



**HAL**  
open science

# Modélisation et simulation des microclimats urbains - Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments

Julien Bouyer

► **To cite this version:**

Julien Bouyer. Modélisation et simulation des microclimats urbains - Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments. Energie électrique. Université de Nantes, 2009. Français. NNT: . tel-00426508

**HAL Id: tel-00426508**

**<https://theses.hal.science/tel-00426508v1>**

Submitted on 27 Oct 2009

**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.

École Doctorale  
Sciences pour l'Ingénieur, Géosciences, Architecture  
de Nantes

## THÈSE DE DOCTORAT

Discipline : « *Sciences pour l'ingénieur* »  
Spécialité : « *Ambiances Architecturales et Urbaines* »

Présentée et soutenue publiquement par :

**Julien BOUYER**

le 16 Septembre 2009

à l'École Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes

### **Modélisation et simulation des microclimats urbains Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments**

Membres du jury :

M.	Jean-Jacques ROUX	Professeur, INSA de Lyon	(Rapporteur)
M.	Jacques TELLER	Professeur, Université de Liège	(Rapporteur)
M.	Hervé ANDRIEU	Directeur de recherche, LCPC de Nantes	(Examineur)
M.	Jean-Louis IZARD	Maître assistant, ENSA de Marseille	(Examineur)
M.	Yves BRUNET	Directeur de recherche, INRA Bordeaux-Aquitaine	(Examineur)
M.	Xavier GANDIBLEUX	Professeur, Université de Nantes	(Examineur)
M.	Dominique GROLEAU	Ex-Ingénieur de recherche, ENSA de Nantes	(Invité)
M.	Christian INARD	Professeur, Université de La Rochelle	(Directeur de thèse)
M <sup>elle</sup>	Marjorie MUSY	Ingénieur de recherche, ENSA Nantes	(Co-encadrante)



*A ma famille.*



## *Remerciements...*

J'introduis cette page au tout début du document alors qu'elle devrait de toute logique le ponctuer... Allez, un peu de folie après s'être plié aux règles de la structure, de la chronologie, des transitions et de tant d'autres aspects formels. Et puis, cette page est peut-être la moins pénible à lire de ce pavé, en particulier pour les néophytes. En la positionnant ici, je suis quasi certain que vous la lirez, encadrants, collègues, collaborateurs, camarades de foire et j'en passe... vous qui avez le même point commun, celui de mériter toute ma reconnaissance pour votre accompagnement durant ce long périple d'octobre 2004 à septembre 2009.

Avant tout, j'adresse mes remerciements aux membres du jury qui, malgré cette période compliquée de rentrée, ont pris le temps d'examiner avec soin ce document, donnant lieu à une soutenance riche en discussions. Merci en particulier à Messieurs Jacques Teller et Jean-Jacques Roux pour avoir rapporté ce travail de thèse auprès de l'Ecole Doctorale.

En premier lieu, je remercie chaleureusement Christian Inard, mon directeur de thèse, pour son aide précieuse à l'élaboration de cette recherche. Malgré la distance géographique séparant La Rochelle et Nantes, empêchant des rencontres plus fréquentes, nos discussions ont toujours été riches et fructueuses et m'ont souvent permis d'arrêter les choix stratégiques. Si je dois retenir deux qualités parmi les autres, ce serait à la fois ta rigueur scientifique et ton humanité. Christian, merci encore.

Ce travail ne serait pas arrivé à terme sans l'apport des deux autres pierres angulaires de ce trio d'encadrants. Marjorie Musy, tout d'abord, qui a toujours cru en moi et qui, par son expérience de recherche et son dynamisme naturel, a su me donner l'élan nécessaire aux moments où il le fallait. Dominique Groleau, qui pendant une année et demie, a suivi et encadré ce travail à l'égal des deux cités précédemment, mais surtout, qui malgré son départ en retraite que je ne suis pas le seul à regretter, a montré une grande disponibilité et prêt à apporter des suggestions toujours éclairées. Merci à vous deux.

Je tiens également à remercier chaleureusement les membres du laboratoire CERMA pour leur soutien pendant ces années. Tout d'abord, merci aux deux directeurs successifs, Gérard Hégron, qui m'a accueilli et a activement participé à l'acquisition de mon financement, puis Pascal Joanne pour sa sympathie et ses encouragements pendant les périodes où mon bureau était souvent le dernier allumé le soir. Merci également à l'ensemble du personnel, chercheurs, enseignants et ITA, pour votre considération et votre bienveillance, aux filles du secrétariat, pour les bons moments passés à l'heure du café, à Virginie mon agent matrimonial et une mention spéciale à Martine, notre documentaliste qui dépasse bien souvent le cadre de ses fonctions en prenant à la fois la casquette d'oeil extérieur averti, de relectrice hors-pair, de conseillère personnalisée et d'ange gardien. Je ne vous oublie pas confrères doctorants, anciens, nouveaux et contemporains auxquels j'accorde également une mention spéciale : Jihen, Thomas, Vincent, nous nous sommes vus passer par beaucoup d'états et bien des fois étions les seuls à nous comprendre. Merci à tous ceux qui ont croisé ma route au labo, votre compagnie m'a permis de me sentir comme un poisson dans l'eau pendant ces cinq années.

Je m'adresse maintenant aux personnes, qui ont suivi voire subi ce travail avec un peu plus de distance « scientifique ». Malgré vos domaines d'activité complètement différents du mien, vous avez toujours manifesté un intérêt pour mon sujet de recherche ; pour preuve vous étiez beaucoup à vouloir assister à la soutenance, mais les aléas de distance ou d'horaires inflexibles font que seulement certains d'entre vous ont pu être présents. Je sais tout de même que le cœur y était. Alors, pour vous tous les amis, Nantais, Tourangeaux, Tourangeaux-Nantais, Ex-Toulousains, Handballeurs(euses), j'oublie sûrement quelques cas isolés mais tous ceux qui m'ont apporté un brin de soleil et m'ont permis d'extérioriser se reconnaîtront, un grand merci pour votre soutien, pour votre authenticité, pour votre joie de vivre, pour votre humour et pour les liens forts qu'on continue de cultiver.

En guise de point final à cette révérence, je tiens à saluer et rendre grâce à ma famille sans qui je n'en serais peut-être pas là aujourd'hui. Maman, Christèle, Papa, Mamie, Tonton, ce travail ne sera jamais à la hauteur de ce que j'espérais vous rendre. Malgré tout j'ai joué le jeu jusqu'au bout et espère vous procurer une pointe de fierté et une grosse dose de soulagement. Ce travail, je vous le dédie.



---

Modélisation et simulation des microclimats urbains  
Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les  
consommations énergétiques des bâtiments

Julien BOUYER

---



## Résumé

Les architectes, les urbanistes et les ingénieurs sont fortement sollicités pour élaborer des méthodes de conception permettant de limiter l'impact environnemental de l'urbanisation. De nombreux travaux montrent que des phénomènes climatiques comme l'îlot de chaleur urbain sont à la fois les causes et les conséquences de l'augmentation de la consommation énergétique à l'échelle de la ville. Par ailleurs, l'expertise énergétique des bâtiments est possible avec des outils opérationnels qui ne prennent pas correctement en compte les conditions climatiques à petite échelle spatiale alors qu'il est démontré que leurs effets sont avérés. Souvent négligé, l'impact direct et indirect de l'aménagement constitue pourtant une piste intéressante pour la régulation énergétique passive.

Pour étudier ces phénomènes, nous proposons dans cette thèse d'utiliser un outil de simulation microclimatique, reposant sur le couplage d'un modèle thermoradiatif et d'un code de mécanique des fluides numérique. Dans une première partie, nous développons un modèle de sol et un modèle thermique de bâtiment, ce dernier permettant le calcul des consommations énergétiques d'un bâtiment interagissant avec son environnement urbain. Nous les intégrons à l'outil de simulation thermoradiative (Solene), puis adaptons la procédure de couplage physique avec l'outil de simulation thermoaéroulique (Fluent).

Dans une deuxième partie, nous caractérisons le comportement d'un bâtiment de référence en site isolé et décrit par des paramètres variables, en établissant des classes de consommations énergétiques à partir d'une méthode statistique d'étude de sensibilité multicritères.

Enfin, nous réutilisons ces classes de bâtiments dans un contexte urbain réel, le projet Lyon Confluence, pour analyser l'impact de deux modes d'aménagement des îlots étudiés : un aménagement minéral et un aménagement végétal. Cette dernière partie fait ressortir deux résultats principaux à savoir l'écart important entre des consommations énergétiques simulées en contexte théorique isolé et simulées en site urbain, puis, l'économie potentielle d'énergie entre deux choix d'aménagement urbain pour un même projet.



## Abstract

Architects, urban designers and building engineers are more and more solicited to develop design methods that reduce the environmental impact of urbanization. Many studies show that climatic phenomena such as urban heat island are both the causes and the consequences of the energy demand increase at the whole urban scale. Furthermore, energetic expertise of the buildings is allowed by operational tools that presently do not properly take into account the climatic conditions at a small spatial scale, although their effects have been demonstrated. Usually neglected, the direct or indirect impact of the urban planning is however an interesting way for passive thermal control.

To study these phenomena, we propose in this work to use a microclimatic simulation tool, relying on the coupling of a thermoradiative model and a CFD computation tool. In a first part, we develop a soil model and a inner building thermal model, this last one allowing to compute the energy consumption of a building interacting with its urban environment. They are both integrated into the thermoradiative (Solene), then the coupling procedure with the CFD tool (Fluent) is adapted accordingly.

In the second part, we analyse the behaviour of a reference building, located in an isolated site and described by a set of variable parameters, and we establish classes of energy consumption using a statistical method for multicriteria sensitivity analysis.

Finally, we use these building classes in a real urban site, the Lyon Confluence project, to analyse the impact of two planning fixtures : a mineralized one and a vegetated one. This last part points out two main results, the significant difference between energy consumption simulated from the real microclimatic context and obtained from the theoretical case, and, the potential energy saving between two design strategies for a same project.



## Sommaire

Introduction générale	1
1 Microclimat, aménagements urbains et interactions énergétiques avec les bâtiments	5
2 Modélisation des systèmes climatiques urbains	71
3 Etude multicritère du comportement énergétique d'un bâtiment de référence	143
4 Etude de l'impact de l'aménagement sur les consommations énergétiques des bâtiments	201
Conclusion générale	261
A Annexes	273
Références bibliographiques	287
Liste des figures	295
Liste des tableaux	301
Table des matières	303



## Introduction générale

De nos jours, 45% des gens habitent en ville ; ce ratio atteint même 75% dans les pays développés. En extrapolant l'évolution de cette tendance, on peut supposer que dans un avenir proche, tous les terriens deviendront des citadins. Les constructions et les activités de l'homme dans les villes engendrent des phénomènes climatiques auxquels les scientifiques accordent une attention particulière. Le plus connu et le plus étudié d'entre eux est l'effet d'îlot de chaleur urbain, effet qui consiste en une augmentation de quelques degrés de la température de la ville par rapport aux zones rurales environnantes. La réduction de la vitesse du vent par la présence de bâtiments, la diminution de l'effet de refroidissement évaporatif des surfaces d'eau ou des espaces végétalisés moins présents puis le stockage du rayonnement solaire par les revêtements de surface absorbants comme l'asphalte ou le béton, contribuent notamment à l'intensification du phénomène.

Les instances politiques sollicitent désormais activement les architectes, les urbanistes et les ingénieurs pour élaborer des méthodes de conception permettant d'adapter les constructions à leur environnement climatique, en tirant au maximum profit de celui-ci sans pour autant le dégrader. Des textes réglementaires et des plans d'action, à l'instar de la Directive pour la Performance Énergétique des Bâtiments, du Plan Climat, de la réglementation thermique 2005 et du Grenelle Environnement, se mettent en place et évolue avec des objectifs liés à la réduction des rejets de carbone et la diminution des consommations énergétiques des bâtiments. En effet, le savoir-faire et les technologies de construction se sont considérablement développés. L'isolation thermique des bâtiments a été le premier objet des réglementations strictes spécifiques aux situations hivernales, tandis que parallèlement, la climatisation d'été se répandait sans cadre réglementaire. Le bâtiment est devenu alors plus confortable au dépend d'une utilisation abusive de matériaux d'isolation et de dépenses énergétiques indirectes liées à la consommation électrique des équipements techniques. Pour les prochaines années, les constructions neuves pourront pallier ces problèmes de surconsommations grâce à des

technologies comme les « passives houses » pour les maisons individuelles. Mais à l'ère actuelle de réhabilitation, en particulier dans les grands centres urbains, les possibilités d'ajustement énergétique doivent également passer par la recomposition de l'espace urbain.

Des possibilités d'expertises par les moyens informatiques existent pour optimiser les constructions. Toutefois, la prise en compte des conditions climatiques aux abords des bâtiments est souvent théorique ou limitée aux données des stations météorologiques éloignées du site, sans réelle prise en compte des effets microclimatiques engendrés par les objets urbains en interaction avec l'interface bâtie. Les moyens techniques et scientifiques dont les concepteurs disposent ne sont pas suffisamment évolués et adaptés à la pratique opérationnelle, d'où la nécessité d'un effort de la recherche dans ce domaine.

La conception architecturale et urbaine et la climatologie trouvent alors des enjeux communs tels que l'évaluation du confort climatique piétonnier, l'étude de la dispersion des polluants et la maîtrise énergétique des bâtiments et des quartiers. Si la question des conditions de confort reste complexe et controversée du fait de la multiplicité des disciplines mises en jeu, à savoir la thermique, l'aérodynamique, la physiologie et la psychologie, le diagnostic énergétique du bâti semble plus intelligible.

De nombreuses études descriptives concernant les effets climatiques ont été réalisées, à des échelles différentes, mais n'aboutissent pas forcément à des bases de décision fiables, exhaustives et applicables. De ces approches descriptives, la recherche en climatologie urbaine migre peu à peu vers des approches explicatives. La climatologie urbaine a d'ailleurs profondément bénéficié des avancées conceptuelles en terme de climatologie de la couche limite. Les récentes améliorations de la compréhension de la sous-couche de rugosité et des implications de l'hétérogénéité et des différents flux de chaleur ont trouvé de vastes applications dans la mesure et l'interprétation du bilan énergétique urbain. L'enseignement principal de ces années de recherche est qu'un outil bien adapté à ce champ disciplinaire semble être la technique de simulation numérique : sa flexibilité et le contrôle des paramètres de calcul se prête bien au traitement de la complexité, l'hétérogénéité et non-linéarité des systèmes climatiques urbains. En outre, elle se montre plus flexible et moins coûteuse que les campagnes de mesures du fait du contrôle des paramètres de calcul. D'où son intérêt à petite échelle pour détecter des variabilités climatiques locales imperceptible à l'échelle de la ville, occasionnées par l'intervention de l'homme sur l'aménagement de fragments urbains singuliers, et pour obtenir des données spatiales plus fidèles et adapter le diagnostic énergétique à la situation réelle.

Un des axes de recherche du laboratoire CERMA est l'étude du microclimat urbain. L'analyse des interactions du système tri-polaire homme - bâtiment - environnement extérieur

a pour finalité la mise en pratique des résultats de recherche dans la phase opérationnelle du projet de conception urbaine. Les aspects ambiantaux et énergétiques pouvant intégrer les exigences du développement durable constituent le fil conducteur des études menées. Trois thèses illustrent entre autres ces recherches, l'une traitant des aspects morphologiques et historiques à l'échelle de la ville [Benzerzour, 2004], les deux autres s'appuyant sur la simulation physique pour analyser les variables climatiques de l'espace urbain [Vinet, 2000] [Robitu, 2005]. Ces dernières ont abouti à une modélisation climatique fine des environnements urbains intégrant le comportement d'éléments de l'aménagement comme :

- la végétation (comportement thermoradiatif, hydrique, aéraulique)
- les bassins d'eau (comportement thermoradiatif, hydrique)
- les parois des bâtiments et le sol (comportement thermoradiatif).

Une technique de couplage thermo-aéraulique entre Solene (code développé au CERMA et partiellement validé par des campagnes de mesures in-situ et télédéteectées à Marseille et à Strasbourg) et Fluent (code commercial de CFD) permet désormais de prendre en compte à l'échelle microclimatique les effets du vent sur les champs thermiques et inversement, dans des scènes urbaines hétérogènes.

Il s'agit dans la thèse présentée ici, en plus d'une amélioration des modèles existants, d'obtenir une modélisation plus complète des transferts de chaleur et de masse d'eau dans la scène urbaine, notamment les transferts hydriques dans les différents types de sols. L'étude du stockage et déstockage d'eau dans ces milieux poreux permettrait une meilleure évaluation des effets de l'évapotranspiration. Mais dans la logique de continuité des travaux du laboratoire CERMA en microclimatologie urbaine, l'apport de ce troisième volet concerne l'étude des consommations énergétiques des bâtiments. Nous entendons ainsi répondre aux objectifs principaux de cette recherche, à savoir :

- Développer un outil de simulation des microclimats à partir d'une modélisation physique complète et représentative des phénomènes climatiques à l'échelle d'étude.
- Donner à cet outil la possibilité d'évaluer la consommation d'énergie des bâtiments.
- Enrichir la connaissance scientifique de situations microclimatiques dans différentes configurations urbaines par l'intermédiaire d'un éventail de simulations bien choisies.
- Étudier en particulier l'impact des éléments de l'aménagement urbain sur la demande énergétique des bâtiments.
- Appréhender le transfert des résultats de recherche vers la pratique du projet en formulant une méthodologie ou des règles de conception climatique urbaine avec l'aménagement.



## Microclimat, aménagements urbains et interactions énergétiques avec les bâtiments

### Sommaire

1.1	Introduction . . . . .	5
1.2	Les spécificités du climat urbain . . . . .	6
1.3	L'influence de l'aménagement sur le microclimat urbain . . . . .	15
1.4	Les consommations énergétiques du bâtiment . . . . .	38
1.5	L'influence du microclimat urbain sur les consommations énergétiques du bâtiment . . . . .	45
1.6	L'influence des aménagements sur les consommations énergé- tiques des bâtiments . . . . .	54
1.7	Problématique . . . . .	59
1.8	Hypothèses de la recherche . . . . .	64
1.9	Méthodologie de notre recherche . . . . .	65

### 1.1 Introduction

Le travail traite une des perspectives ouverte par les travaux consécutifs de Vinet et Robitu au laboratoire CERMA [Vinet, 2000], [Robitu, 2005], à savoir l'intérêt de concevoir l'espace urbain en intégrant la végétation et l'eau pour réguler le microclimat. Celui-ci intègre un niveau supplémentaire d'interaction entre l'aménagement urbain et le microclimat à l'échelle du piéton puisque l'objectif initial de cette thèse est d'évaluer l'influence de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments.

La qualité énergétique d'un aménagement extérieur à un bâtiment ne peut être évaluée sans tenir compte de la facture énergétique de ce bâtiment. En effet, le comportement thermo-énergétique de l'aménagement, son influence sur le microclimat et l'enveloppe du bâtiment, et

l'influence des modifications microclimatiques sur les apports et les déperditions relatives au bilan du bâtiment sont autant de phénomènes qui s'emboîtent et interagissent entre eux. La compréhension et la représentation physique de ce système interactif deviennent complexes du fait des échelles de modélisation souvent différentes.

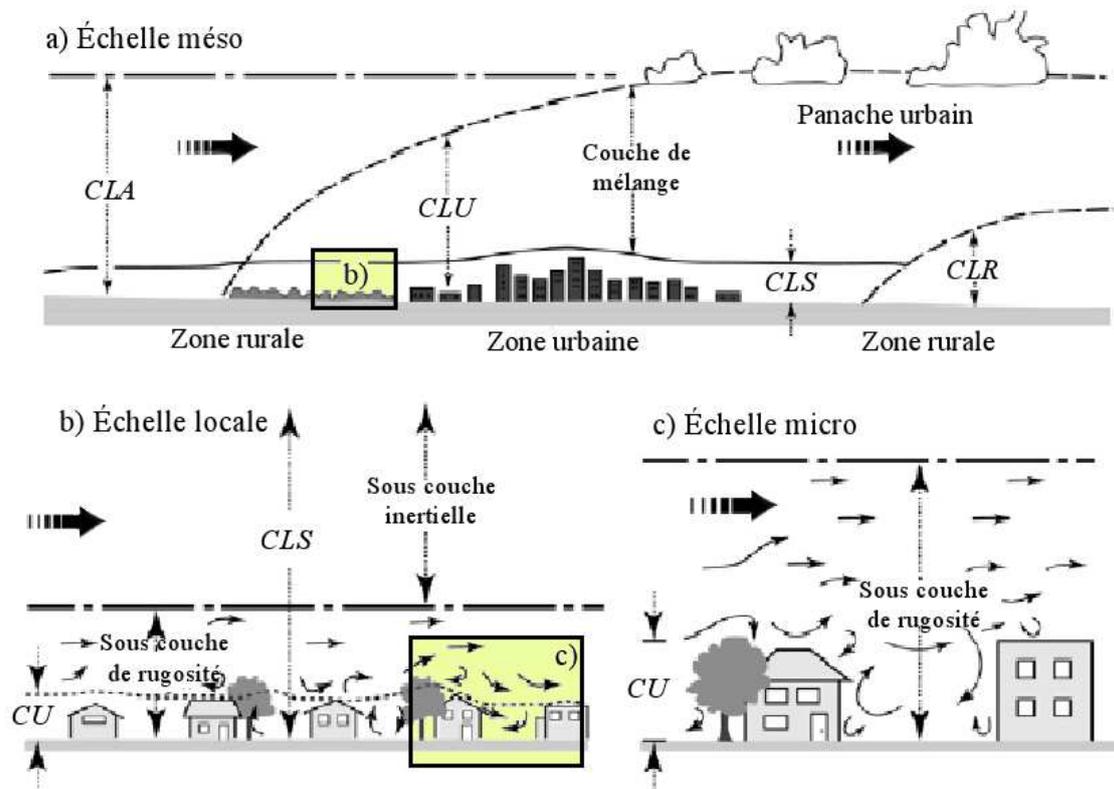
Ainsi, nous donnons dans ce chapitre les clés de compréhension des phénomènes énergétiques et microclimatiques urbains. Nous introduisons le chapitre par la présentation des éléments théoriques conduisant à la définition du microclimat, de ses spécificités et de son échelle particulière de caractérisation et d'étude. La deuxième partie présentera les principaux résultats d'études liant la nature et la configuration de l'aménagement urbain et les variations plus ou moins locales des variables climatiques. Nous consacrerons ensuite une partie à l'énergétique des bâtiments où un constat montrera la part importante qu'ont les bâtiments dans la facture énergétique globale urbaine, et les solutions basiques proposées aux concepteurs pour la réduire. La partie suivante présente les concepts qualitatifs généraux et les résultats qualitatifs concernant la variation des consommations énergétiques des bâtiments par la modification des variables climatiques de l'environnement proche du bâtiment, ainsi que la manière dont les chercheurs ont commencé à caractériser l'association de différents aménagements. Enfin, nous nous servons de tous les éléments présentés auparavant pour poser une problématique approfondie orientant nos choix stratégiques. Les hypothèses et la méthodologie de travail seront finalement exposées et introduiront la structure du travail.

## 1.2 Les spécificités du climat urbain

### 1.2.1 L'échelle climatique urbaine

La classification des échelles urbaines repose sur un grand nombre de considérations météorologiques et géographiques. La différenciation de chacune d'elles passe par l'observation des phénomènes en fonction des échelles temporelle et spatiale. Nous proposons ici un résumé où figurent les éléments essentiels caractérisant notre échelle d'étude, mais aussi une description détaillée des échelles urbaines en annexe [A.1](#).

Notre échelle d'étude dans cette thèse est l'échelle microclimatique. Elle correspond à une échelle spatiale horizontale où la dimension transversale des fragments urbains étudiés ne dépasse pas 300 mètres, et une échelle verticale correspondant à la sous-couche de rugosité (figure [1.1](#)). L'échelle temporelle type d'étude des phénomènes physiques est l'échelle horaire, car l'étude des taches solaires impose des pas de temps de mesure ou de calcul réduits.



**Figure 1.1 :** Imbrication des échelles climatiques et atmosphériques, de l'échelle méso à l'échelle micro, de la couche limite atmosphérique (CLA) à la canopée urbaine (CU), adapté de [Oke, 2006]

### 1.2.2 Le bilan énergétique d'une surface urbaine

Les transferts d'énergie et de masse sont à la base des processus climatiques et microclimatiques. L'atmosphère est une machine thermique dont l'état énergétique dépend de l'équilibre entre ces flux [Vinet, 2000]. La surface globale du sol est un patchwork de surfaces végétales, minérales et synthétiques, irriguées ou non irriguées ayant des propriétés radiatives, thermiques, aérodynamiques et hydriques complètement différentes [Arnfield, 2003]. De plus, au sein de la canopée urbaine, le « plissage » de cette surface s'accroît et l'hétérogénéité géométrique, la diversité des propriétés thermophysiques des aménagements urbains, et, les diverses inconnues telles que l'incertitude de la composition du sous-sol ou l'imprévisibilité de la quantité et la qualité des équipements énergétiques à l'intérieur des bâtiments, rendent difficile le calcul de bilan d'énergie urbain.

Différentes approches sont adoptées au sein de la communauté du climat urbain, en particulier par les modélisateurs. La notion physique fondamentale adoptée par tous est que le bilan énergétique d'un système est la somme algébrique des flux énergétiques qu'il échange avec

son environnement. Simplement, c'est l'échelle spatiale de modélisation qui modifie les termes du bilan. En effet, les surfaces urbaines ne sont pas représentées avec le même degré de détail suivant l'échelle de l'étude puisque la performance des modèles numériques est conditionnée par la taille des cellules de calcul :

- A grande échelle, ne considérant en général que deux dimensions, en coupe transversale ou en bilan de surface horizontale, la pratique courante est d'agrèger les variables physiques de champ, les flux, pour ne s'intéresser qu'à leurs valeurs moyennes. Le but est d'identifier des signatures atmosphériques des villes ou des grandes zones urbaines et de les différencier entre elles.
- A petite échelle, intégrant en général la 3<sup>e</sup> dimension, on s'intéresse cette fois aux phénomènes singuliers, propres à l'échelle humaine pour des problématiques de confort, sécurité, et consommations énergétiques. On s'intéresse alors de plus près aux interactions énergétiques du milieu habité.

Différents éléments de contrôle sont alors possibles pour établir le bilan :

- la maille surfacique du mobilier urbain pour les petites échelles,
- l'élément volumique d'air urbain pouvant être utilisé à n'importe quelle échelle,
- l'élément de surface urbaine pour les grandes échelles.

Dans le premier cas, le bilan d'énergie est calculé sur des surfaces (ou facettes) urbaines solides, voire liquide pour les bassins, les fontaines ou les cours d'eau. Ce bilan se fait en considérant la 3<sup>e</sup> dimension et donc en prenant en compte les orientations et les interactions entre les mailles. Dans le deuxième cas, le bilan se fait sur un élément volumique d'air atmosphérique de la couche limite de surface. Le troisième cas est un intermédiaire géométrique entre les deux approches. L'élément de surface urbaine est un objet d'observation conceptuel en général défini pour l'étude des échelles méso ou sub-méso urbaines. Il a été introduit par Oke et correspond à une surface fictive plane au dessus de la canopée urbaine. L'expression de son bilan énergétique est celle du volume de contrôle en sous-face où sont intégrés en deux dimensions les variables physiques relatives aux objets 3D implantés sur le sol [Oke, 1987] [Arnfield, 2003]. Cette analogie implique que les flux sont verticaux et traversent cette surface fictive de manière homogène (voir figure 1.2).

### Expression du bilan

D'après de nombreux auteurs [Brutsaert, 1982], [Oke, 1987], [Mestayer et Anquetin, 1994], [Guyot, 1999], [Arnfield, 2003], le bilan d'énergie en régime permanent d'une maille surfacique réelle d'un objet urbain, en densité surfacique de flux [ $W.m^{-2}$ ], s'écrit :

$$Q_R = Q_H + Q_L + Q_C \quad (1.1)$$

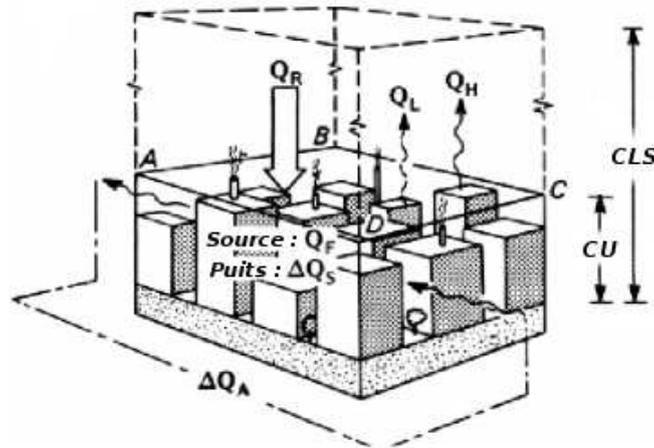


Figure 1.2 : Modélisation d'un élément de surface urbaine, adapté de [Oke, 1987]

- $\rho$  : albédo de la surface
- $Q_H$  : flux convectif [ $W.m^{-2}$ ]
- $Q_L$  : flux latent [ $W.m^{-2}$ ]
- $Q_C$  : flux conductif [ $W.m^{-2}$ ]

En général les quantités de chaleur à gauche de l'égalité sont des gains de chaleur, alors qu'à droite on trouve le plus souvent des pertes de chaleur ou alors une alternance entre pertes et gains de chaleur

### Le bilan radiatif ( $Q_R$ )

Le terme  $Q_R$  représente le flux de rayonnement sur l'ensemble du spectre électromagnétique : il est couramment appelé rayonnement net. Le flux solaire présente les variations les plus importantes du bilan d'énergie au cours du cycle diurne. C'est la principale source d'énergie des surfaces extérieures. Que ce soit dans la formulation théorique ou dans les modèles numériques, on le décompose généralement en deux bandes de longueurs d'onde : une correspondant au rayonnement solaire, de 0,3 à  $3\mu m$  (de 0,38 à  $0,76\mu m$  pour le rayonnement visible) et l'autre correspondant à l'infrarouge thermique (IRT), de 3 à  $100\mu m$ .

$$Q_R = (1 - \rho)R_{sol,g} + R_{IR,urb} + R_{IR,atm} \quad (1.2)$$

- $\rho$  : albédo de la surface
- $R_{sol,g}$  : flux solaire global incident [ $W.m^{-2}$ ]
- $R_{IR,urb}$  : flux IRT net échangé avec les surfaces des bâtiments, du sol et de toutes les autres surfaces solides appartenant à la canopée urbaine [ $W.m^{-2}$ ]
- $R_{IR,atm}$  : flux IRT net échangé avec l'atmosphère [ $W.m^{-2}$ ]

➤ *Les flux solaires  $(1 - \rho)R_{sol,g}$*

Le flux solaire global incident  $R_{sol,g}$  est la somme de trois termes, le flux provenant directement du soleil  $R_{sol,dir}$ , le flux solaire diffus provenant de la réflexion et diffusion multidirectionnelle des rayons solaires directs par les particules atmosphériques  $R_{sol,dif}$  et le flux solaire diffus provenant des multi-réflexions sur les autres surfaces urbaines et restant piégées dans la canopée  $R_{sol,dif,R}$ .

Les rayonnements direct  $R_{sol,dir}$  et diffus  $R_{sol,dif}$  peuvent être mesurés dans les stations météorologiques avec des capteurs adaptés, fournis par les cartes de satellites météorologiques haute résolution, dont certaines sont disponibles en ligne [Satel-Light, 2008], ou estimés par des formules reliant la constante solaire extra-terrestre ( $I_0 = 1367W.m^{-2}$ ), la position relative du soleil par trigonométrie sphérique et des paramètres empiriques décrivant le comportement radiatif de l'atmosphère (masse atmosphérique, turbidité, nébulosité, teneur en vapeur d'eau, etc.).

La quantité de flux solaire absorbé dépend également de l'albédo  $\rho$  de la surface. Il caractérise sa capacité de réflexion du rayonnement visible. L'albédo d'une surface dépend du type de matériau, de son état de surface, et de sa couleur. Il peut varier avec le temps, à cause des processus de vieillissement des surfaces ou de dépôt de poussières, et avec l'angle d'incidence solaire comme pour les surfaces vitrées ayant un albédo qui varie de 0,08 à 0,5 en fonction de l'incidence solaire. Les surfaces urbaines présentent une très large palette de valeurs d'albédos.

Des études ont montré que le flux solaire incident mesuré au niveau de la limite supérieure de la CU était atténué de 2% à 20% par les particules de polluants de la CLU [Arnfield, 2003]. Les radiations de courtes longueurs d'onde sont absorbées par les petites particules d'aérosols, la vapeur d'eau, l'oxygène et l'ozone. L'émission d'aérosols produit aussi des noyaux de condensation qui augmentent la fréquence de couverture nuageuse absorbant aussi les courtes et grandes longueurs d'onde. [Mestayer et Anquetin, 1994]

➤ *Le flux infrarouge échangé avec les surfaces urbaines ( $R_{IR,urb}$ )*

Pour la bande de longueur d'onde IRT, chaque surface de l'environnement urbain est considérée comme un *corps gris*<sup>1</sup>, à la fois source et récepteur de rayonnement.

---

<sup>1</sup>Un *corps gris* ne peut pas absorber et réémettre toute l'énergie radiative incidente, il en réfléchit une partie. D'après Kirchhoff ces deux quantités sont équivalentes et égales à un pourcentage de l'énergie maximale pouvant être échangée, celle du *corps noir*, correspondant à la propriété d'émissivité  $\varepsilon$

Le flux émis par chaque surface obéit à la loi de Stefan-Boltzmann<sup>2</sup> ; il est fonction de sa température et de son émissivité. Un flux IRT net est échangé entre deux surfaces si leurs températures sont différentes ; il dépend des paramètres précédents ainsi que de l'angle solide sous lesquels les surfaces se voient entre elles.

Du fait de l'émissivité assez élevée ( $\approx 0,9$ ) des matériaux de construction et des nombreuses surfaces verticales, le flux  $R_{IR,urb}$  est plus important en zone urbaine par rapport aux zones rurales.

➤ *Le flux infrarouge atmosphérique ( $R_{IR,atm}$ )*

L'atmosphère émet également un rayonnement dans le domaine IRT. Son intensité dépend de la température et de la composition chimique de la CLU. Sa valeur peut être issue de données météorologiques ou par des formules empiriques. Elles sont très documentées [Guyot, 1999] [Vinet, 2000] [Robitu, 2005] et expriment soit directement le flux soit une température fictive de surface de ciel que l'on peut réutiliser dans la formule de Stefan-Boltzmann .

A l'inverse du flux solaire incident, la multiplication des nuages et des aérosols accroît le rayonnement IRT en ville, environ 5% de plus par rapport à la campagne [Mestayer et Anquetin, 1994].

**Le flux convectif ( $Q_H$ )**

L'échange de chaleur sensible par convection thermique est dû aux transferts aérodynamiques de chaleur entre les surfaces solides et la masse d'air, du fait de leur différence de température. Il s'effectue simultanément par convection naturelle et par convection forcée, sans que l'un ou l'autre de ces processus puisse être considéré comme négligeable. La convection naturelle consiste en l'apparition d'un courant d'air sous l'effet d'une différence de densité de l'air due à un gradient de température d'air. La convection forcée apparaît lorsque l'air est mis en mouvement sous l'action d'une force externe comme le vent ; plus la vitesse de l'air est élevée, plus les échanges thermiques sont importants. La modélisation du vent urbain sera abordée au chapitre suivant.

La densité du flux convectif est relié à la différence entre la température de surface  $T_s$  et la température d'air  $T_{air}$  et un coefficient d'échange superficiel convectif  $h_c$  :

$$Q_H = h_c (T_s - T_{air}) \quad (1.3)$$

<sup>2</sup>La loi de Stefan-Boltzmann sera détaillée au chapitre suivant, dans la partie consacrée à la modélisation des flux radiatifs

Un grand nombre de corrélations sont proposées dans la littérature pour estimer la valeur de ces coefficients d'échanges en fonction de la configuration étudiée [Inard, 1988] [Vinet, 2000]. Elles dépendent en général de la température d'air, de la vitesse du vent, de nombres adimensionnels décrivant le régime d'écoulement ou bien des configurations géométriques des surfaces considérées.

### **Le flux latent ( $Q_L$ )**

Il est dû au dégagement de vapeur d'eau par les sols naturels, les surfaces végétales et les surfaces poreuses. L'évaporation de l'eau stockée en surface induit une consommation importante d'énergie dans l'air car la chaleur latente de vaporisation de l'eau est très élevée. Dans un environnement urbain, l'imperméabilité des surfaces limite généralement la présence d'humidité ; après plusieurs jours sans pluie, l'évaporation est donc faible. Pour caractériser l'importance ou non du flux latent dans un site urbain, des climatologues manipulant les techniques expérimentales ont introduit un coefficient appelé rapport de Bowen correspondant au rapport des flux verticaux  $Q_H$  sur  $Q_E$ .

### **Le flux conductif ( $Q_C$ )**

La loi de Fourier signifie que la densité de flux conductif est le produit de la conductivité thermique et du gradient de température dans l'épaisseur du matériau. Les conductivités thermiques des matériaux sont très variées d'une surface à l'autre ce qui entraîne une forte variabilité de  $Q_C$  au sein du tissu urbain. Généralement, le signe du flux conductif s'inverse entre le jour, où le flux va dans le sens de la profondeur, et la nuit où le flux est évacué vers la surface où les températures sont plus faibles qu'à l'intérieur du matériau.

A l'échelle du fragment urbain, l'équation 1.1 n'est pas directement applicable. Les considérations géométriques de la modélisation en élément de surface urbaine impliquent la contribution d'autres flux dans le bilan énergétique. L'équation devient alors :

$$Q_R + Q_F = Q_H + Q_L + Q_C + \delta Q_S + \delta Q_A \quad (1.4)$$

$\rho$  : albédo de la surface

$Q_F$  : flux anthropogénique [ $W.m^{-2}$ ]

$\delta Q_S$  : flux stocké [ $W.m^{-2}$ ]

$\delta Q_A$  : flux advectif [ $W.m^{-2}$ ]

### **Le flux anthropogénique $Q_F$**

Le flux  $Q_F$  correspond à la somme des productions de chaleur des véhicules motorisés, des bâtiments, des industries, des équipements urbains ainsi que du métabolisme humain et animal.

A l'échelle de la ville, ce flux n'excède en général pas  $100 \text{ W.m}^{-2}$ ; cependant il peut atteindre des valeurs locales beaucoup plus importantes à l'échelle du quartier ou du bâtiment si on se trouve dans une zone dense au niveau de la population et de l'activité [Bozonnet *et al.*, 2006]. Oke a remarqué que  $Q_F$  est plus important pour les villes développées de l'hémisphère Nord [Oke, 1987].

La production de chaleur due aux bâtiments peut implicitement être en partie intégrée au bilan si les températures intérieures des bâtiments sont fixées. L'énergie utilisée pour le chauffage ou la climatisation est alors exprimée. Dans une étude, Taha propose un modèle de flux anthropogénique se basant sur les scénarios de rejets des bâtiments et des véhicules motorisés [Taha, 1997].

### Le flux stocké $\delta Q_S$

Le flux stocké  $\delta Q_S$  résulte du fait que l'approche en élément de surface est en réalité une approche volumique dans un élément délimité. L'équilibre des flux entrants et sortants de la surface fictive au dessus de la canopée n'est pas respecté comme pour l'équation 1.1. On touche à la limite de l'approche en flux verticaux. En prenant l'exemple des flux radiatifs, l'aspect de la multidirectionnalité implique que ces flux peuvent entrer et sortir par les interfaces latérales de l'élément ou être absorbé par une autre surface proche à l'intérieur de l'élément.  $\delta Q_S$  est alors le flux résiduel qui rétablit l'équilibre des flux surfaciques. Le terme  $R_{IR,urb}$  disparaît de l'équation 1.2 pour être intégré à  $\delta Q_S$  alors que l'albédo  $\rho$  de la surface fictive devient un albédo effectif. Le terme  $R_{IR,atm}$  est uniquement un bilan avec le ciel et la partie IRT échangée avec les surfaces urbaines est également intégrée dans  $\delta Q_S$ .  $\delta Q_S$  augmente avec la densité de bâti et la multiplication des parois verticales. Ce terme peut être formulé comme une régression du rayonnement net  $Q_R$  mais une hystérésis est constaté entre les deux grandeurs [Arnfield, 2003].

### Le flux advectif $\delta Q_A$

Le flux advectif  $\delta Q_A$  correspond à la quantité de chaleur fournie ou prélevée à la masse d'air circulant dans le volume fictif et associée à l'élément de surface urbain. En effet, l'air atmosphérique entre et sort de ce volume à débit quasiment constant mais à des températures différentes;  $\delta Q_A$  dépend de cet écart de température et de la capacité calorifique de l'air.

Un autre phénomène conservatif est très lié au bilan de chaleur en milieu urbain, c'est le bilan hydrique. Le bilan hydrique met en jeu les transferts d'eau sous forme liquide et vapeur qui influent non seulement sur  $Q_E$ , mais induit des phénomènes diffusifs qui changent l'état thermique de l'air atmosphérique. Nous ne le présenterons pas dans ce travail sachant que la modélisation du bilan énergétique des surfaces est faite sur des petits pas de temps alors que

les phénomènes hydriques ont des échelles temporelles plus importantes. Dans ce cas, seule la connaissance de la masse d'humidité dans l'air à l'échelle régionale (station météorologique) est nécessaire en considérant qu'elle est constante sur un pas de temps donné. Les phénomènes météorologiques comme les précipitations ou le brouillard ne rentrent pas dans le cadre de ce travail. Pour plus de précision, le bilan hydrique est largement abordé dans la littérature [Monteith, 1965] [Brutsaert, 1982] [Asaeda et Ca, 1993] [Guyot, 1999] [Musy, 2005].

### 1.2.3 Conclusion

Cette première partie a permis de dresser un aperçu théorique sur les fondements de la climatologie urbaine. La description de la couche limite atmosphérique urbaine peut se concevoir comme l'imbrication de sous-systèmes délimités par la configuration verticale des vents et des transferts de masse et d'énergie et de l'expansion horizontale de la ville. Ces sous-systèmes nécessitent des modélisations différentes répondant aux échelles spatio-temporelles décrivant les phénomènes qui leur sont propres. Les phénomènes physiques qui nous intéressent dans ce travail sont ceux impliqués dans les transferts d'énergie des bâtiments avec leur environnement climatique, par conséquent ceux qui se forment et interfèrent à l'échelle microclimatique. Cette échelle purement théorique peut être caractérisée par une étendue spatiale horizontale de l'ordre de quelques centaines de mètres, et, verticale comprise entre le sol et la limite supérieure de la sous-couche atmosphérique de rugosité pouvant atteindre cinq fois la hauteur des bâtiments. L'échelle temporelle qui lui est associée correspond à la dynamique des variables climatiques qui sont impliquées dans le bilan énergétique d'une surface urbaine pour lesquelles les météorologistes donnent des valeurs horaires.

Deux grands types de modélisation sont utilisés pour traiter les échanges énergétiques urbains, la modélisation en éléments de surface urbaine et la modélisation en facettes urbaines. Alors que la première semble plus adaptée à la comparaison énergétique des quartiers ou à l'étude des transferts d'énergie vers la plus grande échelle climatique (échelle méso), la deuxième paraît plus adaptée pour le traitement des interactions énergétiques entre le bâtiment et l'aménagement urbain. En effet, certains termes du bilan en éléments de surface urbain (équation 1.4) sont définis comme des flux résiduels alors que la modélisation en facettes (équation 1.1) donne une formulation explicite de chacun des termes. L'inconvénient de la modélisation de base en facette est que l'on ne traite pas l'air atmosphérique puisqu'on doit connaître ses variables physiques descriptives pour les intégrer au bilan (termes  $Q_H$  et  $Q_L$  de l'équation 1.1). Des mesures sur l'air ou des simulations aérodynamiques en éléments volumiques, contraignantes en temps de calcul, doivent être réalisées. La modification locale de ces variables est très liée au type d'aménagement urbain local qui, par la diversité de ses éléments et leurs arrangements, complexifie d'autant plus ces interactions.

Ainsi, par souci de la problématique générale du réchauffement climatique, ou de celle plus particulière du confort dans les espaces extérieurs, la communauté scientifique a largement investi le sujet des interactions entre l'aménagement et le microclimat urbain ces vingt dernières années. Nous dressons dans la partie suivante un panorama des effets microclimatiques liés aux aménagements, leurs grandes tendances et les résultats quantitatifs associés.

## 1.3 L'influence de l'aménagement sur le microclimat urbain

### 1.3.1 Le phénomène d'îlot de chaleur urbain

Le principal constat fait par la communauté des chercheurs s'intéressant au climat urbain depuis le XIXe siècle, est qu'il existe une différence de température systématique entre l'air atmosphérique des villes et celui des zones rurales ou périphériques suburbaines moins densifiées [Mestayer et Anquetin, 1994]. Ce phénomène est aussi révélé par les vues satellites de températures de surfaces [Bozonnet *et al.*, 2006].

Ainsi une définition physique possible de l'îlot de chaleur urbain (ICU) est l'écart de température maximum entre la ville et la campagne environnante  $\Delta T_{u-r}(max)$ , les indices  $u$  et  $r$  respectivement pour urbain et rural [Oke, 1987]. Cette dénomination vient du fait que la représentation de l'évolution spatiale de la température révèle un pic de température, semblable à un « îlot », au niveau des agglomérations (figure 1.3). De plus, ce pic est constaté tant au niveau des températures de surface que de la température d'air.

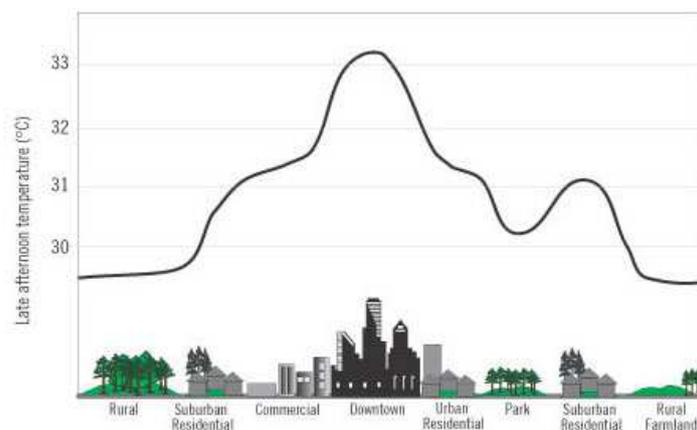


Figure 1.3 : Représentation schématique de l'îlot de chaleur urbain

Le phénomène d'ICU est principalement dû aux phénomènes suivants [Mestayer et Anquetin, 1994], [Santamouris, 2005], [Bozonnet *et al.*, 2006] :

- l’absorption accrue du rayonnement de courte longueur d’onde due au piégeage des rayons solaires par multi-réflexions au sein de la géométrie globale de surfaces urbaines très accidentées ;
- la diminution des surfaces évaporatives remplacées par ces mêmes surfaces artificielles, et l’altération simultanée de la balance hydrique à cause de la réduction de l’évapotranspiration de la végétation et des dégagements industriels directs de vapeur d’eau ;
- l’importante inertie thermique des bâtiments qui stockent toute forme d’apport de chaleur ;
- une moindre visibilité du ciel des surfaces bâties qui contribue à faire décroître leur échange de rayonnement grande longueur d’onde avec l’atmosphère ;
- l’effet de serre causé par la CLU plus chargée en particules de polluants, et donc à la fois moins transparente et plus absorbante ;
- la réduction des transferts de chaleur turbulents du fait de la diminution de la vitesse d’air permettant d’évacuer la chaleur stockée dans les rues ;
- les dégagements de chaleur anthropogénique provenant des transports, des équipements électriques des bâtiments, de l’industrie, des autres procédés utilisant la combustion et du métabolisme humain voire animal.

L’observation de l’évolution des températures en milieu urbain montre une augmentation d’année en année qui concorde avec l’intensification de l’urbanisation. Des mesures effectuées au centre-ville de Los Angeles montrent une augmentation des températures maximales d’environ 2,5 ° C entre 1920 et 1997 [Akbari *et al.*, 1992]. Par ailleurs, des relevés également effectués en Californie sur une trentaine de villes et leurs zones rurales environnantes ont montré qu’avant 1940 les villes étaient plus froides, contrairement au phénomène actuel où la différence de température entre l’extérieur et l’intérieur de la ville est de 2,5 ° C en moyenne [Akbari *et al.*, 1992].

L’écart de température dû à l’urbanisation est difficilement quantifiable. Des phénomènes microclimatiques dus à la modification de l’organisation du territoire rendent la comparaison historique difficile avec le niveau actuel des températures. Ceci est dû aussi au fait que les centres urbains se sont souvent développés en fonction de configurations naturelles particulières, comme par exemple la présence de cours d’eau pour le transport qui ont disparu au fil du temps, et donc dans des conditions climatiques singulières [Benzerzour, 2004].

L’intensité de l’ICU varie non seulement en fonction de la taille de la ville, mais aussi de la densité d’habitants, de la densité des constructions et des paramètres descriptifs de la morphologie urbaine (organisation et hauteur des bâtiments). Les écarts de température trouvés varient de 2 ° C à 12 ° C en fonction de la taille de la ville et de la densité d’habitants et de constructions [Mestayer et Anquetin, 1994]. Des corrélations sont aussi établies entre cet écart de température et le rapport d’aspect caractéristique des rues de la ville (ou *aspect ratio*,

AR, dans la littérature anglaise) ou bien le degré d'ouverture au ciel de la structure urbaine (ou *sky view factor*, SVF, dans la littérature anglaise) [Oke, 1987].

Les effets conduisant à cet ICU semblent également beaucoup dépendre des cycles solaires et des saisons : en été, l'altération du bilan hydrique est le facteur dominant alors qu'en hiver le facteur dominant semble être le flux de chaleur anthropique. On peut aussi noter que l'ICU a tendance à augmenter pendant les périodes anticycloniques et pendant la nuit ou le maximum est atteint en général 3 à 5 heures après la tombée de la nuit [Mestayer et Anquetin, 1994]. Il est plus développé en été ou plutôt pendant la moitié la plus chaude de l'année [Arnfield, 2003].

Une campagne d'analyse a permis de révéler des spécificités propres à l'ICU de la ville de Paris qui ne vérifient pas systématiquement les grandes tendances citées précédemment [Cantat, 2005]. A partir de données fournies par des stations de Météo-France installées en Île-de-France (55 postes thermiques répartis sur 10 000 kilomètres carrés), Cantat a montré que l'importance de l'anomalie thermique ne dépend ni des saisons, ni de l'existence d'un anticyclone ou d'une dépression sur la région, mais, tout simplement, de l'ensoleillement et de la force du vent sur l'agglomération. Elle est en général plus marquée le matin en été (3,4 °C) qu'en hiver (2,5 °C) mais peut varier beaucoup plus rapidement : parfois, de 0 °C à plus de 10 °C, d'un jour à l'autre, voire au cours d'une seule et même journée. Une journée couverte et venteuse sur Paris, statistiquement plus fréquente en hiver qu'en été ou lorsqu'une dépression s'est installée sur la région donne un ICU faible. Tandis qu'une nuit claire et calme, comme il s'en produit souvent en été ou en période anticyclonique, peut être à l'origine d'une différence de plus de 10 °C entre le centre de l'agglomération et la campagne.

Les lois de variation de l'écart de température  $\Delta T_{u-r}$  établies empiriquement sont diverses d'un site à un autre avec cependant une forme de type généralement sinusoïdale, et un maximum la nuit quand l'effet d'ICU est accentué du fait de la faible végétalisation urbaine. Les différentes formulations ne conduisent pas à un cas général car elles ont été établies dans des climat particuliers, en Amérique du Nord et en Europe [Oke, 1987], et ne se vérifient pas nettement dans des villes aux climats différents [Bozonnet *et al.*, 2006].

Enfin les procédés de télédétection augmentent aussi les possibilités d'observation. Des études ont montré des liens significatifs entre des cartographies de températures de surface télédéteectées et les températures d'air de l'ICU. Cependant, les images télédéteectées montrent une grande variabilité spatiale et temporelle au niveau des températures de surface ce qui n'est pas vraiment le cas pour les champs de température d'air.

Nous ne détaillerons pas plus avant le phénomène d'ICU. Nous pouvons dire que celui-ci est aujourd'hui bien présent dans toutes les grandes agglomérations. Il n'existe pas de loi générale explicitant ce phénomène, chaque ICU ayant ses propres caractéristiques.

### 1.3.2 La morphologie urbaine

Comme nous l'avons vu, le bilan énergétique d'une ville diffère beaucoup de celui d'une zone rurale du fait de plusieurs phénomènes :

- l'existence de flux anthropogéniques substantiels ;
- l'augmentation du stockage solaire relative à l'augmentation de la surface urbaine « dépliée » ;
- le blocage du flux d'émission IRT par les façades des bâtiments ;
- le freinage du vent par les rugosités bâties ;
- la diminution du flux latent du fait de l'appauvrissement en aménagement de sol naturel et en végétal.

Hormis les flux anthropogéniques que l'on associe à l'activité humaine, les quatre autres aspects de cette liste peuvent être atténués ou renforcés par la répartition des éléments bâtis dans la ville.

Il n'existe pas de catégories reconnues de morphologies à l'échelle du fragment urbain. Les urbanistes introduisent les notions de trame urbaine, de plan masse, de systèmes de parcellaire, mais l'état des connaissances ne permet pas pour l'instant de discriminer les formes en fonction de leurs effets climatiques à l'échelle locale. Des tentatives ont tout de même été faites. Parmi elles, nous pouvons citer celle de Oke, s'appuyant sur un travail de base de Ellefsen. Il a identifié différents types de zones climatiques urbaines [Oke, 2006]. Cette classification (figure 1.4, 1<sup>er</sup> tableau) associe les effets climatiques à l'échelle locale et une description sommaire de l'aménagement de la zone en fonction de trois données de terrain :

- la classe de rugosité : la classification de la rugosité est basée sur celle établie par Davenport (figure 1.4, 2<sup>e</sup> tableau), elle peut être associée à la hauteur de rugosité  $z_0$ .
- le rapport d'aspect<sup>3</sup> moyen des rues canyons. Cette valeur a un effet direct sur le régime des flux et les échanges thermiques et radiatifs.
- la fraction de surface bâtie : cette valeur représente la proportion de surface couverte par les éléments construits (bâtiments, rues, pavage et autres revêtements imperméables). Le reste de la surface urbaine est considéré recouvert par des éléments perméables (espaces verts, eau, et autres surfaces). La perméabilité a un effet sur l'humidité de l'air et sur le potentiel d'humidification et d'évaporation provenant du sol.

---

<sup>3</sup>Il correspond au rapport  $(\frac{H}{L})$ . Dans la littérature anglo-saxonne, sa dénomination est *Aspect Ratio* :  $AR = \frac{H}{L}$

Cette classification apparaît à l'usage insuffisamment discriminante. Trop de cas intermédiaires existent.

Zone climatiques urbaines	Image	Classe de rugosité	Rapport d'aspect du canyon	% construit (imperméable)
Croissance urbaine intense avec des variations importantes des hauteurs de bâtiments (présence de tours)		8	>2	>90
Croissance intense à forte densité avec hauteurs homogènes et bâtiments proches (Utilisation de la brique et de la pierre)		7	1.0-2.5	>85
Croissance importante, densité moyenne, Bâtiments espacés (habitations urbaines...)		7	0.5-1.5	70-85
Croissance importante, densité moyenne, bâtiments bas, sols pavé (centres commerciaux...)		5	0.05-0.2	70-95
Croissance moyenne, densité faible avec 01 à 02 rangées de maisons (périphérie urbaine)		6	0.2-0.6 (plus de 1 avec arbres)	35-65
Paysage ouvert, succession d'espaces verts et de bâtiments étendus, usages divers (aéroports, universités...)		5	0.1-0.5 dépend des arbres	<40
Site semi-rural avec des habitations éparpillés sur un sol agricole (fermes...)		4	>0.05 dépend des arbres	<10

Bâtiments Arbres Sol imperméable Sol perméable

Catégorie rugosité	Z0 (m)	Description du paysage correspondant
4 Rugueux ouvert	0.10	Territoire modérément ouvert avec des obstacles occasionnels (bâtiments bas isolés ou arbres) avec une distance entre obstacles égale à 20 fois leur hauteur
5 Rugueux	0.25	Obstacles réguliers avec des distances égales entre 8 à 12 fois leur hauteur pour des objets assez bas (exp. Bâtiments) (calcul nécessaire de la hauteur de déplacement)
6 Très rugueux	0.5	Surface modérément couverte par des bâtiments bas séparés par une distance égale entre 3 à 7 fois le leur hauteur et sans arbres hauts (calcul nécessaire de la hauteur de déplacement)
7 Rugueux régulier	1.0	Surface bâtie dense sans grande variation de hauteur (calcul nécessaire de la hauteur de déplacement)
8. Chaotique	2.0	Centres villes composés de bâtiments avec une forte variation de hauteur

**Figure 1.4 :** Classification simplifiée de formes urbaines hiérarchisées selon leur effet potentiel sur le climat local, adapté de [Oke, 2006]

La morphologie urbaine se définit selon les chercheurs du Martin Centre de Cambridge comme l'association de la forme tridimensionnelle d'un groupe de bâtiments, de son étalement et de la volumétrie des espaces extérieurs qu'ils créent [Nikolopoulou, 2004]. Leurs recherches ont montré que des applications innovantes de techniques d'analyses d'images sur des textures urbaines tridimensionnelles permettent de relier, à un niveau simplifié, les caractéristiques

microclimatiques (température, ensoleillement et vent) avec la forme urbaine. Celles-ci ont aussi ouvert la possibilité d'utiliser des méthodes simplifiées pour caractériser le microclimat urbain pour l'expertise environnementale, en évitant la manipulation de modèles élaborés, et ont proposé une gamme de descripteurs géométriques faisant le lien avec les performances environnementales. L'influence de la géométrie des bâtiments sur l'ensoleillement, sur le vent ou sur le bruit dans un espace ouvert peut ainsi être discutée. Le but n'est pas de décrire en détail la physique ou la complexité des phénomènes mais de définir des relations simplifiées.

D'autres travaux se sont attachés à développer des indicateurs morpho-climatiques. Certains s'appuient sur des approches purement théoriques de la géométrie urbaine [Adolphe, 2001], alors que d'autres les construisent à partir de données d'études à l'échelle des projets urbains dans l'optique de rendre compte synthétiquement des potentialités bioclimatiques et énergétiques des projets [Groleau et Bourges, 2005]. Ces indicateurs peuvent caractériser la ville entière ou des fragments urbains ayant une signature urbanistique et architecturale particulière. A l'échelle microclimatique, les spécificités morphologiques d'un espace agissent sur les champs de variables physiques par l'intermédiaire d'effets locaux que l'on présente succinctement ci-après.

### Le piégeage radiatif

Un des phénomènes remarquables en site urbain est le piégeage radiatif. Celui-ci consiste en l'absorption progressive des flux radiatifs issus des multi-réflexions sur les parois des bâtiments et sur le sol qui ne sont pas systématiquement redirigées vers le ciel (figure 1.5).

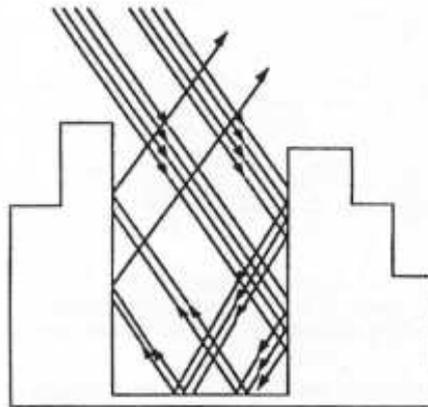


Figure 1.5 : Le phénomène de piégeage radiatif d'après Estournel [Rigenbach, 2004]

Les expérimentations et les modélisations de ce phénomène ont surtout été appliquées à une géométrie type et reproductible dans les environnements urbains : le *canyon urbain*.

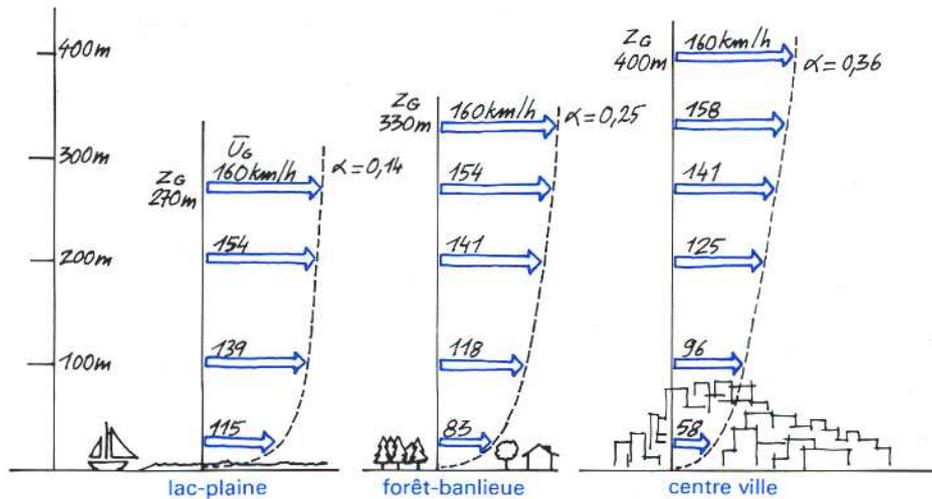
Celui-ci est défini comme un volume longiligne de vide urbain délimité en bas par le sol, sur les côtés par les façades alignées des bâtiments de hauteur  $H$  d'une rue infinie de largeur  $L$ , et au-dessus par la surface fictive de la canopée urbaine puisqu'il est ouvert sur le ciel. Beaucoup d'auteurs émettent l'hypothèse qu'à grande échelle, les centre-villes des grandes agglomérations peuvent être considérés comme une succession infinie de ces canyons. Cette approche trouve évidemment ces limites mais offre des possibilités de paramétrisation des phénomènes climatiques.

Pour caractériser l'intensité du piégeage radiatif, on utilise souvent le rapport d'aspect. Bien que l'accroissement du rapport d'aspect entraîne l'augmentation de la chaleur accumulée par rayonnement à l'échelle du fragment urbain, à l'échelle du canyon les flux radiatifs sur les surfaces verticales au niveau de la rue sont plus faibles du fait des ombres portées. L'énergie transmise à l'air par convection au fond du canyon reste limitée. Ali-Toudert [Ali-Toudert et Mayer, 2006] [Ali-Toudert et Mayer, 2007] montre que la température d'air du canyon diminue lentement avec l'augmentation du rapport d'aspect. Les auteurs montrent aussi qu'en modulant la géométrie des façades, la nouvelle volumétrie de l'espace peut permettre une régulation du confort thermique dans la rue. Enfin ils soulignent, comme d'autres auteurs, que l'orientation des rues est un paramètre principal pour moduler le microclimat au sein de celles-ci. Les rues orientées Nord-Sud sont plus confortables, que ce soit en été ou en hiver, que les rues orientées Est-Ouest [Bozonnet *et al.*, 2006].

### Les effets aérodynamiques

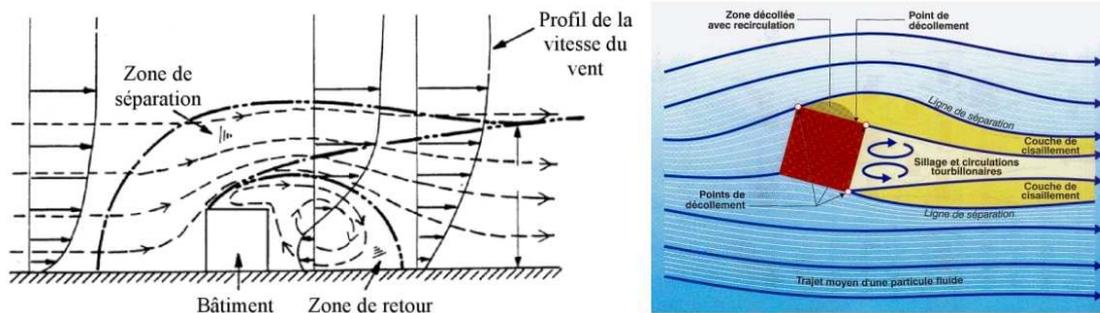
Le vent est le mouvement horizontal de l'air qui tend à équilibrer les zones de pressions différentes dans la CLA. A l'échelle méso, il est décrit par deux attributs : sa direction d'incidence, donnée par une rose des vents, et son profil vertical de vitesse qui est couramment défini par des fonctions logarithmiques ou puissances [Gandemer et Guyot, 1976]. Le vent n'est pas un phénomène constant, il varie constamment en direction et en grandeur (rafales) et ces variations peuvent être saisonnières et même horaires. Ainsi la rose des vents fournit des données relatives à des portions angulaires, et les profils de vent sont donnés en vitesse moyenne sur un intervalle de temps. Sur de larges étendues, le profil reste constant si la rugosité du terrain est homogène et que le relief n'est pas accidenté (voir figure 1.6). La vitesse moyenne du vent dans les zones urbaines peut être réduite de 50% par rapport à celle mesurée au niveau des surfaces d'eau libre [Brophy *et al.*, 2000].

A l'échelle microclimatique urbaine, le vent est fortement perturbé par la configuration du bâti et on ne peut plus utiliser directement les deux indicateurs précédents pour le décrire. Les directions sont très influencées par l'orientation des rues et les divers obstacles bâtis. Le contournement d'un bâtiment isolé de forme parallélépipédique simple a largement été



**Figure 1.6** : Profils verticaux de vitesses de vent, en fonction puissance, au dessus de 3 terrains de rugosités différentes.  $z_G$  est la hauteur de rugosité et  $\alpha$  est un paramètre de terrain issu de mesures en vraie grandeur [Gandemer et Guyot, 1976]

décrit (figure 1.7). Différentes zones perturbées peuvent être distinguées : sur la façade au vent une zone de recirculation frontale en surpression, sur les côtés et la partie supérieure un décollement et une couche limite turbulente, sur la façade sous le vent une zone morte de dépression turbulente (bulle de sillage) suivie par une zone de sillage perturbée qui reprend peu à peu les caractéristiques de l'écoulement incident.



**Figure 1.7** : Écoulement de vent autour d'un bâtiment cubique. A gauche, en coupe verticale selon Thurow [Robitu, 2005] et à droite en coupe horizontale et avec incidence du vent oblique [Liébard et DeHerde, 2006]

Oke a étendu cette représentation en extrapolant l'écoulement d'air dans des portions de centre-ville. Deux type de vents incidents peuvent être identifiés. Il discrimine les perturbations aérodynamiques, en les considérant comme une succession régulière de canyons urbains, selon trois catégories : à rugosité isolée, à interférence de sillage et rasant [Oke, 1987]. Cette représentation est effective lorsque les quartiers de ville sont construits sur un maillage régulier dessiné par de grandes avenues [Bozonnet et al., 2006]. Des effets aérodynamiques

liés à des configurations type de bâtiments sont souvent introduites plutôt que d'exprimer théoriquement des profils de vitesse non reproductibles. Leur description découle à l'origine principalement d'étude en soufflerie et ils ont été détaillés dans un ouvrage de Gandemer et Guyot [Gandemer et Guyot, 1976]. Quelques exemples courants sont présentés sur la figure 1.8.

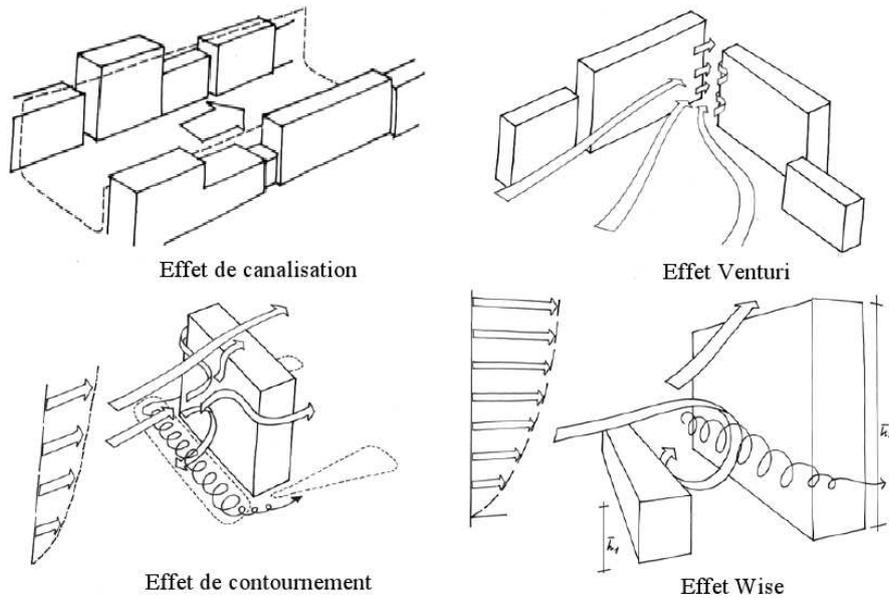


Figure 1.8 : Quelques effets aérodynamiques types [Gandemer et Guyot, 1976]

Mis à part ces schématisations plutôt intuitives, un manque de données de référence se fait ressentir pour traiter les cas réels des projets urbains. Aussi, de l'échelle du bâtiment jusqu'à celle du quartier, on a un recours justifié à des outils de type CFD<sup>4</sup>, des mesures en soufflerie ou encore des mesures in situ pour observer les modifications affectant les volumes d'air dessinés par les alignements et autres organisations de bâtiments (rues canyons, places, cœurs d'îlots...). À partir d'une description empirique des zones d'écoulement autour du bâtiment isolé, des méthodes de prédiction du champ de vitesse moyen ont été développées par Rockle et reprises par d'autres équipes. La démarche consiste à définir les zones perturbées pour un obstacle, puis à les combiner pour un ensemble d'obstacles. De même, une approche empirique a été développée à partir de l'écoulement défini pour un bâtiment isolé pour permettre d'estimer les écoulements autour d'un ensemble quelconque de bâtiments [Pardyjak *et al.*, 2004]. Ce modèle

<sup>4</sup>acronyme pour **C**omputational **F**luid **D**ynamics, terme anglo-saxon désignant la mécanique des fluides numérique dont les aspects théoriques seront détaillés dans le chapitre suivant

a été repris pour la constitution du noyau de calcul de Quic-Urb<sup>5</sup>, code de simulation accélérée pour l'aérodynamique urbaine.

### 1.3.3 Les matériaux

Les matériaux, en particulier ceux constituant les revêtements de sols, de façades et des autres éléments de mobilier urbain, ont la propriété de modifier directement les températures de surface de la ville et indirectement les températures d'air ; ils contribuent donc à la modification de l'ICU mais avant tout à la modification localisée du bilan radiatif et des températures d'air.

#### Influence à l'échelle de la ville

Les propriétés optiques, radiatives et calorifiques des matériaux définissent principalement leur bilan thermique. Certains auteurs passent au premier rang le rôle des propriétés de surface, en insistant préférentiellement sur la réflectivité solaire puis sur l'émissivité. D'autres assurent que l'impact microclimatique des matériaux réside en grande partie dans la chaleur spécifique (ou capacité thermique), la diffusivité thermique et l'inertie.

Pour illustrer le premier propos, l'US EPA<sup>6</sup> a publié un guide détaillé sur l'utilisation des revêtements de couleurs claires pour la diminution de l'ICU [Akbari *et al.*, 1992]. Caractériser l'influence des matériaux à l'échelle d'un fragment urbain ou d'une ville passe en général par l'évaluation de la propriété d'albédo effectif qui est l'équivalent de la réflectivité solaire mais associée à des surfaces hétérogènes et/ou non planes. L'albédo typique des villes européennes et américaines varie de 0,15 à 0,30. Celui des villes nord africaines est compris entre 0,45 et 0,60. La construction de bâtiments s'est accompagnée de la diminution de l'albédo des surfaces urbaines. Diverses observations ont pourtant montré que l'augmentation globale de l'albédo d'une ville pouvait entraîner une forte diminution de l'ICU, mais ce type de mesure est difficile à mettre en œuvre réellement ; elles doivent être respectées à grande échelle car l'effet sur la température est indirect [Bozonnet *et al.*, 2006]. 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 faisant passer l'albédo de surface de 0,25 à 0,40 pour les latitudes typiques moyennes des climats chauds. Il a également utilisé des simulations plus fines tout en étudiant les effets à grande échelle de l'albédo de Los Angeles. Une baisse moyenne de 2 ° C à 4 ° C est possible par une augmentation de l'albédo de 0,13 [Santamouris, 2005]. Des observations expérimentales de Rigenbach indiquent qu'une baisse de 1/10e de l'albédo conduit à une hausse de la température de surface de 3 ° C quand l'intensité du rayonnement solaire est maximale [Rigenbach, 2004].

---

<sup>5</sup>site internet du code : <http://www.lanl.gov/projects/quic/index.shtml>

<sup>6</sup>United State Environmental Protection Agency

Oke se veut plutôt défenseur du second propos et considère le rôle de l'émissivité mineur dans certains cas au contraire des propriétés calorifiques des matériaux. Il définit la propriété d'admittance thermique comme étant l'inverse de la résistance thermique d'un élément à un flux de chaleur cyclique dû à la température ambiante, et possédant la même unité que la conductance thermique. Pour un terrain plat, si l'admittance de la zone urbaine est de  $2200 \text{ J.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$  et celle des zones rurales est inférieure de 800 unités, un ICU d'environ  $2^\circ\text{C}$  se développe au cours de la nuit ; cependant lorsque l'admittance en milieu urbain est réduit à  $600 \text{ J.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ , un îlot de fraîcheur de plus de  $4^\circ\text{C}$  peut se former au cours de la nuit [Santamouris, 2005].

### Le traitement de surface des sols

Divers travaux de recherche, dans différents pays sollicités par différents climats, ont été menés en ce qui concerne les performances thermiques de différents matériaux utilisés dans le tissu urbain, ceci en grande partie pour les revêtements des voies de circulation piétonnes et automobile.

Berg et Quinn ont observé que pendant la moitié de l'été, des routes peintes en blanc dont l'albédo proche de 0,55, avaient presque la même température que la température d'air, tandis que les routes classiques, dont l'albédo était proche de 0,15, étaient de température d'environ  $11^\circ\text{C}$  supérieures à celles de l'air [Santamouris, 2005].

Taha a réalisé des mesures d'albédo et de températures de surface pour un panel de matériaux de surface de sol utilisés dans le tissu urbain [Taha, 1997]. Ils ont indiqué que les revêtements en élastomère blanc ayant un albédo de 0,72 avaient une température inférieure de  $45^\circ\text{C}$  à celle des revêtements sombres classiques d'albédo 0,08. De plus, les surfaces blanches avec un albédo de 0,61 avaient une température supérieure à la température de l'air de seulement  $5^\circ\text{C}$ , respectivement  $30^\circ\text{C}$  pour du gravier avec un albédo de 0,09.

Asaeda a mené une étude expérimentale sur la performance estivale des chaussées composées de divers matériaux utilisés communément dans les zones urbaines. Ils ont vérifié que la température de surface, le stockage de la chaleur et les flux émis vers l'atmosphère étaient significativement plus importants pour l'asphalte et le béton que pour le sol nu [Santamouris, 2005].

Une grande étude expérimentale a été réalisée pendant l'été 2001, où 93 matériaux couramment utilisés pour les revêtements urbains de sols mais aussi de façades (plaques de marbres, mosaïques et pierre) ont été étudiés [Doulos *et al.*, 2004]. Des mesures de température par thermographie IRT ont été réalisées sur des échantillons exposés à l'ensoleillement. Des différences de températures jusqu'à  $25^\circ$  entre les matériaux ont pu être relevées (figure 1.9).



**Figure 1.9 :** Photo et thermographies IRT des revêtement testés dans l'étude de [Doulos et al., 2004]

L'analyse des auteurs a été basée sur la comparaison des différences entre la température de surface du matériau et l'air. Ils se sont intéressés plus particulièrement à la couleur, la rugosité et les dimensions des matériaux. Pour les matériaux clairs, ils relèvent un écart maximal de  $6,9^{\circ}\text{C}$  tandis que pour les matériaux foncés cet écart varie entre  $10,2^{\circ}\text{C}$  et  $15,5^{\circ}\text{C}$ . Les surfaces rugueuses et sombres absorbent plus de rayonnement 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. Une manière de synthétiser les résultats a été la réalisation d'une classification subjective basée sur deux graphiques impliquant successivement le degré de rugosité puis le type de matériaux en fonction de la couleur (propriété réflective). On distingue ainsi deux grandes classes : les matériaux « chauds » et les matériaux « froids ». Les matériaux « froids » sont par exemple caractérisés par des coefficients de réflexion solaires et des émissivités très élevés. Ils sont intéressants car ils réduisent l'absorption solaire dans les enveloppes des bâtiments et maintiennent leurs surfaces plus froides en période estivale. Ces matériaux sont également dotés d'une grande émissivité leur permettant d'évacuer le rayonnement courte longueur absorbé en rayonnement grande longueur d'onde.

Des modèles ont été développés pour analyser les flux de chaleur et le transport d'humidité dans les sol bruts, goudronnés et bétonnés. L'imperméabilisation du sol réduit les pertes évaporatives, menant à des températures de surface élevées et à un flux ascendant, même la nuit [Arnfield, 2003].

Oke a montré qu'une pelouse bien irriguée est le lieu de flux latents très importants, supérieurs aux flux radiatifs, renforcés par une advection à micro-échelle issue des surfaces imperméables sèches contiguës, telles que les routes et les facettes de bâtiment [Arnfield, 2003].

La majeure partie d'eau liquide déposée sur les surfaces imperméables est collectée par le réseau de drainage vers les égouts, et au final vers les fleuves et la mer restant ainsi sous forme liquide. L'évaporation est ainsi réduite dans l'atmosphère urbaine ce qui entraîne une diminution du pompage de chaleur latente dans le bilan d'énergie. Toutefois, certains auteurs ont noté des taux d'évaporation importants et inattendus pour des sites de centre ville du fait des caractéristiques urbaines spécifiques telles que l'irrigation des plantations urbaines, l'écoulement des précipitations et le nettoyage des rues [Arnfield, 2003]. Par ailleurs, en ce qui concerne les sols naturels, Oke a montré que la pelouse irriguée montre des flux latents très importants, supérieurs aux flux radiatifs, renforcés par des phénomènes d'advection à micro-échelle issue des surfaces imperméables sèches contiguës, telles que des routes, des routes et des facettes de bâtiment [Oke, 1987].

### **Les matériaux de surface des bâtiments : façades et toitures**

L'enveloppe d'un bâtiment n'agit pas seulement comme un filtre aux conditions climatiques extérieures, déterminant le confort intérieur. Du fait de son inertie, de sa réflectivité et transmissivité solaire, elle influence aussi les conditions de confort visuel et thermique des espaces adjacents. Les matériaux des bâtiments exposés au rayonnement solaire direct stockent une grande quantité d'énergie sous forme de chaleur qui est libérée en différé après un temps qui dépend de la réflectance et de la capacité de stockage du matériau. Au niveau urbain, cela peut être un avantage dans des contextes où un déphasage peut faire bénéficier les espaces extérieurs d'un déstockage de chaleur dans la soirée.

Il est difficile dans les modèles décrits précédemment de renseigner correctement la modélisation de la ville en prenant en compte de manière précise les matériaux présents. On rencontre en effet une difficulté de l'ordre de l'échelle de description et une autre de l'ordre de la connaissance des matériaux en place. La connaissance des caractéristiques radiatives des matériaux n'en reste pas moins importante, notamment dans le cadre de l'aide à la conception.

Une étude de Berdahl concerne la caractérisation de la réflectivité de matériaux de toiture. Pour les revêtements à base d'aluminium, ils mettent en évidence une relation entre la réflectivité solaire et l'émissivité thermique. La forte corrélation entre la réflectivité solaire des matériaux et leur température de surface est également retrouvée par les mesures réalisées en extérieur. Les matériaux dont la température reste la plus fraîche sont ceux qui ont de grandes réflectivités solaires et émissivités thermiques dans des conditions où le coefficient de convection est important [Bozonnet *et al.*, 2006].

Prado a réalisé des mesures d'albédo de matériaux utilisés pour les toits des bâtiments au Brésil [Bozonnet *et al.*, 2006], évaluant ainsi des gains de chaleur sur les toits par calcul des

températures que peuvent atteindre les surfaces. Parmi les matériaux testés, les céramiques rouges et blanches, le fibrociment, l'aluminium nu ou laqué, l'acier inoxydable nu ou laqué, l'alliage aluminium et zinc nu ou laqué et le ciment coloré. Les auteurs concluent que les céramiques blanches et rouges sont les seuls matériaux pour lesquels ont été obtenues des températures de surface inférieures à la température de l'air. L'intérêt technique et pratique de cette étude est par ailleurs la production d'un tableau synthétisant les albédos et températures pour un grand nombre de matériaux et couleurs de revêtement.

Synnefa a réalisé une étude comparative sur l'effet de 14 types de revêtements réfléchissants qui souligne la nécessité de prendre simultanément en compte la réflectivité spectrale, qui influence les performances du matériau pendant la journée, et son émissivité qui est le facteur prédominant pendant la nuit. En général, plus les réflectivités et émissivités sont grandes, plus la température de surface reste faible. Ils montrent que l'utilisation de revêtements réfléchissants peut réduire la température de surface d'une tuile de béton blanc de 4 ° C sous des conditions d'été et de 2 ° C durant la nuit [Bozonnet *et al.*, 2006].

Ce sont les villes denses, constituées de bâtiments plus vieux et de faible hauteur, dans des climats chauds et ensoleillés, et avec une forte utilisation de l'air conditionné, qui présentent le plus fort potentiel de réduction de l'ICU par l'utilisation de toitures à fort albédo [Bozonnet *et al.*, 2006].

La recherche effectuée par les industriels au sujet des revêtements de façade a permis de mettre au point des peintures dotées d'excellentes caractéristiques optiques favorables à l'environnement urbain. Des mesures comparatives de marbre blanc recouvert de carreaux de ces nouvelles peintures très réfléchissantes, révèlent près de 6 ° C de différence dans les températures de surface en été à midi [Santamouris, 2005].

Chudnovsky analyse le comportement thermique de différentes surfaces urbaines en utilisant une caméra IRT haute résolution située à l'altitude de 103 m au-dessus de la ville de Tel-Aviv. Ils concluent que pendant la journée, les éléments qui participent le plus à l'échauffement de l'air sont les toits, les rues et les sols pavés exposés au soleil. Pendant la journée, les rues couvertes d'asphalte et les toitures ont atteint les températures les plus élevées. Inversement, ce sont les murs extérieurs et les arbres qui avaient les températures nocturnes les plus élevées. Les espaces ouverts qui sont exposés à l'ensoleillement direct pendant la journée et aux échanges avec le ciel la nuit ont été caractérisés par les écarts de température diurne les plus grands [Bozonnet *et al.*, 2006].

Les techniques expérimentales de mesure des caractéristiques radiatives des matériaux sont bien maîtrisées et on peut ainsi caractériser toutes sortes de matériaux. Cependant,

la démarche de caractérisation doit être systématisée pour tous les produits du marché, et les propriétés réfléchissantes des matériaux mises en avant afin d'inciter fortement les aménageurs et concepteurs à utiliser des matériaux à haut pouvoir réfléchissant, le choix d'un matériau se faisant en fonction de l'ensemble de ses propriétés [Bozonnet *et al.*, 2006].

Le comportement du matériau vis-à-vis de la rétention de l'eau peut également être examiné comme le fait Tanaka en testant différents matériaux comme des graviers issus du recyclage de tuiles en céramiques vis-à-vis des propriétés d'absorption d'eau et de refroidissement par évaporation [Bozonnet *et al.*, 2006].

Le vieillissement des matériaux à fort pouvoir réfléchissant ne doit cependant pas constituer une barrière à leur utilisation. Les modifications de l'albédo au cours du temps dépendent essentiellement du revêtement, de la texture de la surface, de la pente (dans le cas des toits) et des sources de salissures, de poussière et de débris à proximité. Les mesures réalisées par Bretz en 1997 sur des toits lui permettent d'estimer une diminution moyenne de l'albédo de 0,15 la première année et plus faible les années suivantes [Bozonnet *et al.*, 2006]. Dans la plupart des cas, le lavage des revêtements leur restitue 90 à 100% de leur valeur d'albédo d'origine, mais ce bénéfice est de courte durée. Levinson *et al.* en 2005 étudient les effets du vieillissement et du nettoyage de membranes de couleurs claires utilisées pour les toits.

Il est finalement difficile de se fier directement aux valeurs de données physiques comme l'albédo données dans des tables. En effet, en étudiant la variation de la réflectivité solaire des bétons, Levinson a montré que leur composition, leur vieillissement et leur exposition climatique modifient significativement leur albédo [Bozonnet *et al.*, 2006]. Les albédos des bétons lisses étudiés variaient entre 0,41 et 0,77. Ceux des bétons blancs lisses les plus réfléchissants sont de 0,18 à 0,39 plus grands que ceux des bétons gris. L'albédo des bétons lisses est corrélé avec celui du ciment et du sable, et après abrasion, avec celui des cailloux. Concernant le vieillissement, l'albédo d'une surface de béton augmente avec la progression de la réaction d'hydratation d'une valeur de 0,08. La simulation de l'exposition climatique, salissure et usure réduit l'albédo en moyenne de 0,06, 0,05 et 0,19. L'humidification par la pluie diminue les albédos d'environ 0,23.

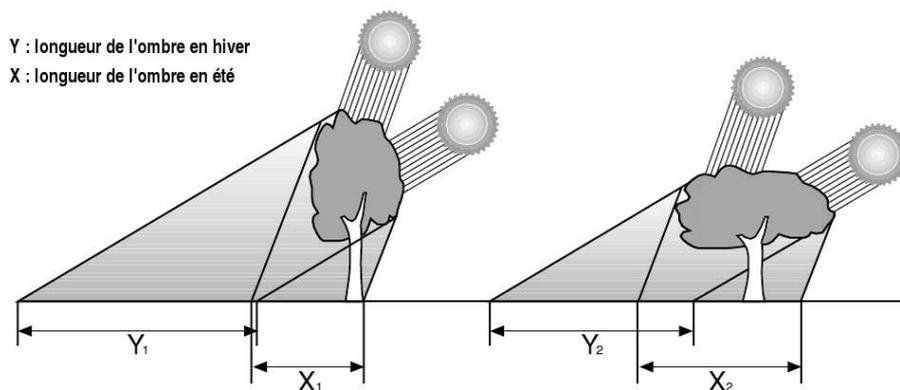
#### 1.3.4 Les arbres et les aménagements végétaux

Outre la valeur esthétique, la fonction paysagère, voire sociologique largement abordées dans un rapport bibliographique du Warwick District Council [Hastie, 2003], l'utilisation des arbres permet de modifier le climat local et peut en améliorer les conditions de confort. Individuellement, les arbres agissent comme des masques solaires et des brise-vents, modifiant les champs de rayonnement et les écoulements d'air autour des bâtiments. Par effet cumulatif,

un groupe d'arbre ou une zone locale très végétalisée, permet la réduction de la température de l'air urbain par l'absorption du rayonnement solaire. Celui-ci est transformé en énergie chimique pour la photosynthèse et pour sa plus grande partie dissipé en chaleur latente. Les feuillages constituent aussi des absorbeurs de bruit, atténuent l'érosion dû aux évènements pluvieux et filtrent les polluants. Le système racinaire quant à lui a une fonction de stabilisation du sol.

Un espace planté se conçoit en jouant sur le type d'espèce, le type de croissance et l'emplacement. Chaque espèce de végétation a des capacités différentes à absorber le rayonnement solaire, les caractéristiques intrinsèques les plus influentes sur cet aspect sont les suivantes :

- l'évolution de la croissance : le temps nécessaire pour une taille suffisante pour apporter à la fois l'ombre / avantages de refroidissement.
- la morphologie (forme, diamètre et hauteur du houppier) : l'implication pour l'espacement des arbres, la distance avec les bâtiments, l'étendue de l'ombre à maturité. Lorsque le concepteur envisage la plantation d'arbres à proximité des bâtiments, il doit s'intéresser au diamètre de la couronne et à sa hauteur (figure 1.10) par rapport à l'emplacement des ouvertures (entrées, vitrages...) et des capteurs solaires sur les bâtiments à proximité. Les arbres plantés dans des endroits abrités conservent leurs feuilles plus longtemps, ce qui peut être ou ne pas être souhaitable en fonction du climat et de l'accès solaire.
- la durée de foliation : calendrier relatif aux périodes de chauffe et de climatisation, les implications quant à l'accessibilité solaire et à l'apparence des arbres en hiver.
- la résistance à la pollution : des espèces durables sont nécessaires dans les zones urbaines ; les espèces locales ont généralement une plus forte résistance aux pesticides et conditions climatiques locales, exigeant moins d'entretien que les espèces exotiques.



**Figure 1.10** : Influence de la hauteur et de la forme du houppier sur l'efficacité de l'ombrage, la géométrie de l'arbre de droite est plus avantageuse à la fois en hiver et en été ( $Y_2 < Y_1$  et  $X_2 > X_1$ )

Le compromis pour concevoir une plantation d'arbres par rapport à l'accessibilité solaire est d'obtenir le maximum de rayonnement solaire en période de chauffe, tout en protégeant les espaces occupés contre le rayonnement solaire indésirable en été lorsque une surchauffe peut se produire. Augmenter l'accessibilité solaire est généralement souhaitable pour les latitudes nord, tandis que pour les latitudes sud, la protection contre les apports excessifs est nécessaire en été. Les arbres à feuilles caduques représentent une solution de protection solaire saisonnière particulièrement intéressante, en fournissant protection pendant les mois d'été tout en permettant à la lumière naturelle et à l'énergie solaire de pénétrer en hiver. Lorsque la lumière du soleil atteint directement les grandes surfaces de sol dans le cas de places ou de larges rues, la végétation peut être utilisée comme un moyen d'ombrage pour réduire le stockage de chaleur. La fonction d'écran dépend du type de végétation et du cycle annuel du feuillage. Canton a étudié la perméabilité au rayonnement global, diffus et direct de quatre espèces d'arbres présents dans la ville de Mendoza en Argentine [Bozonnet *et al.*, 2006]. Ces données permettent d'orienter le choix d'espèces végétales à utiliser. Elles sont également utiles aux modélisations. En effet, l'estimation des économies d'énergie liées à l'utilisation de la végétation est principalement abordée par le biais de la simulation.

La végétation peut aussi être utilisée comme brise vent. En hiver, le confort piétonnier peut alors être amélioré et les bâtiments peuvent être protégés par rapport aux courants froids. Cependant, en diminuant de manière trop importante la circulation de l'air, on peut favoriser l'échauffement des surfaces urbaines en saison chaude durant la journée. Par exemple, dans les zones où les canopées végétales sont éparpillées, le rayonnement peut atteindre et chauffer les surfaces au sol ; en même temps, la canopée peut réduire le brassage atmosphérique tel que l'air plus frais ne puisse plus ventiler ces zones. Dans ce cas, l'ombrage et l'évapotranspiration ne peuvent pas forcément compenser l'augmentation des températures d'air dû au faible brassage.

L'aptitude des végétaux à modifier le climat réside principalement dans le phénomène d'évapotranspiration défini comme la perte simultanée de l'eau par évaporation et transpiration dans l'atmosphère. Un arbre peut être considéré comme un climatiseur évaporatif naturel épuisant jusqu'à  $0,378 \text{ m}^3/\text{jour}$  dans de bonnes conditions d'irrigation [Akbari *et al.*, 1992], [Saxena, 2002]. Ce taux d'évapotranspiration se traduit par un potentiel de refroidissement égal à  $26,7 \text{ kWh}/\text{jour}$ . L'humidité relative dans les zones urbaines végétalisées peut ainsi être de 3% à 10% plus élevée que dans les zones dépourvues d'aménagement naturel. Les effets sont décuplés pour les étés chauds et secs si les zones racinaires sont bien irriguées, mais moins en hiver [Brophy *et al.*, 2000]. L'évapotranspiration de la végétation rafraîchissant l'air ambiant peut de ce fait favoriser les dispositifs de ventilation naturelle en été [Bozonnet *et al.*, 2006].

Diverses campagnes de mesure que rapporte Santamouris ont démontré l'effet des vastes zones urbaines végétalisées comme les parcs sur la température d'air du fait de ce processus d'évapotranspiration [Santamouris, 2005] :

- Duckworth et Sandberg ont indiqué que les températures à San Fransisco, dans le parc fortement végétalisé de Golden Gate sont en moyenne 8 ° C plus froides qu'à proximité de zones moins végétalisées ;
- Oke a mesuré à Montréal, des différences négatives de 2,5 ° C dans les parcs urbains par rapport aux zones construites environnantes ;
- Taha a indiqué que l'évapotranspiration pouvait créer des effets d'« oasis », soit des zones de 2,8 ° C plus froides que leur environnement ;
- Saito a étudié l'effet de espaces verts dans la ville de Kumamoto au Japon ; ici des différences maximales de 3 ° C sont constatées entre le cœur de ce type de zones et la proximité ;
- Jauregui a indiqué que le parc dans la ville de Mexico était 2 à 3 ° C en dessous de la température urbaine ;
- A Tokyo, Tatsu puis Gao ont observé des différences de 1,6 ° C dans les zones très végétalisées ;
- Santamouris a montré que l'évapotranspiration des plantes dans le Parc National d'Athènes crée des « oasis » de 1 à 5 ° C au cours de la nuit.

Les résultats précédents sont variés mais montrent une tendance de réduction de température d'air, pour laquelle [Nowak, 1995] propose des valeurs potentielles de réduction relative à la mi-journée.

Givoni préconise l'espacement des zones arborées et végétalisées et des parcs publics dans l'ensemble de la zone urbaine plutôt que de les étendre individuellement et de les concentrer en quelques endroits. Cette proposition est en accord avec les mesures de Lindqvist, à Göteborg, en Suède, où la température de l'air augmente de 6 ° C entre un point à 100 m à l'intérieur du parc et un autre point au sein des zones bâties 150 m à l'extérieur du parc. Plus généralement, l'écart de température de l'air dans la zone de transition parc - zone construite était de 0,3 à 0,4 ° C pour chaque 100 m de distance franchie à l'extérieur du parc [Brophy *et al.*, 2000].

A plus petite échelle, Streiling et Matzarakis ont analysé la différence entre les effets des arbres singuliers et de petites groupes d'arbres sur le microclimat [Streiling et Matzarakis, 2003]. L'étude est effectuée sur une place triangulaire de 1700 m<sup>2</sup> (Fahnenbergplatz) au centre-ville nord de Fribourg fin septembre 2002. Elle est plantée de douze châtaigniers (*Aesculus Hippocastanum*) de différents âges et tailles. Des mesures météorologiques (température d'air sec et d'air humide, vitesse d'air, direction du vent, rayonnement solaire, rayonnement IRT) y ont été effectuées en six points de mesures. A partir de ces valeurs de la pression de vapeur, l'humidité relative, la température moyenne radiante,

l'indice de confort PET<sup>7</sup> ont été calculés. Les mesures de température d'air ont montré des différences maximales de 2,2 °C entre deux points de mesure, et des différences moyennes de 1 °C entre des zones nues et des zones arborées. Les auteurs soulignent la faible différence trouvée entre une mesure de température d'air sous un arbre et la température d'air sous trois arbres de l'ordre de 0,1 °C. Des différences assez importantes ont été au contraire observées au niveau de la température moyenne radiante et par conséquent de la PET.

Des modèles physiques sont aussi construits en parallèle pour évaluer les phénomènes de rafraîchissement par évapotranspiration dans les villes. Ils consistent en une adaptation de modèles valables pour des sites forestiers pour l'étude de zones urbanisées [Arnfield, 2003]. Santamouris rapporte également des résultats de simulations numériques réalisées pour démontrer ces effets de climatisation passive de la végétation [Santamouris, 2005] :

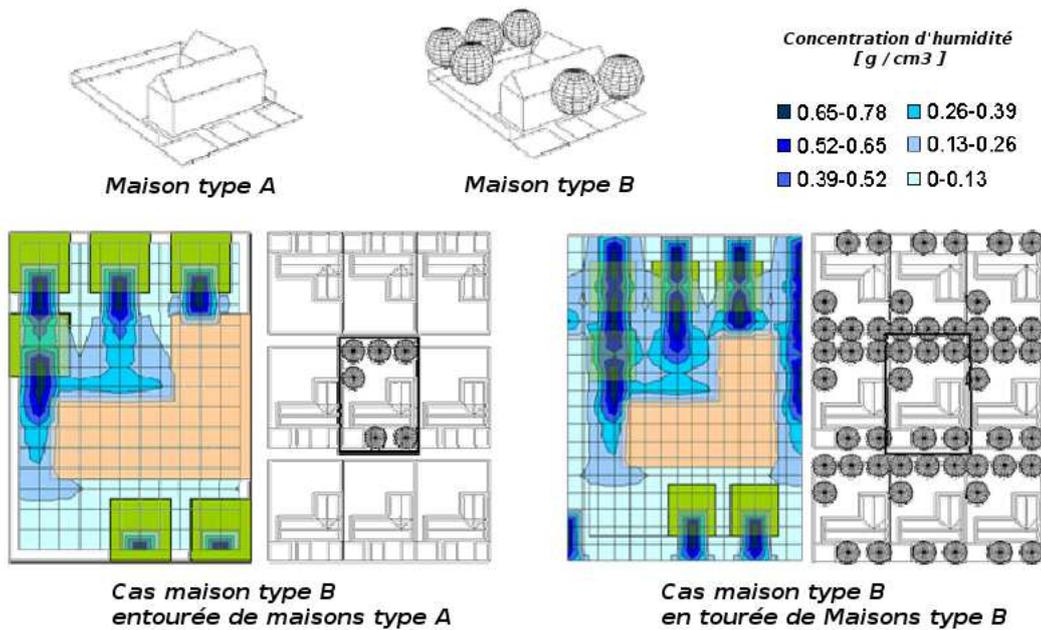
- Huang présume qu'une augmentation de 25% de la couverture forestière à Sacramento et Phoenix, États-Unis, doit diminuer la température ambiante de 5,6 °C à 14H00 en Juillet ;
- Taha présente aussi des résultats de simulations sur l'effet de la couverture végétale sur la température diurne et nocturne à Davis, en Californie. Il montre que 30% de couverture végétale pourrait entraîner un oasis à midi jusqu'à 6 °C, dans de bonnes conditions et pendant la nuit un ICU de 2 °C ;
- Gao note que les espaces verts peuvent diminuer la température moyenne et maximale de 2 °C, tandis que les arbres dans les rues ne peuvent diminuer les températures maximales que de 2 °C.

Saxena a pour sa part développé un modèle et une méthodologie pour quantifier l'effet de climatisation naturelle de l'air dû aux arbres à l'échelle d'une habitation ou d'un quartier résidentiel [Saxena, 2002]. Il tente de donner une solution au problème du traitement de la dispersion d'humidité dans la canopée urbaine liée à la turbulence à petite échelle. Il justifie son travail en soulignant les limites du modèle de Huang à savoir le brassage de l'air à température et humidité constantes, l'agrégation de l'effet de refroidissement par le concept de hauteur de mélange non adapté pour des observations localisées et l'utilisation d'une évapotranspiration potentielle compromettant la précision des résultats du fait des conditions d'irrigation des arbres trop favorables. Son hypothèse est que le dégagement d'humidité d'un arbre est considéré comme similaire à un dégagement de polluants gazeux d'une usine par sa cheminée. Il s'appuie sur un modèle gaussien de dispersion de polluants formulé par Oke en 1978. Une étude de mise en situation est réalisée sur un quartier résidentiel de 144 parcelles

---

<sup>7</sup>Physiological Equivalent Temperature (température physiologique équivalente). L'indice de confort thermique PET est défini comme la température d'air fictive d'une ambiance intérieure, qui conduit du point de vue énergétique aux mêmes conditions thermophysiques que sur le site extérieur considéré. Elle donne une évaluation quantitative d'un environnement thermique particulier en tenant compte de toutes les variables thermoaérauliques. La PET intègre le vent, la température d'air, l'humidité et tous les flux radiatifs. C'est un critère synthétique indépendant du ressenti de chaque individu et facilement compréhensible [Bouyer, 2004]

individuelles similaires où sont implantées une maison de type A, sans arbres, ou bien une maison de type B, avec 6 arbres dans le jardin individuel (figure 1.11). Pour un 1<sup>er</sup> juin, à 12H00, et des données météorologiques de Phoenix, il compare deux maisons type B, l'une entourée de type A et l'autre entourée de type B. On constate respectivement pour les deux un abaissement de 0,6 ° C et de 0,75 ° C par rapport à la température météorologique de l'air.



**Figure 1.11** : Influence des arbres sur l'humidité et la température de l'air dans des quartiers résidentiels, adapté de [Saxena, 2002]

Des toitures jardins peuvent être mises en place sur les toits des bâtiments. Elles réduisent également la surface de toiture directement exposée au soleil en été et en hiver et ainsi les températures extrêmes à laquelle elles sont soumises. Les toitures plantées ou gazonnées sont de plus en plus implantées sur les bâtiments des agglomérations urbaines en Europe. De plus les systèmes actuels requièrent peu de maintenance et d'entretien. On peut lister les principaux avantages des toitures végétalisées :

- l'amélioration de la stabilité thermique dans les structures et les matériaux de toiture prolongeant leur durée de vie ;
- l'isolation acoustique due à la masse supplémentaire de toiture ;
- la création d'un habitat naturel des espèces biologiques dans un environnement urbain souvent hostile ;
- la réduction jusqu'à 50% du ruissellement d'eau de pluie par rétention et évapotranspiration ;
- l'absorption du rayonnement solaire utilisé pour la photosynthèse ;

- la compensation de la perte d'espaces verts au sol constaté dans le parcellaire urbain, en le reprenant en toiture.

Il a été montré que les performances des toitures dépendent du type de végétation utilisé, notamment de sa couleur, de sa densité et du type de construction. Les températures de surface les plus faibles sont plutôt obtenues pour des bâtiments de construction ancienne peu ou pas isolés.

Ip décrit le fonctionnement d'un écran végétal associé à une façade légère [Bozonnet *et al.*, 2006]. La végétation est supportée par un treillis placé devant les vitrages et peut ainsi capter les rayonnements solaires directs en été tout en les laissant passer en hiver. Les auteurs donnent la liste des plantes pouvant être utilisées pour cet usage. Des simulations et des expérimentations ont mis en évidence une baisse de température intérieure de 4 à 6 ° C au plus fort de l'été avec une légère augmentation de l'humidité dans la pièce.

Plusieurs vertus biochimiques, réduisant la pollution urbaine, peuvent être enfin allouées à la végétation :

- la végétation absorbe l'ozone, le dioxyde d'azote, le dioxyde de carbone et d'autres polluants, réduisant leur concentration dans l'atmosphère ;
- les micro-organismes végétaux se trouvant dans le sol sont particulièrement actifs dans la conversion du monoxyde de carbone en dioxyde de carbone ;
- les plantes placées à côté des routes dégagent de l'oxygène qui combiné avec l'oxyde de soufre crée du dioxyde de soufre pouvant être réabsorbé par ces plantes.

Par ailleurs, comme l'augmentation de la température favorise les réactions de synthèse des polluants, la présence d'arbres atténuera ces réactions.

### 1.3.5 L'eau

Les bassins, les étangs, les fontaines et les jets d'eau sont les principaux aménagements urbains basés sur la modification de l'état de l'air ambiant par phénomène d'évaporation ; l'air se rafraîchissant du fait de la chaleur latente de vaporisation importante. La présence d'une étendue d'eau contribue également à modérer les températures de surface extrêmes en raison de sa grande capacité de stockage thermique.

Comme les surfaces d'eau libre augmentent l'humidité de l'air, elles sont avantageuses dans les climats secs, mais peuvent être source de problèmes dans les climats très humides. Dans les climats chauds, leur effet de refroidissement devrait être maximisé par la conception de stratégies empêchant la diffusion de l'air refroidi dans toutes les directions mais en le dirigeant vers les espaces habités.

Les principaux exemples dont on dispose pour mesurer l'influence de ce type d'aménagement sont les installations présentes sur l'exposition universelle de Séville en 1992. L'objectif des concepteurs du site était de fournir un environnement extérieur confortable dans lequel les visiteurs, dont le nombre a été estimé à 290000 par jour, pourraient se détendre entre leurs différentes visites des pavillons d'exposition occupant 50 des 215 hectares du site. De plus, la réduction de la température de l'air extérieur sur une zone de 10 km était souhaitée [Brophy *et al.*, 2000].

En plus d'aménagements végétaux, l'eau était omniprésente dans l'ensemble du site grâce à des fontaines, des piscines, des cascades, des étangs, des jets d'eau et des brumisateurs. De plus, les tours de refroidissement, ont été installées dans les différentes parties du site. Des études préalables et pendant le déroulement de l'exposition ont montré que des environnements confortables étaient obtenus par des moyens naturels décrits précédemment lorsque les conditions climatiques de Séville restaient en dessous de conditions météorologiques chaudes mais modérées. L'application de ces techniques de refroidissement passif a contribué en moyenne à la baisse de température de l'air ambiant de 5 ° C [Brophy *et al.*, 2000].

Un concept de tour de refroidissement a été également développé par Givoni en 1994. Ce système consiste en un puits où de fines gouttes d'eau sont aspergées verticalement vers le bas. Un piège à vent peut être placé au-dessus du système pour augmenter le débit d'air. Lorsque l'air en amont du système était proche d'une température à 36 ° C, il a été montré que celui en aval était d'environ 23 ° C [Santamouris, 2005].

Une autre application sur des installations d'échelle équivalente à l'exposition'92 se trouve sur le village olympique 2004, à Athènes. Afin d'améliorer le microclimat, des piscines, des étangs et des fontaines ainsi que des techniques d'amélioration de la circulation d'air ont été utilisées. La température ambiante a pu être réduite de 4 ° C, la vitesse maximale du vent a été réduite de 3  $m.s^{-1}$ , tandis que la zone de confort a été augmentée de 65% [Nikolopoulou, 2004].

### 1.3.6 Conclusion

Nous avons présenté dans cette partie les conséquences microclimatiques occasionnées par l'aménagement urbain. Il est possible d'améliorer les conditions de confort d'un espace extérieur en tenant compte de ces aspects.

Comme on l'a vu, la morphologie urbaine peut être source de phénomènes radiatifs et aérodynamiques. L'échelles de ces phénomènes se situe entre notre échelle microclimatique définie précédemment et l'échelle sub-méso. La diversité des critères, les phénomènes en jeu font que l'impact de la morphologie urbaine sur le climat est un phénomène complexe. Les

travaux de recherche se sont particulièrement intéressés à la mise en œuvre d'indicateurs morpho-climatiques pour caractériser les espaces urbains à cette échelle intermédiaire.

Les matériaux de surface sont d'importants facteurs qui affectent à la fois les conditions thermiques et visuelles. Deux propriétés sont particulièrement concernées à savoir l'albédo et la capacité thermique, qui déterminent la capacité à stocker la chaleur. Nous retiendrons la préconisation de nombreux auteurs consistant en l'utilisation de couleurs pâles et réfléchissantes (albédo élevé) pour ces surfaces afin de réduire le bilan radiatif  $Q_R$  responsable des surchauffes en milieu urbain.

Les éléments végétaux, quant à eux, ont naturellement un rôle de climatiseurs passifs, puisque à la fois ils génèrent de l'ombre, absorbent les flux radiatifs et absorbent la chaleur sensible de l'air pour évapotranspirer de l'eau contenue dans leurs feuilles. L'eau a les mêmes fonctions évaporatives, simplement la quantité d'eau n'est pas un facteur limitant. La présence de ces deux éléments se justifie pleinement en milieu urbain.

Nous retiendrons également les ordres de grandeurs des modifications maximales apportées aux températures : une cinquantaine de degrés pour les températures de surface et une dizaine de degrés pour les températures d'air. Pour les autres variables climatiques comme l'humidité ou la vitesse d'air, il est plus difficile de faire ressortir des tendances. Les modifications de vitesses (ou des autres variables intensives de l'écoulement) sont très localisées et dépendent de la vitesse incidente. Les écarts des masses d'humidité quant à eux sont très faibles et la valeur ressentie au niveau du confort est l'humidité relative qui dépend du niveau de température d'air et peut varier sur toute sa plage de définition.

Si l'exposé de cette sous-partie a été réalisée de manière thématique, c'est parce que les études recensées sont relatives à un seul type d'élément à la fois. On trouve peu d'études traitant de la mixité des aménagements dans un îlot ou de la comparaison de divers éléments sur un même site. [Robitu, 2005] l'a fait dans sa thèse en comparant l'effet de l'eau, puis des arbres et l'effet simultané de l'eau et des arbres.

Pour les études faisant intervenir les techniques de simulation, on remarque que les résultats sont très différents. Ceci est dû au fait que les sites urbains de départ ne sont pas comparables mais aussi que les modèles ne donnent pas les mêmes résultats. On peut se poser la question de la fiabilité des modèles surtout que ceux-ci sont en général adaptés de modèles construits pour d'autres domaines scientifiques. Étant donné le niveau d'interaction et la non linéarité des phénomènes étudiés, ainsi que la complexité de la structure de la CU, des chercheurs ont avancé que certaines simplifications dans le bilan énergétique induisaient forcément une perte de fiabilité des résultats. En particulier la nuit, par des conditions calmes, quand la radiation solaire et les flux turbulents de chaleur et d'eau peuvent être négligés, la modélisation conduit à

des bilans d'énergie pour lesquels une quantité d'énergie résiduelle est dissipée en rayonnement net grande longueur d'onde [Arnfield, 2003].

Après avoir exposé comment les aménagements urbains étaient susceptibles de modifier les conditions microclimatique, nous nous intéressons dans la partie suivante à la problématique des consommations énergétiques du bâtiment. En effet, il est important d'identifier le champ d'action pour mieux cibler dans la suite du travail le potentiel d'amélioration du comportement énergétique des bâtiments par le microclimat. Nous dressons d'abord un constat chiffré des dépenses énergétiques du secteur du bâtiment pour ensuite proposer des solutions techniques classiques admises pour leur réduction.

## 1.4 Les consommations énergétiques du bâtiment

La question de la réduction des consommations énergétiques se positionne comme un élément majeur pour parvenir à résoudre les défis environnementaux contemporains. C'est une action prioritaire à mettre en œuvre pour répondre aux engagements mondiaux, européens et nationaux de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

### 1.4.1 Constat global pour le chauffage et la climatisation

En 2005, la consommation énergétique globale de l'Union Européenne était de 1725 *Mtep*<sup>8</sup>, et le seul secteur du bâtiment représentait une part de 40,4% en 2002. Le conditionnement des espaces habités représente à lui seul 57% de cette demande énergétique, et, outre la production de *CO*<sub>2</sub> (33% pour le secteur du bâtiment), il représente une des principales sources anthropiques contribuant au phénomène d'ICU et à la dégradation de la qualité environnementale des espaces urbains habités [Bozonnet, 2005].

En France, la consommation d'énergie des bâtiments a augmenté de 30% au cours des 30 dernières années du fait de l'accroissement simultané du parc de bâtiments (+41%) et de la surface moyenne des logements, mais aussi du fait de l'augmentation des exigences de confort et de l'apparition de nouveaux besoins chez les usagers [ADEME, 2005]. Ces différents facteurs ont contribué à une forte augmentation de la consommation d'électricité utilisée pour l'électroménager, l'éclairage, la bureautique, la climatisation, le renouvellement et le traitement d'air, la cuisson ou le séchage. Par ailleurs, le chauffage représente non seulement près des deux tiers de ces consommations d'énergie mais aussi la majeure partie des émissions de *CO*<sub>2</sub> (120

---

<sup>8</sup>Unité choisie du fait du caractère universel du combustible, la tonne équivalent pétrole (*tep*) est une unité de référence pour comparer entre elles les différentes sources ou dépenses d'énergie. 1 *tep*, soit un volume de 1161 litres, correspond à une énergie de 11629 *kWh*

millions de tonnes, soit 25% des émissions nationales) en raison du contenu élevé en carbone des combustibles fossiles et de l'électricité utilisée lors des périodes très froides.

Pour le logement et le secteur tertiaire, la consommation d'énergie est de 660 *TWh* par an. Deux tiers sont relatifs aux bâtiments d'habitation et cette proportion est quasi constante depuis près de 20 ans. Les logements et les bâtiments tertiaires sont à l'origine de 18% des émissions nationales de  $CO_2$  soit plus d'une demi tonne de carbone par an et par personne. On y consomme 46% de l'énergie finale, soit 1,1 *tep* par an et par personne. La consommation totale du secteur tertiaire s'est établie en 2001 à 214,1 *TWh* pour 814,6 millions de  $m^2$  de bâtiments chauffés et/ou climatisés [ADEME, 2005].

Le secteur tertiaire se décompose suivant huit classes principales aux activités de services très diversifiées. Sur les huit classes, les commerces et les bureaux, représentent à eux seuls près de la moitié (47%) des consommations d'énergie. Les bureaux sont d'ailleurs les plus consommateurs en énergie globale (51,2 *TWh*), et en deuxième position derrière la classe des cafés/hôtels/restaurants en terme d'énergie au  $m^2$  de bâti (296 *kWh.m<sup>-2</sup>*). Pour l'ensemble du secteur tertiaire, le poste chauffage représente comme pour le secteur résidentiel la première source de consommation énergétique avec 54% de la consommation totale. On note que la climatisation en représente environ 5% [ADEME, 2005].

Si on s'intéresse de plus près aux mêmes usages énergétiques mais uniquement pour les bureaux, dont le taux de renouvellement est d'environ 3% du parc total, soit environ 5 millions de  $m^2$  par an [Filfi, 2006], on remarque que la source principale reste le chauffage avec 56%, mais que la climatisation prend une part plus importante avec 8% de la consommation totale [ADEME, 2005]. Une étude de Burton estime au niveau européen que l'air conditionné augmente en moyenne la consommation totale d'énergie des bâtiments de bureaux d'environ 40 *kWh.m<sup>-2</sup>.an<sup>-1</sup>* [Santamouris, 2005].

D'après l'IIR<sup>9</sup>, on peut estimer à plus de 240 millions le nombre de centrales de traitement d'air installées dans les bâtiments dans le monde entier ; d'ailleurs les systèmes de refroidissement et d'air conditionné représentent environ 15% de toute l'électricité consommée dans le monde [Santamouris, 2005].

La Directive Performance Énergétique des Bâtiments formule les grands objectifs suivants :

- améliorer la performance énergétique des bâtiments neufs, en fixant des limites pour les consommations des bâtiments sur la base d'une méthode de calcul prévisionnelle et, pour les bâtiments de plus de 1000  $m^2$ , l'obligation d'évaluer la possibilité d'utiliser des systèmes de production d'énergies alternatives (énergies renouvelables) ;

<sup>9</sup>International Institute of Refrigeration

- améliorer la performance énergétique des bâtiments existants en fournissant pour chaque bâtiment ou partie de bâtiment mise en vente ou location un certificat de performance énergétique, appelé en France Diagnostic de Performance Énergétique (DPE). Pour certains bâtiments institutionnels recevant du public et de surface supérieure à  $1000\text{ m}^2$ , ce DPE devra être affiché. En outre, des exigences minimales pourront être imposées pour les bâtiments de plus de  $1000\text{ m}^2$  en cas de rénovation ;
- améliorer la performance énergétique des systèmes de chauffage et de climatisation des bâtiments existants par la mise en place de procédures d’inspection périodique des chaudières de plus de  $20\text{ kW}$  et des systèmes de climatisation de plus de  $12\text{ kW}$ . Cette inspection doit inclure des recommandations d’amélioration, soit en termes de fonctionnement ou de remplacement.

Pour l’accomplissement du premier objectif, la dernière Réglementation Thermique 2005 (RT 2005), applicable depuis le 1er septembre 2006, envisage l’amélioration d’au moins 15% la performance énergétique des bâtiments neufs d’ici à 2010 et de 40% pour 2020. Pour y arriver, cette nouvelle réglementation prévoit notamment le recours aux énergies renouvelables, la prise en compte de la conception bioclimatique, le renforcement des exigences de confort d’été et, sur certains matériaux et équipements, l’incitation au traitement des ponts thermiques. Pour cela, elle s’appuie sur une méthode de calcul prenant en compte : l’emplacement et l’orientation des bâtiments, les caractéristiques de l’enveloppe, les équipements de chauffage et la production d’eau chaude sanitaire, la climatisation, l’éclairage. La conception bioclimatique des bâtiments et les systèmes faisant appel aux énergies renouvelables sont également pris en compte, ce qui permet leur valorisation.

#### **1.4.2 Les techniques alternatives de réduction des consommations énergétiques du bâtiment**

Les techniques connues de gestion énergétique passive du bâtiment sont répertoriées selon les trois classes suivantes :

- la protection solaire et thermique ;
- la technique de régulation thermique ;
- la technique de dissipation de chaleur (été) ;
- la technique de récupération de chaleur (hiver).

##### **La protection solaire et thermique**

Cet aspect repose essentiellement sur la conception des ouvertures du bâti et de leur protections solaires. Des recherches menées aussi bien par le corps académique qu’industriel ont conduit au développement de dispositifs de protection très efficaces. Ainsi, de nouveaux stores permettant une meilleure intégration de la lumière du jour, un meilleur contrôle de l’éblouissement et un meilleur filtrage solaire sont à présent disponibles. Les dispositifs de

contrôle solaire doivent permettre de réduire autant que possible les apports solaires tout en permettant un contact visuel et un accès suffisant à la lumière du jour. Ceci peut être atteint soit avec la combinaison d'une fenêtre munie d'une protection externe ou interne ou en utilisant un vitrage à transmission variable. Le dimensionnement des protections solaires peut se faire par le biais d'outils graphiques largement disponibles dans la littérature [Twarowski, 1967], [Lavigne *et al.*, 1994]. Des outils numériques simplifiés sont aussi proposés pour éviter des simulations compliquées et permettre de tester rapidement de nouvelles configurations [AUDIENCE, 1999].

En parallèle, de nouveaux types de vitrages performants ont été mis au point. Ils présentent une valeur de  $U$  bien plus faible et une qualité de contrôle solaire plus adaptée aux besoins. Dans l'ensemble, la performance de contrôle solaire d'un vitrage est exprimée par un coefficient appelé facteur solaire ( $g$ ) qui est la somme de la transmission du rayonnement solaire énergétique et de la chaleur absorbée dans l'épaisseur de l'élément de vitrage et réémise vers l'intérieur. La technologie de vitrage sélectif en est l'exemple type, et des vitrages à faible émissivité voire électrochimiques sont maintenant disponibles dans le commerce. Des systèmes de vitrages intelligents ont également été conçus et mis en place dans des bâtiments récents. Ils fournissent de l'énergie solaire, protègent de la chaleur, optimise la lumière du jour et la ventilation naturelle ou hybride, le tout d'une manière intégrée.

Selon un rapport de l'industrie du verre, le remplacement en Europe du simple vitrage avec du double vitrage à faible émissivité sur le parc de bâtiments existants, permettrait d'économiser près de  $75.10^{15} J$ , soit 10,4 millions d'euros, et 57,7 millions de tonnes de  $CO_2$ . De la même façon, le remplacement des doubles vitrages classiques par du double vitrage à faible émissivité contribuerait à économiser près de  $340.10^{15} J$ , 3,95 millions d'euros et 24,6 millions de tonnes de  $CO_2$  [Santamouris, 2005].

La protection thermique du bâtiment ne fait plus automatiquement appel à une grande réflexion sur la conception. Le choix du type d'isolation thermique est maintenant très contraint par les réglementations et ne laisse de latitude que dans le choix de la nature des matériaux, puisque leurs performances doivent respecter les coefficients de référence. Sur-isoler n'a, en plus, pas un intérêt particulier. L'architecte, selon le type de bâtiment, peut prévoir la disposition d'espaces tampons, semi extérieurs, entre les espaces exigeant un grand niveau de confort et l'extérieur ou introduire des dispositifs d'enveloppe comme les doubles peaux.

### La technique de la régulation thermique

La technique de la régulation s'appuie sur le choix des matériaux de construction pour l'enveloppe et la structure interne du bâtiment en considérant leur inertie. Pour l'été, un

moyen très efficace pour réduire les températures de l'air intérieur et les pics de puissance de climatisation est de stocker l'excès de chaleur dans les matériaux de l'enveloppe et de la structure du bâtiment. Constituée d'un matériau à haute capacité thermique, tel que le béton banché, les briques et les tuiles, on place plutôt cette masse thermique dans les murs, cloisons, plafonds et planchers.

Pour qu'un matériau de paroi puisse stocker efficacement la chaleur, il doit avoir une capacité thermique et une conductivité thermique élevées, de sorte que la chaleur puisse pénétrer dans les murs pendant les périodes de stockage et déstockage. La répartition de la masse thermique est basée sur l'orientation des surfaces de composition lourde et le déphasage temporel souhaité.

Des matériaux à changement de phase intégrés dans les enduits ont aussi la possibilité d'augmenter la capacité de stockage de chaleur dans les bâtiments et de contribuer ainsi à réduire la température moyenne intérieure.

### **La technique de dissipation de la chaleur**

La dissipation de l'excès de chaleur dépend de deux aspects complémentaires : la présence d'un puits de chaleur dans l'environnement proche du bâti et la mise au point d'une technique de transfert appropriée entre le bâtiment et ce puits de chaleur. L'existence d'une forte différence de température entre le bâtiment et le puits facilite l'échange. Les procédés les plus courants pour la dissipation de chaleur sont l'évacuation par échanges convectifs et évaporatifs en utilisant l'air ou l'eau, la conduction par le sol ainsi que le rafraîchissement radiatif par échange avec le ciel. Le potentiel de dissipation de chaleur dépend sensiblement des conditions climatiques. Lorsque le transfert de chaleur est assisté de techniques mécaniques, on parle alors de climatisation hybride.

Le **refroidissement convectif** correspond à la ventilation. En plus de l'amélioration de la qualité de l'air cette méthode est très efficace pour abaisser à court terme la température d'air en le renouvelant, puis à long terme en évacuant la chaleur des parois par convection. Des vitesses supérieures à celles de l'air à l'intérieur du bâtiment peuvent améliorer le confort thermique si elles ne dépassent pas un certain seuil d'acceptance des occupants. La technique est généralement limitée à la surventilation nocturne mais l'augmentation de la ventilation diurne peut être utilisée lorsque la température ambiante extérieure est suffisamment inférieure à la température ambiante intérieure. Le refroidissement convectif peut être naturel, mécanique ou hybride. La ventilation naturelle est due soit au vent (différence de pression sur les façades extérieures), soit aux différences de température, ou les deux simultanément. Une sérieuse réduction du potentiel de refroidissement est observée dans les environnements urbains denses

à cause de la diminution importante de la vitesse du vent dans les villes. La stratégie de positionnement des ouvertures pour la ventilation naturelle dans les bâtiments est un aspect fondamental qui détermine l'efficacité du procédé.

Le **refroidissement évaporatif** s'applique à tous les procédés pour lesquels la chaleur sensible de l'air est échangée par la chaleur latente des gouttelettes d'eau ou des surfaces mouillées. Il existe une large gamme d'équipements techniques de climatisation utilisant cette technique ; leur efficacité s'est d'ailleurs nettement améliorée récemment. Le refroidissement par évaporation peut être direct ou indirect. Le procédé direct refroidit l'air au contact de l'eau et le transporte directement dans le bâtiment alors que le procédé indirect repose sur un système d'échangeur ou cette fois l'air du circuit secondaire qui sera véhiculé ne voit pas son humidité augmenter. De manière générale, le refroidissement évaporatif est efficace quand il y a une grande différence entre la température sèche et la température humide.

Le **refroidissement conductif** propose de profiter de la température du sol qui à une certaine profondeur est plus basse que la température d'air extérieur en été. Par conséquent, et du fait de sa capacité de stockage « infinie », le sol offre une sérieuse opportunité de dissiper ou de puiser de la chaleur soit par contact direct ou en utilisant des canalisations enterrées (puits canadien ou provençal). Les bâtiments en contact direct avec le sol offrent les avantages suivants :

- la limitation des infiltrations et les pertes de chaleur ;
- la protection au soleil et à la chaleur en été, au froid en hiver ;
- la réduction du bruit et des vibrations ;
- la protection au feu et aux tempêtes ;
- une grande inertie en partie basse du bâtiment.

Cependant quelques désavantages lui sont tout de même associés :

- la condensation intérieure ;
- la réponse lente aux conditions thermiques imposées ;
- l'appauvrissement en lumière naturelle ;
- la dégradation de la qualité de l'air intérieur.

Enfin, le **refroidissement radiatif** est basé sur le principe de perte de chaleur par rayonnement de grandes longueurs d'onde émise durant la nuit d'un bâtiment vers le ciel ayant une température beaucoup plus faible. Deux méthodes de refroidissement radiatif sont différenciées : la méthode directe passive ou la méthode hybride. La première consiste à favoriser l'exposition de l'enveloppe du bâtiment au ciel pendant la nuit. Pour des raisons physiques mais surtout géométriques, la partie de l'enveloppe du bâtiment la plus propice est la toiture et d'autant plus si elle est plane. Dans le second cas, l'élément rayonnant n'est pas l'enveloppe du bâtiment, mais en général une plaque métallique. Le fonctionnement de ce type

de radiateur est le principe inverse du collecteur d'un panneau solaire. L'air est refroidi par circulation dans le cadre de la plaque de métal avant d'être injecté dans le bâtiment. D'autres systèmes peuvent être des combinaisons de ces deux configurations.

### **La technique de récupération de la chaleur**

Parmi les techniques relatives présentées précédemment l'une d'entre elles est réversible : la technique du refroidissement conductif. En effet, la température du sol est aussi plus élevée que celle de l'air extérieur en hiver. En technique directe, on peut chercher à enterrer certaines parties du bâti pour limiter les déperditions par transmission thermiques à travers celles-ci. De plus, cette disposition peut permettre également de protéger le bâtiment des directions de courants d'air froid dominantes. En technique indirecte, on peut récupérer de la chaleur sur l'air intérieur renouvelé par l'intermédiaire des puits canadiens. On peut amplifier la récupération de chaleur en utilisant un système de pompe à chaleur géothermique. L'énergie est extraite à basse température (sol) et transférée vers l'intérieur du bâtiment à une température amplifiée grâce à un compresseur. Ce transfert se fait grâce à un fluide frigorigène, qui assure lors de ses changements de phase les transferts de chaleur. Malgré que ce système ne soit pas totalement passif, puisque un apport d'énergie est nécessaire au fonctionnement du compresseur, il permet de diviser, en moyenne, par trois la consommation d'énergie nécessaire au chauffage.

### **1.4.3 Conclusion**

L'enseignement principal tiré de cette partie est que le secteur du bâtiment est le premier responsable de l'augmentation de la facture énergétique totale, aussi bien au niveau mondial, européen et français. Parmi les différentes familles de bâtiments, le logement et les bâtiments de bureaux sont les plus consommateurs. Parmi les équipements relatifs au confort des usagers, les systèmes de climatisation, vont à l'encontre des enjeux énergétiques actuels puisqu'ils sont très énergivores et utilisés trop spontanément. Certaines directives incitent à l'utilisation de systèmes passifs intégrés aux bâtiments. La conception passive ou bioclimatique du bâtiment repose sur des principes liés à sa construction, comme l'augmentation de sa compacité ou de son inertie, ou sur des principes liés aux variables du climat extérieur, comme l'encouragement à la ventilation naturelle ou la gestion du rayonnement en été. Dans la partie suivante, nous nous intéressons au rôle des variables microclimatiques sur les consommations énergétiques des bâtiments, puisque dans les techniques de dimensionnement thermique, on ne prend pas en compte toutes les subtilités de l'environnement climatique extérieur qui a son rôle à jouer.

## 1.5 L'influence du microclimat urbain sur les consommations énergétiques du bâtiment

Nous dressons à présent un panorama des constats que l'on peut généraliser sur l'impact direct des phénomènes et des variables microclimatiques sur les consommations énergétiques associées au confort hygrothermique à l'intérieur des bâtiments. La température d'air, le rayonnement solaire, le rayonnement IRT, l'humidité et le vent sont les principaux paramètres qui définissent le climat local et qui sont responsables de la modulation du comportement énergétique d'un bâtiment.

### 1.5.1 La température d'air

Le phénomène d'ICU modifie les charges climatiques sollicitant les bâtiments et module ainsi les consommations d'énergie visant à rétablir les conditions de confort à l'intérieur de ceux-ci. Si en hiver, l'effet peut être positif sur les consommations des systèmes de chauffage, en été les bâtiments climatisés ont par contre une consommation énergétique accrue.

Des études sur la ville de Tokyo ont été réalisées par Ojima [Santamouris, 2005], où selon lui, la charge de refroidissement des bâtiments existants a augmenté jusqu'à 50% en moyenne en raison de l'ICU, de 1965 à 2000.

A Los Angeles, des comparaisons ont été faites entre l'évolution des températures d'air extérieures et celle des consommations d'énergie domestique dans des sites résidentiels et ont mis en évidence une corrélation entre ces deux grandeurs [Akbari *et al.*, 1992]. La puissance électrique de climatisation augmente de près de 540 MW par écart de degré de la température ambiante. De même, il a été calculé que les coûts d'électricité d'été pour les États-Unis dus à l'ICU seraient de plus d'un million de dollars par heure, soit plus de 1 milliard de dollars par an. On estime que 3% à 8% de la demande d'électricité urbaine est utilisée pour compenser uniquement cet effet.

Dans la ville d'Athènes, largement étudiée pour son ICU dû à une pollution importante, notamment par Hassid en 2000, on constate des températures d'air tellement différentes de celles observées en périphérie qu'en hiver pour l'hyper-centre une diminution de la charge de chauffage peut atteindre 30% à 50% par rapport à celle de la banlieue [Bozonnet *et al.*, 2006]. Pour l'été, des relevés pour un bâtiment de référence ont montré que les charges thermiques pouvaient être doublées [Santamouris, 2005], [Bozonnet *et al.*, 2006] avec un COP<sup>10</sup> des systèmes d'air conditionné souvent inférieur à 25% [Bozonnet *et al.*, 2006].

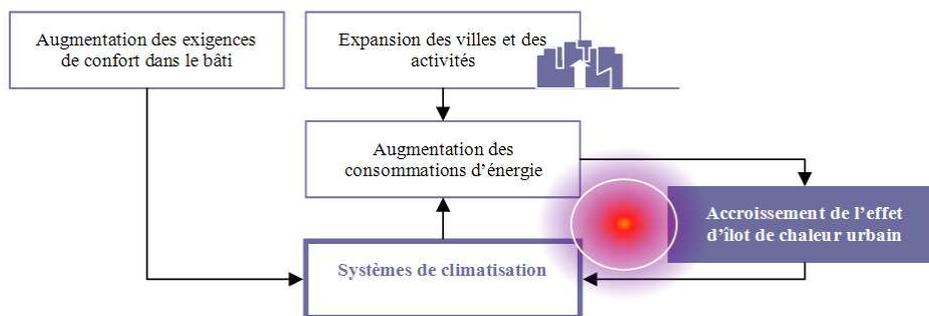
---

<sup>10</sup>Coefficient Of Performance

Comme il a pu déjà être dit dans les parties précédentes, parallèlement à l'augmentation des températures d'air moyennes, les maxima de température ont eux aussi augmenté; les charges climatiques instantanées dans les bâtiments alors plus importantes aux heures critiques entraînent une augmentation des niveaux de puissance de crête. Il est alors nécessaire de surdimensionner les équipements de génie climatique par rapport aux consommations courantes.

Depuis 1940, toujours à Los Angeles, une augmentation de  $2,8^{\circ}\text{C}$  du pic de température a été constatée, ce qui a entraîné une augmentation de la facture d'électricité de  $1,5\text{ GW}$ . Une étude d'Akbari sur six villes américaines en 2001 a montré que le pic de puissance augmente de 2 à 4% pour une augmentation de la température d'air de  $1^{\circ}\text{C}$ , au-delà d'un seuil de  $15^{\circ}\text{C}$  à  $20^{\circ}\text{C}$  [Bozonnet *et al.*, 2006].

Enfin, la densification des villes et la multiplication des équipements énergétiques augmentent l'énergie dissipée, et les systèmes de climatisation peuvent représenter une part significative d'autant plus que leur charge croît avec la température [Bozonnet, 2005]. On ne peut pas négliger ce phénomène de rebouclage perpétuel (voir figure 1.12) puisque la hausse des températures ambiantes en ville est très liée à la faible efficacité des climatiseurs. Les systèmes au COP les plus faibles nécessitent une augmentation de la taille et de la puissance électrique de fonctionnement; l'effet indirect du redimensionnement de ces systèmes est l'augmentation de la demande d'électricité et de la charge de climatisation du fait de l'augmentation des rejets thermiques [Santamouris, 2005].

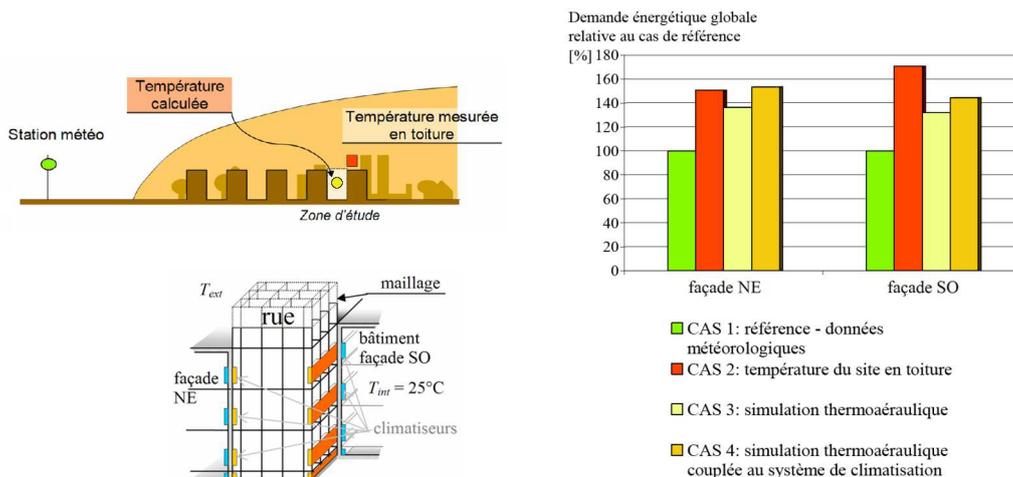


**Figure 1.12 :** *Accroissement de l'îlot de chaleur urbain par la puissance dissipée des systèmes de génie climatique* [Bozonnet, 2005]

Dans sa thèse [Bozonnet, 2005], Bozonnet a estimé l'impact de l'interaction entre le microclimat et le bâti sur la demande énergétique. Un modèle de type zonal a été développé et utilisé pour décrire la répartition des températures et des vitesses d'air dans la rue, avec un degré de précision intermédiaire entre la modélisation CFD et les approches nodales simplifiées.

Le site d'étude était une rue canyon dans le centre d'Athènes. Les simulations y ont été menées pour le mois d'août 2001 (28 jours), période durant laquelle des mesures météo in-situ avaient déjà été répertoriées. Un système de climatisation classique de façade avec des blocs externes et internes a été utilisé pour le calcul des charges intérieures, tout en considérant son rejet anthropique dans l'atmosphère urbaine, agissant ainsi sur les charges extérieures. La demande énergétique pour les charges climatiques en façade de bâtiment, calculée heure par heure puis intégrée sur la période, a été comparée par rapport aux méthodes de calcul classiques selon quatre niveaux de précision (figure 1.13) :

- Cas 1 : Selon la moyenne horaire de température d'air à la station météorologique ;
- Cas 2 : En tenant compte de l'effet d'ICU du site avec la température d'air mesurée en toiture ;
- Cas 3 : En tenant compte du détail des transferts thermoaérauliques par la modélisation zonale du volume d'air dans la rue ;
- Cas 4 : Identique au cas 3, mais en tenant compte en sus du rejet de charge anthropique dans la rue du fait du fonctionnement couplé des climatiseurs sur l'espace confiné du canyon.



**Figure 1.13 :** Etude de Bozonnet : Schématisation des 4 références de température d'air - Modélisation zonale dans le canyon urbain - Comparaison des 4 types d'évaluation des charges climatiques selon les deux orientations des façades [Bozonnet, 2005]

Les résultats obtenus ont démontré l'importance de la morphologie de la rue canyon et de l'effet d'ICU (cas 3) sur l'accroissement de la demande énergétique avec 36% de plus pour la façade Nord-Est et 32% de plus pour la façade Sud-Ouest par rapport au cas de référence (cas 1). Enfin, cette simulation a permis de quantifier l'impact relatif du fonctionnement et des rejets thermiques extérieurs de la climatisation (cas 4) sur les conditions de température extérieure ; la demande énergétique en façade du bâtiment s'est en effet révélée supérieure de

53% (Nord-Est) et de 44% (Sud-Ouest) par rapport au même cas de référence. Finalement, le choix d'une température extérieure fixée peut donner des résultats fortement sous-estimés (cas de référence) ou fortement surestimés (cas de la température en toiture).

### 1.5.2 Les flux solaires

Le potentiel énergétique d'une ville ou de plusieurs bâtiments peut être évalué au prorata des quantités d'énergie solaire atteignant les surfaces d'enveloppe de ces mêmes bâtiments. En effet, dans le bilan énergétique d'une surface urbaine, les échanges radiatifs de courtes longueurs d'onde représentent souvent en valeur absolue la composante la plus forte, à partir du lever du soleil. On constate en outre que les puissances reçues par les façades Sud, Sud-Est et Sud-Ouest des bâtiments sont des sources d'énergie facilement utilisables au moment où l'on en a le plus besoin, car les pics annuels de réception correspondent aux pics annuels de demande de chauffage. Le rayonnement solaire est finalement un flux de chaleur positif pour le bâtiment, il ne peut être néfaste qu'en été.

Les apports solaires sont directs ou diffus (réflexions atmosphériques dans toutes les directions), mais sont aussi dus aux réflexions s'opérant dans l'environnement proche du bâtiment en fonction de propriétés réfléchives des façades vues. Les éléments déterminants pour la diminution des charges de climatisation pour le bâtiment sont alors son taux de protection solaire, le ratio de surface et la qualité photométrique de ses vitrages, et, sa compacité.

Pour évaluer les apports énergétiques solaires réels avec des outils de simulation, la connaissance de la géométrie et de la nature des surfaces environnant le bâtiment étudié est indispensable. En effet, pour accéder à l'ensoleillement d'une surface réceptrice, il faut détecter l'éventuelle présence de masques, variable au cours de la journée, et pour évaluer la participation des inter-réflexions, il faut au préalable faire une analyse d'intervisibilité entre l'ensemble des surfaces de la scène urbaine à travers un calcul de facteurs de forme.

### 1.5.3 Les échanges radiatifs infrarouges

Malgré que le bilan radiatif soit fortement marqué par les flux solaires pendant la durée du jour, la partie grande longueur d'onde ou IRT a un impact non négligeable dans les apports ou la restitution de chaleur. Cependant, on trouve peu d'études démontrant une relation directe entre l'intensité de ces échanges et les consommations énergétiques des bâtiments. Ceci est dû au fait que l'intensité de ces échanges est principalement imputable au champ de température des surfaces environnantes qu'il est difficile de mesurer dans son intégralité. Les techniques de télédétection donnent de l'information sur un grand domaine mais seulement en 2 dimensions, alors que les techniques de thermographie IRT peuvent donner de l'information fine mais on doit réaliser les mesures à partir de nombreux points d'observation. Les techniques de

simulation semblent les plus adaptées pour étudier ce genre de problème mais nécessite un couplage inter-phénomènes.

#### 1.5.4 Influence du vent

L'écoulement du vent constitue un autre paramètre important à prendre en compte lors de la conception énergétique des espaces urbains. Son influence est à la fois associée aux échanges convectifs à la surface extérieure de l'enveloppe du bâtiment et au flux thermique généré par le renouvellement d'air des espaces intérieurs. Les variables climatiques les plus importantes liées aux conditions de vent sont la vitesse d'air et le coefficient de convection. Ces deux grandeurs peuvent être considérées comme liées, en tout cas beaucoup d'auteurs cherchent à les corrélérer directement en particulier en thermique du bâtiment [Vinet, 2000].

Les champs de pression influent sur le potentiel de ventilation naturelle à l'intérieur du bâti tandis que les flux convectifs ont une part importante dans la charge et la décharge d'énergie dans les parois des bâtiments. De plus, les courants d'air à l'échelle du quartier sont les vecteurs du transport d'énergie (masse d'air chauffées ou refroidies un peu plus loin), d'évacuation ou d'apport de polluants.

Des études spécifiques ont déjà été réalisées sur la réduction du vent incident dans le cas de bâtiments utilisant la ventilation naturelle. Les auteurs ont noté que le potentiel de ventilation dans des configurations simples de ventilation traversante est sérieusement réduit dans des morphologies urbaines de type canyon. Pour la ventilation non-traversante, le potentiel de ventilation est diminué de près de cinq fois, tandis que pour la ventilation traversante, le potentiel est réduit jusqu'à dix fois. Geros, dans son travail de thèse [Santamouris, 2005], a estimé la réduction de la performance de la ventilation nocturne dans le cas de la ventilation naturelle des immeubles de canyons urbains. L'étude a été réalisée pour 10 canyons urbains où les données météorologiques et les données énergétiques ont été mesurées. Il a été constaté que dans le cas de la ventilation de locaux aux façades mono-orientée (ventilation non-traversante), la charge de refroidissement de ces bâtiments situés dans des canyons est 6% à 89% plus élevée que celle de bâtiments isolés, tandis que dans des configurations de ventilation traversante, la charge de refroidissement augmente de 18% à 72%. On peut en conclure que l'effet canyon, en ne considérant que les effets liés au vent, dégrade considérablement les conditions de ventilation naturelle et implique dans toutes les configurations de construction une augmentation de la charge de climatisation.

L'orientation et la forme du bâtiment peuvent contribuer à la création d'écoulements favorisant une bonne gestion énergétique. Des mesures faites pendant l'été à Londres montrent que la ventilation nocturne par effet de cheminée combinée à une optimisation de la forme

du bâti pouvait permettre de maintenir un niveau de température intérieure de moins de 24 °C, ce qui équivaut à une consommation d'énergie de rafraîchissement réduite de 90% [Bozonnet *et al.*, 2006].

Les conseils habituels en terme de régulation du vent autour des bâtiments sont qu'il est souhaitable de réduire les vitesses en hiver pour éviter le phénomène de perte de chaleur, tandis que pendant l'été, en particulier pour les climats où la température d'air est bien moins élevée que les températures radiantes, on doit favoriser le potentiel de ventilation naturelle en canalisant les écoulements en adéquation avec la conception des enveloppes bâties. Ces conseils sont un peu plus détaillés dans [Brophy *et al.*, 2000]. Pour réduire la vitesse du vent afin d'abriter les zones bâties, le concepteur peut :

- configurer les bâtiments s'autoprotégeant contre le vent sans créer d'effet canalisation ;
- utiliser des brise-vents comme la végétation ou des dispositifs architecturaux pour assurer la protection de vents dominants saisonniers ;
- agir sur la topographie de l'espace environnant à l'aide de monticules de terre ou de changements dans les niveaux des espaces pratiqués.

Pour augmenter la vitesse du vent favorisant la ventilation naturelle, le concepteur peut :

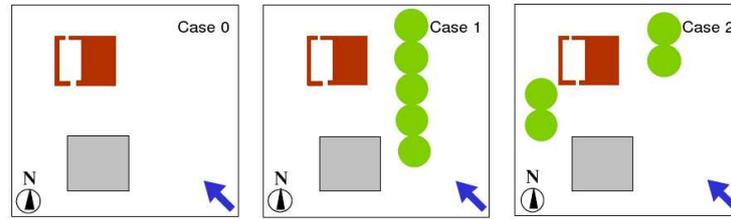
- utiliser la végétation, ou les éléments architecturaux et la configuration des alignements de bâtiments pour diriger les vents dominants saisonniers ;
- rechercher les espaces publics où ils bénéficieront des mouvements d'air de l'échelle méso comme les brises urbaines, les effets de vallée, de pentes.

Dans une étude réalisée par Jiang et Chen [Bozonnet *et al.*, 2006], une modélisation fine a été réalisée sur un ensemble de bâtiments pour lesquels l'objectif initial était de prédire le potentiel de ventilation de logements. Une analyse basée sur la comparaison entre données expérimentales et simulées a par ailleurs montré l'importance de la variation de la direction du vent. En effet, l'étude numérique a été simplifiée à des conditions de vent de Nord-Ouest constant alors que le cas réel (mesures) regroupait des vents de direction variable entre le Nord et l'Ouest : ainsi l'écart moyen de pression pour la ventilation d'un appartement est surestimé d'un facteur 4 quand il est estimé de manière numérique.

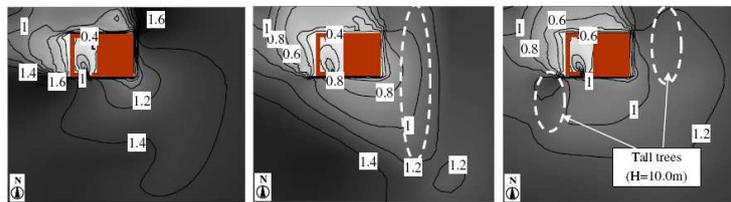
Mochida a réalisé une étude assez approfondie sur l'impact de l'environnement proche sur l'efficacité du procédé de ventilation naturelle dans le bâtiment (figure 1.14).

Le bâtiment étudié était un bâtiment instrumenté sur le campus de l'Université de Tohoku au Japon. L'analyse des consommations énergétiques et de la climatisation a été plus précisément effectuée sur une chambre à l'étage. Le protocole de simulation repose sur deux outils :

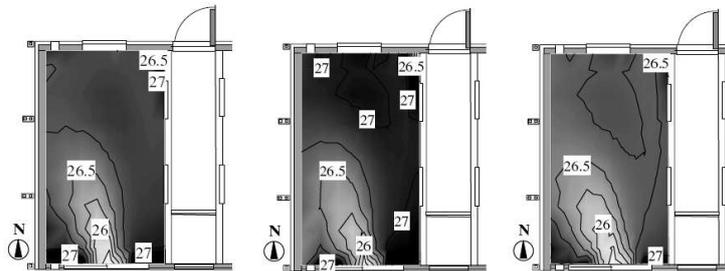
- un outil de CFD disposant d'un modèle d'écoulement dans les arbres et couplé avec un modèle de conduction et rayonnement ;



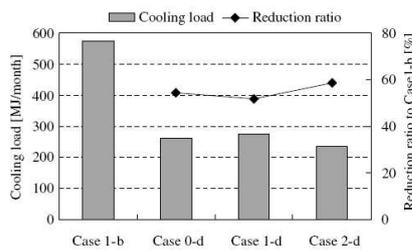
I - Disposition des arbres



II - Simulation aéralique extérieure



III - Simulation aéralique intérieure



IV - Bilan des charges de climatisation

**Cas d'étude pour les charges de climatisation**

- a : pas de ventilation traversante
- b : idem (a) et climatisation active quand  $PMV > 0,5$
- c : ventilation traversante continue
- d : idem (c) et climatisation active quand  $PMV > 0,5$

Figure 1.14 : Influence des arbres et de la ventilation naturelle sur les charges de climatisation, adapté de [Mochida et al., 2006]

- un outil pour le bilan thermique du bâtiment (TRNSYS) qui se base sur un module de rayonnement et un module de traitement de bâtiment multizone ; celui de l'étude est découpé en 10 zones.

Le protocole de simulation est basé sur deux échelles différentes et organisé selon quatre étapes :

- une première analyse CFD est réalisée en situation isotherme dans un grand domaine englobant le site ;
- un bilan thermique en régime instationnaire pour le sol et les surfaces du bâtiment dans le sous-domaine comprenant le bâtiment et son espace contigu ;
- une deuxième analyse CFD est réalisée en situation non-isotherme dans le même sous-domaine en utilisant les résultats des étapes 1 et 2 comme conditions aux limites ;
- le taux de ventilation traversante est finalement calculé par CFD ainsi que le bilan thermoradiatif à l'intérieur du bâtiment. Le calcul de la charge de climatisation est alors déduit.

Les résultats obtenus par cette étude sont multiples. Outre une bonne correspondance entre les mesures effectuées à l'intérieur du bâtiment et les simulations, l'auteur tire des enseignements sur l'effet de l'activation ou non de la ventilation naturelle traversante combinée à la configuration des arbres sur la charge de climatisation pour tout un mois d'août. Le principe de calcul est que la climatisation est active quand l'évaluation du confort thermique intérieur dépasse le seuil acceptable par les usagers (basé sur l'indice PMV). On économise beaucoup d'énergie de climatisation en tirant profit de la ventilation naturelle traversante, et encore un peu plus en réarrangeant la disposition des arbres.

### 1.5.5 Les transferts d'humidité

Dans la littérature, peu d'études donnent explicitement des résultats sur l'influence du taux d'humidité extérieur sur les consommations énergétiques des bâtiments. En fait, la charge de climatisation est souvent assimilée à la charge sensible et non à la charge latente qui concerne exclusivement la déshumidification de l'air intérieur en saison chaude. Les principaux travaux sur ce sujet se sont intéressés à l'aspect négatif du rejet d'humidité dans l'air pour des climats tropicaux humides.

### 1.5.6 L'interaction des paramètres climatiques

L'équipe de recherche en thermique du bâtiment de l'Université de Séville a réalisé beaucoup d'études sur la variation de la performance énergétique des bâtiments en fonction du climat. Parmi celles-ci, ils se sont attachés à la modélisation des environnements urbains pour la simulation microclimatique et aux méthodes d'estimation de l'influence de l'environnement sur le comportement énergétique des bâtiments [Sanchez de la Flor et Alvarez Dominguez, 2004], [Sanchez de la Flor *et al.*, 2006]. Un modèle de rue canyon (« GreenCanyon »), développé

dans le cadre d'un projet européen (« Greencode ») a été validé par deux campagnes de mesure, l'une en vraie grandeur et l'autre sur une maquette d'étude à échelle réduite où le rapport d'aspect des canyons était variable. Ils ont consacré une partie de ces études au développement d'une méthodologie d'évaluation de l'influence des conditions microclimatiques sur les consommations énergétiques des bâtiments. Un indice quantitatif synthétique a été construit : le CSI (Climatic Severity Index) ou *indice de sévérité climatique*. Sa définition repose sur deux hypothèses :

- deux types de conditions climatiques peuvent conduire à la même dépense énergétique d'un bâtiment et par conséquent être considérées comme équivalentes ; elles auront le même CSI d'hiver si la dépense totale est la même pour le chauffage ou le même CSI d'été si la dépense totale est la même pour la climatisation ;
- on peut estimer qu'un premier type de conditions climatiques est X fois plus sévère qu'un deuxième si le rapport entre les consommations énergétiques d'un bâtiment est X fois plus élevé dans le premier cas que dans le deuxième.

Le CSI est alors défini comme un indice adimensionnel représentant le rapport entre la charge de chauffage et de climatisation d'un bâtiment dans un lieu au climat spécifique et celle correspondant à une localité et un climat de référence, tout en restant indépendant de la nature du bâtiment. Cet indice est exprimé par les auteurs sous la forme suivante :

$$CSI = a.DD + b.(n/N) + c.DD^2 + d.(n/N)^2 + e$$

$DD$  : « Degree Days » ou *degrés jours*<sup>11</sup> de chauffage ou climatisation moyens saisonniers

$n/N$  : rapport entre le nombre d'heures d'insolation réel  $n$  et le nombre maximum potentiel pour le mois  $N$

$a, b, c, d, e$  : coefficients empiriques tabulés

Le travail a alors consisté à évaluer l'influence de trois types de modifications climatiques sur les consommations énergétiques d'un bâtiment en calculant le différentiel de CSI :

- la modification de la température d'air, liée aux degrés-jours ;
- la modification du rayonnement solaire, liée au rapport  $n/N$  ;
- la modification des températures de surface, que l'on peut exprimer par une relation empirique entre les différents paramètres géométriques et climatiques.

<sup>11</sup>Les degrés-jours de chauffage correspondent à la somme des écarts entre une température intérieure conventionnelle de référence ( $T_{ic} = 18^{\circ}C, 19^{\circ}C$  ou  $20^{\circ}C$ ) et la température extérieure moyenne journalière. Lorsque la température extérieure est supérieure ou égale à  $T_{ic}$ , l'écart est compté nul. Les écarts quotidiens sont cumulés mensuellement, annuellement ou sur la période annuelle de chauffage. Ils servent à évaluer la déperdition énergétique totale par les parois et par renouvellement d'air et renseignent sur la sévérité du climat.

On constate dans le premier cas, qu'une baisse de  $10^{\circ}\text{C}$  de la température d'air extérieur correspond à une économie de charge de climatisation de 6% par rapport au cas de référence, sur la base d'une température à l'intérieur des bâtiments de  $20^{\circ}\text{C}$ .

Dans le deuxième cas, on décompose le calcul pour chaque élément bâti : toitures, murs extérieurs et fenêtres. Pour une baisse de 10% du rayonnement solaire incident, les consommations sont réduites de façon inversement proportionnelle au taux de vitrage du bâti (3 configurations testées dans l'étude 10%, 50% et 90%)

On obtient finalement des variations de consommation proportionnelles à la variation de l'écart  $T_s - T_{air}$ . Les économies sont plus importantes pour les façades les plus vitrées mais restent assez faibles dans l'ensemble.

Le principal problème de cette méthode réside dans le fait que les modifications climatiques peuvent affecter différemment chaque paroi du bâtiment, par exemple du simple fait de l'orientation ; la méthode n'est alors pas directement applicable.

### 1.5.7 Conclusion

Nous avons recensé dans cette partie quelques données d'études parmi de nombreuses qui confirment l'importance de l'interaction entre microclimat, système de conditionnement des ambiances habitées et demande énergétique. On remarque que les aspects les plus documentés sont ceux concernant l'influence de la température d'air, que ce soit des données intégrées concernant l'îlot de chaleur ou des données purement microclimatiques, et la ventilation naturelle. On a accès à des données quantitatives établies soit au cours de campagnes de mesures soit à partir de résultats de simulation (CFD pour la plupart) qui montrent une forte possibilité de réduire les consommations énergétiques surtout associées à la climatisation. La problématique du chauffage reste moins abordée. En ce qui concerne les flux solaires, nous n'avons pas présenté de données quantitatives. Ce choix est justifié par le fait que les concepteurs disposent d'outils informatiques, d'abaques et de méthode de calcul pour évaluer l'influence des flux solaires directement dans leurs projets. De ce fait, les études à ce sujet ne sont pas d'ordre général mais plutôt très orientées en fonction de l'étude.

## 1.6 L'influence des aménagements sur les consommations énergétiques des bâtiments

Des études cherchent à quantifier l'influence de la modification d'éléments d'enveloppe, ou de la configuration intérieure d'un bâtiment sur sa propre consommation d'énergie [Filfi, 2006]. La partie suivante vise plutôt à répertorier l'influence des aménagements extérieurs du bâtiment en supposant que la maîtrise de l'enveloppe est bien connue et appartient au savoir faire de l'architecte et du bureau d'étude. On s'est intéressé dans la partie précédente à l'influence du microclimat sur les consommations énergétiques du bâtiment, on ira ici un

peu plus loin en répertoriant les études visant à évaluer l'influence directe des éléments d'aménagement, comme les arbres, les parcs, l'eau et les matériaux, sur le comportement énergétique des bâtiments.

L'American Forestry Association, en 1985, a estimé que le potentiel économique d'un arbre d'âge adulte était de 273 dollars par an. Le détail de cette estimation correspond à des réductions de coûts moyens annuels de 73 dollars pour l'air conditionné, de 75 dollars pour l'entretien indirect du sol et l'érosion, de 50 dollars pour la lutte contre la pollution atmosphérique et de 75 dollars pour le maintien de l'écosystème (refuge faunique) [Akbari *et al.*, 1992].

Les arbres ont un effet bénéfique direct sur la consommation énergétique des bâtiments par l'écran qu'ils constituent au rayonnement solaire et au vent, quand ils sont placés devant. A l'inverse, ils peuvent augmenter la charge latente des systèmes d'air conditionné par leur production d'humidité par évapotranspiration.

Akbari a simulé grâce à l'outil numérique DOE-2 les masques dus aux arbres au fil des saisons. Les résultats sont exprimés sous forme de tableaux et d'une méthode d'exploitation qui permet pour différents types de bâtiments d'évaluer l'effet de l'utilisation d'arbres comme écran solaire. Pour les simulations, ces arbres sont placés le long de la façade sud, de manière à masquer les fenêtres et à ombrager une partie du toit. Ces résultats, s'ils sont difficiles à transposer, permettent néanmoins de conclure que l'utilisation des arbres est un moyen efficace de réduction de la consommation d'énergie nécessaire au rafraîchissement des bâtiments [Bozonnet *et al.*, 2006].

La végétation et une bonne implantation des bâtiments permettent une réduction de la consommation d'énergie en particulier en limitant l'usage de la climatisation. En effet, plusieurs auteurs soulignent le rôle de la végétation dans la qualité de l'environnement urbain. Les parcs même très grands ont peu d'influence sur le climat d'une ville mais ils peuvent modifier le microclimat autour d'un bâtiment en modulant l'exposition solaire des façades, la vitesse du vent, les températures de surface. La végétation absorbe une part d'énergie solaire (1 à 2% convertis en énergie chimique et évaporation de l'eau entraînant un rafraîchissement de l'air et une augmentation de l'humidité). En adaptant la végétation à l'effet recherché (ombrage avec une canopée dense, grandes plantes à feuillage peu dense pour la porosité à l'air, isolation thermique dans le cas des toits végétalisés, évapotranspiration) on peut réduire l'énergie nécessaire à la climatisation de 15 à 35% [Bozonnet *et al.*, 2006].

Des simulations effectuées par Sailor [Santamouris, 2005] ont révélé un potentiel de réduction de pic de température supérieur à 1,3 °C en été, à Los Angeles, par la mise en œuvre d'une

augmentation de 14% de la couverture végétale. Il a également évalué l'impact de la végétation ajoutée sur les degrés-jours de chauffage et les degrés-jours de refroidissement, dans des villes situées aux États-Unis. Il a indiqué que l'augmentation de la couverture végétale de 15% à proximité des bâtiments dans les quartiers résidentiels, permettait de réduire le nombre de degrés-jours de refroidissement de 2 à 5% et d'augmenter le nombre de degrés-jours de chauffage de 0,5 à 3,5%. Selon l'auteur, on pourrait s'attendre à l'échelle de la ville à économiser jusqu'à 5% de l'utilisation de l'air conditionné.

L'académie nationale des sciences des États-Unis, a indiqué que la plantation de 100 millions d'arbres combinée à la mise en œuvre de surfaces de revêtements urbains clairs pourrait réduire la consommation d'électricité de 50 milliards de *kWh* par an. Ceci est équivalent à 2% de la production annuelle d'électricité des États-Unis. Des simulations d'Akbari, mettent en évidence l'effet combiné de l'ombrage et de l'évapotranspiration de la végétation sur la demande d'énergie des bâtiments dans plusieurs villes des États-Unis [Akbari *et al.*, 1992]. Il est constaté que pour l'addition d'un arbre par maison, les économies d'énergie pour la climatisation vont de 12 à 24%, et que l'addition de trois arbres par maison peut réduire la charge de climatisation de 17 à 57% ; l'ombrage ne représente que 10 à 35% du total des économies d'énergie de refroidissement. Simpson et McPherson ont calculé la valeur de l'ombrage des arbres dans 254 propriétés résidentielles à Sacramento, en Californie [Santamouris, 2005]. Une valeur moyenne de 3,1 arbres doit être utilisée dans ces résidences pour réduire le pic annuel de climatisation de 153 *kWh* (7,1%).

Dans une étude de 2006, Yu propose d'étudier l'influence des parcs sur la consommation énergétique des bâtiments à Singapour [Yu et Hien, 2006]. Son étude regroupe trois parties qui consistent à :

1. effectuer des mesures météorologiques dans l'environnement urbain à l'intérieur et à l'extérieur de 2 parcs, à savoir la réserve naturelle Bukit Batok Nature Park de 36 *ha* (BBNP) et le jardin public Clementi Woods Park de 12 *ha* (CWP)) ainsi que celle des propriétés de densité de végétation à l'échelle des deux parcs ;
2. effectuer des simulations des consommations énergétiques d'un bâtiment test (bâtiment commercial de 8 étages) à proximité du BBNP avec l'outil TAS, et comme conditions aux limites les données météo relevées par les capteurs les plus proches ;
3. effectuer des simulations environnementales avec l'outil ENVI-Met pour comparer trois environnements urbains hypothétiques liés à trois configurations concernant uniquement le CWP à savoir en présence du parc, avec un vide urbain à la place du parc et avec des bâtiments à la place du parc.

Les auteurs montrent aussi que l'on peut réaliser 10% d'économie de climatisation entre un bâtiment dans le parc et un bâtiment de référence situé à 400m à l'extérieur du parc. De même

on réalise 9%, 7% et 4% d'économie entre respectivement un bâtiment situé à 100m, 200m et 300m à l'extérieur.

En ce qui concerne le recours aux étendues d'eau en milieu urbain, des calculs référencés à des conditions climatiques moyennes en été donnent des taux d'évaporation correspondant à des puissances de climatisation potentielles de  $150 \text{ W.m}^2$  à  $200 \text{ W.m}^2$  [Santamouris, 2005].

La couleur des façades d'un bâtiment influe sur ses performances thermiques. Givoni a réalisé beaucoup de tests dans les années 1970 sur les couleurs, en particulier le blanc et le gris. Des différences de température de l'air dans le bâtiment de  $3^\circ \text{C}$  (mesure à 0,1m du plafond) et de  $1^\circ \text{C}$  (mesure à 1.2m du sol) ont été mises en évidence; les températures étant, comme attendu, plus élevées avec les façades grises. Les expérimentations montrent également que l'influence de la couleur varie avec la résistance thermique et la conductivité thermique des murs (pour une faible valeur de coefficient global de déperdition  $U$  et une forte conductivité thermique, la couleur des murs extérieurs est moins importante que dans le cas contraire). L'effet de la couleur des parois extérieures s'estompe si le local était ventilé ou en présence d'apports solaires directs. En effet, dans ces cas, le poids relatif des apports par les parois opaques par rapport aux autres apports est moindre [Santamouris, 2005]. Grâce à une expérimentation réalisée à Hong-Kong en 2005, Cheng confirme ces résultats. La couleur de la façade n'influe sur la température intérieure que si sa résistance thermique est faible. Dans ce cas, la couleur blanche est préférable car la température intérieure reste inférieure de 1 à  $2^\circ \text{C}$  à la température extérieure (pour une orientation favorable) et la nuit, le rafraîchissement est plus efficace [Santamouris, 2005]. Lorsque la résistance thermique de la façade est importante, celle-ci retarde les pics de température en journée et ralentit le rafraîchissement nocturne. Il est donc important de choisir l'un ou l'autre des paramètres en fonction des usages du bâtiment.

En utilisant des *matériaux froids* en milieu urbain, on contribue à abaisser les températures de surface qui affectent les échanges thermiques avec l'air, à améliorer le confort extérieur, et à diminuer la température ambiante. Il a été montré que d'importants gains énergétiques sont possibles quand des surfaces de couleurs claires sont utilisées en combinaison avec la plantation de nouveaux arbres. Des simulations numériques effectuées par Rosenfeld et al. en 1998 [Santamouris, 2005], ont montré que des toitures blanches cumulées à l'ombrage des arbres à Los Angeles, Etats-Unis, permettraient de réduire la charge de climatisation de 18%, soit de 1,04 milliards de  $kWh$ , ce qui correspond à un gain financier de près de 100 millions de dollars par an.

Une étude d'Akbari [Bozonnet et al., 2006] a montré que l'application d'un revêtement d'albédo élevé sur des locaux scolaires a permis une économie d'énergie de 35% sur l'énergie

consommée par la climatisation et une diminution d'environ 20% sur la puissance crête de climatisation.

Un grand nombre d'études expérimentales et numériques nord-américaines ont montré l'efficacité de l'utilisation de matériaux réfléchissants pour les toitures. Ces études portent en général sur des bâtiments commerciaux et des bâtiments publics dont les toits ont été recouverts de revêtements blancs. Les économies faites sur les consommations d'énergie nécessaire au rafraîchissement de ces bâtiments variaient selon les auteurs et les cas d'étude entre 15 et 46% [Bozonnet *et al.*, 2006].

L'utilisation de matériaux de toiture à fort albédo a un effet direct et un effet indirect sur la consommation énergétique nécessaire au rafraîchissement des bâtiments. En effet, elle affecte directement la température de l'élément d'enveloppe que constitue le toit, et donc les flux conduits vers l'ambiance intérieure, de plus, elle participe à la réduction de l'ICU et ainsi à une température d'air extérieur moindre à laquelle est soumis le bâtiment (convection, ventilation) [Bozonnet *et al.*, 2006].

Abkari note dans une étude de 2003 que dans le cas de bâtiments soumis à des apports internes importants, le bénéfice relatif des toits réfléchissants combiné à une forte isolation des parois n'est pas évident. Ces bâtiments utilisant le traitement d'air un très grand nombre de jours par an, l'isolation réduit son utilisation quand la température extérieure est supérieure à la température intérieure, mais dans le cas contraire, l'isolation retarde la perte de chaleur par l'enveloppe. L'impact est alors négatif sur la consommation d'énergie. Cet effet est moins prononcé pour des toitures sombres [Bozonnet *et al.*, 2006].

Par ailleurs, les toitures végétales participent à la modulation des températures dans les espaces intérieurs adjacents. Indépendamment du type d'isolation du toit, les toitures végétales participent à la réduction de l'énergie de chauffage et de rafraîchissement. Cette économie peut, selon les auteurs, atteindre 37% pour des bâtiments non isolés et 48% avec l'utilisation en sus de la ventilation nocturne. Dans le cas de bâtiments moyennement isolés, cette économie varie de 4% à 7%. Par contre, dans le cas de bâtiments fortement isolés, l'impact est inférieur à 2%. Notons que cette étude, contrairement à celles conduites par Akbari en 2005, n'inclut que les économies directement induites par le dispositif et pas celles liées à la réduction du phénomène d'ICU.

D'autres auteurs comme Zhou [Bozonnet *et al.*, 2006] ont étudié l'effet de la vaporisation d'eau, dans le cas de bâtiments avec une forte isolation thermique. Ils concluent que cette technique n'a pas grand intérêt du fait de la forte isolation et de la quantité d'eau qui doit être vaporisée.

Akbari et al. en 2005 [Bozonnet *et al.*, 2006] proposent des tableaux classés par degrés-jours de chauffage ou de rafraîchissement pour estimer le potentiel de réduction de l'ICU offert par différentes stratégies visant à réduire l'énergie nécessaire au rafraîchissement des bâtiments, à savoir les toits à forte réflectivité solaire, l'ombrage par des arbres, les revêtements de sol réfléchissants, la végétation urbaine. Ces tableaux fournissent des estimations des économies induites directement (traitement de l'enveloppe) et indirectement (réduction de la température d'air). Pour y aboutir, les auteurs ont analysé trois types de bâtiments qui offrent le plus grand potentiel d'économie d'énergie : le logement, les bureaux et les commerces, classés en fonction de leur période de construction (avant ou après 1980), type constructif et de leur source d'énergie (gaz ou électricité). Des caractéristiques types ont été définies et l'impact des stratégies sur la demande d'énergie (moyenne et crête) a été simulé à l'aide de DOE-2 pour des conditions météorologiques de 240 sites à travers les USA. Les résultats montrent que pour tous les types de bâtiments, plus de 75% des économies d'énergies sont issues des effets directs des toits réfléchissants et des ombrages des bâtiments. Le même type d'étude a été appliqué pour des bâtiments situés à Toronto, au Canada (Abkari, 2004) et cette fois, 88% des économies d'énergies sont attribuées à des effets directs. Les simulations sont complétées par des études expérimentales (Abkari et al. en 2005), (Abkari et al. en 2003) qui viennent corroborer les résultats.

## 1.7 Problématique

### 1.7.1 Les interactions climatiques entre le bâtiment et son environnement proche

Les villes sont des agrégations de constructions érigées, de mobilier urbain, d'éléments végétaux et de surfaces naturelles et artificielles disposées de manière hétérogène. Leur densification, conjuguée aux modes actuels d'urbanisation contribuent largement à l'augmentation des températures d'air et des surfaces par rapport à celles constatées dans les zones rurales. Ce phénomène d'ICU est décrit en considérant que la variabilité spatiale des données physiques est susceptible d'être réduite ou agrégée à mesure que l'échelle spatiale d'observation augmente. Beaucoup de travaux traitent ces effets d'ICU à l'échelle sub-méso, et les identifient comme responsables d'une modification importante du bilan énergétique local, entraînant la modification des conditions de confort en espace extérieur et l'augmentation de la consommation des bâtiments. De plus, les perturbations aérodynamiques liées à la rugosité d'ensemble, les mouvements atmosphériques d'air et d'énergie sont modifiés localement par cette hétérogénéité présente dans la canopée urbaine. C'est pourquoi, un microclimat créé par des aménagements naturels peut être bénéfique à la fois pour le confort et la réduction des consommations énergétiques des bâtiments.

L'enveloppe extérieure des bâtiments n'est pas le seul élément interagissant avec le climat. Les conditions intérieures, l'inertie thermique sont aussi des éléments y participant. Le niveau de confort requis, l'occupation du bâtiment et les équipements techniques modifient les paramètres physiques de l'ambiance intérieure et agissant indirectement sur les conditions extérieures proches. N'oublions pas enfin la contribution directe des rejets anthropogéniques dus aux équipements de génie climatique.

La consommation d'énergie dans les bâtiments est aujourd'hui très importante et devrait encore croître en raison de l'évolution des exigences des usagers et de l'augmentation permanente de la population mondiale. L'air conditionné pénètre de plus en plus le marché et contribue fortement à l'accroissement de la demande globale d'énergie. Au cours des dernières années, un important investissement dans la recherche fondamentale et industrielle a été initié et a conduit au développement de nouveaux matériaux, systèmes et techniques voués à la haute performance énergétique ; les systèmes de refroidissement hybrides ou complètement passifs sont maintenant plus répandus. Toutefois, ils ne sont peut-être pas encore assez accessibles et techniquement aboutis pour limiter le recours au traitement d'air et à la climatisation, en particulier dans les bâtiments tertiaires.

Dans la pratique courante du génie climatique, le calcul des charges s'appliquant au bâti est réalisé à partir de données météorologiques de référence fournies par la réglementation thermique pour des grandes zones climatiques. Il est possible d'affiner ces données en consultant celles des stations météorologiques les plus proches de la construction qui se situent en général en périphérie des villes sur des sites dégagés comme les zones aéroportuaires. Du fait de l'ICU et des effets microclimatiques dans les zones denses évoqués précédemment, les conditions thermiques, radiatives, aérodynamiques et hydriques extérieures et donc les charges climatiques effectives peuvent être fortement différentes entre celles de la station météorologiques et celles du site de la construction. Ceci témoigne que l'on peut difficilement utiliser les données de la méso-échelle pour calculer les flux énergétiques réels s'opérant à l'interface des bâtiments et de la même façon les consommations énergétiques induites sans commettre des erreurs importantes ; d'où la nécessité de la prise en compte de la ville et de l'environnement proche pour réaliser des calculs de comportement thermique réel des bâtiments.

### **1.7.2 Les outils de simulation**

L'étude bibliographique effectuée au début de ce chapitre montre qu'il existe un grand nombre de résultats d'études auxquelles on pourrait se référer. Seulement ces données sont contextuelles : elles s'appliquent à une large gamme de climats, à des morphologies urbaines particulières et à différentes typologies de bâtiments. Les modes opératoires de ces études ne

sont pas transparents et contraignent à une interpolation ou une extrapolation de l'information pour apprécier un nouveau cas.

Quand un architecte, un urbaniste, un ingénieur ou un paysagiste réalise un projet d'aménagement urbain, il aimerait disposer d'un outil d'évaluation de l'impact climatique de son projet sur la ville mais aussi et surtout sur l'environnement proche et sur les consommations d'énergie des bâtiments voisins. Deux types d'outils sont envisageables :

- des outils simplifiés sous forme de guides pratiques basés sur des règles de conception ou bien sous forme d'outils informatiques simplifiés de simulation ne nécessitant pas de connaissances approfondies dans le domaine de la climatologie urbaine, tous deux permettant une évaluation grossière mais rapide et exposant les grandes tendances climatiques entraînées par la nature d'un ou plusieurs aménagements ;
- des outils plus fins et précis faisant appel à des techniques de simulation physique calculant les champs de variables microclimatiques et les consommations énergétiques réelles des bâtiments du site considéré.

Dans l'idée que les premiers outils cités peuvent être construits à partir des deuxièmes, l'un des objectifs de ce travail sera de développer à partir de travaux antérieurs [Vinet, 2000] [Robitu, 2005], un outil de simulation microclimatique permettant de calculer des consommations énergétiques des bâtiments.

La modélisation fine du microclimat et des échanges d'énergie avec le bâti est confrontée à quelques difficultés majeures :

- l'interaction de nombreux phénomènes physiques ;
- les différences d'échelles spatiales et temporelles des phénomènes physiques concernés ;
- la taille du domaine à considérer et les conditions aux limites à mettre en place ;
- les temps de calcul prohibitifs pour une modélisation physique réaliste.

Le développement de plateformes de simulation basées sur la CFD, multi-échelles et intégrant l'étude de phénomènes couplés, permet de répondre à la complexité des interactions physiques entre les variables de différentes natures en résolvant des équations fondamentales dans toutes les mailles d'un domaine discrétisé, et couplant les équations traitant des échanges énergétiques entre les domaines fluides et les frontières solides. Le principal défaut de ce type de modèle est leur complexité, le temps de calcul, et le fait qu'il est difficile de réaliser à la fois une simulation microclimatique et une simulation énergétique du bâtiment puisque, d'une part, les échelles spatio-temporelles sont différentes, d'autre part, le bâtiment est un système fermé alors que l'espace urbain est un système ouvert. Enfin, l'usage de ces outils passe par une modélisation géométrique de l'environnement urbain. Une modélisation fidèle des flux échangés nécessite un couplage supplémentaire entre thermique interne et externe qui complexifie la résolution de la procédure numérique. Ainsi, des hypothèses simplificatrices et

une physique appropriée sont requises pour aborder ces phénomènes. Des précautions doivent cependant être prises pour obtenir des résultats cohérents.

Il existe des modèles avec des équations plus simples de type empirique, rapides à mettre en place, ne nécessitant pas forcément de modélisation géométrique, qui peuvent évaluer l'influence de l'urbanisation sur la ville en ajustant les variables extérieures pour les réutiliser dans les calculs de consommation des bâtiments. Cependant, ces modèles, à l'instar du modèle CTTC [Elnahas et Williamson, 1997], n'évaluent les modifications que d'une seule variable à la fois, en général la température d'air, et reposent sur des géométries classiques comme celles du canyon. Les développeurs du modèle CTTC nous informent d'ailleurs que le fait d'intégrer d'autres phénomènes et variables pour plus de précision, comme celles liées à l'évapotranspiration, pose à terme des problèmes théoriques.

Une alternative intermédiaire est celle des modèles zonaux comme par exemple SimCANYON [Bozonnet, 2005]. Ils ont été mis au point pour limiter les temps de calcul nécessaires à des calculs sur une année type de chauffage-climatisation. Mais, à mesure que les domaines élémentaires de calcul augmentent (le zonage est initié par le modélisateur), on dilate des échelles de calcul qui ne devraient pas l'être pour la bonne prise en compte des phénomènes qui se produisent à petite échelle. De plus le zonage convient pour des études sur des géométries théoriques, mais ne s'applique pas sur des morphologies irrégulières du vide urbain délimité par des enveloppes de bâtiments complexes et des éléments de végétation répartis aléatoirement dans l'espace, ce qui correspond à la plupart des cas réels.

Des modèles de thermique du bâtiment prenant en compte les conditions d'ombrage sont maintenant disponibles. Cependant, ils ne prennent pas en compte la modification des échanges convectifs dus à l'exposition au vent. Ils ne permettent pas non plus de traiter avec une même simulation les conditions de confort dans les espaces piétonniers extérieurs. Une question principale se pose alors : comment adapter un modèle climatologique urbain si notre expertise doit traiter en plus des aspects de confort, les aspects de consommation énergétique ?

Les conditions physiques aux limites sont aussi un objet courant de questionnement. En effet, la simulation du microclimat urbain repose sur des calculs dans un domaine spatial englobant, lui-même échantillon de la couche limite urbaine. Or, les propriétés aérodynamiques de la couche limite sont encore mal maîtrisées. Un sous domaine spatial pour l'étude micro doit déjà être plus étendu que le site urbain d'intérêt pour s'assurer d'une bonne prise en compte des constructions à proximité. Un compromis doit être fait entre la taille du domaine d'étude et le nombre de cellules de calcul mises en jeu. Le plus grand domaine possible pour le plus petit nombre de cellules.

Finalement, pour tous les types de modèles, des compromis sont à faire entre la précision recherchée, le domaine de validité des modèles adoptés et le temps de calcul. Utilisée avec des maillages adaptés et des conditions aux limites correctement définies, la famille d'outils fins de simulation microclimatique peut permettre de donner une bonne estimation du champ des variables physiques dans le cas d'un projet de construction ou d'urbanisme. Le sujet le plus délicat à aborder est la connexion entre la simulation microclimatique et la simulation thermique du bâtiment.

### 1.7.3 La caractérisation de l'impact microclimatique sur l'énergétique

La mise en place d'aménagements particuliers dans un site peut suggérer l'envie de caractériser le microclimat généré par celui-ci. Il est toutefois difficile de caractériser le microclimat particulier d'un site tout au long de l'année étant donné la variabilité saisonnière du climat. De même, il est difficile de le caractériser sur une journée pour les mêmes raisons de variabilité temporelle. On peut prendre une journée type moyenne, ou une journée passée, mais il est peu probable que cette journée se reproduise réellement. Le corpus des recherches sur l'interaction entre le microclimat et l'énergétique des bâtiments montre un déséquilibre entre le nombre de cas d'étude en été, très nombreux du fait de l'accent mis sur la problématique de la climatisation, et celui des cas d'hiver, plus rares. On peut imaginer intuitivement les effets des aménagements en hiver mais nous ne disposons pas du même potentiel d'expertise pour l'été.

Il ressort aussi des études que l'effet de toutes les mesures prises sur l'enveloppe d'un bâtiment, et sur son environnement, sur la consommation énergétique d'un bâtiment n'est pas l'addition des effets de ces mesures prises individuellement. Par exemple l'effet d'une rangée de trois arbres n'est pas la superposition de trois fois l'effet d'un arbre isolé. Il s'agit donc de composer avec ces dispositions une solution adaptée au contexte climatique, au type de bâtiment et à son usage.

L'influence de l'aménagement sur les consommations énergétiques des bâtiments est une question pour laquelle une chaîne problématique se constitue. La ville est un système complexe, variable dans le temps et l'espace. Si les possibilités informatiques ont progressé et que la disponibilité d'une large gamme d'observations issues de diverses campagnes de mesures a augmenté, la complexité des processus physiques en jeu dépasse bien souvent notre compréhension et notre aptitude à les isoler, les mettre en équation et faciliter l'exploitation des variables de sortie pour enrichir l'expertise énergétique des bâtiments. Un certain nombre d'hypothèses doivent ainsi être mises en place.

## 1.8 Hypothèses de la recherche

Deux objectifs liés aux problématiques de fond précédentes orientent naturellement ce travail de thèse :

- établir les connaissances pour concevoir de nouveaux procédés alternatifs pour réduire les consommations énergétiques des bâtiments
- donner au concepteur le moyen de mieux évaluer l'influence de chacun de ces procédés

Nous posons donc les hypothèses suivantes :

- **la conception réfléchie des aménagements urbains peut contribuer significativement à la réduction des consommations énergétiques des bâtiments ;**
- **le bâtiment peut être assimilé à un capteur microclimatique qui nécessite un étalonnage ;**
- **l'influence de chaque paramètre définissant le bâti ou le microclimat ne peut pas être traitée individuellement parce qu'il existe des interactions entre eux.**

En effet, bien que les techniques de constructions futures, accompagnées de l'évolution continue des réglementations, des labels de haute performance énergétique, voire des technologies pour les bâtiments à énergie positive, pallieront sans doute une grande part les problèmes énergétiques, les moyens d'action actuels de la réhabilitation de l'existant reposent également sur la reconception, recomposition de l'aménagement urbain. Ce sera à l'échelle du fragment urbain - l'ordre de grandeur du domaine d'étude caractérisant un fragment s'inscrit dans une parcelle carrée de 300m de côté - que nous étudierons la mise en place des différentes solutions d'aménagement, et que nous évaluerons leur impact microclimatique. Nous pouvons considérer cette échelle équivalente à celle de l'îlot urbain construit sur des trames classiques dessinées par la voirie des centres urbains. Ce choix offre la possibilité d'étendre les connaissances actuellement limitées au concept de la rue canyon. En effet, la rue canyon n'est pas forcément l'objet urbain le plus reproductible dans la morphologie d'une ville.

Quant à l'objectif de construction d'un outil répondant aux attentes des concepteurs d'aménagements urbains, la tâche n'est pas simple. Aujourd'hui, il n'existe pas d'outils intégrant tous les aspects microclimatiques et énergétiques. Les rares outils existants n'ont pas encore franchi la porte des laboratoires de recherche. Leur utilisation et les résultats issus de ceux-ci ne sont donc pas accessibles aux aménageurs. Ce travail de thèse fait suite aux travaux du CERMA [Groleau et Marenne, 1995] [Vinet, 2000] [Robitu, 2005] qui ont abouti à l'outil *Solene*. Nous proposons d'enrichir ses modèles physiques dédiés à la simulation microclimatique, en respectant le cahier des charges suivant :

- être un outil d'étude détaillé pour certains projets nécessitant une expertise poussée ;

- être un outil pour les chercheurs désireux de constituer des règles de conception synthétiques et systématiques à destination des praticiens pour une utilisation dans des commandes de projets plus conventionnelles ;
- produire des résultats facilement exploitables par les concepteurs.

Actuellement, cet outil ne comporte pas de modélisation thermique du bâtiment permettant de calculer des consommations d'énergie. Par ailleurs les consommations énergétiques d'un bâtiment ne dépendent pas seulement des sollicitations climatiques auxquelles ils sont soumis mais aussi fortement de sa nature. Pour faire une analogie avec l'instrumentation physique, le bâtiment peut être assimilé à un capteur microclimatique. Sa sensibilité aux divers paramètres du microclimat doit être déterminée, ou étalonnée, pour mesurer l'effet des aménagements urbains.

Enfin, nous savons par exemple que l'influence du rayonnement solaire sur un bâtiment dépend de son taux d'ouverture. Nous pouvons donc supposer que chacun des paramètres descriptifs du bâtiment dans son environnement ne seront pas des variables indépendantes les unes des autres. Ce « capteur microclimatique » qu'est le bâtiment donne, à l'inverse, des informations sur le microclimat et la spécificité de celui-ci par rapport au mésoclimat. En effet, à partir des variations de la grandeur physique qu'il nous livre, à savoir la charge de chauffage ou de climatisation, nous pourrions statuer ou non sur la présence d'un microclimat.

On peut alors redéfinir plus dans le détail les objectifs de la thèse :

- améliorer et développer des modèles physiques pour les systèmes microclimatiques urbains ;
- intégrer ces modèles dans un outil de simulation thermo-aéraulique couplée ;
- utiliser ces modèles pour caractériser des stratégies d'aménagement urbain de référence appropriées aux bâtiments ;
- enrichir la connaissance des effets combinés des aménagements urbains dans la perspective de création de microclimats favorables au confort extérieur et à la réduction des consommations énergétiques des bâtiments ;
- capitaliser les résultats d'analyse pour la formulation synthétique de stratégies de conception climatique opérationnelle.

## 1.9 Méthodologie de notre recherche

Cherchant à mettre en correspondance les variations des charges climatiques à l'intérieur du bâtiment, qui conditionnent sa consommation énergétique, et les divers modes d'aménagement urbain à proximité nous établissons une méthodologie s'appuyant sur les différentes hypothèses que nous venons de formuler. Bien que notre travail emprunte le passage forcé du développement de modèles physiques, l'objectif premier de cette thèse est de tirer des enseignements généraux sur les modalités d'aménagement d'un même site urbain. Or, si on se

projetée dans la perspective d'une formulation de règles généralisées de conception urbaine, les diverses campagnes de simulation doivent reposer sur un objet d'étude de référence. En effet la pertinence des multiples résultats de simulation est non seulement liée à la physique mise en jeu mais aussi à la typologie des objets étudiés. Diverses questions émergent alors :

- Quelle(s) typologie(s) de bâtiment(s) est adaptée à la référenciation énergétique ?
- Quels modes d'aménagements types étudier pour une base de suggestion et comment identifier l'influence sur le comportement énergétique du bâti de référence ?

Chacune de ces interrogations doit faire l'objet d'une étude spécifique, ainsi la décomposition de la recherche en sous-étape nous permettra de répondre à la question initiale plus aisément.

Pour répondre aux objectifs de la thèse définis antérieurement, nous proposons une méthodologie de travail en trois étapes :

- dans un premier temps, nous mettons au point les modèles physiques permettant de calculer des consommations énergétiques d'un bâtiment au milieu d'aménagements urbains agissant sur les conditions climatiques ;
- dans un second temps, nous nous intéressons à l'impact des paramètres constructifs et des conditions microclimatiques d'un environnement théorique sur le comportement thermique d'une catégorie de bâtiment ;
- dans un troisième temps, nous étudions l'impact de l'aménagement sur les consommations énergétiques de ce bâtiment en situation urbaine.

Cette décomposition se justifie à plusieurs niveaux :

- l'hypothèse formulée dans le sous chapitre précédent propose d'analyser le microclimat au moyen d'un capteur bâtiment. Par analogie à la procédure d'étalonnage en instrumentation physique, il est nécessaire d'évaluer la sensibilité du capteur concerné aux variables physiques extérieures et internes pour relativiser les résultats et de « faire le zéro » équivalent au choix d'un bâtiment de référence ;
- les éléments initiateurs d'un microclimat spécifique sont multiples et leurs interactions sont complexes. Il est ainsi judicieux d'évaluer individuellement l'influence de chaque entité sur le microclimat, afin de maîtriser notre expertise énergétique. Nous isolons ainsi d'une part les interactions { bâtiment  $\longleftrightarrow$  microclimat } et d'autre part les interactions { aménagements  $\longleftrightarrow$  microclimat }, en gardant à l'esprit que notre point d'observation est le bâtiment ;
- enfin, on peut plus facilement envisager de définir des cas de référence en étudiant indépendamment ces deux sous-systèmes. La première étude pourra nous donner quelques indications quant à l'influence de certaines variables ; de la même manière la deuxième étude pourra nous révéler simplement la neutralité énergétique de certains modes d'aménagement.

La première partie de notre travail consistera à enrichir l'outil de simulation auquel a abouti Robitu à la fin de sa thèse [Robitu, 2005]. La demande énergétique d'un bâtiment

ou d'un îlot urbain est directement liée aux conditions microclimatiques contiguës. Elles résultent des effets conjugués des conditions climatiques locales (échelle de la ville), de la morphologie du quartier, des caractéristiques de l'aménagement urbain proche mais aussi d'une éventuelle rétroaction thermique du bâtiment qu'on ne peut pas *a priori* considérer comme un élément passif. Une présentation des outils existants les plus proches de notre travail, et représentant des solutions pour la simulation microclimatique et/ou la simulation énergétique du bâtiment permettra de faire un bilan sur les améliorations de ce type d'outils. En s'appuyant sur ceci, notre contribution consistera au développement d'un modèle de thermique du bâtiment que nous couplons avec l'outil de simulation microclimatique existant. Nous nous inspirons de la modélisation analogique et la résolution nodale utilisée dans certains outils de thermique du bâtiment que l'on présente dans le chapitre suivant. La particularité du modèle est que l'enveloppe du bâtiment, lieu d'échanges avec les charges internes et les sollicitations climatiques externes, propose des interfaces s'adaptant aux échelles spatiales et temporelles différentes. Le choix d'une modélisation fine du microclimat implique une échelle temporelle découpée en pas de temps horaires ou semi-horaires, tout en sachant que la simulation énergétique des bâtiments s'effectue conventionnellement sur l'année, au moins sur les saisons froide ou chaude pour déterminer respectivement les puissances de chauffage ou de climatisation. En outre, les paramètres climatiques extérieurs sont donnés de manière globale alors que la simulation climatique fine fait intervenir des paramètres très localisés.

On dispose déjà d'un modèle thermoradiatif couplé avec un modèle thermo-aéraulique intégrant des modèles de végétation et de bassin d'eau. Trois problèmes restent à solutionner :

- la technique de couplage n'est pas aboutie : le transfert de données entre les deux modèles doit être revu et l'architecture du calcul doit être optimisée au niveau du traitement. Les paramètres intervenant pour la convection, coefficients d'échange convectif et nombres adimensionnels de la mécanique des fluides, doivent être laissés sous le contrôle du modélisateur et non de l'outil « boîte noire » de CFD ;
- les modèles de sol doivent être implémentés : pour l'instant, il existe un modèle de paroi utilisé à la fois pour les surfaces des bâtiments et le sol. Il semble important de les différencier, puis de paramétrer la modélisation du sol suivant sa nature et son degré de perméabilité influant sur les flux évaporatifs ;
- cette phase de développement doit aboutir à un outil souple permettant de traiter plusieurs problématiques de recherche. Le confort thermique extérieur n'est pas traité, mais cela doit toujours être envisageable. De plus, la méthode doit aussi bien être applicable aux zones urbaines denses qu'aux zones périurbaines. Peu d'études ont amené de connaissances sur les bilans d'énergie dans ces zones alors qu'elles occupent une grande partie des agglomérations actuelles et sont la cible privilégiée de projets de constructions neuves. Elles sont particulièrement intéressantes du fait de leur important pourcentage de zones vertes et de leur irrigation.

La deuxième partie de la thèse visera à caractériser l'influence cumulée des paramètres climatiques et des paramètres constructifs du bâtiment sur sa consommation énergétique, sur les saisons d'hiver et d'été. Une étude paramétrique est envisagée et le choix de la méthode sera guidé par les différents objectifs de cette étape intermédiaire de notre recherche :

- tester la véracité du modèle thermique de bâtiment ;
- déterminer les gammes de valeurs des paramètres climatiques permettant de réduire les consommations en considérant leurs interactions ;
- déterminer des typologies énergétiques de bâtiments parmi lesquelles choisir notre (nos) cas test(s) pour l'étude finale.

Les périodes de référence pour les calculs de thermique du bâtiment seront des semaines types d'hiver et d'été pour éviter des temps de calcul trop longs. En effet, pour satisfaire les conditions de l'étude paramétrique, un grand nombre de cas de calcul sera requis. L'indicateur permettant de discriminer les cas entre eux sera respectivement la puissance de chauffage et de climatisation à fournir pour rétablir une situation intérieure avec des conditions de température d'air spatialement homogènes et confortables pour la saison.

La famille de bâtiments choisie sera celle des bureaux. Ce choix est justifié par l'importante consommation énergétique de ces bâtiments que l'on a pu mettre en évidence dans ce chapitre bibliographique. Cette consommation est plus liée aux charges climatiques que dans les bâtiments résidentiels du fait de l'utilisation systématique de la climatisation, de l'occupation importante et des charges supplémentaires dues aux équipements électriques. Les bâtiments de bureaux sont une cible privilégiée pour des recherches de ce type [Filifi, 2006], ou bien pour la mise en place de guides ou d'études de référence à destination des praticiens [Marchio *et al.*, 2007].

Étant donné que cette partie du travail est réalisée en prévision de l'étalonnage du capteur bâtiment, chaque calcul sera réalisé pour un bâtiment en site dégagé dont l'environnement climatique sera décrit par les variables météorologiques de base homogènes dans l'espace. Ceci permettra d'éviter d'utiliser le modèle CFD pour calculer les champs de température d'air et de coefficients d'échanges convectifs. Plusieurs indicateurs seront mis en place pour traduire la modification globale des conditions météorologiques autour de valeurs saisonnières de référence. D'autres indicateurs traduiront le type de construction et la nature des éléments de l'enveloppe directement liés aux consommations thermiques comme la compacité, le taux de vitrage et le taux de protection solaire.

La troisième partie consiste en une évaluation quantitative de l'impact énergétique des aménagements. Après avoir déterminé dans la deuxième partie du travail les caractéristiques

des bâtiments d'étude et le sens d'évolution des variables microclimatiques pour réduire à la fois les charges de chauffage et de climatisation, nous retournerons à l'objet d'étude de départ à savoir les aménagements urbains, et plus précisément la végétation et les types de sols et de revêtements.

Plutôt que de réaliser cette étude sur des fragments urbains théoriques, nous mènerons notre analyse sur un projet urbain réel. En effet, plusieurs arguments sont pris en compte pour de choix :

- Il est difficile de statuer sur ce qu'est une configuration urbaine type qui puisse être représentative d'un grand nombre de situations urbaines réelles. Le choix de la configuration urbaine agit sur le microclimat et on doit alors envisager d'étudier l'influence de la morphologie sur le microclimat pour relativiser l'effet des aménagements.
- De plus, il est important de savoir si notre outil numérique est potentiellement utilisable sur des projets réels, puisque ces géométries réelles proposent des surfaces accidentées qui complexifient en général les maillages supports de la simulation : les temps de calcul sont alors plus importants.
- Enfin, les grandes observations faites sur des éléments théoriques peuvent ne pas être appropriées à un site réel du fait des singularités, des espaces dissymétriques, et des caractéristiques spécifiques d'un projet réel.

La méthode employée dans cette partie consistera à repérer dans un projet urbain des bâtiments pouvant correspondre à notre classification énergétique de la deuxième partie, et à réaliser des simulations sur les mêmes bâtiments, avec l'outil numérique (en configuration couplée), et pour les semaines saisonnières de référence, en modifiant d'une simulation à l'autre les stratégies de l'aménagement urbain. L'objectif sera alors d'observer si les aménagements ont un potentiel assez élevé pour améliorer la performance énergétique des bâtiment sur les deux saisons. Nous pourrons alors vérifier si les modifications des caractéristiques climatiques concernées sont en phase avec l'étude paramétrique menée en deuxième partie. Il sera alors possible de comparer les types d'aménagements, et leur possibilité d'interaction, par rapport à la régulation énergétique passive des bâtiments.



## Modélisation des systèmes climatiques urbains

### Sommaire

<b>2.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>71</b>
<b>2.2</b>	<b>Modélisation thermoradiative et simulation avec le code Solene</b>	<b>72</b>
<b>2.3</b>	<b>Modélisation thermo-aéraulique et simulation avec le code Fluent</b>	<b>86</b>
<b>2.4</b>	<b>Modélisation des arbres</b>	<b>98</b>
<b>2.5</b>	<b>Modélisation des sols</b>	<b>114</b>
<b>2.6</b>	<b>Modélisation des bâtiments</b>	<b>124</b>
<b>2.7</b>	<b>Procédure de couplage entre simulation thermoradiative et simulation thermo-aéraulique</b>	<b>137</b>
<b>2.8</b>	<b>Conclusion</b>	<b>140</b>

## 2.1 Introduction

La première partie du travail de modélisation consiste à étendre les possibilités d'un environnement de simulation numérique existant que nous enrichissons de modèles physiques spécifiques aux aménagements urbains. Cet environnement regroupe deux outils de simulation, aux fonctions étendues mais pas spécifiquement dédiées à la simulation des microclimats urbains. Les potentialités microclimatiques de ces outils ont été développées au cours de travaux successifs au laboratoire CERMA [Vinet, 2000], [Robitu, 2005] sur lesquels nous nous appuyerons. Le premier outil est **Solene**, code permettant entre autres de simuler le bilan thermoradiatif d'une scène urbaine. Le second est **Fluent**, outil commercial de CFD simulant des écoulements de fluides dans des enceintes et pouvant être utilisé pour simuler les écoulements d'air à l'intérieur ou à l'extérieur des bâtiments. Ces deux outils sont couplés par une procédure externe spécifique comme l'a montré Robitu [Robitu, 2005].

Dans cet environnement, nous nous proposons d'intégrer un modèle thermique de sols et un modèle thermique de bâtiment calculant les données nécessaires à l'analyse de son comportement énergétique en site urbain. Nous décrivons ainsi dans cette partie les méthodes et modèles utilisés dans ce travail ; seront présentés les modèles existants puis notre contribution.

## 2.2 Modélisation thermoradiative et simulation avec le code Solene

### 2.2.1 Introduction

Les recherches et les études opérationnelles menées au laboratoire CERMA sur les paramètres solaires lumineux et radiatifs des projets architecturaux et urbains ont permis d'élaborer un logiciel de simulation qui traite conjointement les contraintes de ces paramètres : **Solene**. Il permet de mener des investigations à caractères théorique et pratique sur l'ajustement solaire, microclimatique et morphologique des bâtiments et des fragments urbains dans un souci de conception ou de caractérisation [CERMA, 2007].

**Solene** propose diverses fonctions de simulation qui permettent d'appréhender des modèles géométriques en 3D d'ensembles construits suivant divers paramètres physiques. Des fonctions de visualisation rendent compte des comportements observés dans l'espace et le temps. Les applications sont variées et les divers modes de présentation et d'exploitation des résultats ont permis au fil du temps d'aborder entre autres :

- les questions d'ensoleillement (en terme de tracés d'ombre mais aussi de durée d'ensoleillement) et d'énergétique solaire en dissociant le traitement des composantes directes et diffuses [CERMA, 1998] [Groleau, 2000] ;
- les questions d'éclairage naturel en utilisant des modèles normalisés ou quelconques de luminance de ciel [Miguet, 2000] ;
- les questions de transmission et de multi-réflexions solaires à l'extérieur et à l'intérieur des bâtiments [Miguet, 2000]
- les questions de rayonnement grandes longueurs d'onde (IRT) permettant de réaliser un bilan thermique complet et d'évaluer les températures de surface dans des environnements urbains [Vinet, 2000] [Groleau *et al.*, 2003] en intégrant peu à peu des modèles thermiques d'aménagements urbains [Vinet, 2000] [Robitu, 2005] ;
- les questions de visibilité et des indicateurs morphologiques urbains [Miguet *et Groleau*, 2007] ;
- les questions de mesures hémisphériques de flux radiatifs à la manière des techniques de télédétection [Rigenbach, 2004] [Idczac *et al.*, 2007] [Hénon *et al.*, 2007] ;
- etc.

## 2.2.2 Les objets de Solene

L'outil s'organise autour d'un nombre limité d'objets regroupés dans un espace de travail appelé *projet*, permettant à l'utilisateur de procéder en plusieurs étapes. Ces objets sont les *géométries*, les *descripteurs*, les *ciels* et les *bases de données* (géographie, matériaux, coefficients physiques empiriques). Les opérations sont orchestrées par diverses fonctions de calcul ou de traitement faisant interagir ces objets et permettant d'effectuer les simulations et de visualiser des résultats bruts ou post-traités.

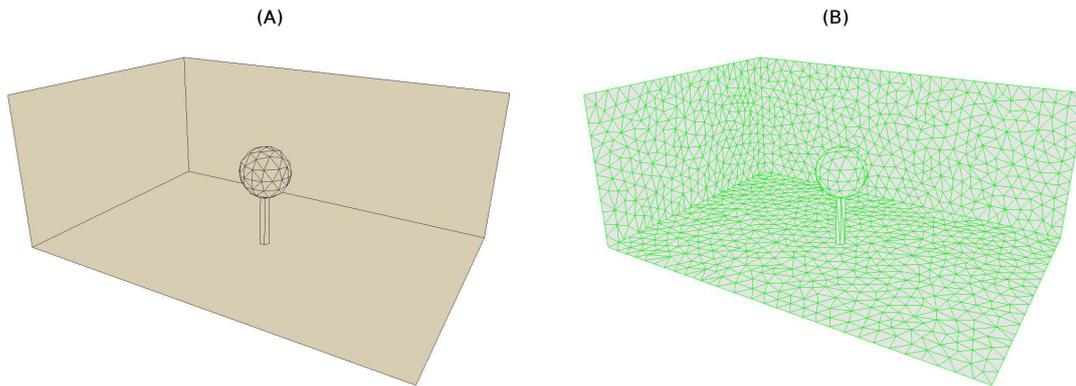
### Les géométries

Une *géométrie* contient la définition point par point des surfaces et des volumes définissant la construction à caractériser. Elle est composée d'un ensemble de faces planes disjointes (voir figure 2.1, (A)) stockées à la suite dans un fichier d'extension `.cir`. Chaque face est constituée de contours ou polygones supports pouvant comporter un ensemble de polygones trous ou contours non pleins disjoints, s'écrivant chacun sous la forme d'une liste ordonnée et fermée de coordonnées de points. Elle possède une normale ainsi qu'un numéro l'identifiant. La normale est une caractéristique très importante de la face car elle intervient pour autoriser et accélérer les traitements dans de nombreuses opérations de transformations géométriques, calcul de visibilité et calculs angulaires. Les géométries d'un projet s'organisent suivant une arborescence hiérarchique qui établit des liens de parenté entre les diverses géométries.

Un modeleur sommaire permet de construire des primitives de base dans **Solene**. Des opérations booléennes peuvent être effectuées sur plusieurs de ces géométries pour créer à partir d'elles un environnement architectural ou urbain détaillé. Mais l'un des principaux atouts de **Solene** est la possibilité d'importer (ou d'exporter) des modèles géométriques 3D, dans différents formats de fichiers (bases de données topographiques, SIG, logiciel de DAO/CAO, modeleurs 3D), représentant fidèlement la morphologie de la scène modélisée, par l'intermédiaire de différentes fonctions de traitement. D'ailleurs l'une d'entre elles permet de transférer des géométries ou maillages construites dans **Gambit** et exploitables par **Fluent**, ce qui sera utile dans ce travail pour le couplage entre les deux outils.

Le modèle **Solene** permet de travailler à une échelle plus fine que les calculs en élément de surface urbain. L'échelle d'espace adoptée peut être celle d'un bâtiment, d'une rue, d'un petit ensemble de rues et bâtiments (fragment urbain), ou éventuellement d'un quartier. En effet la majorité des simulations dans l'outil s'effectue sur des géométries discrétisées, construites à partir de fonctions de triangulation ou de quadrangulation des géométries de base, où les faces support y sont redécoupées en *contours* (ou encore *patches*, *facettes*, *mailles*) adjacents et disjoints d'une longueur caractéristique pouvant varier de quelques dizaines de centimètres à quelques mètres (voir figure 2.1, (B)). La discrétisation des facettes est un aspect important.

En fonction du niveau d'expertise requis, des modèles physiques utilisés dans la simulation et de la puissance de la machine et du temps disponible, l'opérateur choisit de raffiner ou de dilater ce maillage.



**Figure 2.1 :** *Modèle géométrique d'un arbre au centre d'une cour ouverte (A) et discrétisation de la géométrie en facettes triangulaires (B)*

### Les descripteurs

L'information est affectée aux mailles sous la forme d'un descripteur correspondant à une série de valeurs numériques stockée dans des fichiers d'extension `.val`. Chaque valeur est affectée à une seule maille et chaque maille n'est affectée que d'une seule valeur. Les descripteurs sont généralement les résultats des différentes simulations appliquées aux géométries ou d'opérations arithmétiques ou logiques entre ceux-ci. Ils permettent ainsi l'analyse et la visualisation des géométries à travers divers critères suivant une légende associée à la gamme de valeurs.

### 2.2.3 La simulation solaire

L'intérêt de `SoLene` est de calculer indépendamment sur les géométries, les flux solaires direct et diffus qui n'obéissent pas aux mêmes lois, et qu'il est judicieux de traiter indépendamment pour différentes thématiques de conception. Une fois déterminées, elles servent d'entrées aux simulations thermoradiatives.

#### La simulation de l'ensoleillement et des flux solaires directs

La connaissance de la trajectoire du soleil et la prise en compte simultanée des effets de masques engendrés par la configuration de l'espace étudié permet d'effectuer une simulation d'ensoleillement à tout moment de la journée et de l'année qui consiste à distinguer sur la

scène les parties exposées au rayonnement solaire de celles à l'ombre. La position du soleil à un instant  $t$  est déterminée par des équations de base de la trajectoire solaire décrivant le mouvement apparent de la terre autour du soleil en fonction de l'équation du temps ( $ET$ ) de l'angle horaire ( $\omega$ ), de la déclinaison ( $\delta$ ), de la hauteur solaire ( $h$ ) et de l'azimut ( $\alpha$ ) [Miguet, 2000] [Vinet, 2000].

En espace urbain, les bâtiments créent des zones d'ombre et sont donc considérés comme des obstacles au soleil qui peuvent être déterminés géométriquement grâce à deux méthodes [Groleau, 2000] [Vinet, 2000] :

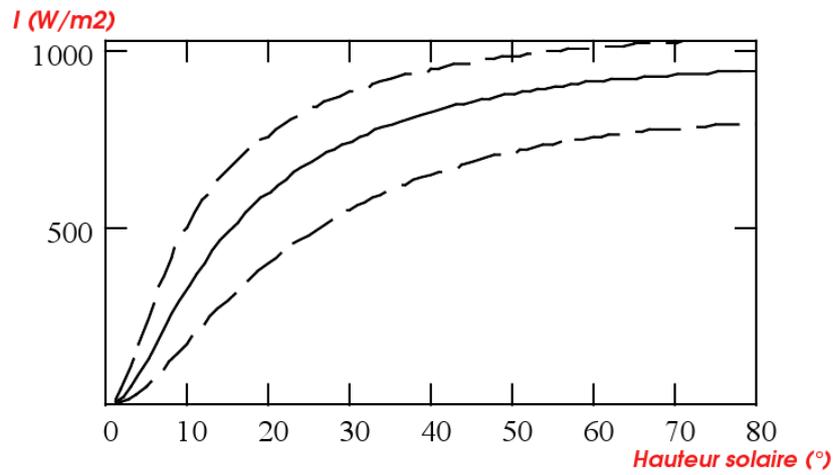
- la méthode *héliodon* qui construit le tracé exact des ombres à un instant  $t$  à l'aide d'une projection axonométrique de la scène selon la direction des rayons solaires. La maquette géométrique initiale est découpée en deux ensembles complémentaires à chaque instant, l'un au soleil, l'autre à l'ombre. Cette méthode s'applique en général à des géométries non-maillées pour traiter des problématiques d'effets, de tâches ou de protections solaires dans les bâtiments ou bien de durées d'ensoleillement en espace urbain.
- la méthode *masque* qui permet de connaître les conditions d'ensoleillement d'un point donné de la scène à un instant  $t$  grâce à la visibilité des trajectoires solaires déterminée au préalable. Cette méthode s'applique à des géométries maillées, où sont appliquées des procédures de projection sphérique au centre de gravité de chaque contour ou facette de la scène urbaine. Elles permettent de constituer les masques au soleil pour l'ensemble de la scène.

Par répétition de la procédure au cours du temps<sup>1</sup>, l'ensoleillement des facettes de l'espace peut être connu au cours d'une ou plusieurs journées et l'évaluation du flux solaire direct incident est immédiate si les valeurs des flux solaires normaux ou horizontaux sont connues aux instants considérés. Beaucoup de formules semi-empiriques permettent d'évaluer le rayonnement solaire direct [Miguet, 2000]. Celle utilisée dans `Solene` est la formule de Perrin de Brinchambault, déclinée pour trois types de conditions atmosphériques pour un ciel très pur, pour des conditions normales et pour une situation de zone industrielle (voir figure 2.2), qui calcule la valeur du flux solaire direct pour une surface perpendiculaire aux rayons solaires. On utilise généralement la formule établie pour des conditions standard (équation 2.1).

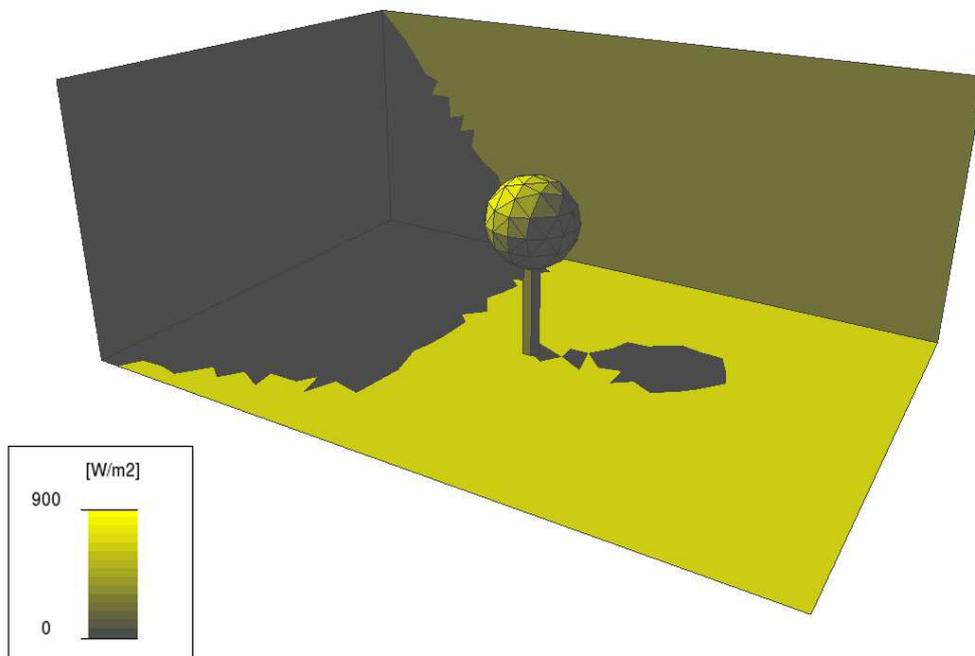
$$I = 1230 \exp \frac{-1}{3,8 \sin(h + 1,6)} \quad (2.1)$$

Les facettes ensoleillées reçoivent alors un flux solaire direct correspondant à la valeur de  $I$  pondérée par l'angle d'incidence des rayons solaires sur les facettes (voir figure 2.3). Sa valeur énergétique est notée  $R_{direct}$  [ $W.m^{-2}$ ].

<sup>1</sup>Notons que le renseignement des horaires de simulation se fait en Temps Solaire Vrai (TSV)



**Figure 2.2 :** Courbes d'irradiation solaire selon la formulation de Perrin de Brinchambault pour les trois types de condition de l'atmosphère [Miguet et Groleau, 2007]

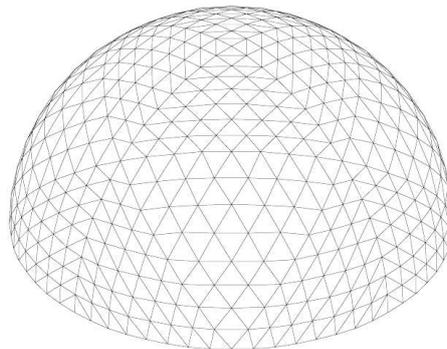


**Figure 2.3 :** Simulation des flux solaires directs pour la géométrie de la figure 2.1, le 10 juillet, à 15H00 solaires, à Nantes, selon le modèle standard de Perrin de Brinchambault

### La simulation de l'éclairement et des flux solaires diffus

Le calcul de l'éclairement et du rayonnement solaire diffus repose respectivement sur la distribution des luminances et des radiances obtenues par différents modèles de ciel. Le ciel est un objet particulier de **Solene**. Il s'appuie sur des *géométries* pour décrire sa représentation hémisphérique et sur des *descripteurs* pour donner les valeurs numériques des angles solides et des données physiques liées à l'énergétique solaire.

En raison de la non-uniformité des valeurs de la luminance dans le ciel, il est nécessaire de subdiviser sa surface fictive afin que chaque élément soit porteur d'une information spécifique. La voûte céleste est représentée par un hémisphère de rayon infini, discrétisé par triangulation géodésique de  $n$  niveaux, les  $4^n$  facettes triangulaires étant orientées vers l'intérieur (voir figure 2.4). La particularité de cette méthode est de construire des triangles dont les côtés sont des portions de cercles équatoriaux [Miguet, 2000].

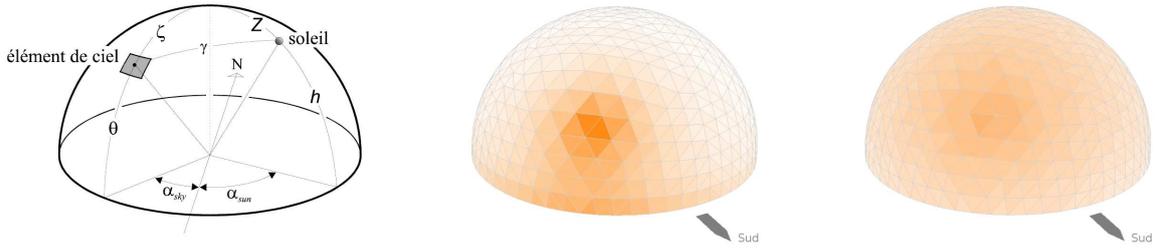


**Figure 2.4 :** *Triangulation géodésique de la voûte céleste en 1024 éléments* [Miguet, 2000]

Pour un point situé au centre de l'hémisphère, l'angle solide sous lequel est vu chaque élément de la surface du ciel est obtenu à partir du théorème de Girard qui permet de déterminer l'aire d'un triangle sphérique précisément dans le cas où ses cotés sont des portions de grand cercle [Vinet, 2000]. Les angles solides appartiennent à plusieurs familles différentes et leur calcul est rendu extrêmement aisé et rapide sur le plan informatique [Miguet, 2000].

Chaque facette de ciel est considérée comme un émetteur isotrope de lumière ou d'énergie. La potentialité d'éclairement des différentes parties du ciel est fonction notamment de :

- la position du soleil (voir figure 2.5) ;
- la position absolue et relative au soleil de la facette de la voûte céleste considérée (voir figure 2.5) ;
- l'état météorologique statistique du ciel dépendant entre autres de la nébulosité, du type et de l'épaisseur des nuages, de la pollution atmosphérique.



**Figure 2.5 :** Repère et angles sphériques (à gauche), distribution de luminances pour une latitude de  $45^\circ$  à 14h solaires pour un ciel clair CIE (au milieu) et pour un ciel couvert clair  $\varepsilon = 1$  ;  $\Delta = 0,35$  (à droite)

Autour de la position du soleil, les luminances sont plus élevées dans des conditions météorologiques de ciel clair. Dans des conditions de ciel couvert, l'intensité des luminances ou des radiances énergétiques tend à s'uniformiser sur la voûte (voir figure 2.5). L'interface permet alors de choisir des types de ciel par défaut, comme les ciels normalisés *clair* ou *couvert sombre* définis par la CIE<sup>2</sup>, le ciel uniforme à 10000 lux, ou, de personnaliser la distribution de luminance ou de radiance par la formulation de Perez (1993) [Miguet, 2000]. Cette modélisation, récente et flexible, est une fonction de distribution statistique s'appuyant sur des mesures effectuées pendant une longue période et permet de bien s'adapter à la grande variabilité des conditions climatiques européennes. Elle décline l'état du ciel par l'intermédiaire de deux coefficients  $\varepsilon$  traduisant le degré de pureté du ciel et  $\Delta$  traduisant sa luminosité liée à l'opacité ou bien l'épaisseur des nuages. La luminance relative  $l_v$ , définie comme le quotient de la luminance de l'élément de ciel considéré et d'un élément de référence arbitraire, s'écrit :

$$l_v(\zeta, \gamma) = f(\zeta) \phi(\gamma) \quad (2.2)$$

avec  $f(\zeta) = 1 + a \exp\left(\frac{b}{\cos \zeta}\right)$   
 et  $\phi(\gamma) = 1 + c \exp(d\gamma) + e \cos(2\gamma)$

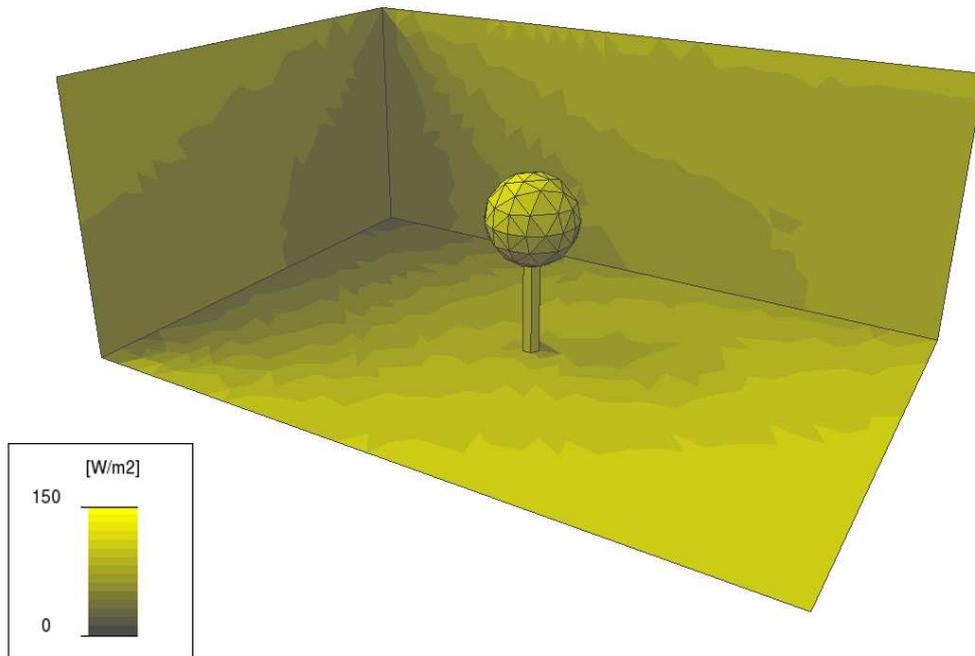
les coefficients  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  et  $e$  étant tabulés en fonction des valeurs de  $\varepsilon$  et  $\Delta$ .

En normalisant la modélisation de ciel obtenue à un éclairage diffus théorique de référence  $D_v$  par intégration sur la totalité de l'hémisphère [Miguet, 2000] [Vinet, 2000], chaque élément de ciel est alors affecté d'une valeur de luminance énergétique en  $W.m^{-2}.sr^{-1}$  ou lumineuse  $cd.m^{-2}$  en fonction de la bande spectrale électromagnétique considérée.

La simulation des éclairagements ou des flux solaires consiste finalement à identifier les portions de ciel vues pour chaque facette de la scène. Cette procédure est réalisée par projection perspective 2D des éléments de la scène, puis des éléments de ciel, au point d'observation

<sup>2</sup>Commission Internationale de l'Eclairage

(centre de gravité du patch à simuler) et par analyse des éléments obstrués ou non. L'énergie incidente sur la facette simulée (voir figure 2.6) est alors cumulée par incrémentation du flux émis par chaque patch de ciel vu, en tenant compte des angles solides et de la normale au point considéré [Vinet, 2000]. Sa valeur énergétique est notée  $R_{diffus}$  [ $W.m^{-2}$ ].



**Figure 2.6 :** Simulation des flux solaires diffus pour la géométrie de la figure 2.1, le 10 juillet, à 15H00 solaires, à Nantes, avec un modèle de ciel clair CIE

Notons que si des mesures de flux solaires diffus sur un plan horizontal sont disponibles, elles peuvent servir à déterminer les flux solaires diffus reçus par n'importe quelle facette de la scène par une fonction spécifique se substituant à la technique précédemment décrite. Le flux mesuré est comparé à celui obtenu par un modèle de ciel ( $Dv$ ). Les valeurs issues du modèle de ciel sont alors corrigées grâce aux mesures de terrain permettant une nouvelle distribution de luminance du ciel, et un calcul de flux diffus sur n'importe quelle facette de la scène.

#### 2.2.4 Facteurs de forme

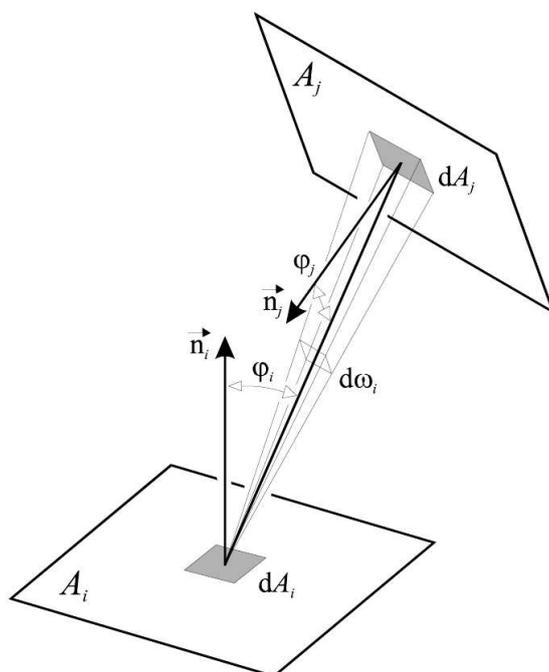
Les étapes précédentes ont permis de déterminer l'énergie reçue par les différents éléments de surface de la scène directement éclairés par le soleil et la voûte céleste. Mais les surfaces qui

ne « voient » aucune portion de soleil ou de ciel reçoivent pourtant de l'énergie, alors qu'elles ne sont pas éclairées directement. En effet, les éléments de la scène se comportent à la fois comme des récepteurs et des émetteurs secondaires d'énergie radiative redistribuée à l'infini. Cette redistribution est dissociée en deux phénomènes :

- les multi-réflexions solaires sur les surfaces de la scène dépendant de leurs réflectivités solaires ( $\rho$ );
- les échanges IRT, pouvant être considérés comme un processus de multi-réflexions, tributaires de la différence entre les températures des éléments de paroi ( $T_s$ ) et de leurs émissivités ( $\varepsilon$ ).

Dans le cas d'un environnement clos, le jeu de ces multi-réflexions tend vers un équilibre, atteint lorsque tous les éléments ont distribué leur énergie vers tous les autres. La quantité d'énergie que peuvent échanger deux facettes entre elles dépend également de leur intervisibilité. Ainsi pour déterminer quel est le niveau d'interaction géométrique entre deux facettes de la scène, il est nécessaire de procéder en premier lieu au calcul des facteurs de formes traduisant la relation géométrique entre ces deux éléments.

Si l'on considère une surface source d'aire  $A_i$  et une surface réceptrice d'aire  $A_j$ , le facteur de forme  $F_{ij}$  entre ces deux surfaces est défini comme l'étendue géométrique du pinceau sous-tendu par celles-ci, rapporté à la surface source (voir figure 2.7).



**Figure 2.7 :** Définition géométrique du facteur de forme [Miguet, 2000]

Il est donc proportionnel à l'angle solide sous lequel une surface émettrice voit une surface réceptrice et s'écrit de la manière suivante :

$$F_{ij} = \nu_{ij} \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \phi_i \cos \phi_j}{\pi d^2} dA_i dA_j \quad (2.3)$$

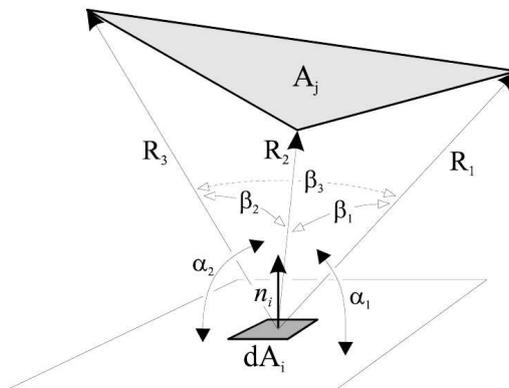
$\nu_{ij}$  correspond à la fonction (binaire) de visibilité qui tient compte des masques entre ces deux éléments.

La méthode de calcul des facteurs de forme implémentée dans **Solene** ne tient pas compte de la double intégrale mais repose sur une méthode similaire à l'intégration sur les contours des deux polygones qui cernent les surfaces par l'utilisation du théorème de Stokes. Le polygone émetteur est considéré comme une surface infinitésimale (source ponctuelle). Cette simplification reste valable tant que la distance à la surface réceptrice est supérieure à environ 5 fois la dimension maximale de la surface émettrice projetée [Miguet, 2000] [Vinet, 2000]. Cette hypothèse peut d'ailleurs occasionnellement être source de problèmes dans le cas de maillage à raffinement (ou dilatation) progressif comme ceux usuellement utilisés dans les outils de CFD comme **Fluent** si deux facettes en regard peu éloignées sont de tailles très différentes. Si cette « règle des 5 fois » n'est pas respectée, la méthode est améliorée en subdivisant la surface émettrice en 4, 16 ou 64 éléments, de cette manière on s'assure d'une erreur toujours inférieure à 1% [Miguet, 2000]. L'expression du facteur de forme pour un élément  $A_j$  totalement visible depuis  $dA_i$  décrit sur la figure 2.8 s'écrit :

$$F_{ij} = \nu_{ij} \frac{1}{2\pi} \sum_{k=0}^{n-1} \beta_k \cos(\alpha_k) \quad (2.4)$$

$\beta_k$  : angle entre les vecteurs  $R_k$  et  $R_{k+1}$  [rad]

$\alpha_k$  : angle entre le plan contenant  $dA_i$  et le plan défini par  $R_k$  et  $R_{k+1}$  [rad]



**Figure 2.8** : Calcul du facteur de forme par la méthode d'intégrale de contour [Miguet, 2000]

Le calcul des facteurs de forme est fait pour chaque paire de facettes ; pour un maillage de  $n$  mailles ou facettes on a donc un nombre de facteurs de forme égal à  $n^2$ . Les valeurs numériques peuvent être stockées sous forme de matrice qui sont très volumineuses à mesure que  $n$  augmente. C'est pourquoi les facteurs de formes dans **Solene** constituent un objet indépendant, stocké dans des fichiers spécifiques (`.fac`) au format de compression binaire. La somme des facteurs de forme pour un élément est de 1 dans le cas d'une scène entièrement fermée, et inférieure à 1 dans le cas de scènes ouvertes vers le ciel, comme c'est le cas général pour une géométrie urbaine. Ainsi, plus la somme des facteurs de forme est proche de 1, plus l'élément est susceptible d'échanger de l'énergie avec les autres éléments.

Une procédure indépendante est utilisée pour calculer les facteurs de forme entre les éléments de la géométrie maillée et la totalité du ciel (sommation des facettes vues) ou l'information est stockée cette fois sous forme de descripteur.

### 2.2.5 Traitement des inter-réflexions et du bilan radiatif

Ce calcul est basé sur l'expression physique qui traduit le fait que chaque élément de surface peut distribuer et recevoir, donc échanger avec tous les autres éléments de l'environnement. Le principe qui régit ces échanges est plus connu en imagerie sous le nom de *radiosité*. Il est en fait calqué sur le principe des échanges radiatifs entre surfaces, dont l'origine se situe dans le champ de l'ingénierie thermique. C'est pourquoi on l'applique à la fois pour les inter-réflexions solaires et le bilan infrarouge.

Le nombre et surtout la complexité des paramètres mis en œuvre dans ce modèle de radiosité impliquent quelques hypothèses simplificatrices :

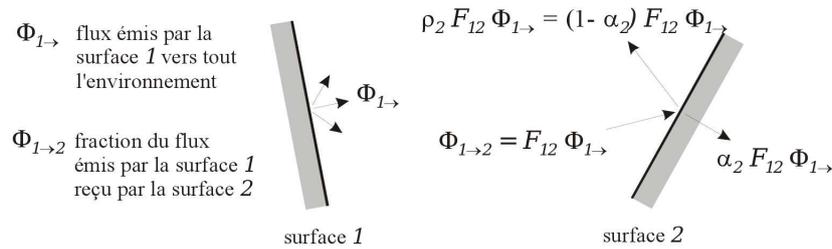
- aucune réémission d'énergie n'est attribué aux éléments de ciel ;
- la quantité d'énergie reçue ou émise par un élément de surface et son coefficient de réflexion sont constants sur tout l'élément ;
- toutes les surfaces non transparentes sont considérées comme opaques et lambertiennes<sup>3</sup> ;
- les surfaces transparentes, en particulier les vitrages ou la végétation, sont traités en affectant une seule fois la transparence à l'interface d'entrée ou de sortie en fonction du sens de la normale, bien que les rayons solaires traversent les deux.

Les principes qui régissent les échanges radiatifs entre deux éléments de surface sont schématisés sur la figure 2.9.

On peut appliquer ce raisonnement à tous les éléments surfaciques de la scène et introduire la notion de radiosité. La radiosité  $B$  (également appelée exitance et notée  $J$  ou  $M$  dans certains

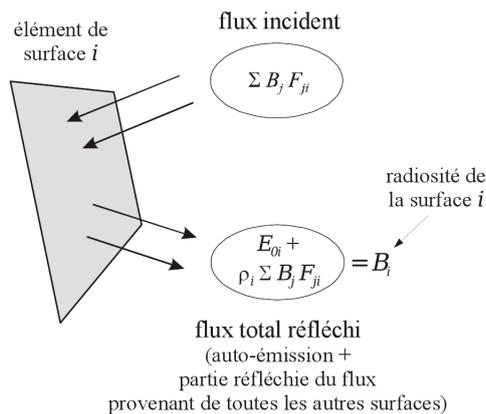
---

<sup>3</sup>elles réfléchissent la lumière incidente de manière identique dans toutes les directions, de telle sorte que la surface apparaît également « brillante » quelle que soit la direction d'observation



**Figure 2.9 :** Principe des échanges radiatifs entre deux éléments de surface opaques 1 et 2 [Miguet, 2000]

ouvrages) est une quantité tout à fait similaire à l'éclairement énergétique  $E$ . Si ce dernier représente le flux incident par unité de surface [ $W.m^{-2}$ ], la radiosité  $B_i$  d'un élément de surface  $i$  représente au contraire la densité d'énergie qui quitte cet élément, et est égale à la somme des densités des énergies émises et réfléchies comme le montre la figure 2.10.



**Figure 2.10 :** Bilan radiatif sur un élément de surface  $i$ . Sa radiosité est égale à l'émission directe de la surface augmentée de la partie réfléchi de l'irradiation [Miguet, 2000]

Son calcul numérique, correspondant à la résolution matricielle ( $n^2$ ) d'un système linéaire à  $n$  équations,  $n$  étant le nombre total de facettes de la géométrie étudiée, est détaillé dans [Miguet, 2000]. Il permet d'accéder au flux solaire inter-réfléchi atteignant une surface  $R_r$ . On peut ainsi introduire la notion de flux solaire global reçu par une surface  $R_g = R_{direct} + R_{diffus} + R_r$ .

## 2.2.6 Simulation énergétique ou thermoradiative

La différence entre le calcul des flux solaires et le bilan thermoradiatif est que la distribution du flux solaire ne dépend pas des températures des parois. Le calcul peut dans le cas du solaire se faire une seule et unique fois en préambule simulation énergétique avec  $R_g$  servant d'entrée

météorologique. Nous utilisons la même technique pour les inter-réflexions associées au flux infrarouge atmosphérique puisque les flux réémis vers le ciel sont perdus. Notons que les flux IRT atmosphériques sont renseignés par des fichiers externes contenant des données de stations météo ou par des données calculées par des relations empiriques dont la littérature donne de nombreux exemples [Vinnet, 2000]. Cependant nous ne traitons pas directement les inter-réflexions infrarouges entre les facettes de la scène car le calcul deviendrait trop coûteux. Connaissant les facteurs de forme, il est possible d'exprimer la densité de flux IRT échangée<sup>4</sup> (ou grande longueur d'onde, noté GLO) entre chaque élément de surface à partir de la loi de Stefan-Boltzmann :

$$R_{IRTnet} = \sum_{j=1}^n \sigma F_{ij} (\varepsilon_i T s_i^4 - \varepsilon_j T s_j^4) \quad (2.5)$$

Le bilan de flux infrarouge dépendant des températures de surface, la simulation énergétique consiste à des allers-retours itératifs entre l'estimation des flux IRT et la simulation directe des températures de surface (voir figure ) grâce à des modèles spécifiques d'aménagements (végétation, sols et bâtiments) exposés dans les parties suivantes. Ces modèles dépendent principalement des flux solaires absorbés ( $\alpha R_g$ ), des flux convectifs liés au vent et des flux latents liés au niveau d'humidité de l'air ambiant. Ils décrivent comment ces trois (ou plus) sollicitations climatiques externes contribuent à l'échauffement de la surface externe de l'aménagement. Les températures de surface sont établies lorsqu'un critère de convergence est atteint entre un passage et un autre.

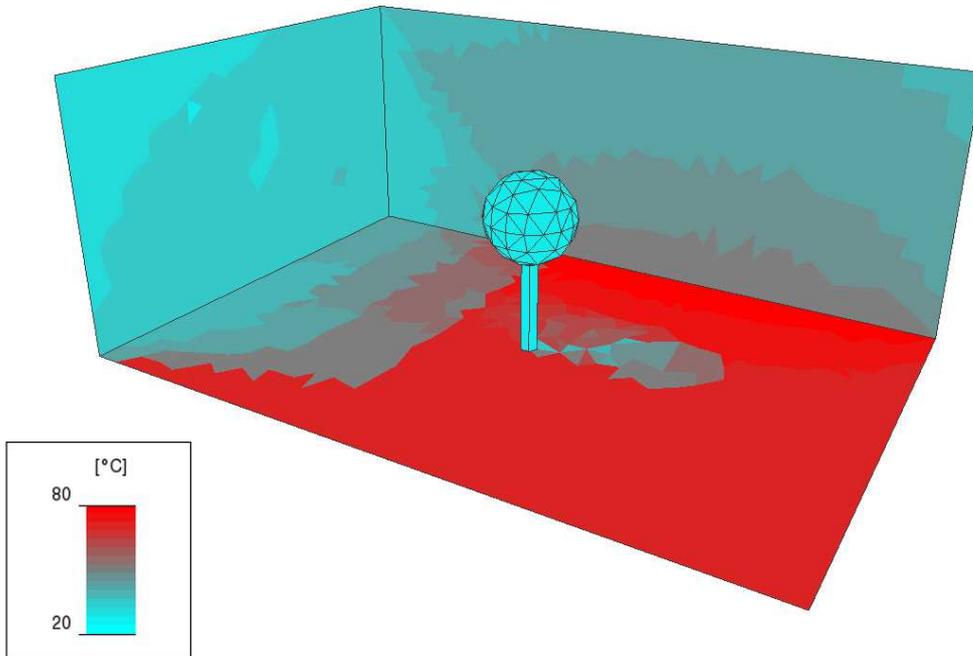
Nous précisons enfin que la discrétisation temporelle dans **Solene** est faite suivant des pas de temps pouvant être au minimum de 5 minutes et au maximum de quelques heures. En général les simulations énergétiques se font sur des périodes de calcul ou les pas de temps sont choisis entre la demi-heure et heure pour respecter un compromis entre temps de calcul, dynamique des zones d'ombre et des tâches solaires, et, réponse thermique des matériaux.

### 2.2.7 Autres fonctionnalités

D'autres fonctions externes permettent de caractériser d'autres problématiques liées à l'ensoleillement, la morphologie et la thermo-énergétique urbaine par statistiques ou analyse géométrique. Elles sont exposées sur le site en ligne dédiée au logiciel [CERMA, 2007].

---

<sup>4</sup>le flux net échangé est un flux sortant, c'est à dire que si  $R_{IRTnet} < 0$  la surface gagne de l'énergie par rayonnement



**Figure 2.11** : Simulation des températures de surface pour la géométrie de la figure 2.1, le 10 juillet, à 15H00 solaires

## 2.3 Modélisation thermo-aéraulique et simulation avec le code Fluent

**Fluent** est un code numérique permettant de modéliser et de simuler l'écoulement des fluides et les transferts de chaleur associés dans des géométries complexes [Fluent, 2006]. Il offre l'avantage d'une grande flexibilité au niveau des maillages, avec notamment la possibilité de résoudre avec beaucoup de facilité des problèmes d'écoulement dans des cas de maillages non structurés. Il permet de travailler sur des maillages 2D triangulaires ou quadrangulaires et 3D tétraédriques, hexaédriques, pyramidaux ou hybrides qui peuvent être réalisés dans l'outil complémentaire **Gambit** (modèleur-mailleur) proposant des facilités pour préparer une géométrie à la simulation **Fluent**. Il est également possible de raffiner ou de dilater le maillage à partir des résultats de simulation obtenus directement dans **Fluent**.

L'outil permet de simuler les écoulements dans diverses situations physiques comme les écoulements compressibles ou incompressibles, laminaires ou turbulents, en régime permanent ou transitoire avec la possibilité de faire appel à des méthodes de résolution adaptées à la physique du phénomène étudié. Il est également possible de traiter les mélanges de fluides, les changements de phase, la combustion et d'autres processus complexes. Le moteur de calcul de **Fluent** est développé en langage **C** et utilise toutes les potentialités de ce langage, parmi elles l'allocation de mémoire dynamique et la gestion de structures de données. De plus l'architecture du solveur permet en outre de fonctionner à distance sur des processeurs puissants, voire de paralléliser les calculs.

### 2.3.1 Principes généraux et équations de base en simulation aérodynamique CFD

Le principe de base de la dynamique des fluides est de résoudre un système d'équations vectorielles aux dérivées partielles non-linéaires appelées équations de Navier-Stokes. Ce système est composé de trois équations de bilan fondamentales : l'équation de conservation de la masse, l'équation de conservation du mouvement, puis, pour des écoulements compressibles et/ou avec transfert de chaleur, une équation de conservation de l'énergie. Pour les écoulements impliquant des mélanges d'espèces ou des réactions chimiques, une équation de la conservation des espèces chimiques est résolue. Des équations de transport supplémentaires sont également résolues lorsque le régime de l'écoulement est turbulent.

#### L'équation de conservation de la masse ou équation de continuité

La forme générale de l'équation de conservation de la masse, valable à la fois pour les écoulements incompressibles et compressibles est donnée par :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (2.6)$$

$\rho$  : masse volumique du fluide

$\vec{v}$  : vitesse du fluide sous forme vectorielle  $\vec{v}(v_x, v_y, v_z)$

$S_m$  : masse ajoutée ou retirée au domaine de fluide (en générale nulle, mais peut prendre des valeurs positives dans le cas de phénomènes comme l'évaporation)

### L'équation de conservation du mouvement

L'équation de conservation du mouvement est donnée par :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\bar{\tau}}) + \rho \vec{g} + \vec{S}_{ext} \quad (2.7)$$

$p$  : pression statique

$\bar{\bar{\tau}}$  : tenseur des contraintes appliquées au fluide

$\rho \vec{g}$  : force de la pesanteur

$\vec{S}_{ext}$  : somme des forces exercées par les corps extérieurs

L'expression du tenseur des contraintes  $\bar{\bar{\tau}}$  est donné par :

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu D = \mu \left[ (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (2.8)$$

$\mu$  : viscosité moléculaire

$D$  : effet de la dilatation volumique

### L'équation de conservation de l'énergie

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left( k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\bar{\bar{\tau}}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \quad (2.9)$$

$k_{eff}$  : conductivité thermique effective

$\vec{J}_j$  : flux de diffusion de l'espèce  $j$  dans le fluide

$S_h$  : source chaleur apportée par réaction chimique ou autre réaction exothermique

Dans notre travail, le fluide d'étude est l'air humide, ainsi l'indice  $j$  est unique et correspond à la vapeur d'eau; il sera noté  $H_2O$  dans les parties suivantes. Les trois termes ( $k_{eff} \nabla T$ ),

$(\sum_j h_j \vec{J}_j)$  et  $(\bar{\tau}_{\text{eff}} \cdot \vec{v})$  représentent les contributions au transfert d'énergie par conduction, par diffusion des espèces et par dissipation visqueuse, respectivement.

Dans l'équation 2.9,  $E$  représente l'énergie totale contenue dans l'élément fluide et se décompose ainsi :

$$E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (2.10)$$

$h$  est l'enthalpie sensible définie pour les écoulements incompressibles des gaz parfaits par :

$$h = \sum_j Y_j h_j + \frac{p}{\rho} \quad (2.11)$$

Dans l'équation 2.11,  $Y_j$  est la concentration massique de l'espèce  $j$  dont l'enthalpie spécifique est donnée par :

$$h_j = \int_{T_{\text{ref}}}^T c_{p,j} dT \quad (2.12)$$

$T_{\text{ref}}$  est la température à laquelle sont prises les constantes physiques du fluide.

## La modélisation de la turbulence

Au sein de la CLS, le vent présente une agitation importante que l'on qualifie couramment de turbulence. Lesieur la définit comme un système dynamique imprévisible, désordonné, possédant de fortes propriétés de mélange, un caractère dissipatif et faisant intervenir une très large gamme d'échelles spatiales [Lesieur, 1994]. Deux nombres adimensionnels caractérisent en général le régime turbulent. Tous les deux comparent globalement les facteurs « déstabilisateurs » aux facteurs « stabilisateurs » de l'écoulement. Lorsque le rapport de ces deux facteurs est supérieur à une valeur critique, le régime d'écoulement est alors turbulent. Le premier est le nombre de Reynolds (voir p.280). Si  $U$  est la vitesse moyenne,  $L$  la « longueur caractéristique » de l'écoulement et  $\nu$  la viscosité cinématique du fluide, ce nombre s'écrit :

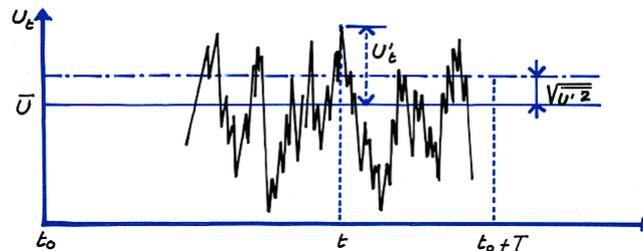
$$Re = \frac{UL}{\nu} \quad (2.13)$$

Pour un écoulement de couche limite, la transition des deux régimes se fait aux environs de  $Re = 5 \cdot 10^5$ . Le deuxième est le nombre de Rayleigh qui correspond au rapport entre les forces convectives liées à un écart de température (convection naturelle) et les forces de viscosité. Pour l'écoulement entre deux plaques horizontales séparées d'une distance  $L$ , la plaque supérieure à la température  $T_0$ , l'autre à la température  $T_0 + \Delta T$ , le nombre de Rayleigh s'écrit :

$$Ra = \frac{g\beta L^3 \Delta T}{\nu\alpha} \quad (2.14)$$

Pour une valeur supérieure à  $Ra = 5.10^4$  l'écoulement est considéré comme turbulent. Les écoulements que nous rencontrons dans la CLS sont fortement turbulents puisque pour une couche limite de 1000 m de longueur et une vitesse de  $15 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $Re$  est de l'ordre de  $10^9$ .  $Ra$  est plus difficilement applicable à la couche limite atmosphérique, mais si l'on se place entre deux bâtiments de la CU, l'un à l'ombre et l'autre au soleil, distants de 20 m, la différence de température minimum qui induira un écoulement convectif turbulent est de l'ordre de  $8.10^{-5} \text{ C}$  [Glockner, 2000].

Les écoulements turbulents sont caractérisés par des champs de vitesses fluctuants, en intensité, en direction, dans l'espace et dans le temps. Ces fluctuations concernent également les autres variables de champ de l'écoulement, et, parce que ces fluctuations sont souvent de petite échelle et de fréquence élevée, elles requièrent un temps de calcul démesuré pour la résolution déterministe des équations traditionnelles de la mécanique des fluides (équations 2.6 ; 2.7 ; 2.9) [Fluent, 2006]. Le problème peut alors être contourné par plusieurs approches mathématiques. Une approche statistique consiste à filtrer les irrégularités temporelles de la turbulence pour les utiliser dans un système approprié d'équations en termes de valeur moyenne. Les variables de champ instantanées (à l'image de la vitesse<sup>5</sup>  $U_t$  sur la figure 2.12) sont alors exprimées comme la somme de la valeur moyenne ( $\bar{U}$ ) et de la valeur fluctuante de la variable ( $U'_t$ ) [Gandemer et Guyot, 1976]. Ce processus est appelé décomposition de Reynolds [Menut, 1997], [Glockner, 2000], [Fluent, 2006], dans laquelle la turbulence peut être statistiquement explicitée par son écart-type<sup>6</sup> ( $\sqrt{U'^2}$ ).



**Figure 2.12** : Représentation de la vitesse instantanée du vent sur une période  $T$  [Gandemer et Guyot, 1976]

Le passage des équations déterministes aux équations statistiques consiste en un remplacement des expressions instantanées des variables de champ dans les équations fondamentales par leur expression sous la forme décomposée. En moyennant les équations obtenues, des inconnues supplémentaires apparaissent en raison de la non-linéarité des équations de Navier-Stokes. Le système devient *ouvert* : il comporte plus d'inconnues que d'équations. Pour le résoudre,

<sup>5</sup>L'annotation associée à la vitesse est  $U$  sur cette figure alors qu'on utilise  $v$  dans l'exposé des différents modèles.

<sup>6</sup>Racine carrée de la valeur moyenne temporelle sur la période  $T$  du carré de la fluctuation.

différentes méthodes de *fermeture de turbulence* ont été proposées [Glockner, 2000]. Elles diffèrent les unes des autres par leur plus haut degré de corrélation entre les variables fluctuantes explicitement résolues [Menut, 1997]. Ces modèles basés sur la décomposition de Reynolds, permettent de traiter des problèmes de grande échelle. Cependant, l'expertise de l'utilisateur demeure nécessaire pour l'obtention de résultats satisfaisants.

D'autres possibilités existent pour le traitement de la turbulence comme la technique LES (« Large Eddy Simulation »). Cette méthode repose sur des équations effectuant un filtrage spatial plutôt que temporel. L'intérêt est que la résolution de la turbulence n'est appliquée que pour les « grosses structures » de l'écoulement, c'est-à-dire celles dont la taille est supérieure au volume des mailles de discrétisation. L'effet des « petites structures », dites de sous-maille, est modélisé par des termes supplémentaires dans les équations bilan. Tout comme précédemment, de nombreux modèles ont été proposés pour représenter l'action des échelles de sous-mailles. Cette méthode permet de conserver de manière naturelle l'aspect instationnaire des écoulements, mais nécessite globalement des maillages plus fins que ceux employés pour les méthodes précédentes, qui sont globalement plus diffusives et donc plus stables, mais aussi plus gourmandes en temps de calcul.

Nous optons dans ce travail pour un des modèles de turbulence issus de la décomposition de Reynolds. Ils s'adaptent convenablement à l'étude aérodynamique en configuration urbaine où l'on dilate le plus possible la taille des mailles discrètes de calcul aux endroits éloignés des faces de bâtiments. Dans cette catégorie, **Fluent** propose les modèles suivants :

Le modèle de *Spalart-Allmaras* qui est le seul de tous à utiliser une seule équation de fermeture au lieu de deux. C'est un modèle très simple, et peu coûteux en temps de simulation, qui a au départ été développé pour des études aérospatiales sur des maillages grossiers même proche des surfaces solides. Ce modèle est assez récent et peu d'avis qualitatifs le concernent. Par contre les modèles à une équation sont souvent critiqués pour leur incapacité à s'adapter aux changements brusques d'échelle d'écoulements et de perturbations, ce qui est un aspect typique de la canopée urbaine.

Le modèle  $k-\varepsilon$  et ses dérivés, dont nous justifions l'adoption et expliquons la théorie dans la partie suivante.

Le modèle  $k-\omega$  et ses dérivés. Ils sont de la même forme que  $k-\varepsilon$  mais utilisent le terme  $\omega$  qui a la dimension du rapport  $\frac{\varepsilon}{k}$ . Il intègre des modifications pour traiter les effets turbulents à bas nombre de Reynolds, la compressibilité et la propagation du cisaillement.

Le modèle  $v^2-f$ . Il a été développé après tous les autres pour traiter le cas particuliers des écoulements turbulents à faible nombre de Reynolds. Son apport spécifique est le traitement de l'anisotropie de la turbulence et des effets non locaux des forces de compression. La formulation d'une des deux équations de fermeture en vitesse, permet une bonne représentation de l'échelle d'amortissement de la turbulence près des parois.

Les modèles physiques de turbulence les plus communs sont les modèles à deux équations de fermeture de turbulence, analogues à des équations de transport. Le modèle  $k$ - $\varepsilon$  standard, proposé à l'origine par Launder et Spalding en 1972 est le plus utilisé dans le monde de l'ingénierie car il montre des atouts de robustesse, d'économie de temps de calcul et de précision raisonnable pour un large éventail d'applications possibles [Glockner, 2000], [Turbelin, 2000], [Robitu, 2005], [Fluent, 2006]. Pour beaucoup de théoriciens et de praticiens de la dynamique des fluides, il constitue le niveau minimum de modélisation physiquement acceptable. Cependant, son défaut est de n'apporter que des informations globales sur les mécanismes de transfert d'énergie entre les différentes échelles de la turbulence, ce qui est toutefois suffisant dans le domaine de l'énergétique urbaine ou interne du bâtiment. Par contre, il a une forte tendance à sous-évaluer la forme de la recirculation dans le sillage des bâtiments exposés à un vent dominant [Bozonnet *et al.*, 2006]. Les améliorations apportées au modèle au cours du temps ont conduit à deux variantes principales également proposées dans les méthodes de résolution de **Fluent** : le  $k$ - $\varepsilon$  RNG (Re-Normalization Group) et le  $k$ - $\varepsilon$  « réalisable ». Les trois modèles ont des structures similaires mais leurs différences résident dans les aspects suivants :

- la méthode de calcul de la viscosité turbulente ;
- le nombre de Prandtl turbulent régissant la diffusion turbulente de  $k$  et  $\varepsilon$  ;
- les termes de production et d'extinction dans l'équation  $\varepsilon$ .

Au niveau du temps de calcul, le modèle standard est légèrement plus coûteux en temps que le modèle de Spalart-Allmaras car une équation supplémentaire est résolue. Le modèle réalisable vient tout juste après. Cependant, en raison de termes supplémentaires du au degré supérieur de la non-linéarité exprimée dans les équations, les calculs avec le modèle RNG ont tendance à prendre 10% à 15% de plus de temps CPU que le modèle standard [Fluent, 2006]. Mis à part le temps de calcul par itération de calcul, le choix du modèle de turbulence peut avoir une incidence sur la capacité de **Fluent** à obtenir une solution convergée. Le modèle standard est reconnu pour être trop diffusif dans certaines situations [Glockner, 2000], [Fluent, 2006]. Au contraire, le modèle RNG minimise la viscosité turbulente en réponse à des contraintes élevées. Sachant que la diffusion a un effet stabilisateur sur l'algorithme numérique, le modèle RNG est plus sujet à l'instabilité en régime permanent [Fluent, 2006]. Ainsi nous adoptons dans cet outil le modèle standard, à la fois pour sa physique adaptée à notre échelle de travail, pour le temps de calcul associé et son aptitude à la convergence. De plus, les méthodes de modélisation aéroulque de la végétation les plus rencontrées dans la littérature sont souvent construites sur ces approches.

Le principe de ce modèle consiste à représenter les propriétés de la turbulence à l'aide d'une échelle de vitesse, caractérisée par son énergie cinétique turbulente  $k$  ( $k = \frac{1}{2} \overline{v'^2}$ ), et une échelle de distance de propagation de ces fluctuations, exprimée par un taux de dissipation énergétique

$\varepsilon$ . Les deux échelles sont déterminées indépendamment. L'hypothèse de validité du modèle est que les effets de viscosité moléculaire sur ces échelles de vitesse et de longueur sont négligeables, ce qui est exclusivement applicable aux écoulements pleinement turbulents [Fluent, 2006]. Le réarrangement des équations de quantité de mouvement en décomposées de Reynolds en appliquant l'hypothèse de Boussinesq [Fluent, 2006], aboutit à une équation d'évolution des fluctuations de vitesse qui constitue la base de la première équation de fermeture appelée équation de transport de l'énergie cinétique turbulente (équation 2.16). Résoudre explicitement cette équation revient à utiliser une fermeture d'ordre 1. Toutefois, cette équation contient des « termes de dissipation de  $k$  ». La spécificité du modèle revient alors à paramétrer ces termes en utilisant le concept de viscosité turbulente  $\mu_t$ . Cette variable relie ces deux quantités avec une constante  $C_\mu$  par la relation de Prandtl-Kolmogorov telle que :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.15)$$

Ce procédé revient à utiliser une fermeture d'ordre 1,5 [Menut, 1997]. La deuxième équation de fermeture, correspondant à l'équation de transport du taux de dissipation de l'énergie turbulente  $\varepsilon$  (équation 2.17), est alors construite en intégrant les termes dissipatifs paramétrés à partir d'un raisonnement physique s'appuyant sur des considérations phénoménologiques et expérimentales. C'est pourquoi ce modèle est qualifié de *semi-empirique*.

$$\rho \left( \frac{\partial k}{\partial t} + (\bar{v} \cdot \nabla) k \right) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.16)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + (\bar{v} \cdot \nabla) \varepsilon \right) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (2.17)$$

$G_k$  : production d'énergie cinétique turbulente due aux gradients de vitesse moyenne

$G_b$  : production d'énergie cinétique turbulente due à la flottabilité

$Y_M$  : contribution des fluctuations de dilatation induite par la compressibilité des structures turbulentes

$S_k$  : source extérieure de production d'énergie cinétique turbulente

$C_{1\varepsilon}$  : constante empirique liée au taux de production d'énergie cinétique turbulente totale

$C_{2\varepsilon}$  : constante empirique de correction de la production globale de turbulence

$C_{3\varepsilon}$  : constante empirique de correction du taux de production d'énergie cinétique turbulente due à la flottabilité

$\sigma_k$  : nombre de Prandtl turbulent pour  $k$

$\sigma_\varepsilon$  : nombre de Prandtl turbulent pour  $\varepsilon$

Les valeurs par défaut des constantes des équations 2.16, 2.17 et 2.15 sont précisées dans le tableau 2.1. Elles ont été déterminées à partir des expérimentations avec de l'air et de l'eau

dans des conditions de référence, et sont couramment admises pour la plupart des applications. Les effets de flottabilité sont pondérés par  $C_{3\varepsilon}$  qui n'a pas de valeur proprement tabulée mais prend la valeur théorique de  $\tanh\left|\frac{v}{u}\right|$ .

$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	$C_\mu$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$
1,44	1,92	0,09	1,00	1,30

**Tableau 2.1** : Constantes empiriques pour le modèle de turbulence  $k-\varepsilon$  [Fluent, 2006]

### La modélisation des transferts d'humidité

Fluent peut modéliser le mélange et le transport d'espèces chimiques de par la résolution d'équations de conservation pour chaque composant, ceci avec ou sans réaction chimique. Dans notre travail, nous modélisons la canopée urbaine comme un volume d'air humide où, du fait de l'importance de l'humidité dans le système climatique, il faut modéliser les phénomènes liés à la présence de vapeur d'eau. Les réactions thermodynamiques ne seront pas modélisées dans l'air, où nous ne considérons que le transport (pas de particules en suspension pour condenser, pas d'aménagements de type jets d'eau pour évaporer). Cependant, les flux évaporatifs seront traités spécifiquement pour les aménagements comme les arbres, les sols perméables (voir parties suivantes), et, les masses d'eau induites seront localement incorporées au bilan de l'air environnant.

L'équation de conservation de la vapeur d'eau propose de calculer la fraction massique  $Y_{(H_2O)}$  grâce à la solution d'une équation mixte de convection-diffusion :

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \rho Y_{(H_2O)} \right) + \nabla \cdot \left( \rho \vec{v} Y_{(H_2O)} \right) = -\nabla \cdot \vec{J}_{(H_2O)} + R_{(H_2O)} + S_{(H_2O)} \quad (2.18)$$

$R_{H_2O}$  : taux net de la production volumique de vapeur d'eau par réaction chimique (égal à 0 dans nos applications)

$S_{H_2O}$  : taux de production volumique de vapeur d'eau par addition d'une source externe

$\vec{J}_{H_2O}$  : diffusivité massique de la vapeur d'eau, dont la loi pour les écoulements turbulents est donnée par l'équation 2.19

$$\vec{J}_{H_2O} = -\left( \rho D_{(H_2O,m)} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_{H_2O} \quad (2.19)$$

$D_{(H_2O,m)}$  : coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air humide

$Sc_t$  : nombre de turbulence de Schmidt, par défaut égal à 0,7

## La méthode de résolution numérique

Nous utilisons une méthode basée sur la résolution des pressions. Le champ des vitesses est obtenu à partir des équations de mouvement, l'équation 2.7 déclinée sur ces 3 composantes spatiales. Le champ des pressions est ensuite obtenu par la résolution d'une équation de correction de pression par manipulation simultanée des équations 2.6 et 2.7. Ensuite, les autres équations de transport des scalaires (équations 2.9, 2.16, 2.17 et 2.18) sont calculées indépendamment. L'enchaînement des opérations précédentes définit le mode découplé de **Fluent** que nous utilisons dans ce travail. Il est aussi possible d'utiliser un mode couplé où les équations fondamentales sont calculées de manière simultanée (figure 2.13).

La technique de calcul numérique est basée sur l'utilisation de volumes de contrôle et consiste en la réalisation des étapes suivantes :

1. la division du domaine de simulation en volumes de contrôle discrets, ce qui consiste en la phase de maillage volumique (dans les configurations d'écoulements d'air en milieu urbain, nous préférons les mailles tétraédriques car, étant déstructurées, elles s'adaptent mieux aux formes irrégulières constituées par les nombreux bâtiments présents sur le socle constitué par le sol) ;
2. l'intégration des équations fondamentales des volumes de contrôle individuels pour construire les équations algébriques discrètes concernant les inconnues, telles que la vitesse, la pression, la température, et les autres scalaires transportés ;
3. la linéarisation des équations discrétisées et la résolution de ce système d'équations linéaires pour mettre à jour les variables.

La méthode numérique de discrétisation des équations différentielles se base sur une technique en *volume finis* ; l'approche utilisée pour la linéarisation et la résolution du système d'équation est basé sur un algorithme de projection [Fluent, 2006], où l'équation de pression est dérivée des équations 2.6 et 2.7. La solution est obtenue lorsqu'un niveau de convergence est atteint pour tout le système.

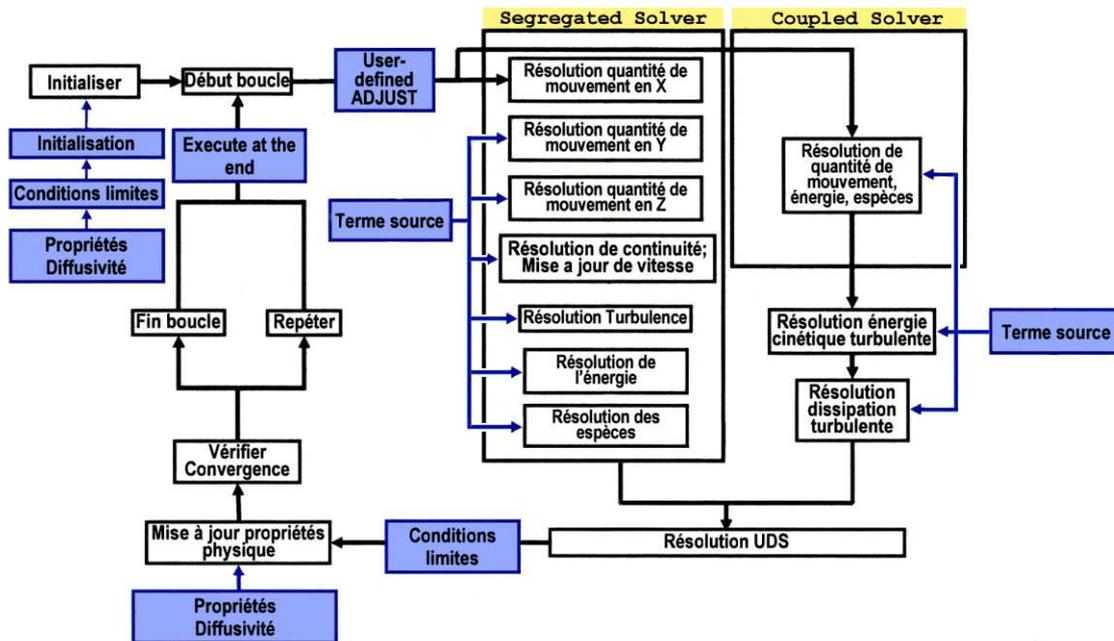
### 2.3.2 Les fonctions spécifiques utilisateur de Fluent

Les modèles standards disponibles dans **Fluent** ne permettent pas de répondre à tous les besoins. C'est pourquoi nous avons recours dans notre travail à un certain nombre d'UDF<sup>7</sup>, permettant d'étendre les capacités de **Fluent** aux besoins de l'étude. Ces routines correspondent à des fichiers externes programmés dans un langage proche du **C**. Elles peuvent être exécutées à différents instants de la procédure de calcul (figure 2.13) et serviront à

---

<sup>7</sup>User Defined Function, autrement dit des fonctions spécifiques définies par l'utilisateur

intégrer les modèles physiques que l'on utilise dans ce travail pour représenter les modèles d'aménagement.



**Figure 2.13 :** Procédure générale de calcul pour une résolution en équation de pression - mode découplé à gauche (*Segregated solver*) et couplé à droite (*Coupled solver*) - et possibilités d'intégrations des diverses UDF dans la procédure

### 2.3.3 La technique de la veine numérique

La simulation numérique des écoulements d'air en milieu urbain est basée sur une analogie avec les techniques de simulation expérimentales en soufflerie. Il s'agit de recréer une veine de « soufflerie numérique » avec l'avantage de ne pas être contraint par les dimensions spatiales et de maîtriser la valeur des conditions physiques aux limites. Les éléments de la scène urbaine : bâtiments, rues, arbres et bassins doivent d'abord être modélisés en 3D. Le maillage dans le logiciel FLUENT est un maillage volumique.

#### Géométrie de la veine

La veine a une géométrie parallélépipédique et ses dimensions sont paramétrées par la taille de la zone à étudier, qui est inscrite dans une boîte englobante délimitée par la position extrême et la hauteur maximale des bâtiments et aménagements (figure 2.14). En effet, le compromis à réaliser est d'éloigner le plus possible les frontières fictives du volume de la zone d'étude, pour éviter les effets de blocage, tout en gardant une volumétrie raisonnable pour limiter le nombre de mailles volumiques de simulation. Plusieurs auteurs proposent des

distances aux frontières à respecter [Sini *et al.*, 1996], [Raymond, 1998], [Robitu, 2005]. En les synthétisant, nous établissons que  $L'_{x1} = 2L_x$ ,  $L'_{x2} = 5L_x$ ,  $L'_y = 2L_y$  et  $L'_z = 10L_x$ . L'expérience des simulations montre toutefois que ces distances, spécialement  $L'_z$ , peuvent être réduites à mesure que  $L_x$  et  $L_y$  sont grands devant  $L_z$ .

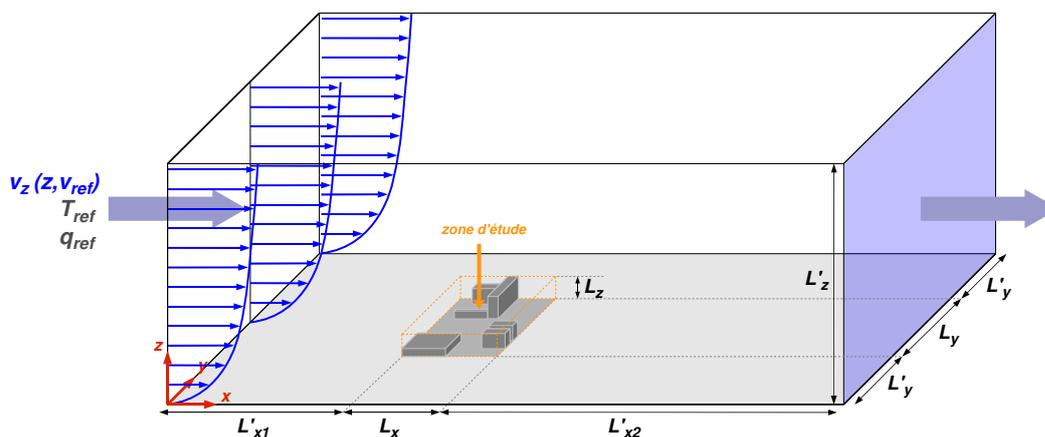


Figure 2.14 : Schématisation d'une veine numérique de simulation

A l'intérieur de la veine, la taille des éléments volumiques discrets n'est pas homogène. Nous avons besoin d'une bonne précision dans la zone d'étude, moins dans les zones périphériques de la veine où il n'y a pas de bâtiments. Des fonctions d'accroissement de la taille des mailles sont disponibles dans **Fluent** pour ajuster la discrétisation de la veine.

### Conditions aux limites

Pour mener à bien une simulation, non seulement nous devons adapter les modèles physiques à notre cas d'étude mais aussi renseigner au mieux **Fluent** sur les conditions physiques au niveau de chaque frontière fictive de la veine numérique ou conditions aux limites. Leur définition repose sur l'hypothèse de base que l'écoulement de la masse d'air s'établit de l'entrée vers la sortie avec une conservation de la masse d'air sec. C'est-à-dire qu'il n'y a pas de passage d'air à travers les deux frontières latérales et la frontière supérieure.

Nous utilisons en sortie une condition de flux sortant par défaut (« outflow ») pour laquelle les valeurs des vitesses et des pressions ne sont pas connues avant la résolution. Nous ne précisons pas de conditions de débit, mais le solveur extrapole les conditions physiques requises pour maintenir une cohérence avec les valeurs calculées à l'intérieur de la veine.

Pour les frontières latérales et la frontière supérieure, nous imposons une condition de symétrie des variables de champs (« symmetry ») puisque la définition des distances  $L'_x$ ,  $L'_y$  et  $L'_z$  est faite de sorte que la perturbation due à la zone d'étude se soit estompée à cette

distance et de ce fait que les variables de l'écoulement se reproduisent égales à elles-mêmes dans les cellules adjacentes de part et d'autre de la frontière. L'avantage de cette condition en simulation numérique est que nous évitons les conditions d'arrêt à la paroi comme en soufflerie expérimentale.

Le conditionnement de l'écoulement repose alors sur les conditions d'entrée de la veine. Nous choisissons la condition la plus appropriée à l'écoulement dans la sous couche limite urbaine de rugosité c'est-à-dire un forçage en vitesse. Les informations sont données en fonction du type de modèle de vent utilisé (voir p.21) et des données météorologiques disponibles appropriées au site (campagne de mesure locale ou données de la station météo la plus proche). Le renseignement de la condition limite d'entrée se fait par l'intermédiaire d'une UDF.

Le profil vertical de vitesse de vent incident  $v_e$  est défini par une loi puissance [Gandemer et Guyot, 1976] [Guyot, 1999] donné par l'équation 2.20 :

$$v_e(z) = v_{\text{ref}} \left( \frac{z}{z_{\text{ref}}} \right)^\alpha \quad (2.20)$$

$v_{\text{ref}}$  : vitesse du vent à la hauteur de référence de la mesure météo ( $m.s^{-1}$ )

$z_{\text{ref}}$  : hauteur de référence de la mesure météo (en règle générale 10 m)

Nous renseignons l'entrée de la veine par un profil d'énergie cinétique turbulente  $k_e$  que l'on considère homogène selon l'équation 2.21 [Sini et al., 1996] :

$$k_e = I v_{\text{ref}}^2 \quad (2.21)$$

$I$  : intensité de turbulence (une valeur de 0,3% est acceptable pour ce type de simulation)

Le profil de taux de dissipation d'énergie cinétique turbulente  $\epsilon_e$  est donné par l'équation 2.22 [Sini et al., 1996]

$$\epsilon_e(z) = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{\kappa z} \quad (2.22)$$

$\kappa$  : constante de von Karman égale à 0,41

Les conditions de température  $T_{\text{ref}}$  et d'humidité  $q_{\text{ref}}$  sont considérées homogènes sur toute la frontière d'entrée et égales aux valeurs données par les mesures ou données météorologiques.

Enfin, la condition limite pour le socle du sol est une condition de paroi (« wall »). Les paramètres physiques liés au mouvement respectent la condition d'adhérence et des lois de paroi standards [Fluent, 2006]; nous considérons une hauteur de rugosité homogène pour les

matériaux urbains de 5 *cm*. Les conditions thermiques sont renseignées soit en flux, soit en température. Pour la partie du sol urbain en dehors de la zone d'étude, nous considérons une condition adiabatique alors que pour les surfaces appartenant à la zone d'étude, les conditions thermiques, en général les températures de surface, et hydriques sont données par les modèles spécifiques d'aménagements présentés dans les parties suivantes. Les modèles disponibles dans **Fluent** pour la conduction et le rayonnement étant trop sommaire, nous couplons **Fluent** à **Solene**.

## 2.4 Modélisation des arbres

La structure volumique des éléments de végétation (arbres isolés, haies, buissons...) affecte le microclimat local car ceux-ci jouent à la fois le rôle de filtre au rayonnement solaire, d'obstacle poreux aux mouvements d'air locaux, et également de source/puits d'humidité et d'énergie dans la canopée urbaine. Le bilan d'énergie de la végétation est alors équilibré par des échanges microclimatiques de surface et des processus physiologiques et biologiques internes principalement liés à la photosynthèse et aux échanges hydriques entre la zone racinaire et le sous-sol.

Les aménagements végétaux sont des systèmes complexes composés d'un tronc, de racines, d'une multitude de branches et de feuilles et l'intégralité des processus physiques y siégeant est d'autant plus difficile à modéliser. D'autre part, certains phénomènes énergétiques participant au bilan global ne sont pas des causes directes des modifications microclimatiques auxquelles nous nous intéressons, la modélisation de la végétation reposera sur un certain nombre de considérations. Celles déjà évoquées dans les travaux de Vinet et Robitu [Vinet, 2000], [Robitu, 2005] seront réutilisées ou complétées dans notre modélisation intégrée.

### 2.4.1 Modélisation géométrique des arbres

Différentes représentations géométriques sont possibles pour les éléments de végétation en fonction des phénomènes physiques examinés. Robitu propose d'assimiler la structure complexe du feuillage à un volume d'air aux propriétés différentes de l'air atmosphérique pour faciliter la simulation de la circulation d'air à travers celle-ci [Robitu, 2005]. Concernant les phénomènes solaires et infrarouges thermiques, le feuillage est plutôt représenté comme une enveloppe surfacique semi-transparente et continue. Le feuillage est alors modélisé géométriquement par un ensemble de mailles volumiques pour le modèle thermo-aéro-hydrique (**Fluent**), et, par un ensemble de mailles surfaciques constituant son enveloppe extérieure pour le modèle thermoradiatif (**Solene**). Cette géométrie est obtenue par la construction d'une forme géométrique en 3D, reprenant au plus juste la forme théorique du houppier de l'arbre, intuitivement ou selon des classifications existantes, qui détermine l'occupation

spatiale fictive maximale des branches et des feuillages. Ce volume est ensuite discrétisé en un nombre suffisant de mailles volumiques permettant une représentation macroscopique bien localisée des phénomènes de transfert qui ont lieu dans le domaine végétal. La surface englobante, implicitement discrétisée par les arêtes des mailles volumiques périphériques, est ensuite utilisée dans le modèle radiatif. Pour diminuer le nombre de mailles, mais surtout du fait de sa participation négligeable aux modifications microclimatiques locales - en terme de température surfacique, d'après Escourrou [Robitu, 2005], et en terme de perturbation aérodynamique induite assez faible comparée à celle du feuillage - le tronc de l'arbre n'est pas représenté.

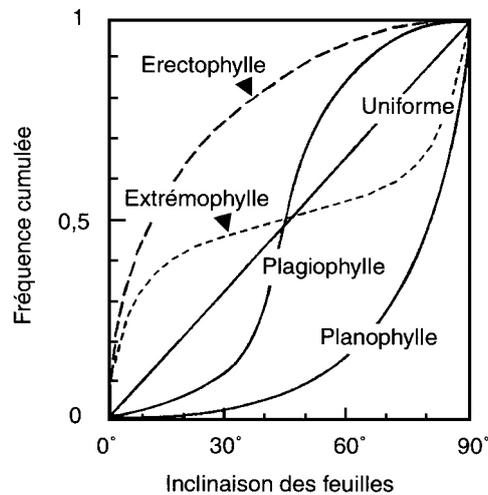
Il est possible de connaître de manière assez précise les propriétés optiques ou biophysiques des feuilles isolées à petite échelle. Les propriétés radiatives sont également bien connues et proposées selon une discrimination spectrale et angulaire, voire en fonction de la teneur en eau du végétal [Guyot, 1999], [Jacquemoud, 2002]. Les chercheurs en aérodynamique, en climatologie et en télédétection, préfèrent utiliser des propriétés géométriques macroscopiques propres à l'architecture globale des couverts végétaux pour aborder les phénomènes propres à l'échelle de la couche limite urbaine. Les critères les plus significatifs pour différencier les types de couverts entre eux sont l'inclinaison moyenne de leurs feuilles et leur densité.

Pour l'inclinaison des feuilles ( $\theta_F$ ), une approche de base consiste à considérer une inclinaison moyenne. Une approche plus fine proposée par Witt [Guyot, 1999] a permis de dégager cinq grands types de couverts végétaux en étudiant la fonction de distribution de leur inclinaison et de leur azimut (voir figure 2.15). L'aspect de l'inclinaison est surtout utile quand on cherche à analyser la distribution spatiale du rayonnement dans le couvert, ou que l'on veut analyser les directions angulaires privilégiées des flux solaires transmis ou réfléchis par le couvert.

Les applications à l'échelle microclimatique nécessite généralement uniquement une caractérisation de la densité des feuilles. Deux propriétés principales, qui combinent à la fois la distribution spatiale et la densité globale des feuilles dans un volume végétal, sont couramment utilisées. Ces données tendent à homogénéiser les propriétés structurales du couvert pour simplifier la manipulation dans les équations physiques :

➤ Le **LAI** (**L**eam **A**rea **I**ndex, ou indice foliaire) représente la surface cumulée des faces supérieures des feuilles, sur toute (ou partie de) la hauteur du couvert et par unité de surface de sol sous-jacent [Jacquemoud, 2002], [Duthoit, 2006], [Guyot, 1999]. Son expression est :

$$LAI(z) = \int_z^H A_F(z) dz \quad (2.23)$$



**Figure 2.15** : Les 5 classes de couverts végétaux en fonction de l'inclinaison de leurs feuilles. Graphe des fréquences cumulées [Guyot, 1999]

$LAI(z)$  : indice foliaire à la cote de référence  $z$  (on remplace  $z$  par 0 pour calculer le LAI global) en  $m^2.m^{-2}$

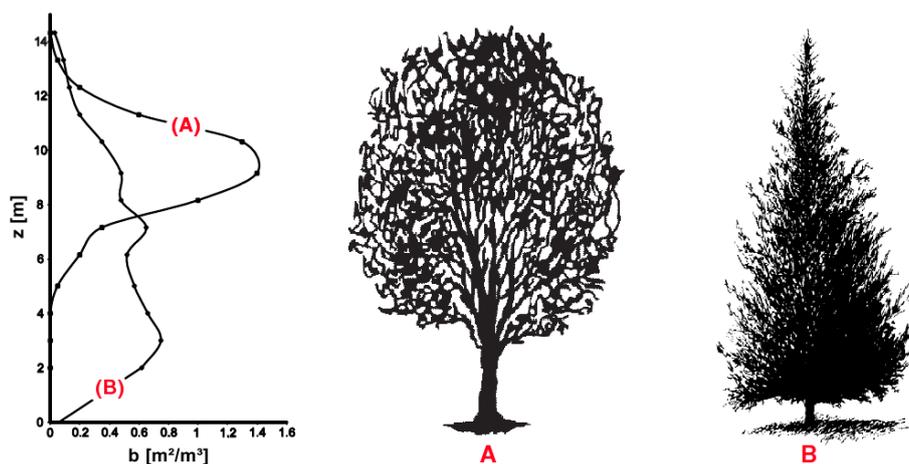
$A_F(z)$  : aire totale des faces supérieures des feuilles à la cote  $z$  par unité d'aire de sol en  $m^2.m^{-2}$

H : hauteur du couvert végétal

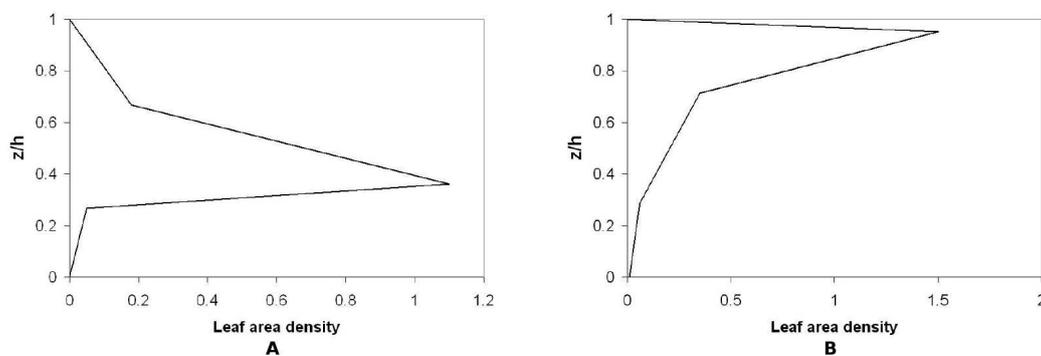
Cet indice est adapté pour caractériser les forêts denses ou les parcelles de plantations agricoles car il est calculé entre deux strates horizontales végétales de section équivalente en fonction de la hauteur (même emprise au sol). Les valeurs de LAI varient couramment de 1 à 10 [Vinet, 2000]; théoriquement de 0 pour un sol nu, pouvant dépasser 15 pour des forêts tropicales très fermées ou des forêts de conifères, atteignant rarement plus de 8 dans nos forêts tempérées et varient par exemple de 2 à 4 pour des cultures agricole annuelles [Duthoit, 2006]. Habituellement, un LAI de 5 écarte toute possibilité d'éclairement incident direct sur le sol, quelle que soit la géométrie d'éclairement; le faible rayonnement reçu par le sol est alors entièrement diffus. Cette propriété est moins appropriée quand il s'agit de caractériser des éléments isolés, car dans ces configurations, l'évaluation de la LAI peut passer par des techniques de calibrage à partir de photographies hémisphériques [Piboule, 2005].

➤ La **LAD** (**Leaf Area Density**, ou densité foliaire) représente la surface totale des feuilles par unité de volume de couvert et s'exprime en  $m^2.m^{-3}$ . La densité foliaire varie suivant l'espèce considérée, l'architecture et la saison. En fonction des espèces, la masse foliaire peut varier dans la hauteur du couvert. Pour les arbres à feuilles caduques, la majorité de la masse foliaire se trouve dans la partie la plus élevée de la couronne; elle diminue rapidement vers le

bas alors que pour des conifères, le maximum de LAD se trouve dans la partie inférieure de la couronne [Robitu, 2005]. C'est pourquoi l'architecture du feuillage des arbres est souvent décrite suivant un profil vertical de LAD ; plusieurs études expérimentales nous renseignent sur ces valeurs (voir figures 2.16 et 2.17).



**Figure 2.16** : Profil vertical de densité foliaire moyenne pour les feuillus (A) et les conifères (B) [Ries et Eichhorn, 2001]



**Figure 2.17** : Profil vertical de densité foliaire mesuré dans une forêt d'épicéa de Sitka (A) et dans une forêt de Pins (B) [Dalpé et Masson, 2007]

Pour conclure, en considération des données bibliographiques, nous modélisons géométriquement les arbres sans leur tronc, comme des milieux continus à savoir un volume d'air délimité par une surface frontière, tous deux discrétisés. La structure volumique interne est définie par la propriété de LAD, constante selon l'altitude, et prise égale à  $1 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$ .

## 2.4.2 Bilan radiatif des arbres

Cette modélisation repose sur un bilan de flux radiatifs établi sur l'enveloppe fictive surfacique de l'arbre qui, rappelons le, est supposée continue, semi-transparente au rayonnement solaire direct incident et opaque au rayonnement solaire réfléchi ainsi qu'au rayonnement de grandes longueurs d'ondes (voir figure 2.18). Ces deux derniers flux proviennent de l'environnement urbain proche. Le transfert radiatif dans la végétation dépend à la fois du rayonnement solaire incident et des propriétés optiques et géométriques de la végétation.

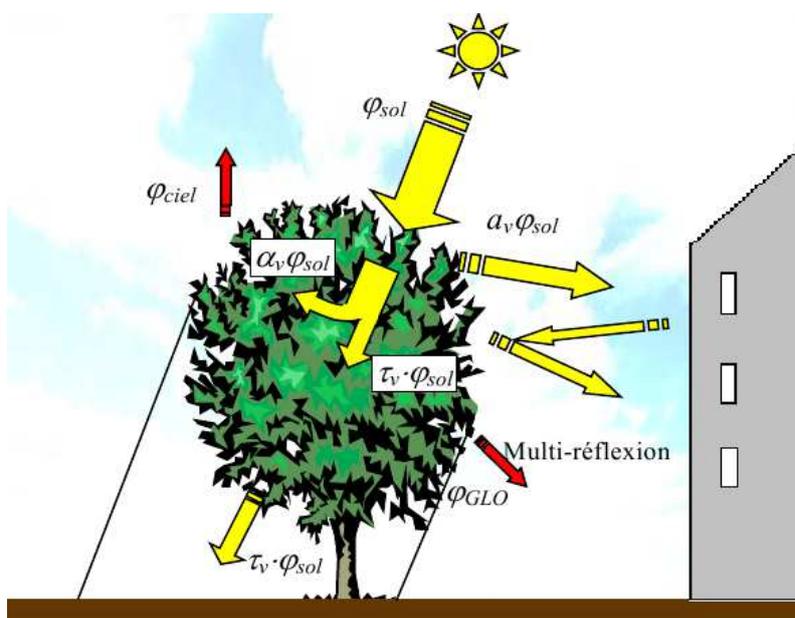


Figure 2.18 : Flux solaires à la surface des arbres [Robitu, 2005]

Une partie du rayonnement solaire direct incident sur l'enveloppe de l'arbre est réfléchi de manière totalement diffuse, du fait des orientations multiples et aléatoires des feuilles. L'autre partie pénètre la couronne de l'arbre où une fraction  $y$  est absorbée. La fraction restante traverse complètement la couronne, de manière rectiligne, et atteint les surfaces environnantes de la scène urbaine. Pour déterminer les proportions des trois quantités précédentes par rapport au flux incident, nous attribuons des propriétés solaires et thermiques à l'enveloppe de l'arbre qui ne sont pas celles des feuilles singulières, mais plutôt une intégration des caractéristiques de l'échelle microscopique des feuilles, des rameaux, des branches, de l'air interstitiel en des caractéristiques macroscopiques surfaciques de l'enveloppe fictive. Trois coefficients sont ainsi définis à l'image des surfaces semi-transparentes comme les vitrages : la réflectivité solaire ( $\rho_v$ ), la transmissivité solaire ( $\tau_v$ ), l'absorptivité solaire ( $\alpha_v$ ) déduite des deux précédentes, puis l'émissivité IRT ( $\varepsilon_v$ ). Des valeurs sont disponibles dans la littérature, et proposées dans le tableau 2.2. Ces coefficients sont des valeurs saisonnières moyennées pour un large panel

d'espèces dont les coefficients propres sont proposés dans la littérature [Vinét, 2000]. En supposant une connaissance parfaite des espèces à intégrer dans l'aménagement paysager du site, nous pourrions nous référer aux données spécifiques pour plus de précision.

	réflectivité ( $\rho_v$ )	absorptivité ( $\alpha_v$ )	transmissivité ( $\tau_v$ )	émissivité ( $\varepsilon_v$ )
été	0,30	0,50	0,20	0,97
hiver	0,15	0,15	0,70	0,97

**Tableau 2.2** : Propriétés solaires et thermiques moyennes des feuillages d'arbres

Pendant la traversée du couvert végétal, l'atténuation du rayonnement solaire en fonction de la profondeur est décrite par une loi de type exponentielle, dérivée de la loi de Beer-Lambert [Guyot, 1999], [Vinét, 2000], [Piboule, 2005] :

$$R_g(z) = R_{g,0} e^{-k.LAI(z)} \quad (2.24)$$

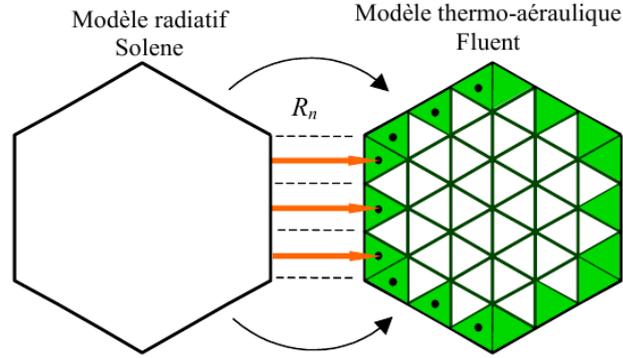
$R_g(z)$  : rayonnement global moyen à la profondeur  $z$  [ $W.m^{-2}$ ]

$R_{g,0}$  : rayonnement global au sommet de la végétation [ $W.m^{-2}$ ]

$k$  : coefficient d'extinction, dépendant de l'inclinaison des feuilles et des rayons solaires incidents ; une valeur de 0,5 peut être prise par défaut pour une orientation aléatoire des feuilles [Piboule, 2005] tandis que pour une évaluation plus précise, des formules empiriques en fonction de la classe de feuillage (voir figure 2.15), du rapport d'aspect du houppier et de la hauteur solaire existent [Vinét, 2000].

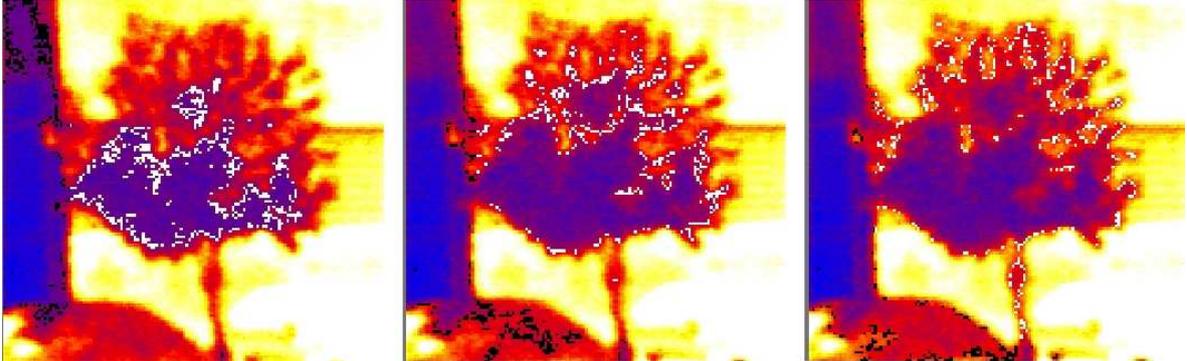
Cette décroissance rapide du flux solaire global ( $R_g$ ) dans la profondeur du feuillage équivaut à dire que la majeure partie du flux est absorbée par les premières feuilles traversées. Robitu propose d'attribuer la densité surfacique du flux absorbé par les facettes du modèle thermoradiatif à la première couche de cellules volumiques adjacentes dans le modèle thermo-aéro-hydrique (figure 2.19).

Le rayonnement IRT ( $R_{GLO,net}$ ) est calculé comme pour une surface opaque conventionnelle en utilisant les températures de la surface végétale et celles des surfaces environnantes dans l'équation de Stefan-Boltzmann résolue dans toute la géométrie par l'algorithme de radiativité de Solene. La surface végétale est considérée comme une interface isotherme sur laquelle un bilan de flux est réalisé. La température de la surface de végétation n'est pas calculée dans Solene mais imposée en entrée ; elle détermine seulement la contribution de la surface bilan de flux GLO. Ceci permet d'imposer à la surface, soit la « température d'air équivalente » calculée dans Fluent dans le cas d'une simulation couplée, soit la température d'air météorologique



**Figure 2.19 :** Attribution du flux solaire surfacique aux cellules volumiques [Robitu, 2005]

pour des simulations plus classique en mode découplé, ce qui est une première approximation satisfaisante d'après la bibliographie [Sanchez de la Flor et Alvarez Dominguez, 2004]. Même pour avec des conditions climatiques très chaudes et sous une forte exposition au rayonnement solaire, les variations locales des températures de surface sont faibles (figure 2.20).



**Figure 2.20 :** Thermographies IRT d'un arbre au cours d'une journée d'été ensoleillée à Séville, Espagne,  $T_{air}$  moyenne = 28°. Isothermes à 27°, 28° et 29°

Finalement, le terme source d'énergie qui renseigne le modèle thermo-aéro-hydrique  $R_{net}$  est l'addition de trois composantes : la fraction des flux solaires directs et diffus absorbée par l'arbre ( $\alpha_v R_g$ ), la partie absorbée du rayonnement solaire issu des multi-réflexions dans la scène  $(1 - \rho_v) R_r$  et enfin le rayonnement IRT net échangé à la surface de l'enveloppe de l'arbre  $R_{(GLO)net}$  :

$$R_{net} = \alpha_v R_g + (1 - \rho_v) R_r - R_{GLO,net} \quad (2.25)$$

avec  $\rho_v + \alpha_v + \tau_v = 1$

Le stockage thermique dans la profondeur du feuillage, contribuant à l'élévation ou à la baisse de température de surface équivalente est ainsi pris en considération dans le modèle thermo-aéro-hydrique explicité dans la partie suivante.

### 2.4.3 Modélisation thermo-aéro-hydrique des arbres

Les effets des arbres sur l'air sont intégrés dans les cinq équations du modèle thermo-aéroulique (l'équation de quantité de mouvement (équation 2.7), les deux équations de turbulence (équation 2.16 et 2.17), l'équation de transport d'humidité (équation 2.18) et celle du bilan d'énergie (équation 2.9)) au moyen de termes source ou puits pour les cellules du maillage qui correspondent au volume occupé par l'arbre

#### Modélisation de la quantité de mouvement

Les effets de la végétation sur les écoulements d'air se traduisent tout d'abord par une réduction de la vitesse du vent à l'intérieur du feuillage. L'intensité de la réduction et la distance de propagation de l'effet en aval de l'élément dépendant de la hauteur, de l'épaisseur et de la porosité de l'élément. Les feuilles, les tiges et les branches agissent sur l'écoulement d'air comme autant de freins aérodynamiques [Guyot, 1999]. Nous traduisons physiquement ce phénomène par l'ajout d'un terme de perte de charge dans le second membre de l'équation de quantité de mouvement (2.7), c'est-à-dire en lieu et place du terme vectoriel  $\vec{S}_{ext}$  de composantes  $S_{v,x}$ ,  $S_{v,y}$  et  $S_{v,z}$ . Les composantes de ce puits de mouvement, dépendent du niveau moyen de la vitesse de l'air et dans chaque direction spatiale  $x$ ,  $y$  et  $z$ , des propriétés structurelles de l'arbre ( $LAD$ ), des propriétés aérodynamiques du feuillage ( $C_d$ ) [Gross, 1987], [Ries et Eichhorn, 2001], [Takahashi et al., 2004], [Katul et al., 2004] et [Dalpé et Masson, 2007] et peut se calculer, pour chaque direction ( $i$ ), de la façon suivante :

$$S_{v_i} = -\rho_{air} C_d LAD \|\vec{v}\| v_i \quad (2.26)$$

Cette expression simplifiée du terme puits résulte classiquement d'une hypothèse de traînée visqueuse négligée par rapport à la traînée de forme du sillage [Katul et al., 2004].  $C_d$  est le coefficient de traînée aérodynamique équivalent à un coefficient de proportionnalité qui relie l'énergie cinétique du vent, ou sa pression d'arrêt ( $\rho \frac{u^2}{2}$ ), à la force exercée par unité d'aire sur un objet [Robitu, 2005]. Pour les arbres,  $C_d$  dépend de la forme, de la dimension et de l'inclinaison des feuilles. Sa valeur diffère de celle qui peut être mesurée pour une feuille isolée car les feuilles se protègent mutuellement du vent. Une majorité d'auteurs, [Guyot, 1999], [Ries et Eichhorn, 2001] et [Katul et al., 2004], suggèrent un  $C_d$  moyen de l'ordre de 0,2. Toutefois, l'incertitude sur la valeur de ce paramètre ( $\pm 0,1$ ) a un effet limité sur les modèles de transfert au sein d'un couvert végétal [Guyot, 1999].

### Modélisation de la turbulence

Le deuxième effet typique de la végétation sur l'écoulement d'air traversant est d'augmenter son niveau de turbulence. La production d'énergie cinétique turbulente ( $k$ ) peut être prise en compte dans la première équation de fermeture de la turbulence (2.16) par le terme source  $S_k$  proposé par Katul [Katul *et al.*, 2004] :

$$S_k = \rho_{air} C_d LAD (\beta_p \|\vec{v}\|^3 - \beta_d \|\vec{v}\| k) \quad (2.27)$$

$\beta_p$  : coefficient empirique de conversion d'énergie cinétique moyenne en énergie cinétique turbulente par l'effet de sillage

$\beta_d$  : coefficient empirique de dissipation d'énergie cinétique turbulente par déflexion

La végétation est un type de brise-vent poreux qui a pour particularité de générer un nombre important de petites structures turbulentes qui se dissipent très rapidement dans le sillage. Le taux de dissipation d'énergie cinétique turbulente induit ( $\varepsilon$ ) est formulé dans la deuxième équation de fermeture de turbulence par le terme source  $S_\varepsilon$ , également proposé par Katul [Katul *et al.*, 2004] :

$$S_\varepsilon = C_{4\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} S_k \quad (2.28)$$

$C_{4\varepsilon}$  : constante empirique de fermeture de la turbulence du modèle  $k$ - $\varepsilon$ , spécifique à la végétation

Les valeurs des constantes empiriques explicitées précédemment seront celles suggérées par Dalpé et Masson, référencées dans le tableau 2.3, qui ont réévalué celles proposées par Katul en réalisant une étude confrontant des résultats de mats de mesures implantés à l'intérieur et l'extérieur d'une forêt et des simulations CFD de la même zone réalisées avec le code **Fluent** [Dalpé et Masson, 2007].

$\beta_p$	$\beta_d$	$C_{4\varepsilon}$
1,00	5,03	0,78

**Tableau 2.3** : Valeurs des constantes empiriques pour l'expression de la turbulence dans la végétation

### Modélisation de la production d'humidité

L'augmentation locale du taux d'humidité dans l'air est liée au taux d'évapotranspiration de la végétation. Notons que nous commettons un abus de langage, courant dans le domaine de l'hydrologie, puisque dans le modèle présenté ci-après, seule la transpiration des feuilles

par les stomates est prise en compte. L'évaporation de la fraction d'eau, provenant des eaux pluviales, de la condensation (rosée) ou des systèmes d'arrosage, et interceptée par les feuilles, est négligée. Cette approximation se justifie du fait que sur une longue période temporelle le taux de transpiration est beaucoup plus important que le taux d'évaporation par interception, et que les événements pluvieux ne sont pas renseignés dans les données météorologiques d'entrée du modèle. Outre sa participation au cycle hydrologique comme source de vapeur d'eau dans l'atmosphère, la transpiration a de multiples autres fonctions, comme véhicule des éléments nutritifs dans la plante, les sèves brutes et élaborées - c'est la principale force motrice de circulation de l'eau dans la plante en dehors d'évènements particuliers - ou comme système de régulation thermique des feuilles par refroidissement.

Pour calculer le taux d'évapotranspiration (transpiration) d'une plante ou d'un arbre, plusieurs hypothèses sont en général faites :

➤ Premièrement, la modélisation du transfert d'eau dans l'arbre peut s'envisager selon une analogie électrique. Les quantités d'eau transpirées quotidiennement sont généralement voisines de celles qui sont absorbées par les racines, une fraction dérisoire est employée au sein de la plante. Le flux d'eau à travers le végétal peut alors être considéré comme conservatif. Dans ces conditions, le flux d'eau dans le continuum sol  $\rightarrow$  plante  $\rightarrow$  atmosphère (CSPA), système quasi isotherme, peut être décrit par analogie à la loi ohmique suivant l'équation 2.29 [Guyot, 1999] :

$$\Phi = \frac{d\Psi}{r} \quad (2.29)$$

$\Phi$  : flux d'eau dans la plante ( $Pa.m.s^{-1}$ )

$d\Psi$  : potentiel chimique, nommé potentiel hydrique par les agronomes, physiologistes et hydrologues ( $Pa$ )

$r$  : résistance totale aux transferts hydriques ( $s.m^{-1}$ )

Des résistances en série s'opposent au cheminement de l'eau à travers le CSPA comme le montre la figure 2.21 :

- la résistance au passage de l'eau du sol vers aux racines  $r_{s-r}$  (phase liquide) ;
- la résistance interne de la plante  $r_p$  (phase liquide) ;
- la résistance stomatique  $r_{sto}$  (phase gazeuse) ;
- la résistance atmosphérique ou de couche limite ou résistance aérodynamique  $r_{aero}$  (phase gazeuse).

avec  $r = r_{s-r} + r_p + r_{sto} + r_{aero}$

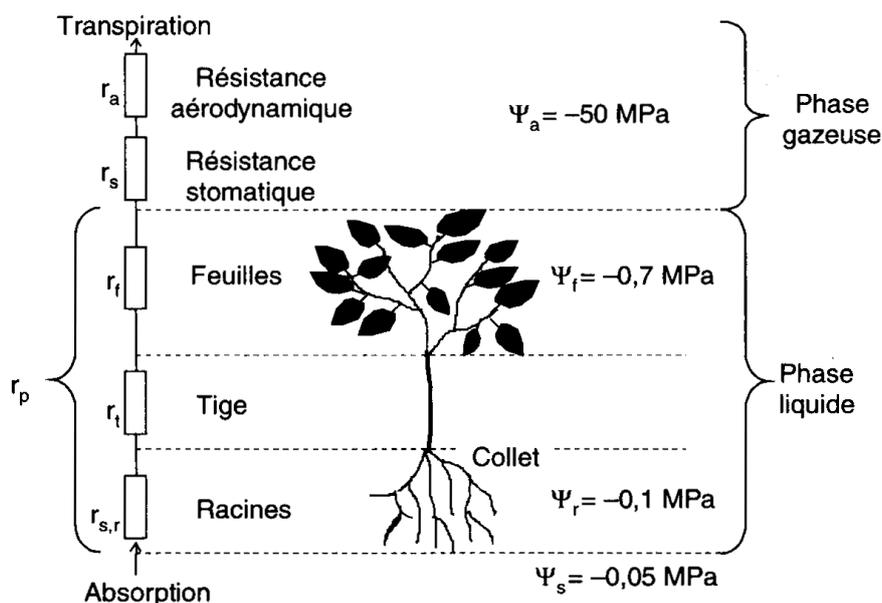


Figure 2.21 : L'analogie électrique du cheminement de l'eau dans la plante [Guyot, 1999]

D'après Guyot, la somme des résistances en phase gazeuse,  $r_{sto} + r_{aero}$  est 50 à 100 fois supérieure à la somme de celles en phase liquide  $r_{s-r} + r_p$ . Ainsi l'état des stomates constitue un moyen de contrôle extrêmement efficace de la transpiration de la plante [Guyot, 1999].

➤ Deuxièmement, nous pouvons considérer que la différence de potentiel est uniquement fonction de la différence d'humidité spécifique entre la surface de la feuille et l'air. En effet, le processus d'évapotranspiration est d'une part conditionné par la demande évaporative de l'air, donc par la charge en humidité, d'autre part, par la capacité du système végétal à satisfaire cette demande, à savoir, de l'humidité du sol dans la zone racinaire qui conditionne celle des feuilles, de l'âge et de l'espèce de la plante, ainsi que du développement de son feuillage et de la profondeur des racines [Musy, 2005]. Nous nous plaçons dans le cas théorique idéal où le sol au niveau de la zone racinaire n'est pas en déficit d'humidité, et donc, que les racines sont convenablement irriguées. De plus, nous considérons que l'arbre est à taille adulte et par conséquent ne demande pas de supplément d'absorption pour maintenir le potentiel hydrique. Pour décrire le phénomène de transpiration de surface, il est impossible d'utiliser directement des équations de transfert volumique à cause de l'humidité spécifique de surface  $q_s$  qui est inconnue. Pour surmonter cette difficulté, une approche très utilisée en micrométéorologie agricole consiste à remplacer la valeur d'humidité spécifique  $q_s$  par la valeur d'humidité spécifique à sa valeur de saturation  $q_{sat}$ , qui est censée être prédominante au niveau des cavités sous-stomatiques des éléments des feuillages [Brutsaert, 1982].

L'expression du taux d'évapotranspiration peut alors s'écrire selon l'équation 2.30 :

$$E_s = \rho_{air} \frac{q_{sat} - q_{z_{ref}}}{r_{aero} + r_{sto}} \quad (2.30)$$

$E_s$  : taux d'évapotranspiration surfacique ( $kg.m^{-2}.s^{-1}$ )

$\rho_{air}$  : masse volumique de l'air ( $kg.m^{-3}$ )

$q_{sat}$  : humidité spécifique pour l'air saturé au niveau des stomates ( $kg_{(eau)}.kg_{(airsec)}^{-1}$ )

$q_{z_{ref}}$  : humidité spécifique à un niveau de référence au delà de la couche limite aérodynamique du feuillage ( $kg_{(eau)}.kg_{(airsec)}^{-1}$ )

L'équation 2.31 permet le passage de  $1 m^2$  de surface foliaire théorique à  $1 m^3$  de cellule volumique de feuillage du modèle :

$$E_v = \rho_{air} LAD \frac{q_{sat} - q_{z_{ref}}}{r_{aero} + r_{sto}} \quad (2.31)$$

$E_v$  : taux d'évapotranspiration volumique ( $kg.m^{-3}.s^{-1}$ )

Nous rappelons maintenant brièvement comment calculer les variables relatives à l'humidité de l'air, utilisées pour déterminer le numérateur de l'équation 2.31, mais aussi utilisées pour déterminer les variables relatives à l'évapotranspiration des sols dans le sous chapitre suivant. Composé d'air sec et de vapeur d'eau, l'air atmosphérique se comporte comme un mélange de gaz parfaits obéissant à la loi de Dalton<sup>8</sup> :

$$p_A = p_a + e \quad (2.32)$$

$p_A$  : pression totale de l'air humide ( $Pa$ )

$p_a$  : pression partielle de l'air sec ( $Pa$ )

$e$  : pression partielle (ou tension) de vapeur d'eau ( $Pa$ )

Cette relation est vraie tant que la vapeur d'eau n'est pas saturante, c'est-à-dire tant qu'il n'y a pas équilibre entre la phase gazeuse et la phase liquide.

L'expérience montre que la tension de vapeur en équilibre avec l'eau liquide (ou tension de vapeur saturante) est uniquement une fonction croissante de la température. Guyot nous documente sur les nombreuses formules d'approximation qui sont proposées pour estimer la tension de vapeur saturante de l'eau en fonction de la température [Guyot, 1999]. Certaines, comme la formule empirique de Goff et Gratch adoptée par l'organisation météorologique mondiale et valide de  $-50^\circ C$  à  $+100^\circ C$ , sont basées sur l'intégration de la formule

<sup>8</sup> « La pression totale d'un mélange de gaz parfaits occupant un volume  $V$  à une température  $T$  est la somme des pressions partielles des gaz constituant le mélange. »

de Clapeyron-Clausius relative aux changements d'états. D'autres expressions, comme les formules de Magnus ou Tetens, sont plus simples et inversibles mais demandent pour des gammes de température réduites une modification de leurs coefficients. Enfin, il existe une formule voisine des précédentes, mise au point par Alt en 1978 et de plus en plus utilisée, qui a l'avantage d'être valable pour l'ensemble des valeurs rencontrées en météorologie et donne une très bonne estimation des valeurs de tension de vapeur :

$$e_{sat}(T_a) = 610,7 \left[ 1 + \sqrt{2} \sin \left( \frac{T_a}{3} \right) \right]^{8,827} \quad (2.33)$$

$e_{sat}$  : tension de vapeur saturante (Pa)

$T_a$  : température d'air ( $^{\circ}C$ )

Le déficit de saturation, différence entre la pression de vapeur saturante et la pression de vapeur réelle ( $e_{sat} - e$ ), peut aussi être exprimé d'une autre manière en recourant à la notion d'humidité relative  $H_r$ , souvent employé par les climaticiens pour caractériser le niveau de confort. Cette dernière s'exprime par la relation suivante :

$$H_r = \frac{e}{e_{sat}} \times 100 \text{ [%]} \quad (2.34)$$

Nous considérons un volume  $V_A$  d'air humide à la température  $T_A$  et à la pression  $p_A$ . Il est constitué par le mélange de la masse  $m_a$  d'air sec et de la masse  $m_w$  de vapeur d'eau et de masse totale  $m_A$  et donc :

$$m_A = m_a + m_w \quad (2.35)$$

L'humidité spécifique est la concentration massique en vapeur d'eau dans l'air. Elle est égale au quotient de la masse de la vapeur d'eau dans l'air humide :

$$q = \frac{m_w}{m_w + m_a} \quad (2.36)$$

D'après l'équation d'état des gaz parfaits, nous pouvons écrire :

$$m_a = M_a \frac{p_a V_A}{RT} \quad (2.37)$$

$$m_w = M_w \frac{e V_A}{RT} \quad (2.38)$$

$M_a$  : masse molaire de l'air sec :  $29 \cdot 10^{-3} \text{ kg.mol}^{-1}$

$M_w$  : masse molaire de la vapeur d'eau :  $18 \cdot 10^{-3} \text{ kg.mol}^{-1}$

$R$  : constante des gaz parfaits :  $8,314 \text{ J.}^{\circ}K^{-1}.\text{mol}^{-1}$

$T$  : température du gaz ( $^{\circ}K$ )

En substituant les termes des équations 2.37 et 2.38 dans l'équation 2.36, nous obtenons respectivement les équations 2.39 et 2.40 :

$$q = \frac{\varepsilon e}{\varepsilon e + p_a} \quad (2.39)$$

$$q_{sat} = \frac{\varepsilon e_{sat}}{\varepsilon e_{sat} + p_a} \quad (2.40)$$

$\varepsilon$  : rapport des masses molaires  $\frac{M_w}{M_a} \approx 0,622$

Nous explicitons maintenant la méthode de calcul des deux résistances au passage de l'eau de la plante à la vapeur d'eau dans l'air pour déterminer le dénominateur de l'équation 2.31.

➤ La **résistance stomatique**,  $r_{sto}$ , varie avec le degré d'ouverture des stomates. En effet les stomates ont aussi pour attribut d'ajuster leur ouverture pour empêcher la perte d'eau quand la plante est soumise à un stress hydrique. Cette résistance représente la contrainte physiologique imposée par la végétation au mouvement de l'eau au travers de ses stomates. Le rôle de toutes les variables climatiques rend la description et l'évaluation de la résistance stomatique,  $r_{sto}$ , difficile.

Robitu fait une revue de quelques formulations de la résistance stomatique parmi les nombreuses qui existent dans la littérature [Robitu, 2005]. Jarvis décrit l'inverse de la résistance stomatique, la conductance stomatique,  $g_{sto}$ , comme le produit d'une conductance maximale  $g_{sto(max)}$  et de 5 facteurs liés aux variables climatiques  $f_1 \dots f_5$ , chacun variant de 0 à 1 suivant la permmissivité du facteur climatique à la transpiration. Deardorff a exprimé la résistance stomatique par l'équation faisant intervenir l'énergie solaire incidente, le stress hydrique dans le sol et la croissance de la plante. Pour Jacobson, la résistance stomatique dépend du type de plante. Plus récemment, Monteith a suggéré une relation alternative pour expliquer comment la dépendance de la conductance stomatique devrait plutôt être interprétée comme la réponse du stomate à l'évaporation ; le souci est que cette relation linéaire pourtant simple, dépend du taux d'évaporation que l'on cherche lui-même à évaluer.

Finalement la résistance stomatique varie d'environ  $40 \text{ s.m}^{-1}$  à  $20\,000 \text{ s.m}^{-1}$  correspondant respectivement à des stomates largement ouverts et complètement fermés. Beaucoup d'auteurs s'accordent à dire qu'une valeur moyenne et constante de  $100 \text{ s.m}^{-1}$  peut être considérée pour la majorité des cas. Ce sera la valeur prise par défaut dans les équations de notre modèle.

➤ La **résistance aérodynamique**,  $r_{aero}$ , est engendrée par la couche limite de la feuille au niveau de laquelle l'écoulement passe d'un régime laminaire à turbulent. Elle peut être vue

comme la résistance rencontrée par la vapeur d'eau et la chaleur à leur transfert de la surface vers l'air ambiant. L'épaisseur de la couche limite dépend de la dimension des feuilles, de la rugosité de leur surface et de la vitesse du vent. La résistance aérodynamique, augmente avec la dimension de la feuille, avec la diminution de la vitesse du vent et dans une moindre mesure, avec la décroissance de la différence de température entre la feuille et l'air [Robitu, 2005].

Des auteurs proposent des valeurs pour les feuilles individuelles, de 5 à 10  $s.m^{-1}$  [Oke, 1987] et 15  $s.m^{-1}$  [Lövenstein *et al.*, 1995]. Certains auteurs comme Barden ou Landsberg proposent des formules empiriques pour l'exprimer en fonction des caractéristiques géométriques de la feuille [Robitu, 2005]. Le problème qui se pose est la question de l'agrégation des résistances aérodynamiques des feuilles individuelles pour accéder à celle d'un feuillage dans son ensemble. Comme pour l'approche de la LAI, les travaux les plus aboutis sont ceux nous donnant des valeurs intégrées de résistances pour des couverts homogènes de forêt dense ou de plantations agricoles. La plage de valeurs pour  $r_{aero}$  est alors beaucoup plus importante, Musy propose une plage allant de 10 à 100  $s.m^{-1}$ . Nous nous basons sur la formulation de Monteith, couramment admise pour ce type de couvert végétal :

$$r_{aero} = \frac{v_{ref}}{v^*2} \quad (2.41)$$

$v_{ref}$  : vitesse de référence (point de mesure juste en dehors de la couche limite) [ $m.s^{-1}$ ]

$v^*$  : vitesse de frottement [ $m.s^{-1}$ ]

Le profil de vitesse au voisinage des couverts végétaux est exprimé en loi logarithmique [Brutsaert, 1982] [Guyot, 1999] [Musy, 2005], l'équation 2.41 devient alors :

$$r_{aero} = \frac{1}{\kappa^2 v} \left[ \ln \left( \frac{z_{ref} - d_0}{z_0} \right) \right]^2 \quad (2.42)$$

$\kappa$  : voir équation 2.22

$z_{ref}$  : hauteur de référence pour la vitesse [ $m$ ]

$z_0$  : hauteur de rugosité [ $m$ ]

$d_0$  : hauteur de déplacement [ $m$ ]

Nous utilisons les relations approchées données par Guyot pour exprimer la hauteur de rugosité  $z_0$  et la hauteur de déplacement  $d_0$  à savoir respectivement 0,15 et 0,7 fois la hauteur totale de l'arbre ou de la plante [Guyot, 1999]. Enfin, il est conseillé de considérer pour  $z_{ref}$  la hauteur de l'arbre à laquelle nous ajoutons 2  $m$  [Musy, 2005].

Finalement, la modélisation de la production d'humidité dans les cellules volumiques associées à la végétation consiste à intégrer un terme source ( $S_{(H_2O)}$  dans l'équation 2.18) qui devient égal à  $E_v$  (voir équation 2.31).

### Bilan énergétique

Comme nous l'avons rappelé en préambule, le bilan énergétique de la végétation résulte de l'équilibre entre les flux microclimatiques et l'énergie chimique. Seulement une partie du rayonnement incident qui traverse l'enveloppe surfacique est absorbée dans l'épaisseur du feuillage ( $R_{net}$  dans l'équation 2.25). Ce flux énergétique est alors utilisé en grande partie pour faire évapotranspirer l'eau des feuilles ( $E_v$  dans l'équation 2.31) et pour la photosynthèse. Le reste est soit stocké dans le végétal ou soit échangé avec l'air ambiant sous forme de chaleur sensible ( $H$ ). La photosynthèse ne représente que 1 à 2% de ces échanges énergétiques [Guyot, 1999] et le stockage de chaleur dans la végétation est très faible, environ  $6 W.m^{-2}$  selon [Oke, 1987], et pour les arbres est localisé en grande partie dans le tronc que l'on ne représente pas dans le modèle. Nous négligeons alors ces deux termes du bilan. Le bilan pour une surface végétale peut alors s'écrire :

$$R_{net} = H + LE_s \quad (2.43)$$

$L$  : chaleur latente de vaporisation de l'eau calculée par la formule de Harrison [Allen et al., 1998] :  $L = 2,501.10^6 - 2,361.10^6.T_a [J.kg^{-1}]$

L'échelle transversale des couches aérodynamiques limites hydrique et thermique étant similaires [Brutsaert, 1982], il est possible d'exprimer le flux sensible comme une quantité inversement proportionnelle à la résistance aérodynamique (équation 2.42) comme le propose Robitu :

$$H = \rho_{air} C_{air} \frac{T - T_{air(z_{ref})}}{r_{aero}} \quad (2.44)$$

$\rho_{air}$  : masse volumique de l'air [ $kg.m^{-3}$ ]  
 $C_{air}$  : capacité thermique de l'air [ $J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$ ]  
 $T$  : température de la végétation [ $^{\circ}C$ ]  
 $T_{air(z_{ref})}$  : température de l'air à hauteur de référence [ $^{\circ}C$ ]

Nous définissons alors une source de chaleur volumique que l'on intègre à l'équation de conservation de l'énergie (équation 2.9) pour chaque cellule d'air correspondant à du végétal dans le maillage volumique :

$$S_h = R_{net,v} - LAD(H + LE_s) \quad (2.45)$$

$R_{net,v}$  [ $W.m^{-3}$ ] est calculé en multipliant  $R_{net}$  en [ $W.m^{-2}$ ] par l'aire de la facette réceptrice du rayonnement (modèle géométrique de **Solene**) et en divisant par le volume de la cellule adjacente auquel elle appartient (modèle géométrique de **Fluent**).

## 2.5 Modélisation des sols

La modélisation des sols est la première des deux contributions de ce travail de thèse pour l'enrichissement de l'outil de simulation microclimatique. Dans l'ancienne version de l'outil, les aménagements de sol étaient assimilés à des éléments de paroi de bâtiment et renseignés par les différents matériaux et épaisseurs associés composant la couche superficielle, et pour lesquels une condition limite intuitive était attribuée en sous-face dans le modèle **Solene**. Pour l'outil **Fluent**, seule la température de surface jouait le rôle de condition limite. Cette représentation était trop approchée pour bien traiter le stockage thermique, en particulier la nuit [**Rigenbach, 2004**], puis était limitée aux sols artificiels puisque les échanges latents n'intervenaient pas.

### 2.5.1 Principe

La modélisation des effets thermiques dans le sol est une discipline rendue compliquée par plusieurs aspects. D'une part sa composition dans la profondeur peut être assez hétérogène, et la composition des différentes strates superposées est souvent mal connue. Le sous-sol est constitué de constituants d'origines minérales et organiques, d'eau et d'air, et ses caractéristiques thermiques dépendent de leurs proportions respectives et de l'arrangement de ces constituants. D'autre part, en milieu urbain, le sous-sol contient des équipements sanitaires comme les réseaux d'eaux usées, les réseaux de chaleur, les réseaux électriques et d'autres systèmes pouvant conduire à des sources ou puits volumiques de chaleur. Enfin, le taux d'humidité et son transfert interagissent fortement avec les flux de chaleur mis en jeu. Nous aspirons avec notre modèle à une simplification physique n'altérant pas le bilan énergétique au sein de la CU.

Une modélisation fine pour le sol peut être de le considérer comme un volume fini s'étendant de la surface jusqu'à une certaine profondeur, et de le discrétiser en mailles volumiques. Ceci présente surtout un intérêt pour des calculs de transferts de chaleur tridimensionnels, en résolvant des équations de bilan en volumes finis, comme c'est le cas dans **Fluent**. Dans la mesure où l'intérêt d'un modèle de sol pour une simulation microclimatique urbaine est la connaissance de sa température de surface pour réaliser le bilan thermoradiatif IRT, et la connaissance des flux de chaleur et d'humidité échangés avec l'air ambiant à son contact, nous choisissons une modélisation monodimensionnelle selon la profondeur. Non seulement cette représentation permet l'utilisation de méthodes de résolution moins gourmandes en temps de

calcul mais la gamme des variables physiques d'entrée et de sortie est cohérente avec celles des autres modèles d'aménagement. Le niveau d'abstraction est équivalent. Ainsi le bilan thermique sera réalisé indépendamment pour chaque facette de sol dans l'outil *Solene*, alors que dans l'outil *Fluent* la surface du sol, qui constitue une des limites géométriques de la veine numérique, sera uniquement renseignée en terme de conditions aux limites thermiques et hydriques.

## 2.5.2 Modélisation thermoradiative des sols

La modélisation repose sur une analogie électrique et une discrétisation nodale dans la profondeur. Le transfert de chaleur en profondeur respecte la loi de conduction monodimensionnelle dans les diverses couches de matériaux traversées, considérées homogènes et isotropes pour chaque composition d'aménagement référencée par l'utilisateur. L'élément moteur de ce transfert est la différence entre la température de surface, déterminée par un bilan des flux microclimatiques surfaciques, et une condition limite de température en profondeur liée au rythme thermique journalier et saisonnier. Le stockage thermique est modélisé par des capacités thermiques positionnées à des profondeurs particulières.

La première hypothèse importante permettant d'utiliser cette approche est que l'empilement des matériaux composant la couche superficielle du sol (en dessous de la dizaine de mètre) est homogène et isotrope transversalement. Deuxièmement, le fait de travailler sur une profondeur assez faible et de ne pas tenir compte des précipitations nous permet de considérer le taux d'humidité du sol constant et d'éviter la modélisation du transfert hydrique, comme dans le modèle de transport de chaleur et d'humidité de Asaeda et Ca [Asaeda et Ca, 1993].

### Discrétisation dans la profondeur

Nous avons choisi de discrétiser le sol en quatre nœuds de calcul. Le nœud 1 correspond à la surface, le nœud 2 à la sous face d'un revêtement, le nœud 3 est à mi distance du nœud 2 et 4 et le nœud 4 est positionné à une profondeur de référence où l'on estime la condition limite de température. Pour chacun des nœuds intermédiaires est établie une équation en fonction de la température inconnue :

Au nœud 1 (en surface) :

$$\frac{T_s - T_{air}}{R_c} + \frac{T_s - T_2}{R} + C_e \frac{dT_s}{dt} = R_{net} - LE + H \quad (2.46)$$

Au nœud 2 (en sous-face du revêtement) :

$$\frac{T_2 - T_s}{R} + \frac{T_2 - T_3}{R_s} + C_i \frac{dT_2}{dt} = 0 \quad (2.47)$$

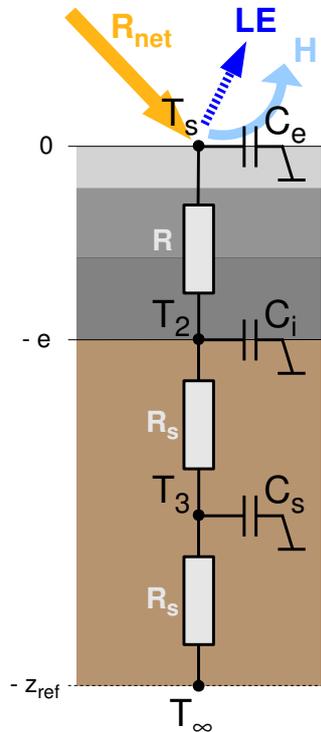


Figure 2.22 : Schématisation du modèle de sol

Au nœud 3 (à la profondeur  $z_1$  dans le sol) :

$$\frac{T_3 - T_2}{R_s} + \frac{T_3 - T_\infty}{R_s} + C_s \frac{dT_3}{dt} = 0 \quad (2.48)$$

### Bilan énergétique de surface

L'équation 2.46 correspond à un bilan de flux surfacique. Elle représente l'équilibre entre les flux internes (flux conduit à travers le revêtement et flux stocké en surface) et les flux microclimatiques externes (flux convectif, flux radiatif total, flux latent).

➤ Les **flux internes** : Le flux conduit correspond au terme  $\frac{T_s - T_2}{R}$  et le flux stocké au terme  $C_e \frac{dT_s}{dt}$ . La méthode de calcul des résistances et des capacités est détaillée dans la partie 2.6.3 décrivant la méthode de modélisation des parois d'un bâtiment.

➤ Le **flux convectif** correspond au terme  $H = \frac{T_s - T_{air}}{R_c}$ . La résistance convective  $R_c$  est effectivement l'inverse du coefficient de convection  $h_c$ . Nous détaillerons son calcul dans la partie 2.7 dédiée au couplage des deux outils (équation 2.88).

➤ Le **flux radiatif net total** se calcule de la même façon que dans l'équation 2.25.

➤ Le **flux latent** est le produit de la chaleur latente avec le taux d'évapotranspiration du sol, soit le terme  $LE$ . Jusqu'ici, dans *Solene*, les flux latents s'opérant à la surface n'étaient pas pris en compte ; à juste titre, puisque les sols urbains sont souvent artificiels et imperméabilisés. Dans ces cas, l'eau des précipitations s'écoule vers les réseaux d'eaux usées équilibrant le cycle de l'eau, et l'eau du sous sol ne peut pas s'évaporer car les revêtements artificiels créent un barrage. En réalité, une partie de l'eau de ruissellement s'évapore avant son évacuation mais, non seulement ces phénomènes sont aléatoires et obéissent à des échelles de temps en dessous de celles de nos modèles, et nous rappelons aussi que les événements pluvieux ne sont pas pris en compte dans nos données climatiques d'entrée du modèle. Le problème de la modélisation de l'évapotranspiration se pose alors uniquement pour les sols naturels perméables que nous proposons d'intégrer au modèle, car ils représentent un enjeu intéressant pour la climatisation passive de l'environnement urbain comme nous l'avons exposé dans la revue bibliographique du premier chapitre.

L'évapotranspiration est un phénomène que l'on associe aussi aux sols naturels [Guyot, 1999]. Là aussi, nous pouvons utiliser le terme avec un abus de langage, car si dans le cas d'un sol couvert par de la pelouse il est difficile de distinguer l'évaporation de la transpiration qui sont simultanées, pour un sol nu humide aussi bien que pour une surface d'eau libre, de neige, de glace, seule l'évaporation est concernée. L'évapotranspiration dépend des conditions de température et de rayonnement car elle exige un apport de chaleur extérieur, mais, est aussi très favorisée par l'augmentation de l'intensité du vent et la faible charge en humidité de l'air (qui ne doit pas être saturé) déterminant tous deux son pouvoir évaporant [Musy, 2005]. De plus, si la quantité d'eau à disposition n'est pas un facteur limitant dans le cas de l'évaporation à partir d'une surface d'eau libre, puisqu'elle est considérée comme infiniment disponible, elle le devient dans la situation d'un sol. La quantité d'eau évapotranspirée dépend aussi de la capacité du sol à répondre à la demande évaporative climatique par sa teneur en eau et par sa capacité à transmettre de l'eau vers la surface par capillarité.

La modélisation de l'évapotranspiration fait référence à plusieurs concepts théoriques. En effet, elle fait l'objet d'évaluations et de modélisations pour des objets et des échelles différentes. A grande échelle spatiale, souvent pour des bassins versants, les hydrologues l'évaluent pour des parcelles de sol très hétérogènes et exposées à des variabilités microclimatiques locales, tandis qu'à petite échelle les agronomes l'évaluent pour des cultures agricoles dans des conditions idéales d'irrigation. Les plus petites échelles de temps considérées sont des périodes journalières. Ainsi, les modèles d'évaporation existants, sont surtout adaptés aux sols non-urbains, et en particulier aux sols recouverts par de la végétation.

Thornthwaite, en 1948, est le premier à introduire un concept d'évapotranspiration potentielle, dans un contexte de classification du climat [Oudin, 2004] : « Il y a une distinction entre le volume d'eau qui est effectivement évapotranspiré et celui qui pourrait être évapotranspiré, s'il était disponible. Lorsque la disponibilité en eau augmente, l'évapotranspiration atteint un maximum qui dépend uniquement du climat. C'est ce que nous pourrions appeler évapotranspiration potentielle, en distinction de l'évapotranspiration réelle ». Nous caractérisons alors le flux de vapeur d'eau évaporée pour une surface selon différents termes conceptuels [Guyot, 1999] :

- L'évapotranspiration potentielle ( $ETP$  ou  $ET_0$ ) : elle correspond au cas où toutes les surfaces évaporantes d'un couvert végétal sont recouvertes d'eau et donc à saturation. Cette grandeur correspond donc à un concept théorique et représente les possibilités maximales d'évaporation dans des conditions climatiques données. Ce cas limite peut se rencontrer dans les conditions naturelles, dans une période relativement courte (évaporation de l'eau libre déposée sur les feuilles) après une pluie, une forte rosée ou une forte irrigation par aspersion.
- L'évapotranspiration potentielle théorique ( $ETP^*$ ) : elle correspond à la valeur maximale de  $EP$ , lorsque la végétation n'oppose aucune résistance au transfert de vapeur d'eau. Elle ne dépend alors que des apports énergétiques par les facteurs du climat et est indépendante des caractéristiques de la surface. Elle peut être déterminée à partir de formules climatiques comme la formule de Penman.
- L'évapotranspiration réelle ( $ETR$ ) : elle correspond au cas général dans les conditions naturelles. Elle est égale à la quantité d'eau qui est réellement évapotranspirée au niveau d'une culture. Elle est très variable et dépend des conditions climatiques (vent, bilan radiatif) de la disponibilité en eau de la surface et des caractéristiques de la partie aérienne des couverts végétaux.
- L'évapotranspiration réelle maximale ( $ETR_M$  ou  $ET_M$ ) : elle représente une valeur particulière de l' $ETR$  d'un couvert végétal lorsque la résistance stomatique est minimale. Cela suppose donc que l'alimentation hydrique de la culture soit optimale. Cependant, l' $ETR_M$  ne peut jamais atteindre l'évaporation potentielle car, même lorsque les stomates des plantes sont largement ouverts, le couvert végétal lui-même offre de par sa structure géométrique, une certaine résistance au transfert de vapeur d'eau. Il existe cependant un cas particulier pour lequel  $EP \approx ETR_M$  : celui d'un gazon bien alimenté en eau, car la résistance offerte par sa structure au transfert de vapeur d'eau est pratiquement nulle.
- L'évapotranspiration potentielle climatique ( $ETP_c$ ) : elle est donnée par les formules climatiques, comme la formule de Penman et celles qui en sont dérivées, et dans lesquelles des coefficients d'ajustement introduisent une valeur moyenne de la résistance moyenne de la résistance atmosphérique au transfert de vapeur d'eau.  $ETP_c$  peut être calculée à partir

des données météorologiques, sur des intervalles de temps allant de la journée au mois. Les valeurs obtenues sont inférieures à celles de  $EP^*$  dans les mêmes conditions.

Pour la culture de référence, en l'occurrence le gazon,  $ETR \leq ETR_M \leq ETP$ . Pour tous les autres végétaux, seule la relation  $ETR \leq ETR_M$  est toujours valable tout au long de l'année [Musy, 2005]. Penman considère implicitement que l' $ETP$  représente la valeur maximale de l' $ETR$ . Cependant, si la transpiration est importante, l' $ETR$  peut dépasser l' $ETP$  de Penman par un facteur allant jusqu'à 1,4 [Oudin, 2004]. Morton donne une définition un peu plus précise de l' $ETP$  : « L'évapotranspiration potentielle peut se définir comme l'évapotranspiration qui se produirait d'une surface maintenue humide sous des conditions d'absorption de rayonnement régional, de transfert de vapeur et de chaleur, dont l'aire est assez petite pour que les transferts de chaleur et de vapeur d'eau à la surface n'aient pas d'influence significative sur le pouvoir évaporant de l'atmosphère ».

Oudin présente cinq classes principales de méthodes d'estimation de l'évapotranspiration potentielle [Oudin, 2004] :

- la méthode du *bilan hydrique* : elle fait intervenir des techniques expérimentales (bacs à évaporation, lysimètres) ;
- les méthodes *aérodynamiques* : elles reposent sur des équations faisant intervenir la vitesse et la tension de vapeur d'eau de l'air ambiant ;
- les méthodes en *température* : elles reposent sur des équations empiriques faisant intervenir la température d'air ;
- les méthodes *radiatives* : elles reposent sur des équations empiriques faisant intervenir le rayonnement solaire ;
- les méthodes *combinatoires* : elles correspondent à des formulations, dérivées des travaux de Penman, reposant sur les principes physiques du bilan d'énergie.

La fiabilité et les différences entre ces méthodes ont été étudiées par Jensen (1990) puis Amatya (1995) en comparant des résultats de mesures lysimétriques avec l'évaluation du taux d'évapotranspiration donné par un grand nombre de formules existantes appartenant aux quatre classes précédentes. Globalement, les méthodes en température, radiatives et combinatoires sont plus performantes que les méthodes aérodynamiques. Pour l'estimation de l'évapotranspiration sur des pas de temps réduits, les méthodes combinatoires offrent les meilleures garanties. Les auteurs notent tout de même que certaines méthodes radiatives sont assez performantes et peuvent être utilisées lorsque les données climatiques sont réduites. De plus, par rapport aux méthodes combinatoires, les méthodes radiatives et en température sont souvent déterminées dans des climats particuliers et ne sont pas facilement transposables.

Le constat précédent nous suggère d'utiliser une méthode combinatoire pour le modèle. Notre choix se porte sur la relation de Penman (1948) qui est la plus connue. Cette formule

d' $ETP$  est construite en combinant l'approche aérodynamique de Dalton<sup>9</sup>, ajustée de manière empirique, et une approche basée sur les principes physiques du bilan d'énergie. Cet artifice permet d'éliminer un terme délicat à mesurer : la température de surface. Nous utilisons également la relation de Penman-Monteith (1965), estimée parmi les plus fiables d'après Jensen et Amatya [Oudin, 2004], où Monteith fait explicitement intervenir les paramètres liés aux caractéristiques d'un couvert végétal uniforme recouvrant le sol, comme la pelouse, en intégrant les résistances aérodynamique et de surface (équivalente à une résistance stomatique agrégée pour un couvert), déjà évoquée dans la modélisation de la végétation. L'établissement de cette formule repose sur cinq hypothèses :

1. le régime thermique est permanent, ce qui correspond en conditions réelles à des intervalles de temps très courts, de quelques minutes à une heure ;
2. les flux sont conservatifs entre la surface considérée et le niveau de référence dans l'air, ce qui suppose que la surface est suffisamment étendue pour qu'on puisse négliger les apports latéraux d'énergie par advection ;
3. la surface doit être plane, homogène et continue ;
4. la surface est saturée en eau, l'eau doit donc être libre et la tension de vapeur au niveau de la surface est la tension de vapeur saturante à la température de la surface ;
5. toute l'énergie disponible (essentiellement sous forme radiative) est absorbée au niveau de la surface.

Son expression est donnée par l'équation :

$$ETP_c = \frac{R_n \Delta + \gamma E_a}{L(\Delta + \gamma k_r)} \quad (2.49)$$

$ETP_c$  : flux d'évapotranspiration potentielle climatique [ $kg.m^{-2}.s^{-1}$ ]

$R_n$  : flux radiatif net total [ $W.m^{-2}$ ] (voir équation 2.46)

$L$  : chaleur latente de vaporisation de l'eau [ $J.kg^{-1}$ ] (voir équation 2.43)

$\Delta$  : pente de la courbe de pression de vapeur à la température moyenne de l'air [ $Pa.^{\circ}C^{-1}$ ]

$\gamma$  : constante psychrométrique [ $Pa.^{\circ}C^{-1}$ ]

$E_a$  : pouvoir évaporant de l'air [ $W.Pa.^{\circ}C^{-1}.m^{-2}$ ]

$k_r$  : constante liée aux résistances hydriques du couvert végétal

La pente de la courbe de pression de vapeur saturante est obtenue en calculant la dérivée de  $e_{sat}(T)$  en  $T$ . La dérivation de l'équation 2.33 donne :

$$\Delta = 44,352 \left[ \cos \left( \frac{T_a}{3} \right) \right] \left[ 1 + \sqrt{2} \sin \left( \frac{T_a}{3} \right) \right]^{7,827} \quad (2.50)$$

---

<sup>9</sup>le taux d'évaporation d'un plan d'eau est une fonction du déficit de saturation de l'air et de la vitesse du vent

L'expression de la constante psychrométrique est :

$$\gamma = \frac{C_{air} p_A}{\varepsilon L} \quad (2.51)$$

Pour  $C_{air}$  : voir éq. 2.44, pour  $p_A$  : voir éq. 2.32, pour  $\varepsilon$  : voir éq. 2.39 et 2.40.

L'expression du pouvoir évaporant est :

$$E_a = K(e_{sat} - e) \quad (2.52)$$

$K$  : coefficient d'échange aérodynamique [ $kg.m^{-3}$ ]

$e_{sat}$  : pression de vapeur saturante [ $Pa$ ] (voir équation 2.33)

$e$  : pression de vapeur effective dans l'air [ $Pa$ ] (voir équation 2.39)

Les relations de Penman et Penman-Monteith se différencient en deux points. Premièrement, le coefficient d'échange aérodynamique  $K$  peut soit être exprimé de façon empirique en fonction de la vitesse de l'air selon formulation de base de Penman :

$$K = f(v) = 0,35(0,5 + v) \quad (2.53)$$

ou bien, comme l'introduit Monteith, comme un coefficient inversement proportionnel à une résistance aérodynamique :

$$K = \frac{\rho C_{air}}{r_{aero}} \quad (2.54)$$

Ensuite, le coefficient  $k_r$  n'apparaît pas dans la formulation de Penman, auquel cas nous considérons  $k_r = 1$ . Cependant, dans la formule de Penman-Monteith où est intégrée une représentation de la résistance stomatique effective, ce coefficient devient :

$$k_r = 1 + \frac{r_{sto}}{r_{aero}} \quad (2.55)$$

Nous pouvons nous référer à la littérature pour trouver des données concernant  $r_{sto}$  et  $r_{aero}$ . Elles sont plus nombreuses pour les couverts homogènes de sol que pour les arbres.

Comme nous l'avons précisé auparavant la teneur en eau du sol conditionne le taux d'évaporation. Le dessèchement du sol fait obstacle à l'évaporation puisque dans des conditions réelles, et en particulier en site urbain, la mouillure des revêtements de sol n'est jamais maximale, comme l'impose les conditions d'application de la formule d'évapotranspiration potentielle. C'est le paramètre le plus influent pour le passage de l'évapotranspiration potentielle à l'évapotranspiration réelle. La régulation s'opère en fonction de la teneur en

eau des couches de surface. Lorsque le sol s'assèche ces couches forment un écran qui limite l'évaporation. Chanzy et Bruckler [Chanzy et Bruckler, 1990] proposent une relation simple entre taux d'évapotranspiration réelle et potentielle, qui prend la forme :

$$f(\theta_s) = \frac{ETR}{ETP} \quad (2.56)$$

$ETR$  : évapotranspiration réelle [ $kg.m^{-2}.s^{-1}$ ]

$ETP$  : évapotranspiration potentielle [ $kg.m^{-2}.s^{-1}$ ]

$\theta_s$  : humidité volumique moyenne du sol pour la couche 0 cm - 5 cm [ $cm^3.cm^{-3}$ ]

La comparaison entre des résultats de campagnes de mesure de télédétection hyperfréquence, sur du limon sableux, du limon argileux et de l'argile, et les simulations d'un modèle théorique de transferts d'eau et de chaleur dans les sol, leur ont permis de valider la relation suivante :

$$f(\theta_s) = \frac{e^a \theta_s + b}{1 + e^a \theta_s + b} c + (1 - c) \quad (2.57)$$

$a, b, c$  : coefficients empiriques ajustées en fonction du type de sol

Cette formulation donne des résultats satisfaisants, mais il est difficile d'avoir accès à l'humidité volumique de chaque sol, en particulier en milieu urbain, sans passer par la mesure locale. Nous nous référons alors à un travail de Mihalakakou concernant la modélisation de surface des sols qui introduit des valeurs de référence pour le coefficient  $f$  :

- $f = 1$  pour les sols saturés
- $0,6 \leq f \leq 0,8$  pour les sols humides
- $0,4 \leq f \leq 0,5$  pour les sols secs
- $0,1 \leq f \leq 0,2$  pour les sols arides

Finalement l'expression du flux latent dans notre modèle de sol prend la forme de l'équation 2.58 :

$$LE = L f ETP_c \quad (2.58)$$

### Condition limite de température en profondeur

Couramment, les scientifiques s'accordent à dire que la densité de flux surfacique est transmise par conduction jusqu'à une profondeur de référence,  $z_{ref}$  où elle devient quasiment nulle. Près de la surface, une variation journalière de la température est observée et son amplitude s'atténue rapidement en fonction de la profondeur à cause de l'inertie importante du sol. Ces variations peuvent être assimilées, en première approximation, à une sinusoïde dont la période est 24 heures. D'après Landsberg [Robitu, 2005], la variation de température

journalière est amortie à une profondeur de 20 *cm* à 40 *cm* au-dessous d'une couche de végétation légère, alors qu'elle peut pénétrer jusqu'à 80 *cm* - 1 *m* au-dessous d'un revêtement urbain synthétique. En ne se référant plus aux valeurs instantanées, mais aux valeurs moyennes de la température calculées sur une journée ou une semaine, une variation sinusoïdale de la température de période annuelle apparaît et l'onde thermique peut pénétrer jusqu'à une profondeur de l'ordre de 10 *m* [Guyot, 1999]. Cette hypothèse s'appuie sur le fait que la température de l'eau souterraine de 10 *m* à 20 *m* de profondeur est très proche de la moyenne annuelle des températures de l'air extérieur, et qu'à cette température, les sols sont saturés en eau.

La variation de température dans un sol homogène à une profondeur donnée est une fonction périodique. Elle s'obtient en résolvant l'équation fondamentale de la chaleur (Fourier) dans un milieu semi-infini, selon l'axe  $z$  :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_{sol} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2.59)$$

Les conditions aux limites sont telles que :

- pour  $z = 0$  :  $T = T_s(t)$
- pour  $z \rightarrow \infty$  :  $T \rightarrow T_m$

Une relation théorique sinusoïdale peut être établie pour décrire la variation de température de surface du sol en rapport avec à la dynamique journalière (alternance jour-nuit) et à la dynamique annuelle (alternance des saisons). Cette représentation implique que le profil sinusoïdal de température d'air à la surface du sol est le phénomène principal responsable :

$$T_s = T_m + A_s \sin \left[ \omega (t - t_m) \right] \quad (2.60)$$

La solution de l'équation 2.59 répondant aux conditions limites de l'équation 2.60 est donnée par une fonction périodique amortie dépendant du temps et de la profondeur :

$$T(z, t) = T_m - A_T \exp \left[ -\frac{z}{z_d} \right] \cos \left[ \omega (t - t_0) - \frac{z}{z_d} \right] \quad (2.61)$$

$z$  : profondeur [ $m$ ]

$z_d$  : profondeur d'amortissement,  $z_d = \sqrt{\frac{2\alpha_{sol}}{\omega}}$  [ $m$ ]

$t$  : moment de la journée en secondes (0 à 86400) ou numéro du jour de l'année (1 à 365)

$t_0$  : moment de la journée ou jour de l'année correspondant au minimum de l'onde thermique climatique en surface (température d'air météo)

$\omega$  : pulsation,  $\omega = \frac{2\pi}{86400}$  à l'échelle journalière (en  $s^{-1}$ ),  $\omega = \frac{2\pi}{365}$  à l'échelle annuelle [ $j^{-1}$ ]

$T_m$  : température moyenne journalière/annuelle du site [ $^{\circ}C$ ]

$A_T$  : demi amplitude journalière/annuelle de l'onde thermique de l'onde thermique climatique en surface (température d'air météo) [ $^{\circ}C$ ]

$\alpha_s$  : est la diffusivité thermique du sol,  $\alpha_{sol} = \frac{\lambda_{sol}}{\rho_{sol}C_{sol}}$  [ $m^2.s^{-1}$ ] (ou  $m^2.jour^{-1} = m^2.s^{-1} \times 86400$ )

D'après Guyot [Guyot, 1999], la condition limite en surface de variation sinusoïdale de l'onde thermique est rarement satisfaite dans les climats tempérés car la durée d'ensoleillement journalière représente d'importantes variations à l'échelle annuelle et, à une date donnée, en dehors de la période des équinoxes, il existe une dissymétrie entre la durée du jour et celle de la nuit. Certains travaux confirment tout de même que cette relation est bien vérifiée à une certaine profondeur. L'équation du profil thermique en profondeur a été validée par différentes campagnes de mesure de température du sol in-situ, par Labs et al. en 1989, puis par Al Ajmi et al. 2002. Des écarts maximaux de  $\pm 1^{\circ}C$  ont été trouvés pour leurs conditions climatiques à savoir respectivement en climat tempéré et en climat désertique [Chlela et al., 2007].

## 2.6 Modélisation des bâtiments

### 2.6.1 Introduction

La deuxième contribution personnelle de modélisation est consacrée au développement d'un modèle thermique de bâtiment. Actuellement l'outil **Solene** dispose uniquement d'un modèle de paroi universelle qui traite chaque facette de la géométrie urbaine indépendamment de son appartenance aux bâtiments. Le calcul consiste en un bilan énergétique en régime transitoire pour chaque élément facette de paroi (facettes triangulées) [Vinet, 2000], [Robitu, 2005]. Les conditions aux limites en température de chaque facette côté intérieur du bâtiment sont indépendantes et fixées par l'utilisateur. Les facettes d'un même bâtiment n'ont pas de lien physique entre elles, il n'est pas possible de faire un bilan thermique à l'intérieur du bâtiment pour estimer les charges climatiques conduisant aux consommations énergétiques. Cette modélisation sera appliquée aux bâtiments urbains en général. Pour les bâtiments dont nous ne souhaitons pas calculer la consommation énergétique ou bien les températures internes, le modèle pourra être attribué indépendamment à chaque facette de parois avec

une condition limite du coté intérieur. Ceci est suffisant pour avoir accès aux températures de surfaces extérieures, avec une précision satisfaisante. En revanche pour étudier finement le comportement thermo-énergétique intérieur d'un bâtiment, il est nécessaire de développer un modèle pouvant être imbriqué dans le modèle microclimatique en respectant la structure géométrique et la physique du calcul.

### 2.6.2 Approche générale du comportement thermique du bâti

Pour représenter le bâtiment dans son ensemble, nous utilisons une méthode de modélisation thermique simplifiée [Roux, 1984], similaire à celle mise en œuvre dans l'outil de simulation thermique dynamique des bâtiments CoDyBa, qui consiste à l'assemblage de constituants thermiques élémentaires dérivés d'un modèle original de paroi.

Les caractéristiques et les hypothèses faites sur les parois correspondent aux cas les plus fréquemment rencontrés en thermique du bâtiment. Les parois sont homogènes, avec ou sans inertie thermique, et la propagation de la chaleur à l'intérieur est considérée comme monodimensionnelle. Pour les parois verticales, les gradients verticaux de températures sont négligeables par rapport aux gradients horizontaux et l'épaisseur des parois est très faible par rapport aux autres dimensions. C'est l'inverse pour les parois horizontales. Le comportement en régime dynamique des parois d'un bâtiment est régi par l'équation fondamentale de la chaleur de Fourier. Pour une géométrie plane, elle s'écrit :

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + P \quad (2.62)$$

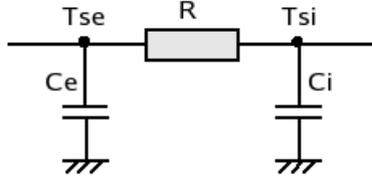
Pour résoudre l'équation 2.62, plusieurs méthodes sont possibles : les méthodes analytiques, numériques et de représentation externe.

Ces méthodes permettent d'évaluer avec une bonne précision les flux conduits à travers les parois. L'inconvénient est que ces méthodes sont lourdes à mettre en œuvre et le temps de calcul est généralement important. Pour ces raisons, une méthode approchée basée sur l'analogie électrique, moins coûteuse en temps de calcul, est utilisée.

### 2.6.3 Méthode de modélisation d'une paroi de bâtiment

Le principe consiste à représenter le comportement thermique en régime dynamique de la paroi à l'aide d'un réseau de résistances et de capacités. Le modèle choisi comprend trois paramètres à savoir une résistance  $R$  et deux capacités  $C_e$  et  $C_i$  implantés respectivement au niveau des surfaces extérieure et intérieure de la paroi (voir figure 2.23). Pour des calculs avec des pas de temps et des périodes de sollicitation importants, ce modèle à une résistance et deux condensateurs (1R2C) est suffisant. Pour des sollicitations de plus hautes fréquences, nous pourrions passer à une représentation 3R4C pour plus de précision [Fraisie *et al.*, 2002].

La mise en œuvre du modèle nécessite la détermination préalable des trois paramètres, qui dépendent uniquement de la nature des matériaux de construction.



**Figure 2.23 :** Analogie électrique pour un modèle thermique de paroi

La résistance thermique ( $R$ ) est calculée de manière à ce que le régime permanent soit restitué de manière exacte :

$$R = \sum_i R_i \quad (2.63)$$

$R_i$  : résistance thermique de la couche  $i$  de la paroi [ $m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$ ]

La détermination des capacités  $C_e$  et  $C_i$  est obtenue à partir de l'hypothèse suivante : à un instant donné  $t$ , le profil de température dans chaque couche de paroi est linéaire. Nous pouvons alors écrire :

$$\frac{T_{si}(t) - T_{se}(t)}{R} = \frac{T_{si_j}(t) - T_{se}(t)}{R_j} \quad (2.64)$$

avec  $R_j = \sum_{i=1}^j R_i$

De même :

$$\frac{T_{si}(t) - T_{se}(t)}{R} = \frac{T_{si_{j-1}}(t) - T_{se}(t)}{R_{j-1}} \quad (2.65)$$

avec  $R_{j-1} = \sum_{i=1}^{j-1} R_i$

Par ailleurs, l'énergie  $dQ_j$  échangée entre la surface  $j-1$  et  $j$  et entre le temps  $t_1$  et  $t_2$  s'écrit :

$$dQ_j = \rho_j C_j e_j \left[ \frac{dT_{s_j}}{2} + \frac{dT_{s_{j-1}}}{2} \right] \quad (2.66)$$

avec  $dT_{s_j} = dT_{s_j}(t_2) - dT_{s_j}(t_1)$

et  $dT_{s_{j-1}} = dT_{s_{j-1}}(t_2) - dT_{s_{j-1}}(t_1)$

En exprimant  $dTs_j$  et  $dTs_{j-1}$  à l'aide des équations 2.64 et 2.65, il vient :

$$dQ_j = \rho_j C_j e_j \left[ \beta_j dTsi + (1 - \beta_j) dTse \right] \quad (2.67)$$

$$\text{avec } \beta_j = \frac{\frac{R_j}{2} + \frac{R_{j-1}}{2}}{R}$$

La quantité de chaleur échangée par toute la paroi entre les temps  $t_1$  et  $t_2$  s'écrit alors :

$$dQ = \left[ \sum_{j=1}^n \rho_j C_j e_j \beta_j \right] dTsi + \left[ \sum_{j=1}^n \rho_j C_j e_j (1 - \beta_j) \right] dTse \quad (2.68)$$

Par ailleurs, en utilisant les notations de la figure 2.23 et la représentation analogique,  $dQ$  s'exprime également par :

$$dQ = Ci dTsi + Ce dTse \quad (2.69)$$

Ainsi, par identification entre les équations 2.68 et 2.69, nous obtenons les expressions des capacités de surface :

$$Ci = \sum_{j=1}^n \rho_j C_j e_j \beta_j \quad (2.70)$$

$$Ce = \sum_{j=1}^n \rho_j C_j e_j (1 - \beta_j) \quad (2.71)$$

A partir de la définition de ces trois paramètres de représentation analogique de base des parois, nous envisageons une modélisation globale du bâtiment en les appliquant et en les adaptant pour chaque classe thermique d'éléments constitutifs du bâtiment. Ce modèle peut être utilisé indépendamment pour chaque facette correspondant à l'enveloppe des bâtiments si les données énergétiques internes ne sont pas requises, mais que les températures de surface extérieure

sont simplement utilisées pour leur contribution au bilan thermoradiatif extérieur.

#### 2.6.4 Modélisation des différents composants du bâtiment

Le principe général repose sur le découpage du bâtiment en plusieurs sous-entités :

- les parois verticales
- les parois vitrées
- les planchers
- les parois intérieures

L'élément de base pour modéliser les différentes entités est le modèle analogique électrique en 1R2C présenté précédemment, auquel nous connectons des éléments résistifs en fonction de l'environnement physique aux interfaces.

### Les parois extérieures

Le modèle est décrit dans la figure 2.24.

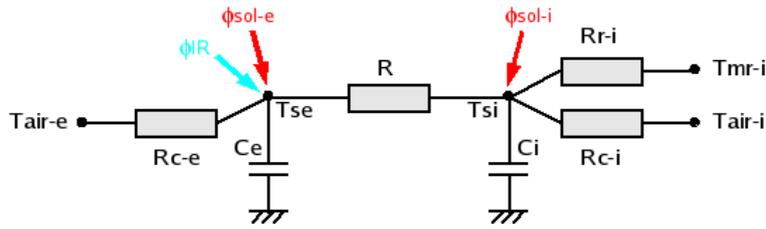


Figure 2.24 : Modèle thermique pour les parois extérieures

$R_{c-e}$  : résistance convective entre  $T_{se}$  et l'air extérieur [ $m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$ ]

$R_{c-i}$  : résistance convective entre  $T_{si}$  et  $T_{air-i}$  [ $m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$ ]

$R_{r-i}$  : résistance radiative entre  $T_{si}$  et  $T_{mr}$  [ $m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$ ]

$\phi_{sol-e}$  : flux solaire absorbé par la surface extérieure des parois [ $W \cdot m^{-2}$ ]

$\phi_{sol-i}$  : partie du flux solaire transmis et absorbé par la surface intérieure des parois [ $W \cdot m^{-2}$ ]

$\phi_{IR}$  : flux IR total net échangé avec l'environnement (atmosphère et surfaces urbaines) [ $W \cdot m^{-2}$ ]

Les parois vitrées sont traitées de manière similaire au modèle précédent. En effet les vitrages actuels, du fait de leur propriétés d'isolation renforcée, détiennent une inertie qu'on ne peut pas négliger en supprimant les termes capacitifs  $C_e$  et  $C_i$  comme cela pouvait être fait dans les modèles type 70 [Fraisie et Virgone, 2001] ou type 100 [Fraisie et al., 2002] de l'outil TRNSYS. Le modèle est également utilisé pour les toitures en considérant que le modèle global du bâtiment s'applique exclusivement aux bâtiments munis de toitures terrasses. Il peut aussi s'appliquer aux pans de toiture qui ne recouvrent pas de combles non aménagés et en considérant les éléments de charpente comme partie intégrante de l'inertie liée aux parois et mobilier intérieur.

### Les planchers

Le modèle est décrit dans la figure 2.25. Le plancher bas se distingue des parois extérieures par l'absence d'échanges radiatifs avec l'environnement extérieur.

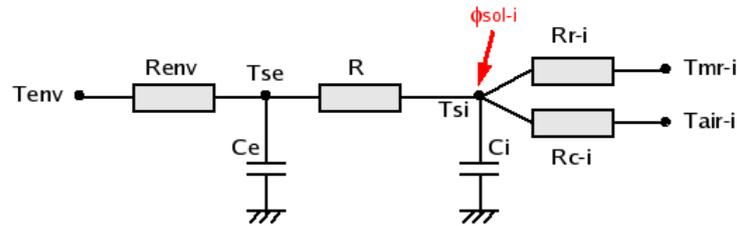


Figure 2.25 : Modèle thermique pour les planchers

$R_{sol}$  : résistance globale entre la surface extérieure du plancher bas et le niveau du sous-sol à la température  $T_{env}$  [ $m^2 \cdot ^\circ C \cdot W^{-1}$ ] (déterminée par l'équation 2.61)

La figure 2.25 représente la configuration analogique pour un plancher bas, où  $R_{env}$  représente la résistance thermique du terre-plein en sous face de la dalle de plancher bas et  $T_{env}$  la température du sous sol à une profondeur donnée pouvant être déterminée par la relation 2.61. Pour représenter un plancher intermédiaire, nous déconnectons du nœud  $T_{se}$  la résistance  $R_{env}$  pour la remplacer par deux résistances en parallèle  $R_{c-i(N-1)}$  et  $R_{r-i(N-1)}$  respectivement connectées à  $T_{air-i(N-1)}$  et  $T_{mr-i(N-1)}$ , l'indice  $N-1$  correspondant au niveau inférieur. La modélisation du plancher sur vide sanitaire n'est pas prévue dans le modèle.

### Les parois intérieures

Le modèle est décrit dans la figure 2.26. Bien qu'aucun flux ne traverse les parois intérieures du bâtiment, puisqu'on verra par la suite qu'elles séparent physiquement les espaces intérieurs considérés à des températures égales, leur prise en compte permet d'intégrer leur inertie. Elles sont supposées être symétriques aussi bien du point de vue géométrique que thermique. Les différentes composantes du modèle sont analogues à celles du modèle des parois extérieures. Sa particularité est que, du fait de la symétrie, nous ne représentons qu'une capacité  $C_p$  qui est la somme des  $C_i$  et  $C_e$  qui sont utilisées dans les modèles précédents :  $C_p = \sum_{j=1}^n \rho_j C_j e_j$ .

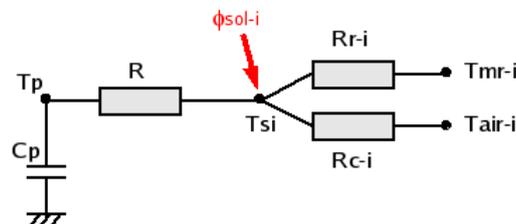
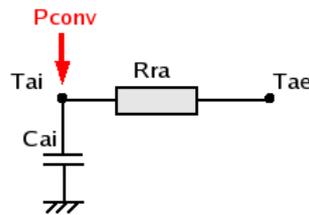


Figure 2.26 : Modèle thermique pour les parois intérieures

## L'air intérieur

Le modèle est décrit dans la figure 2.27. Bien que le comportement thermique d'une masse d'air soit différent de celui d'un solide, les lois physiques appliquées à un volume homogène permettent de le représenter également de manière analogique comme un réseau RC. En effet, le chauffage ou le refroidissement d'une masse d'air peut être modélisé comme une résistance thermique entre la température de l'air admis et l'air intérieur, alors que le stockage thermique peut être modélisé comme pour les parois par une capacité équivalente.



**Figure 2.27** : Modèle thermique pour le volume d'air intérieur

$R_{ra}$  : Résistance de renouvellement d'air :  $R_{ra} = \frac{1}{\rho_{air} C_{air} Q_{air}}$ . A chaque branche  $R_{ra}$  correspond une bouche d'entrée d'air traversant l'enveloppe extérieure et sa valeur numérique est proportionnelle au débit de ventilation  $Q_{air}$ . [ $^{\circ}C.W^{-1}$ ]

$C_{ai}$  : Capacité de l'air intérieur :  $C_{ai} = \rho_{air} C_{air} V_i$ . Elle traduit l'inertie thermique du volume d'air intérieur  $V_i$  du local considéré. [ $J.^{\circ}C^{-1}$ ]

$P_{conv}$  : Puissance convective du système de traitement d'ambiance (chauffage ou climatisation) [ $W$ ]

$P_{int}$  : Puissance convective due aux apports internes (occupants, équipements) [ $W$ ]

### 2.6.5 Modélisation hygrothermique globale d'un bâtiment

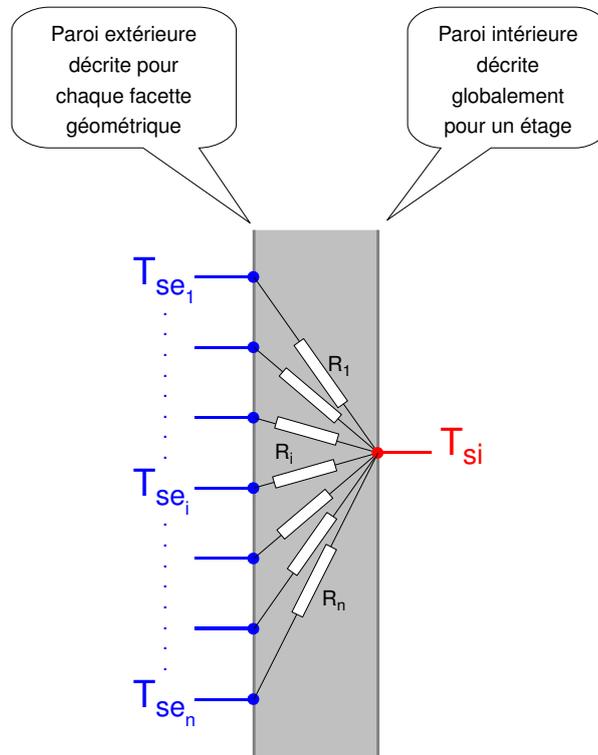
Le modèle de bâtiment mis en œuvre s'appuie sur un mode de connexion des différents modèles analogiques élémentaires présentés précédemment, qui s'adapte à la géométrie discrétisée exploitée par Solene et qui répond à une série d'hypothèses liées à la physique du problème.

#### Principe général et hypothèses

Nous constituons un système thermique par la connexion entre eux des différents schémas analogiques élémentaires au niveau des nœuds de température. Chaque branche du schéma matérialise un transfert de flux alors que chaque nœud de température représente un point physique où s'établit un équilibre thermique. L'élaboration du modèle global repose sur les hypothèses suivantes :

- pour le calcul des charges thermiques intérieures, la réduction du nombre de nœuds de calcul n'est possible que si elle respecte le principe de conservation des flux, au détriment du sens physique des températures nodales obtenues ;
- les variations de températures d'air à l'intérieur du bâtiment impose un zonage thermique cohérent qui détermine en partie le nombre de nœuds de calcul ;
- le traitement simultané du renouvellement d'air, des flux solaires transmis et des apports dus aux occupants et l'écart de température entre l'air et les surfaces nécessitent de séparer le bilan convectif du bilan radiatif ;
- les échanges radiatifs entre les surfaces intérieures peuvent être modélisés indirectement comme des échanges entre ces surfaces et un nœud fictif à température radiante moyenne ;
- le bilan d'humidité est nécessaire pour calculer la puissance latente, mais peut être traité indépendamment du bilan thermique.

L'aspect original de ce modèle est lié à l'application de la première hypothèse. Les transferts thermiques par conduction à travers chaque facette de l'enveloppe extérieure, de températures différentes, sont sommés vers un nœud de température intérieure unique défini pour la surface totale des vitrages ( $Tv$ ) et la surface totale des parois opaques ( $Tm$ ) d'un étage (voir figure 2.28). Cette approche permet de diminuer sensiblement le nombre de nœuds intérieurs sans porter atteinte au comportement énergétique du bâtiment. Cette méthode ne remet pas en cause la validité du bilan thermique du bâtiment puisque la somme des flux apportés ou perdus par conduction est conservée entre les nœuds internes et externes de l'enveloppe. Les températures des surfaces intérieures de l'enveloppe sont différenciées selon la classe de l'élément de paroi (mur ou vitrage) car nous pouvons également trouver ces différences dans la réalité. Nous pouvons discuter cependant de l'hypothèse de la distribution homogène de température de surface intérieure pour une même classe d'élément de paroi. Une température homogène sur les murs peut tout à fait se justifier puisque l'épaisseur des parois, la quantité d'isolant et l'échange global thermo-convectif interne tend à homogénéiser les températures de surfaces. Pour les vitrages, l'hypothèse est plus discutable puisque leur différence de pouvoir isolant et d'inertie fait que d'un vitrage à l'autre les températures peuvent être assez différentes, surtout dans le cas des vitrages appartenant à des façades d'orientation différente, exposées ou non à l'ensoleillement.



**Figure 2.28** : Agrégation des flux traversant les facettes extérieures vers un nœud de température de paroi intérieure unique (La description extérieure des parois est locale alors que la description intérieure est globale)

La connexion des éléments selon les hypothèses aboutit au schéma analogique global représenté sur la figure 2.29. Le modèle de bâtiment est flexible et s'adapte au nombre d'étages défini à chaque cas d'étude. Il repose alors sur trois types de réseaux analogiques élémentaires :

- le réseau sous-sol
- le réseau niveau
- le réseau toiture

Ainsi, la modélisation complète d'un bâtiment à  $N-1$  étages consiste en l'empilement d'un réseau sous-sol, de  $N$  réseaux niveau et d'un réseau toiture. Le zonage thermique choisi divise le bâtiment en « enceintes » contenant de l'air à température homogène à chaque étage. Ces « enceintes » sont liées entre elles par les planchers intermédiaires. Elles sont traversées par le rayonnement solaire et un débit de renouvellement d'air. Le zonage par étage est un intermédiaire cohérent entre le zonage pièce par pièce et le bâtiment monozone. Le zonage pièce par pièce, fournit un nombre de nœuds trop important. De plus, si les simulations sont



### Système d'équations

La mise en équation du schéma analogique pour le *réseau niveau d'indice*  $N$  ( $1 \leq N \leq N_{\max}$ ) correspond à la série d'équation du nœud 1  $n1$  au nœud 10  $n10$  (équations 2.74 à 2.83) répétée  $N_{\max}$  fois. L'équation au nœud 1 s'établit pour chaque facette  $i$  de paroi opaque au niveau  $N$ ; de même avec l'équation au nœud 3 pour les facettes de vitrages  $j$ . Notons que lorsque le sous-système s'applique au niveau  $N = 1$ , les deux termes convectifs  $\frac{T5-T9_{(N-1)}}{Rripf_{(N-1)}}$  et radiatifs  $\frac{T5-T10_{(N-1)}}{Rcipf_{(N-1)}}$  disparaissent de l'équation 2.78, le terme de conduction dans le sol  $\frac{T0-T5_{(N=1)}}{Rsol}$  les remplaçant.

Le nœud 0 (équation 2.73) est défini pour modéliser le *réseau sous-sol*, c'est à dire les transferts conductifs transmis du plancher bas vers le sol. La température  $Tsol$  est donnée par l'équation 2.61 en fonction de la profondeur de référence choisie pour l'évaluer.

Le système complet est fermé par deux dernières équations (équations 2.84 et 2.85) correspondant au *réseau toiture*, s'établissant au niveau  $N = N_{\max}$ , où l'équation du nœud 11 s'établit pour chaque maille surfacique de toiture  $k$ . A ce niveau, les termes  $\frac{T9-T5_{(N+1)}}{Rripf}$  de l'équation 2.82 et  $\frac{T10-T5_{(N+1)}}{Rcipf}$  de l'équation 2.83 sont remplacés par les termes  $\frac{T9_{N_{\max}}-T12}{Rrit}$  et  $\frac{T10_{N_{\max}}-12}{Rrit}$  respectivement.

Finalement, la relation donnant le nombre total d'inconnues( $n$ ) du modèle en fonction du nombre de niveaux ( $N$ ) et du nombre de facettes discrètes  $F$  de l'enveloppe extérieure ( $F = i + j + k$ ) est :

$$n = F + 8N + 2 \quad (2.72)$$

Nous précisons qu'en fonction du type de simulation effectuée, les  $N$  inconnues des nœuds 10 peuvent être soit  $T10$ , la température d'air du niveau en régime libre  $Pconv = 0$ , soit  $Pconv$ , la puissance de chauffage ou de climatisation mise en œuvre pour rétablir une consigne de température de confort  $T10 = T_{\text{ref}}$ .

Pour la résolution numérique dans notre code, une bibliothèque scientifique d'algèbre linéaire et matriciel optimisée a été utilisée, il s'agit de **CLapack.h**. Nous utilisons l'algorithme spécifique à la résolution d'un produit d'une matrice de dimension  $n^2$  par un vecteur de dimension  $n$ . Notons que cet algorithme est aussi utilisé pour la résolution du modèle de base pour les parois des autres bâtiments de la scène et également du modèle de sol.

$$\text{n0} \quad \frac{T0 - T5_{(N=1)}}{Rsol} + \frac{T0 - Tsol}{Rsol} + Csol \frac{dT0}{dt} = 0 \quad (2.73)$$

$$\text{n1, i} \quad \frac{T1_i - Tae_i}{Rcem_i} + \frac{T1_i - T2}{Rm_i} + Cem_i \frac{dT1_i}{dt} = \phi solm_i + \phi IRTm_i \quad (2.74)$$

$$\text{n2} \quad \sum_{i \in N} \left[ \frac{T2 - T1_i}{Rm_i} \right] + \left[ \sum_{i \in N} Cim_i \right] \frac{dT2}{dt} + \frac{T2 - T9}{Rrim} + \frac{T2 - T10}{Rrim} = \phi 2sol \quad (2.75)$$

$$\text{n3, j} \quad \frac{T3_i - Tae_j}{Rcev_j} + \frac{T3_j - T4}{Rv_j} + Cev_j \frac{dT3_j}{dt} = \phi solv_j + \phi IRTv_j \quad (2.76)$$

$$\text{n4} \quad \sum_{j \in N} \left[ \frac{T4 - T3_j}{Rv_j} \right] + \left[ \sum_{j \in N} Civ_j \right] \frac{dT4}{dt} + \frac{T4 - T9}{Rriv} + \frac{T4 - T10}{Rriv} = \phi 4sol \quad (2.77)$$

$$\text{n5} \quad \frac{T5 - T9_{(N-1)}}{Rripf_{(N-1)}} + \frac{T5 - T10_{(N-1)}}{Rcipf_{(N-1)}} + \frac{T5 - T6}{Rpl} + Cpf \frac{dT5}{dt} = \phi 5sol_{(N-1)} \quad (2.78)$$

$$\text{n6} \quad \frac{T6 - T9}{Rripl} + \frac{T6 - T10}{Rcipl} + \frac{T6 - T5}{Rpl} + Cpl \frac{dT6}{dt} = \phi 6sol \quad (2.79)$$

$$\text{n7} \quad \frac{T7 - T8}{Rpi} + Cpi \frac{dT7}{dt} = 0 \quad (2.80)$$

$$\text{n8} \quad \frac{T8 - T7}{Rpi} + \frac{T8 - T9}{Rripi} + \frac{T8 - T10}{Rcipi} = \phi 8sol \quad (2.81)$$

$$\text{n9} \quad \frac{T9 - T2}{Rrim} + \frac{T9 - T4}{Rriv} + \frac{T9 - T5_{(N+1)}}{Rripf} + \frac{T9 - T6}{Rripl} + \frac{T9 - T8}{Rripi} = \frac{1}{2} P_{int} \quad (2.82)$$

$$\text{n10} \quad \frac{T10 - T2}{Rcim} + \frac{T10 - T4}{Rciv} + \frac{T10 - T5_{(N+1)}}{Rcipf} + \frac{T10 - T6}{Rcipl} + \frac{T10 - T8}{Rcipi} + \sum_{l \in N} \left[ \frac{T10 - Tae_l}{Rra_l} \right] + Cai \frac{dT10}{dt} = P_{conv} + \frac{1}{2} P_{int} \quad (2.83)$$

$$\text{n11, k} \quad \frac{T11_k - Tae_k}{Rcet_k} + \frac{T11_k - T12}{Rt_k} + Cet_k \frac{dT11_k}{dt} = \phi solt_k + \phi IRTt_k \quad (2.84)$$

$$\text{n12} \quad \sum_{k \in N_{max}} \left[ \frac{T12 - T11_k}{Rt_k} \right] + \left[ \sum_{k \in N_{max}} Cit_k \right] \frac{dT12}{dt} + \frac{T12 - T9_{N_{max}}}{Rrit} + \frac{T12 - T10_{N_{max}}}{Rrit} = \phi 5sol_{N_{max}} \quad (2.85)$$

### Traitement des flux solaires intérieurs

Ne disposant pas d'une description géométrique fine de l'intérieur du bâtiment et désirant éviter un calcul d'inter-réflexions, nous appliquons une méthode approchée pour distribuer les flux solaires transmis par les baies vitrées sur les nœuds de calcul correspondant aux surfaces intérieures du bâtiment (nœuds 2, 4, 5, 6 et 8). Pour les flux solaires *directs* transmis, étant donnée l'inclinaison des rayons solaires, nous attribuons tout le flux au plancher qui en absorbe la quantité liée à son coefficient  $\alpha$ . La partie réfléchie est distribuée sur tous les nœuds au prorata de leur surface par rapport à la surface totale des parois intérieures ( $S_t$ ). Les flux solaires *diffus* transmis, étant donné la multi directionalité des rayons solaires, sont distribués directement sur tous les nœuds au prorata de leur surface par rapport à la surface totale des parois intérieures ( $S_t$ ).

### Bilan d'humidité dans le bâtiment

L'enthalpie totale de la vapeur d'eau s'écrit :

$$H_e = m_e(L + C_e T_e) \quad (2.86)$$

$H$  : enthalpie totale de vapeur d'eau [ $kJ$ ]

$m_e$  : masse de vapeur d'eau [ $kg$ ]

$L$  : chaleur latente de vaporisation de l'eau [ $kJ.kg^{-1}$ ], voir équation 2.43

$C_e$  : chaleur spécifique de la vapeur d'eau [ $kJ.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$ ]

$T_e$  : température [ $^{\circ}C$ ]

Vus les niveaux de température dans les bâtiments et les valeurs respectives de  $L$  et  $C_e$ , on néglige la chaleur sensible de la vapeur d'eau par rapport à la chaleur latente. Cela permet de découpler les équations de bilan de chaleur latente et de chaleur sensible. Pour des raisons de confort et d'hygiène, un taux minimal de renouvellement d'air est nécessaire lorsque le bâtiment est occupé. Il permet d'évacuer les polluants et l'humidité produits par les usagers. Sa valeur correspond au débit  $Q_{air}$  en [ $m^3.s^{-1}$ ] abordé dans la description du modèle analogique de l'air intérieur (voir p. 130).

Ceci nous conduit à l'expression simplifiée du bilan enthalpique de l'humidité dans un local :

$$L \frac{dw_{int}}{dt} = L \rho_{air} Q_{air} (w_{ext} - w_{int}) + P_{occ} + P_L \quad (2.87)$$

$w_{int}$  : humidité spécifique de l'air à l'intérieur du local [ $kg.kg^{-1}$ ]

$w_{ext}$  : humidité spécifique de l'air à l'extérieur du local [ $kg.kg^{-1}$ ]

$P_{occ}$  : puissance latente apportée par les occupants [ $W$ ]

$P_L$  : puissance latente apportée par le système de conditionnement d'air [ $W$ ]

Le maintien du confort intérieur consiste à maintenir l'humidité relative intérieure  $HR$  en dessous d'une valeur seuil, fixée en général à 50%, au delà de laquelle on déshumidifie le local à l'aide d'un système approprié. Ceci revient à calculer dans ce cas la charge de déshumidification associée  $P_L$  avec  $w_{int}$  imposée et  $\frac{dw_{int}}{dt} = 0$ .

- si  $P_L < 0$ , le système de déshumidification est actif
- si  $P_L \geq 0$ , le taux d'humidité évolue librement

La puissance apportée par les occupants est déterminée en multipliant le nombre d'usagers par leur surface corporelle moyenne, l'aire de Dubois ( $A_{du} = 1,8 m^2$ ), et le flux latent surfacique moyen par occupant égal à  $23 W.m^{-2}$  en hiver et à  $21 W.m^{-2}$  en été.

## 2.7 Procédure de couplage entre simulation thermoradiative et simulation thermo-aéroulique

Robitu montre dans sa thèse la complexité et les difficultés que l'on peut rencontrer quant au couplage des deux outils de simulation thermoradiatif et CFD [Robitu, 2005]. Nous présentons la méthode et les ajustements opérés dans ce travail pour le couplage, permettant d'éviter des temps de calcul trop longs sans altérer la précision de nos résultats.

### 2.7.1 La gestion de la géométrie et des maillages

En pratique, la réalisation de la géométrie de la scène urbaine à traiter est construite dans un modeleur (dans ce travail avec **Gambit**, le préprocesseur-mailleur de **Fluent**). Nous utilisons ensuite une procédure spécifique externe spécialement développée pour extraire dans le maillage volumique de la veine numérique un maillage surfacique exploitable par le modèle thermoradiatif de **Solene**. Ainsi, dans la configuration actuelle, nous utilisons les mêmes maillages surfaciques. Deux fonctions supplémentaires sont utilisées pour échanger les données physiques sur ces mailles équivalentes de **Solene** (descripteurs) vers **Fluent** (profils) et de **Fluent** vers **Solene**.

La deuxième partie de la thèse met en œuvre des géométries urbaines de grandes dimensions qui entraînent des maillages volumineux. Le problème posé est que le compromis entre la simulation CFD, qui impose une taille maximale des mailles volumiques proches des parois des bâtiments d'étude fines et à l'interface végétation-air, et la simulation thermoradiative, qui suggère de dilater le plus possible les mailles pour les grands domaines géométriques afin de diminuer le traitement et le stockage des facteurs de forme, peut nous influencer à travailler avec une géométrie comportant des maillages surfaciques et volumiques différents. Une procédure spécifique a été réalisée pour interpoler et extrapoler les données lors du passage de **Fluent** vers **Solene**. Dans l'autre sens, **Fluent** dispose de ses propres fonctions d'interpolation.

## 2.7.2 La méthode générale du couplage itératif

La simulation couplée consiste en une interaction à chaque pas de temps de calcul entre les deux outils numériques selon la description de la figure 2.30.

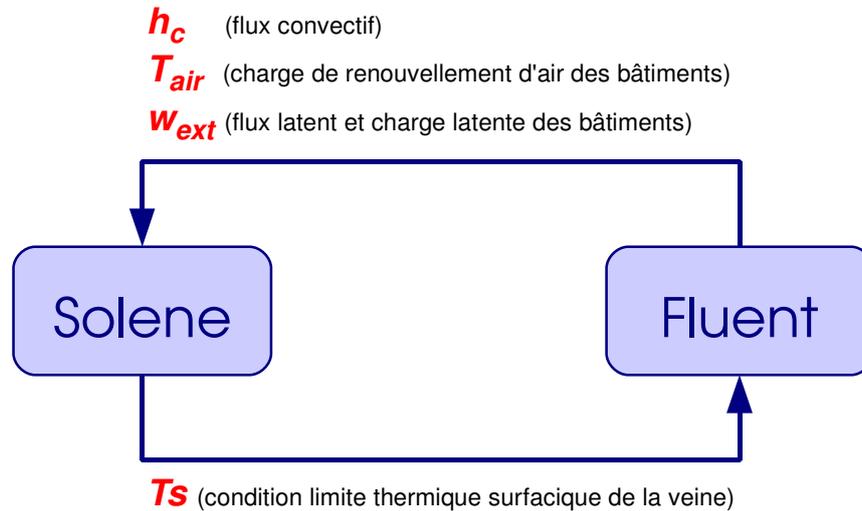


Figure 2.30 : Principe de la simulation couplée

Au pas de temps  $t$  de la simulation, les températures de surface ( $T_s$ ), calculées par le bilan thermoradiatif de Solene, sont introduites comme conditions aux limites dans la simulation thermo-aéraulique, réalisée par Fluent. La simulation thermo-aéraulique permet d'obtenir à proximité des parois les températures d'air ( $T_{air}$ ), les coefficients d'échange superficiel convectif ( $h_c$ ) et les humidités spécifiques ( $w_{ext}$ ), qui sont alors réintroduits dans le bilan thermique en régime transitoire établi par Solene. Pour un pas de temps, le couplage entre les deux modèles se poursuit jusqu'à ce que le critère de convergence fixé soit atteint. Dans notre cas, il correspond à la fois au respect d'un écart maximal de  $1^\circ\text{C}$  et un écart moyen maximal de  $0,1^\circ\text{C}$  entre les températures de surfaces calculées entre deux itérations successives.

Dans ce travail nous réalisons un ajustement au niveau de la physique de la simulation thermo-aéraulique dans Fluent. En effet, les échanges thermiques par convection entre les parois et l'air dépendent d'un coefficient d'échange superficiel convectif  $h_c$ . Ils sont par défaut calculés par des lois de parois standard qui se prêtent bien au cas d'applications industrielles mais pas au cas de l'urbain où les couches limites ne sont pas de la même échelle. Deux solutions sont alors possibles :

- introduire de nouvelles lois de paroi plus adaptées, par l'intermédiaire d'une UDF dédiée aux lois de paroi ;

- garder les lois de parois par défaut mais modifier ponctuellement la valeur du  $h_c$  et celle flux de chaleur échangé par une UDF spécifique à la modification des flux convectifs.

Nous choisissons d'utiliser la deuxième solution pour implémenter une loi de type corrélation en vitesse. Nous utilisons la loi de Jayamaha [Vinet, 2000], qui est une modification de la corrélation donnée par l'ASHRAE permettant de rétablir  $h_c$  pour des  $v_{air}$  élevées.

$$h_c = 5,85 + 1,7v_{air} \quad (2.88)$$

Cette loi permet d'éviter l'annulation des échanges d'énergie pouvant être obtenue par la méthode de loi de paroi standard, ce qui est quasiment impossible sur des parois urbaines sauf si la température de paroi et celle de l'air sont égales.

### 2.7.3 La gestion du temps de calcul

Le couplage, en particulier dans le cas de simulations énergétiques sur des fragments urbains étendus et maillés assez finement, demande un temps de calcul assez important. Plusieurs solutions sont envisagées pour diminuer ce temps de calcul sans altérer la précision des résultats.

- un couplage complet (voir figure 2.31 « Full Dynamic Coupling »);
- un couplage « ping-pong » introduit par [Zhai *et al.*, 2002] (voir figure 2.31 « Quasi Dynamic Coupling »);
- la non résolution des équations de mouvement dans Fluent pendant le couplage, seulement celles de transport, cela nécessite alors une initialisation complète.

La deuxième méthode paraît une alternative intéressante au couplage complet qui est théoriquement la méthode permettant de se rapprocher au plus près des valeurs réelles mais aussi la plus consommatrice en temps de calcul. La méthode proposée par Zhai paraît très intéressante d'autant plus qu'elle montre des résultats encourageant en modélisation de l'intérieur des bâtiments. Cependant, l'obstacle majeur à la réduction des temps de calcul en couplage microclimatique est véritablement le calcul systématique des équations de mouvement lors du passage dans l'outil **Fluent**. Une simulation en configuration de couplage complet (cas bâtiment 1, aménagement A, semaine hiver, voir chapitre 4) nous a conduit à un temps de simulation de 3 semaines. De plus des problèmes de convergence apparaissaient de manière cyclique pour les variables de turbulence. Nous avons alors choisi une méthode, correspondant à la 3<sup>ème</sup> citée précédemment. Ainsi le calcul du champ de vitesse et de turbulence est calculé uniquement dans une simulation d'initialisation, est n'est plus modifié par la suite. En effet, le code **Fluent** permet de choisir les équations résolus, étant donné que les équations de transport ne sont pas numériquement couplées avec les équations de mouvement. Ainsi, lors de la phase de simulation couplée, uniquement les équations de transport d'humidité et d'énergie sont résolues. Pour éviter de obtenir trop de passages entre **Solene** et **Fluent** tout

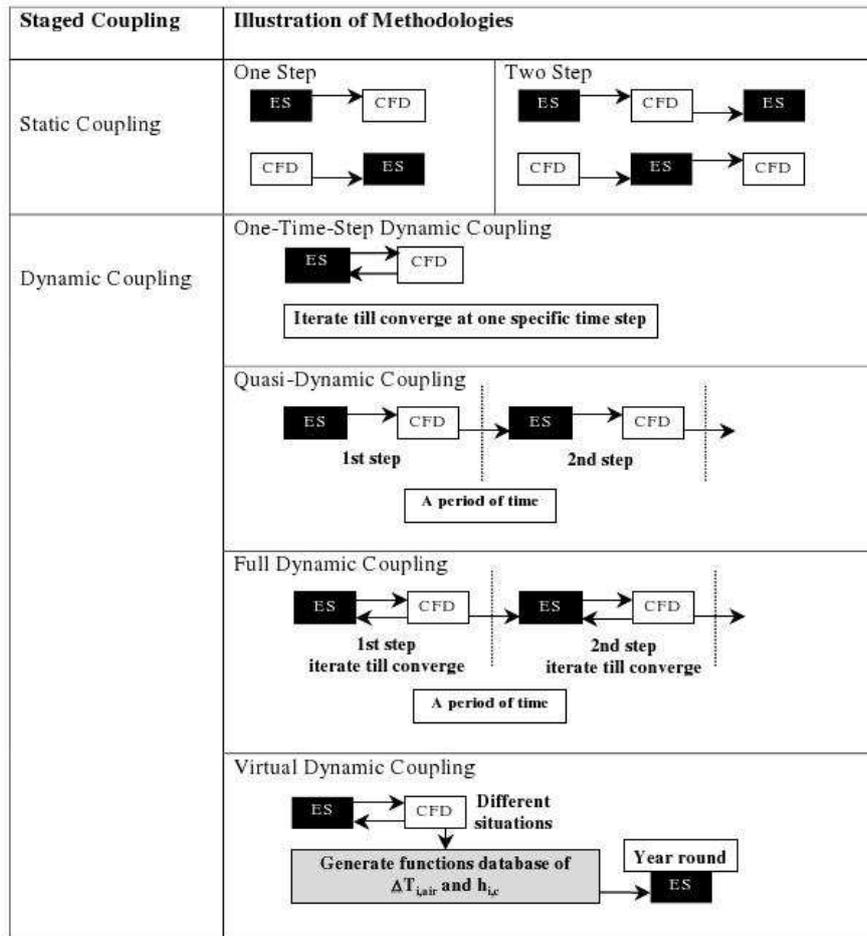


Figure 2.31 : Les différentes méthodes de couplage [Zhai et al., 2002]

en privilégiant une bonne estimation de  $T_{air}$  et  $w_{ext}$ , nous limitons leur nombre maximal à 5, ce qui est une sorte de « ping-pong » en 5 échanges. Une étude plus approfondie du couplage aurait pu être menée mais c'est un sujet de recherche en lui-même ; nous avons privilégié les objectifs initiaux plutôt que cette problématique technique. Un approfondissement du choix de la méthode de couplage est envisagée à la suite de ce travail car c'est un point déterminant pour la potentialité d'utilisation de cet outil dans des applications autres que celle de la recherche où les temps d'étude sont plus limités.

## 2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, a été présenté l'outil de simulation numérique que nous utiliserons dans les deux prochaines parties de ce travail. Il correspond à un de couplage physique entre les codes **Solene** et **Fluent**. Que ce soit **Fluent**, outil commercial de CFD, ou **Solene**, outil de calcul de flux solaire et de bilan thermoradiatif, ils peuvent être enrichis de modèles microclimatiques

complémentaires ayant pour but de décrire de manière détaillée les éléments d'aménagements. Ainsi nous avons présentés les modèles radiatifs-aérauliques-hydriques d'arbres déjà établis dans des travaux de recherche précédents. Ils ont été réutilisés car ils ont démontré leur bon comportement dans les travaux précédents. Toutefois le modèle aérodynamique a été modifiée avec termes sources de mouvement plus en accord avec des études expérimentales.

Notre apport dans ce travail concerne en premier lieu le développement d'un modèle de sols. L'approche utilisée reste simplifiée, mais le modèle développé permet de différencier les sols perméables et imperméables par la prise en compte de l'évaporation surfacique, puis de s'intégrer idéalement dans la structure géométrique de Solene par le transfert de chaleur monodimensionnel pouvant traiter les facettes indépendamment.

Notre contribution principale reste tout de même le développement du modèle thermique de bâtiment. Il a été intégré dans la fonction de calcul microclimatique de Solene et permet de simuler les températures intérieures et les consommations énergétiques pour le chauffage ou la climatisation. L'intérêt de ce modèle est qu'il permet d'évaluer l'influence du climat sur le bâtiment en s'adaptant à la structure géométrique de l'environnement couplé de Solene et Fluent. Le zonage par étage permet d'obtenir une bonne répartition verticale des échanges thermique du bâtiment avec l'extérieur en particulier au point de vue des flux solaires. Cependant, les parois intérieures constituent un tout indépendamment de l'orientation. Les ponts thermiques ne sont également pas pris en compte. Mais le modèle est développé dans ce travail pour effectuer un travail de comparaison et non pas un calcul exact des déperditions, donc la prise en compte d'un élément comme les ponts thermiques ne pose pas de problème pour mener à bien notre étude. Les perspectives d'amélioration des modèles feront l'objet d'une discussion plus approfondie dans la conclusion générale de la thèse.

Nous auront l'occasion de tester ce modèle dans les parties suivantes du travail où il pourra être mis en œuvre dans une configuration non-couplée (c.-à-d. en utilisant juste Solene avec des conditions limites horaires de  $T_{air}$ ,  $w_{ext}$  et  $h_c$ , chapitre 3) et couplée (chapitre 4).



## Etude multicritère du comportement énergétique d'un bâtiment de référence

### Sommaire

<b>3.1</b>	<b>Rappel des objectifs . . . . .</b>	<b>143</b>
<b>3.2</b>	<b>Détermination du bâtiment de référence . . . . .</b>	<b>145</b>
<b>3.3</b>	<b>Construction de la méthode d'étude . . . . .</b>	<b>152</b>
<b>3.4</b>	<b>Choix des paramètres de l'étude de sensibilité . . . . .</b>	<b>161</b>
<b>3.5</b>	<b>Résultats de l'étude et analyse . . . . .</b>	<b>176</b>
<b>3.6</b>	<b>Conclusion . . . . .</b>	<b>197</b>

### 3.1 Rappel des objectifs

La demande énergétique d'un bâtiment est régie par trois principales caractéristiques :

- sa typologie et son usage ;
- sa géométrie et sa technologie constructive ;
- les caractéristiques du microclimat local.

Ainsi l'étude indépendante de l'influence microclimatique de l'aménagement ne suffit pas à établir les règles générales de conception énergétique envisagées sans considérer les deux premiers points.

En ce qui concerne le troisième point, aborder l'étude de l'impact de l'aménagement urbain sur la demande énergétique des bâtiments nécessite dans un premier temps de connaître le comportement énergétique de bâtiments types sous des conditions microclimatiques variées. En effet, les aménagements agissent de manière complexe sur le climat d'un site, qui lui-même module le comportement thermique des bâtiments. L'objectif de ce chapitre est d'approfondir la question de l'interaction bâtiment-climat pour proposer pour la deuxième partie du travail

des solutions pertinentes d'aménagements choisies pour leur capacité à modifier des variables climatiques identifiées.

Le microclimat peut être caractérisé par un ensemble de variables climatiques dans un domaine spatial établi . A l'intérieur de ce domaine, la région d'analyse du microclimat peut être l'enveloppe extérieure d'un bâtiment. Par analogie avec les techniques d'instrumentation des phénomènes physiques, le bâtiment peut être assimilé à un *capteur microclimatique*. Ainsi il paraît nécessaire en quelque sorte de l'*étalonner*, autrement dit de connaître sa (ses) loi(s) de comportement en fonction de la gamme de sollicitations externes puis de sa spécificité intrinsèque, cette dernière, pour en revenir aux deux premiers points, étant liée au type constructif du bâtiment et à ses charges thermiques internes.

Un autre aspect du bâtiment à considérer est que des échanges thermo-énergétiques équivalents peuvent s'établir sur l'enveloppe pour diverses combinaisons de variables microclimatiques. Il est alors nécessaire d'analyser de manière approfondie l'influence individuelle et cumulée des variables aérodynamiques, thermoradiatives et hydriques après avoir déterminé celles qui ont une réelle influence.

Enfin, contrôler la demande énergétique d'un bâtiment est aussi une affaire de compromis. La conception bioclimatique doit favoriser le maintien de températures intérieures agréables à la fois en été et en hiver. Ceci revient à favoriser les sources microclimatiques de chaleur en hiver et de fraîcheur en été, ce qui conduit parfois à des contradictions. Cette étude est basée sur l'intégration de toutes ces contraintes dans la conception de l'aménagement urbain.

On se propose dans cette première étape méthodologique de classer des typologies constructives des bâtiments selon des critères de consommations énergétiques puis d'étudier leurs comportements vis-à-vis des variables microclimatiques principales. Pour cela, on construit une étude paramétrique pour évaluer la sensibilité d'un bâtiment type en modifiant les paramètres que nous avons précédemment identifiés comme paramètres clés. Les trois objectifs principaux de cette étude sont donc :

- l'évaluation hiérarchique de la contribution des paramètres constructifs et climatiques dans une perspective d'étalonnage énergétique du bâtiment de référence ;
- le choix de classes types de bâtiments construites à partir de combinaisons des paramètres constructifs à exploiter dans l'étape suivante de la thèse ;
- la détermination des gammes de paramètres microclimatiques idéaux, pouvant être obtenus en modifiant le microclimat avec l'aménagement urbain, pour la réduction des consommations énergétiques toutes saisons.

## 3.2 Détermination du bâtiment de référence

### 3.2.1 Choix d'une typologie

Nous avons rappelé précédemment que la possibilité de réduire les consommations énergétiques d'un bâtiment par les modifications microclimatiques était aussi liée à ses caractéristiques propres, dont sa technologie constructive, ses usages et son type d'occupation. Dans ce travail, nous réduisons le champ d'étude à une seule classe de bâtiment, celle des bâtiments tertiaires et plus particulièrement celle des immeubles de bureaux. Ce choix est guidé par les raisons suivantes :

- Quand leur conception énergétique n'est pas optimisée, ou qu'ils ne sont pas équipés de systèmes passifs, les niveaux de consommations énergétiques des immeubles de bureaux sont souvent élevés, puisqu'ils sont habituellement très vitrés et que le niveau de confort requis est important ;
- La durée d'application des charges internes (occupants et équipements) est plus facilement paramétrable, puisqu'elle est directement liée aux horaires de travail des usagers alors que dans des bâtiments de logement, on trouve des variabilités d'un foyer à un autre dues aux différences d'appréciation du niveau de confort (températures de consigne personnalisées) et aux différences de niveau d'équipement (électroménager, audiovisuel, etc.) étant également des sources internes de chaleur.

### 3.2.2 Élaboration du modèle et de ses propriétés constructives

Pour mener des études sur l'optimisation des consommations énergétiques, le CSTB<sup>1</sup> a défini un modèle architectural représentatif du parc des petits immeubles de bureaux urbains « type » : l'immeuble de bureau Beethoven [Chlela, 2008]. C'est un bâtiment à 3 niveaux (R+2). Il présente une surface totale de plancher de  $540 \text{ m}^2$  ( $3 \times 180 \text{ m}^2$ ), une surface totale d'enveloppe de  $864 \text{ m}^2$  (plancher bas compris) et une surface totale de parois vitrées de  $167,5 \text{ m}^2$ . Ses dimensions sont  $18 \text{ m}$  de largeur,  $10 \text{ m}$  de profondeur et  $9 \text{ m}$  de hauteur, soit un volume de  $1620 \text{ m}^3$ . Les plans des étages sont présentés sur la figure 3.1. Le modèle de bâtiment utilisé dans ce travail s'inspirera de certaines spécificités constructives de l'immeuble de bureau Beethoven. Nous réadaptions cependant son échelle sans décrire finement la configuration des espaces à chaque étage. Ses caractéristiques majeures sont présentées dans la partie suivante.

<sup>1</sup>Centre Scientifique et Technique du Bâtiment



Figure 3.1 : Plans d'étage du bâtiment Beethoven

## L'architecture de l'enveloppe

On conserve la forme parallélépipédique d'ensemble de Beethoven, qui est la plus simple à traiter dans des études systématiques et qui est également le reflet d'une volumétrie standard de bâtiments urbains. Ceci nous permet de choisir la solution de la toiture terrasse. Son intérêt, en plus de celui concernant l'adéquation avec le modèle thermique, est qu'on pourra envisager d'intégrer par la suite des systèmes de toitures végétalisées correspondant à un mode d'aménagement des surfaces urbaines. De même, on choisit la solution du plancher bas sur terre plein.

## La surface totale et la répartition des espaces

Pour comparer les typologies de bâtiments entre eux, il est nécessaire de conserver une surface utile fixe permettant de comparer à terme des quantités d'énergie équivalentes, c'est-à-dire pour une occupation et un usage équivalents. Nous étudions des bâtiments aux programmes plus importants que Beethoven : une surface totale des planchers de  $3000 \text{ m}^2$ , constituant un ordre de grandeur de surface souvent pratiqué dans des programmes de renouvellement urbain pour des bâtiments mixtes ou tertiaires. Le bâtiment est donc près de six fois plus spacieux que Beethoven qui dispose d'une surface totale des planchers de  $540 \text{ m}^2$ . De plus, son volume est constant puisque nous considérons une hauteur totale d'étage de  $3 \text{ m}$  (hauteur sous plafond de  $2,85 \text{ m}$ ).

En ce qui concerne la surface de plancher allouée aux différents espaces, on s'inspirera du programme de Beethoven de manière à attribuer un pourcentage de surface par niveau à chaque type d'usage (tableau 3.1).

Type d'espace	Quantité	Surface totale ( $\text{m}^2$ )	Surface moyenne par niveau ( $\text{m}^2$ )	Ratio de surface moyenne par niveau (%)
Bureau individuel	17	302,5	100,83	56,0
Réception	1	17,5	5,83	3,2
Secrétariat	1	11,5	3,83	2,1
Salle de réunion	1	32	10,67	5,9
Sanitaire	6	36	12	6,7
Hall / Couloir	3	118	39,33	21,9

**Tableau 3.1 :** Répartition surfacique des espaces par niveau pour le bâtiment Beethoven

Ces différents pourcentages, associés à une hypothèse d'équivalence d'usage pour chaque niveau, seront utilisés dans notre modèle pour construire les scénarios des charges internes liées à l'occupation, l'éclairage et le parc d'équipement bureautique.

### Les matériaux et l'isolation

Des matériaux standards sont choisis pour constituer l'enveloppe et la structure interne du bâtiment. La seule contrainte imposée est que les caractéristiques d'isolation respectent la nouvelle réglementation thermique s'appliquant aux bâtiments neufs résidentiels et tertiaires [JORF, 2006]. Deux critères règlementaires doivent être respectés concernant les caractéristiques d'isolation d'un bâtiment :

- La consommation conventionnelle d'énergie d'un bâtiment pour le chauffage, la ventilation, le refroidissement, la production d'eau chaude sanitaire et l'éclairage des locaux s'exprime sous la forme d'un coefficient exprimé en  $kWh.m^{-2}$  d'énergie primaire, noté  $Cep$ . Le coefficient  $Cep$  du bâtiment est inférieur ou égal au coefficient de référence de ce bâtiment, noté  $Cep_{ref}$ , déterminé sur la base de caractéristiques thermiques de référence ( $U_{ref}$ ).
- Les caractéristiques de transmission thermique des parois, des baies, des équipements de chauffage, de ventilation, d'eau chaude sanitaire, de refroidissement, d'éclairage et des protections solaires sont au moins inférieures aux caractéristiques thermiques ( $U_{max}$ ).

Ces caractéristiques normalisées sont référencées pour différents climats (voir figure 3.13). Nous donnons dans le tableau 3.2 les caractéristiques concernant les zones H1 et H2 correspondant à notre climat moyen français utilisé pour l'étude.

Type de paroi	$U_{ref}$ ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ )	$U_{max}$ ( $W.m^{-2}.K^{-1}$ )
Murs	0,36	0,45
Plancher haut	0,27	0,34
Plancher bas	0,27	0,45
Vitrages	2,10	2,60

**Tableau 3.2 :** Coefficients de transmission thermique de référence et maximum pour les éléments de l'enveloppe des bâtiments selon la RT2005 [JORF, 2006]

Les compositions de paroi établies, respectent ainsi au plus juste les caractéristiques thermiques de référence pour les différents éléments de l'enveloppe. Ces performances sont atteintes par la mise en œuvre des matériaux suivants (de l'extérieur vers l'intérieur) :

➤ *Murs extérieurs*

- 10,5 cm de laine de roche ( $\lambda = 0,04 W.m^{-1}.K^{-1}$ )
- 15 cm de béton brut ( $\lambda = 1,8 W.m^{-1}.K^{-1}$ )

d'où  $U = 0,347 W.m^{-2}.K^{-1}$

➤ *Toiture et plancher bas*

- 14 cm de laine de roche ( $\lambda = 0,04 W.m^{-1}.K^{-1}$ )
- 15 cm de béton brut ( $\lambda = 1,8 W.m^{-1}.K^{-1}$ )

d'où  $U = 0,266 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

➤ *Vitrages*

- 0,6 cm de verre ( $\lambda = 1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )
  - 1,2 cm de lame d'air ( $\lambda = 0,04 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )
  - 0,6 cm de verre ( $\lambda = 1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )
- d'où  $U = 2,081 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

Les planchers intermédiaires, les cloisons internes et les refends seront considérés en béton brut (15 cm). En considérant l'inertie de ces éléments comme lourde, on intègre indirectement l'inertie des équipements et du mobilier qui ne sont pas modélisés, pour finalement se rapprocher d'une inertie globale inter-planchers moyenne.

### Le taux de vitrage des façades

Les pièces à occupation continue (bureaux, secrétariat, accueil) sont supposées être en périphérie de chaque niveau. Les besoins en éclairage naturel y sont identiques ; on impose alors des taux d'ouvertures équivalents pour les quatre façades. Ceci est également justifié par le fait que l'étude paramétrique exposée ici est effectuée en site dégagé, et non pas dans un environnement urbain dense où des phénomènes de masques solaires peuvent moduler les flux radiatifs incidents. Il n'y a donc pas de façade préférentielle pour accroître les ouvertures, comme ce pourrait être prévu pour du logement individuel en site dégagé sur une façade sud. Enfin, pour simplifier les analyses, nous évacuons la possibilité d'utilisation de puits de lumière en toiture.

### Le mode d'occupation et les charges internes associées

Le mode d'occupation d'un bâtiment est nécessaire pour quantifier à chaque instant les charges internes sensibles et latentes. Malgré le fait qu'un bâtiment de bureau soit le siège d'une occupation discontinue, il est possible de fixer des plages horaires d'occupation relatives aux heures d'embauche. Le scénario de référence d'occupation horaire qui renseignera le modèle thermique est ainsi construit à partir des trois règles suivantes :

- aux heures de travail, le nombre d'occupants est de 2 par bureau, 1 par secrétariat, 2 à la réception et 10 par salle de réunion ;
- les profils journaliers d'occupation des bureaux (applicables à la réception et à l'accueil) et des salles de réunion, suggérés par un rapport de recherche sur les scénarios de fonctionnement des bâtiments types de bureaux [Colombier *et al.*, 1997], sont présentés respectivement sur les figures 3.2 et 3.3 ;

- la semaine classique<sup>2</sup> est caractérisée par une occupation normale du lundi au vendredi et une occupation nulle le samedi et dimanche.

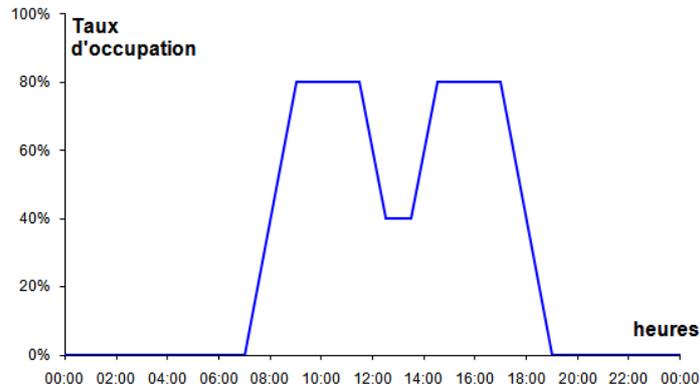


Figure 3.2 : Profil de référence d'occupation journalière des bureaux

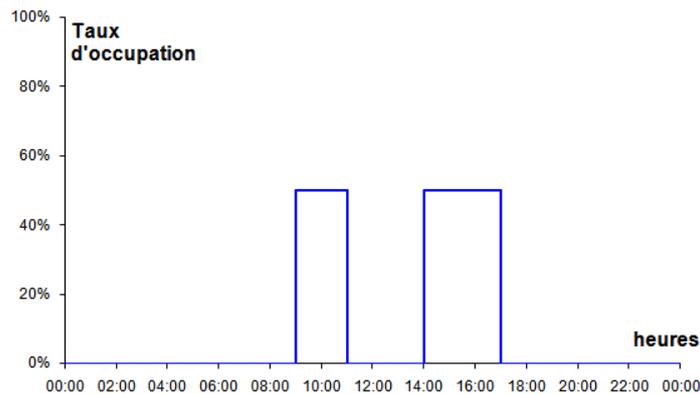


Figure 3.3 : Profil de référence d'occupation journalière des salles de réunion

On définit également un scénario des charges internes liées à la puissance thermique délivrée par l'éclairage et les divers équipements bureautiques. On se base sur les règles suivantes également préconisées dans [Colombier *et al.*, 1997] :

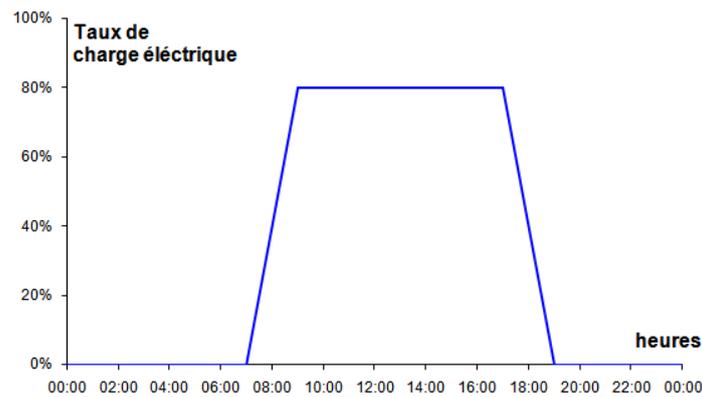
- la quantité d'équipement bureautique par type d'espace est de 2 ordinateurs par bureau, 1 ordinateur par secrétariat, 1 imprimante et 1 photocopieur par couloir ;
- les puissances des équipements de bureautique utilisées sont référencées dans le tableau 3.3 ;
- pendant la période d'occupation les ordinateurs sont considérés 50% actifs et 50% en veille, les imprimantes et les photocopieurs sont considérés 25% actifs et 75% en veille ;
- en période d'inoccupation, les ordinateurs sont éteints, les imprimantes et les photocopieurs en veille.

<sup>2</sup>hors périodes de vacances scolaires, ou comportant des jours fériés

	$P_{actif}$ (W)	$P_{veille}$ (W)	$P_{éteint}$ (W)
Ordinateur	108	22	5
Imprimante ou fax	77	22	0
Photocopieur	153	25	0

**Tableau 3.3 :** Puissances de référence apportées par les équipements bureautiques

On obtient ainsi des puissances unitaires maximales en période d'occupation de 65 W pour les ordinateurs, 50 W pour les imprimantes et 102 W pour les photocopieurs. En période d'inoccupation, on obtient respectivement 5 W, 22 W et 25 W. Pour les ordinateurs, les puissances sont pondérées pour tenir compte des absences partielles. La figure 3.4 donne la charge due aux ordinateurs par rapport à la puissance maximale en fonction des horaires d'occupation [Filfi, 2006].



**Figure 3.4 :** Taux de charge interne due aux ordinateurs dans les bureaux et les secrétariats

Pour définir le scénario des charges internes liées à l'éclairage artificiel, on se base sur les données suivantes :

- Bureaux, secrétariats et salles de réunion :  $12 W.m^{-2}$
- Couloirs et réceptions :  $10 W.m^{-2}$
- Sanitaires :  $6 W.m^{-2}$

En période d'inoccupation, tout l'éclairage artificiel est éteint. En période d'occupation, l'éclairage artificiel des couloirs, de la réception et des sanitaires fonctionne en continu. Pour les bureaux et les secrétariats, le fonctionnement de l'éclairage artificiel est lié à l'éclairage naturel. On peut considérer que l'éclairage artificiel fonctionne 50% du temps pendant la période d'occupation soit une puissance de  $6 W.m^{-2}$ .

On utilise un taux de ventilation hygiénique réglementaire correspondant aux bâtiments non-résidentiels, donné par la norme NF EN ISO 13790 [AFNOR, 2004], à savoir  $q_{min} = 15 m^3h^{-1}/occupant$ . Le débit global de ventilation dépend ainsi uniquement du nombre d'usagers maximum dans le bâtiment. On conservera un taux de ventilation constant y compris en période d'inoccupation. Enfin, on se place dans le cas idéal d'une enveloppe du bâtiment imperméable aux infiltrations d'air.

### Les températures de consigne

Les températures d'air de consigne sont définies en fonction des seuils de confort saisonnier attendus pour la température de l'air dans le bâtiment :

- en hiver :  $T_{air}$  pendant la période de travail ne doit pas être inférieure à  $19^\circ C$ ,  $T_{air}$  nocturne (en dehors des horaires de travail, quand l'occupation est nulle) ne doit pas être inférieure à  $15^\circ C$ . La contrainte de température nocturne est uniquement liée au comportement thermique dynamique du bâtiment pour éviter une relance du chauffage trop importante avant l'embauche ;
- en été :  $T_{air}$  pendant la période de travail ne doit pas dépasser  $26^\circ C$  et il n'y a pas de restriction sur  $T_{air}$  nocturne (régime libre).

## 3.3 Construction de la méthode d'étude

L'objectif principal des analyses de sensibilité est de quantifier l'impact d'un ensemble fini de variables d'entrée d'un modèle sur ses résultats de simulation. De ce point de vue, une analyse de sensibilité permet entre autre de réduire le champ d'investigation sur les paramètres d'entrée lors de la phase d'étalonnage ou la calibration d'un modèle physique. Elle permet aussi de dégager des lois de comportement du modèle face à des situations identifiées.

Dans notre travail, bien que le modèle de bâtiment établi soit une représentation simplifiée de la réalité, et que nos connaissances en thermique du bâtiment peuvent nous éclairer sur ses tendances d'évolution, il reste un outil assez complexe à évaluer. Cette modélisation prend en compte plusieurs processus physiques couplés dont les interactions sont généralement non linéaires. Ceci a pour conséquence de complexifier l'analyse des résultats de simulation, étant donné les gammes étendues dans lesquelles peuvent varier les paramètres d'entrée et l'aspect « boîte noire » du modèle face à des configurations particulières des paramètres les plus influents.

### 3.3.1 Méthodes d'étude paramétrique

Nous présentons ici des méthodes d'étude paramétrique très utilisées par la communauté des chercheurs en sciences de l'ingénieur, en particulier pour les modélisateurs-simulateurs.

Cette liste est non-exhaustive, mais a pour but de nous positionner et de justifier notre choix parmi les trois principales catégories présentées ci-après.

### **La méthode monovariante**

Par sa simplicité de mise en œuvre, l'analyse de sensibilité classique dite *monovariante* est la méthode la plus couramment utilisée. Elle est basée sur l'analyse d'un faible nombre de simulations pour lesquelles un seul paramètre, appelé généralement « paramètre libre » varie. Tout autre paramètre d'entrée du modèle est alors fixé à une valeur déterminée, le « paramètre fixe », que ce soit à partir de considérations expérimentales, bibliographiques ou a priori. On peut alors recommencer l'étude en changeant à chaque fois le paramètre libre.

Cette méthode est un moyen efficace d'évaluation rapide des paramètres influents car le nombre de simulations est réduit pour un nombre important de paramètres d'entrée. La sensibilité du paramètre est ensuite estimée graphiquement ou statistiquement, et ceci de manière indépendante pour chaque variable de sortie étudiée.

Cette méthode ne renseigne que sur la sensibilité relative du paramètre libre en réponse à une situation totalement cloisonnée par les conditions environnementales (par exemple un forçage climatique) et par la prescription du jeu de paramètres fixes. Ainsi, les conclusions quant à la sensibilité du paramètre libre peuvent être biaisées par plusieurs aspects notamment :

- la non-linéarité de la variable de sortie
- d'éventuelles interactions entre paramètres d'entrée
- la prépondérance relative de certains phénomènes en relation avec les valeurs imposées aux paramètres fixes

Sous ces conditions, il devient ainsi très difficile d'extrapoler la sensibilité du paramètre à un autre cas de figure.

### **Les plans d'expériences**

La technique des plans d'expériences permet d'atteindre une meilleure connaissance d'un système avec un minimum d'essais, un maximum de précision sur les résultats et la capacité de mettre en évidence des phénomènes secondaires comme les interactions entre facteurs d'influence. Elle est au départ une méthode qui s'impose dans le secteur industriel [Pillet, 1997], mais elle peut aussi démontrer tout son intérêt dans des recherches s'appuyant sur de lourdes campagnes de mesure ou de simulation. La différence capitale avec la méthode monovariante tient du fait que l'on fait varier les niveaux de tous les facteurs à la fois à chaque expérience, mais de manière programmée et raisonnée.

Aussi surprenant que cela puisse paraître au premier abord, le fait de faire varier tous les facteurs à la fois n'est pas un inconvénient mais offre au contraire de nombreux avantages [Goupy, 2001] parmi lesquels :

- la diminution du nombre d'essais ;
- le grand nombre de facteurs étudiés ;
- la détection des interactions entre facteurs ;
- la détection des optimaux ;
- la meilleure précision sur les résultats ;
- l'optimisation des résultats ;
- la modélisation des résultats.

Les plans d'expériences permettent l'étude de nombreux facteurs tout en impliquant un nombre raisonnable d'essais. C'est pourquoi l'une des applications principales est la recherche des facteurs influents.

Les plans d'expériences de plus en plus utilisés dans le domaine de la recherche en thermique du bâtiment puisqu'ils permettent aussi de quantifier les paramètres d'entrées par des niveaux, que ce soit des paramètres mesurables ou subjectifs. Les travaux de [Filfi, 2006] et [Chlela, 2008] illustrent l'utilisation des plans d'expériences pour caractériser la performance énergétique des bâtiments en fonction de leur construction, du type d'occupation et des équipements de génie climatique mis en œuvre à l'intérieur de ceux-ci.

Finalement, les plans d'expériences sont une bonne alternative pour les études de sensibilité dans notre domaine. Nous pouvons tout de même relever deux limites :

- l'échelle des paramètres d'entrée est décrite sur seulement deux ou trois niveaux ;
- la prise en compte des interactions entre les paramètres se fait par des tables ou les possibilités d'interactions sont déjà prédéfinies.

### **Les méthodes statistiques**

Afin de tenir compte des interactions mutuelles entre paramètres, des méthodes spécifiques ont été développées pour se prémunir des incertitudes liées au faible nombre d'expériences. Ces méthodes d'analyse de sensibilité sont des outils potentiellement très intéressants. Elles sont généralement appliquées au sein de diverses communautés scientifiques (physique, chimie, ingénierie, économie) qui utilisent la modélisation numérique, bien que leurs concepts théoriques relèvent particulièrement des mathématiques et des statistiques.

La simulation numérique est une méthode non-destructive et indépendante d'un cadre expérimental généralement contraignant. On n'est pas limité pour imposer les valeurs des paramètres d'entrée. Cependant, le problème inhérent des modèles complexes reste le temps

important de simulation, mais surtout de notre capacité limitée à traiter un grand nombre de résultats. C'est pourquoi les objectifs premiers de ces outils d'analyse restent la réduction du nombre de simulations et la mise en œuvre d'une méthode automatique et organisée pour caractériser la sensibilité de chaque paramètre. Dans sa thèse, Demarty présente un échantillon de ces méthodes [Demarty, 2001]. Ces méthodes ont la particularité de s'appuyer sur un nombre élargi mais maîtrisé de simulations et sur la variation simultanée de tous les paramètres d'entrée, comme pour les plans d'expériences, mais l'analyse de la sensibilité du (des) paramètre(s) de sortie est appréciée à partir de méthodes statistiques.

➤ *La méthode factorielle*

Cette méthode repose sur une hypothèse d'indépendance des paramètres d'entrée et sur la prescription de ces derniers à partir d'une gamme discrète préétablie, comme pour les plans d'expériences. Elle a l'avantage de tenir compte des interactions mutuelles entre les paramètres d'entrée. La réalisation d'une grille complète de simulations s'avère généralement impossible à obtenir puisqu'elle impose de réaliser au total autant de simulations que pour un plan complet<sup>3</sup>. Afin de réduire le nombre de simulations, une technique d'échantillonnage, souvent du type de l'Hypercube Latin, est généralement mise en place. La sensibilité des paramètres est ensuite analysée à partir d'un critère statistique. Le principal inconvénient réside dans la sélection de la table d'échantillonnage. Bien qu'indispensable, elle peut apparaître délicate à effectuer car elle nécessite la connaissance a priori des principales interactions entre les paramètres. Dans le cas de modèles complexes et à grand nombre de paramètres, cette étape peut s'avérer particulièrement délicate.

➤ *Les méthodes statistiques à tirage aléatoire de paramètres*

La particularité de ces méthodes résulte du fait que le choix des valeurs test pour les paramètres d'entrée n'est pas préétabli comme c'est le cas pour la méthode monovariante (valeurs de référence ou intuition de l'utilisateur), les plans d'expériences (matrices, plans puissance, factoriels, fractionnaires ou tables empiriques de Taguchi...) ou la méthode factorielle. La prescription des paramètres repose sur une technique d'échantillonnage aléatoire de type Monte Carlo. Ceci permet entre autre de choisir le nombre de simulation en fonction du temps de simulation ou d'expérimentation, de l'adéquation de l'échantillon avec la méthode d'analyse statistique et du degré de finesse escompté pour les résultats.

Une de ces méthodes est la *méthode FAST* (Fast Fourier Sensitivity Test). L'analyse de la sensibilité des variables de sortie simulées relativement aux paramètres d'entrée est déterminée

<sup>3</sup>cf. définition plans d'expériences [Pillet, 1997]

à l'aide d'une analyse en composantes de Fourier de ces variables et de leurs variances. La méthode FAST est particulièrement appropriée aux modèles à faible nombre de paramètres car le nombre de simulations à réaliser augmente fortement avec ce dernier. Elle permet une analyse de sensibilité multicritère des paramètres d'entrée : plusieurs variables sorties du modèle peuvent être prises en compte pour déterminer la sensibilité relative de chaque paramètre. Elle permet alors de tenir compte des interactions mutuelles entre chaque paramètre. La question du nombre de paramètres étudiés constitue une limitation importante à l'application de la méthode aux modèles complexes. De plus, des auteurs utilisateurs de cette méthode soulignent la difficulté à analyser les matrices de covariance des paramètres et par conséquent de mettre en évidence les interactions entre paramètres.

La *méthode RSA* (Regionalized Sensitivity Analysis) est une autre méthode de ce type. De la même façon que pour la méthode FAST, elle présente l'avantage majeur de mener une étude multicritère en traitant simultanément plusieurs variables de sortie, puis de tenir compte des interactions mutuelles entre chaque paramètre d'entrée. La méthode d'analyse est différente. A partir des résultats obtenus sur un estimateur statistique de sortie, l'ensemble des simulations est ensuite découpé en plusieurs classes de taille identique. La sensibilité de chaque paramètre est finalement estimée graphiquement par analyse comparative des fonctions de distribution cumulée des valeurs de paramètres obtenues pour chacune des classes. A l'origine, ce type de méthode est surtout adapté pour les processus d'étalonnage automatique des modèles numériques. Demarty note l'intérêt particulier accordé à ce genre de méthode pour l'étude des paramètres physiques des modèles thermiques et hydrologiques de surface des sols quels qu'ils soient [Demarty, 2001]. Outre le fait que cette méthode soit multicritère et traite les interactions entre paramètres, la spécificité de partitionner l'échantillon des simulations en classes offrent des possibilités intéressantes à notre méthodologie. Toutes ces raisons nous suggèrent l'utilisation de cette méthode, qui peut bien se prêter à l'étude de l'enveloppe d'un bâtiment, également lieu d'échanges énergétiques.

### 3.3.2 Formulation détaillée de la méthode RSA

#### Principe théorique

De manière générale, un modèle physique comporte un nombre défini ( $p$ ) de paramètres d'entrée  $\theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p\}$ . Ces derniers conditionnent les résultats de la simulation et notamment l'évolution temporelle des  $m$  variables de sortie :

$$\{Z_j\} = \{Z(\theta, t_j) \quad ; \quad t_j = t_{1j}, t_{2j}, \dots, t_{nj} \quad ; \quad j = 1, 2, \dots, m\} \quad (3.1)$$

avec  $n$  le nombre de pas de temps.

L'appréhension de la « distance » entre une variable particulière de sortie  $Z_j$  et une valeur de référence  $X_j$  permet de définir sur une fenêtre temporelle une fonction « simple critère »  $f_j$ . Le choix d'un estimateur statistique définissant cette distance, dépend du problème et des objectifs de l'utilisateur. Le plus souvent, l'erreur quadratique moyenne ou RMSE (Root Mean Square Error) est utilisée :

$$RMSE = f_j(\theta) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z_j(\theta, t_{ij}) - X_j(\theta, t_{ij})]^2} \quad (3.2)$$

La référence  $X_j$  peut aussi bien correspondre à une mesure expérimentale qu'à une simulation particulière. La prise en compte multicritère peut être définie par un ensemble  $F(\theta) = \{f_1(\theta), f_2(\theta), \dots, f_m(\theta)\}$  regroupant les fonctions simple critère.

L'exploitation de  $F$  est envisagée comme l'extension d'une méthode proposée pour un critère unique. Elle repose sur les étapes suivantes :

1. L'échantillonnage aléatoire des paramètres d'entrée par une technique de Monte Carlo
2. La réalisation de l'ensemble des simulations correspondant au jeu d'échantillons préétabli
3. Le fractionnement de cet ensemble de simulations en deux sous-ensembles complémentaires. L'un est composé par un jeu de simulations dites « acceptables », l'autre par le reste (simulations « non-acceptables »). Cette étape de fractionnement peut être réalisée soit :
  - En termes de trajectoires désirées par le modèle
  - En termes de valeurs désirées pour les critères statistiques. Une des voies possibles consiste en premier lieu à choisir une valeur seuil pour chaque simple critère  $T = \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$ , puis à partager l'ensemble complet en imposant pour chaque critère  $i$  la contrainte  $F_i < T_i$ . Le choix des seuils peut cependant se révéler relativement subjectif.

Un autre procédé consiste à reformuler la réponse multicritère en une forme monocritère plus simple, comme par exemple à partir d'une somme pondérée des fonctions simple critère. Cette forme garde une part subjective puisqu'on doit fixer les différents poids associés à chaque critère, ainsi qu'un seuil de partage en deux sous-ensembles. On peut alors utiliser la méthode dite du rangement de Pareto afin de limiter la part subjective des méthodes précédentes.

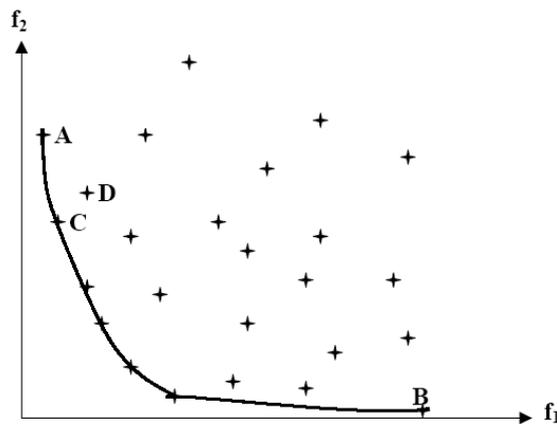
### La méthode de rangement de Pareto

Une difficulté imputée à l'exploitation de la réponse multicritère tient dans le fait qu'il paraît assez improbable d'isoler une solution unique minimisant l'ensemble des critères simples de la fonction  $F$ . En revanche, il est possible d'isoler un ensemble de solutions constitué par des

simulations qui apportent alternativement une amélioration sur un critère et une détérioration sur un autre. Cet ensemble, que l'on dénomme ensemble de Pareto, peut être facilement isolé par l'application de l'une ou l'autre des deux propriétés suivantes :

- ✓ Pour chaque non-membre de l'ensemble de Pareto, il existe au moins un membre de l'ensemble de Pareto dont tous les critères soient meilleurs.
- ✓ Pour chaque membre de l'ensemble de Pareto, il est impossible de trouver un autre membre de cet ensemble dont tous les critères soient meilleurs.

Afin d'illustrer ces propriétés, considérons un exemple simple à seulement deux critères  $\{f_1, f_2\}$ . Dans ce cas, il est possible de visualiser graphiquement dans l'espace des critères l'ensemble des simulations obtenues (voir figure 3.5).

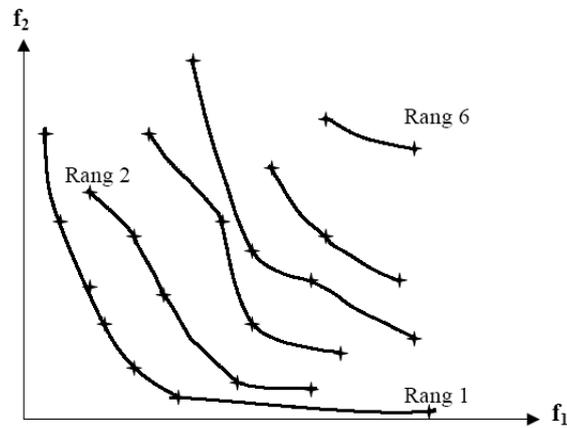


**Figure 3.5 :** Ensemble de Pareto (trait continu) obtenu dans un cas simple à deux critères [Demarty, 2001]

Les points  $A$  et  $B$  représentent les simulations particulières qui minimisent respectivement les critères  $f_1$  et  $f_2$ . Par définition, ces deux points appartiennent obligatoirement à l'ensemble de Pareto. Le point  $C$  représente la simulation qui fournit le deuxième meilleur critère  $f_1$ . Cette simulation conduit par ailleurs à une amélioration de  $f_2$  par rapport à sa valeur dans la simulation  $A$ , ainsi qu'à une amélioration de  $f_1$  par rapport à sa valeur dans la simulation  $B$ . Par conséquent, le point  $C$  appartient lui aussi à l'ensemble de Pareto. Par opposition, le point  $D$  n'y appartient pas car même s'il améliore  $A$  en  $f_2$ , le point  $C$  fournit deux meilleurs critères que lui. Sur ce même principe, l'ensemble de Pareto peut donc être facilement déterminé.

En mettant de côté les simulations trouvées sur l'ensemble de Pareto, il est alors possible de procéder par la même méthode à une nouvelle séparation de l'ensemble restant ; ceci pouvant être finalement répété jusqu'à avoir épuisé l'ensemble complet des simulations. Cette étape

complète constitue la notion du rangement de Pareto. Les différentes phases du rangement sont distinguées les unes des autres par l'assignation d'un rang (voir figure 3.6); l'isolement du premier ensemble de Pareto constituant le rang 1, le second le rang 2, etc.

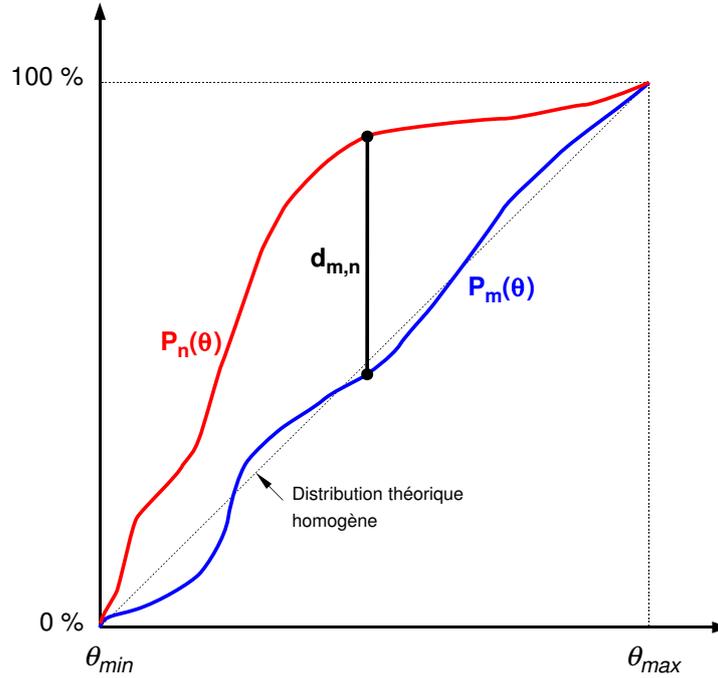


**Figure 3.6 :** Rangement de Pareto complet [Demarty, 2001]

Ainsi, plus le rang est faible plus les simulations sont jugées meilleures d'un point de vue multicritère. Sur ce principe, la partition de l'échantillon initial en simulations acceptables et non acceptables peut alors être réalisée en fixant un rang seuil, ce qui n'est par ailleurs pas complètement objectif [Demarty, 2001].

### Principe de caractérisation de la sensibilité des paramètres - Test de sensibilité

Une fois la partition précédente réalisée, le degré de différence entre les deux sous-ensembles de simulation sert de base à la détermination des sensibilités relatives de chacun des paramètres. Ceci peut être réalisé pour chaque paramètre par comparaison des fonctions de distribution individuelles obtenues sur chaque sous-ensemble (voir figure 3.7). Ainsi, un paramètre sera jugé peu sensible (respectivement sensible) si les deux fonctions de distribution trouvées pour ce paramètre sont identiques ou très proches (respectivement différentes).



**Figure 3.7 :** Évaluation de la distance maximale  $d_{m,n}$  pour un paramètre  $\theta \in [\theta_{min}; \theta_{max}]$  à partir de la fonction de distribution cumulée

Il est aussi possible d'aller plus loin dans l'appréhension du niveau de sensibilité d'un paramètre en appliquant le test statistique de Kolmogorov-Smirnov (K-S). Ce dernier affecte une probabilité à la différence maximale  $d_{m,n}$  séparant les deux fonctions de distribution cumulée :

$$d_{m,n} = \sup(P_n(\theta) - P_m(\theta)) \quad (3.3)$$

où  $P_n$  et  $P_m$  représentent respectivement les fonctions de distribution cumulée des  $n$  simulations acceptables (rang de Pareto inférieur ou égal au rang seuil déterminé par l'utilisateur) et des  $m$  simulations non-acceptables (rang de Pareto supérieur au rang seuil). La probabilité K-S affectée à chaque paramètre peut être ensuite approchée par la fonction suivante :

$$p_r = Q_{K-S} \left[ d_{m,n} \left( \sqrt{N_e} + 0,12 + \frac{0,11}{\sqrt{N_e}} \right) \right] \quad (3.4)$$

avec  $N_e$  : Nombre effectif; et  $Q_{K-S}(\lambda)$  fonction statistique intervenant dans le calcul du test K-S

Les valeurs de  $p_r$  obtenues seront toujours comprises entre 0 et 1 puisqu'elles correspondent à des probabilités. On choisit généralement arbitrairement 3 niveaux significatifs de sensibilité. Dans le travail de Demarty [Demarty, 2001], un paramètre est considéré comme « fortement », « moyennement » ou « faiblement » sensible si sa probabilité  $p_r$  associée est respectivement inférieure à 0,01, comprise entre 0,01 et 0,05 ou supérieure à 0,05.

En choisissant le principe d'analyse de sensibilité précédemment décrit, il est important de noter que les résultats vont dépendre :

- de la taille de l'échantillon initial ;
- de la valeur choisie du rang seuil de Pareto.

Il est donc important de tester pas à pas de quelle manière l'augmentation du nombre de simulations et la modification du rang de Pareto limite altère les résultats de l'étude de sensibilité.

### Spécificité de la méthode personnalisée d'analyse de sensibilité multicritère

Dans ce travail, nous optons délibérément pour la méthode RSA qui offre de réelles opportunités d'analyser la sensibilité du capteur microclimatique que constitue notre bâtiment. Cependant, il paraît présomptueux d'appliquer la méthode de rangement de Pareto pour isoler des simulations acceptables et non acceptables d'un point de vue énergétique si notre estimateur de sortie n'est pas référencé à une consommation annuelle. De plus, nous verrons qu'il peut être intéressant de tirer des informations des simulations qui ne minimisent pas l'estimateur statistique.

Nous utiliserons ainsi la technique RSA en substituant au rangement de Pareto une technique personnalisée de « seuillage », que nous exposerons dans la suite du chapitre.

## 3.4 Choix des paramètres de l'étude de sensibilité

Les textes fondateurs de la nouvelle RT2005 sensibilisent immédiatement les concepteurs sur les postes déperditifs de chaleur prépondérants comme l'isolation, les ponts thermiques, la ventilation, la quantité de vitrage. Des recherches approfondies [Filfi, 2006] mettent en évidence un nombre plus important de paramètres influents dans les consommations énergétiques hivernales et estivales du bâtiment comme l'isolation des parois opaques, les caractéristiques des surfaces vitrées, l'orientation des parois, la gestion des protections solaires, la ventilation, l'inertie, la perméabilité à l'air, les types d'équipements bureautiques, la gestion de l'efficacité de l'éclairage, le rendement et l'efficacité des équipements techniques de chauffage et de climatisation (chaudières, groupes frigo, ventilateurs, pompes), l'isolation des réseaux de distribution.

Pour ce travail, nous ferons une sélection réduite des paramètres d'étude du bâtiment. Les choix ont été constitués par l'élimination d'emblée de certains paramètres cités précédemment comme :

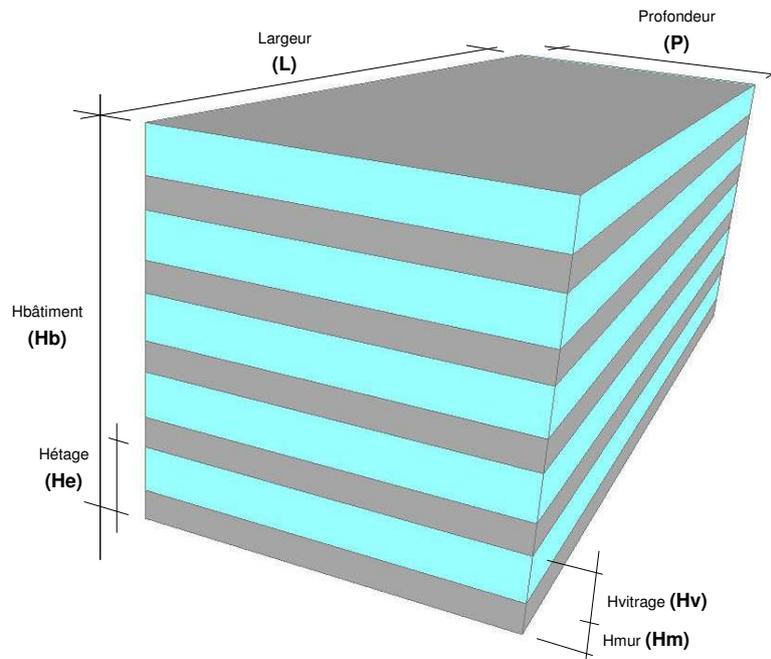
- l'isolation ;
- la nature et l'efficacité des appareils de conditionnement d'ambiance (chauffage et climatisation).

En effet, les décisions concernant ces choix correspondent à des réglementations ou des solutions techniques établies, soit en marge de la conception de l'aménagement extérieur.

On choisit alors d'étudier la sensibilité énergétique du bâtiment de référence à sept paramètres : trois paramètres correspondent à des caractéristiques propres au bâtiment, quatre paramètres au climat. Nous présenterons les données météorologiques de référence utilisées pour l'étude avant de présenter les paramètres de sensibilité climatiques qui y sont étroitement liés. Les paramètres de sortie utilisés pour l'analyse, ayant pour rôle de discriminer au mieux les qualités énergétiques principales d'un bâtiment par rapport à un autre, seront exposés dans la partie suivante.

### 3.4.1 Les paramètres d'entrée liés au bâtiment

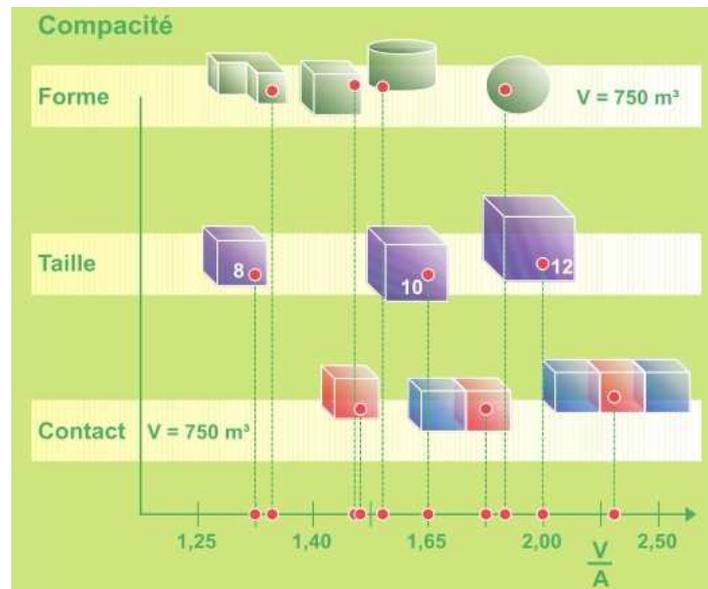
La figure 3.8 présente la forme du bâtiment de référence et présente les variables dimensionnelles utilisées par la suite.



**Figure 3.8 :** Géométrie du bâtiment de référence

#### La compacité

Privilégier une forte compacité revient, pour un volume habitable fixé, à limiter la surface de déperdition du bâtiment, et donc, d'une part, sa demande de chauffage, et d'autre part la quantité de matériaux à mettre en œuvre pour construire son enveloppe. Ces deux points ont une influence directe sur l'impact environnemental du bâtiment et sur son coût. Privilégier une forte compacité c'est aussi réduire la surface réceptrice des apports solaire. On peut voir comment la compacité évolue avec la forme du bâti (figure 3.9) et notamment comment la mitoyenneté favorise son augmentation.



**Figure 3.9** : Influence de la forme, de la taille et de la mitoyenneté d'autres volumes sur la compacité de formes simples [Liébard et DeHerde, 2006]

La compacité d'un bâtiment peut être définie de deux manières. Couramment, elle est calculée comme le rapport entre le volume utile (volume habitable protégé  $V$ ) et la surface de déperdition de chaleur (enveloppe extérieure du bâtiment  $S_e$ ) : on le nommera  $C_p$ . Le rapport inverse  $\frac{S_e}{V}$  est toutefois proposé : on le nommera  $C_p^*$ .

D'autres manières d'exprimer la compacité des bâtiments sont utilisées dans des études des formes urbaines. Dans une partie d'un travail concernant l'étude des indicateurs environnementaux du Grand Projet de Ville Malakoff Pré Gauchet à Nantes [Groleau et Bourges, 2005], Groleau a défini un indice de compacité  $I_c$  dans le but d'optimiser des formes thermo-énergétiques pour des bâtiments de grands ensembles. Pour limiter les échanges en saison chaude et froide, la valeur de  $I_c$  doit être minimale (inversement  $C_p$  doit être maximale).

A partir de la correspondance entre les lois de déperdition volumique et surfacique dans le bâtiment, Adolphe [Adolphe, 2001] définit le coefficient de compacité suivant :  $C_f = \frac{S_e}{V^{2/3}}$ . Il correspond finalement à  $\frac{C_p^*}{C_t}$  avec  $C_t = \frac{1}{V^{1/3}}$  le « coefficient d'échelle » correspondant à la distance maximale entre un occupant et les parois du bâtiment. Cet indice permet de s'affranchir des problèmes d'augmentation de compacité liée à l'augmentation de taille entre deux motifs équivalents (voir figure 3.9).

➤ *Définition*

L'indice de compacité utilisé dans ce travail est  $C_p$ . Pour un bâtiment prismatique (extrusion verticale à hauteur constante d'une base polygonale) et en particulier les bâtiments parallélépipédiques (figure 3.8) considérés dans cette étude, son expression est :

$$C_p = \frac{V}{S_e} = \frac{nH_eLP}{2LP + 2nH_e(L + P)} = \frac{1}{2} \frac{1}{\frac{1}{nH_e} + \frac{1}{L} + \frac{1}{P}} \quad (3.5)$$

➤ *Intervalle de variation*

Les contraintes associées à notre bâtiment de bureaux de référence sont telles que la surface totale des planchers est fixée à  $3000 \text{ m}^2$  et la hauteur d'étage est constante et égale à  $3 \text{ m}$ . Par conséquent, le volume est lui aussi constant et égal à  $9000 \text{ m}^3$ . On ne fixe pas directement des bornes minimales et maximales pour l'intervalle de variation des compacités mais on définit des intervalles pour nos paramètres dimensionnels de géométrie. On fixera des valeurs pour le triplet de variables  $L$ ,  $P$  et  $n$ . Ces trois paramètres sont liés, on a donc seulement besoin d'en déterminer deux pour trouver le troisième. On détermine alors  $n$ , puis  $P$  pour en déduire  $L$ , avec les restrictions suivantes :

Restriction sur  $n$  : Le nombre d'étage sera compris entre 2 et 10 inclus. Ceci induit des hauteurs de bâtiments de 6 à 30m, ce qui correspond à une gamme de hauteurs raisonnable pour des bâtiments tertiaires courants.

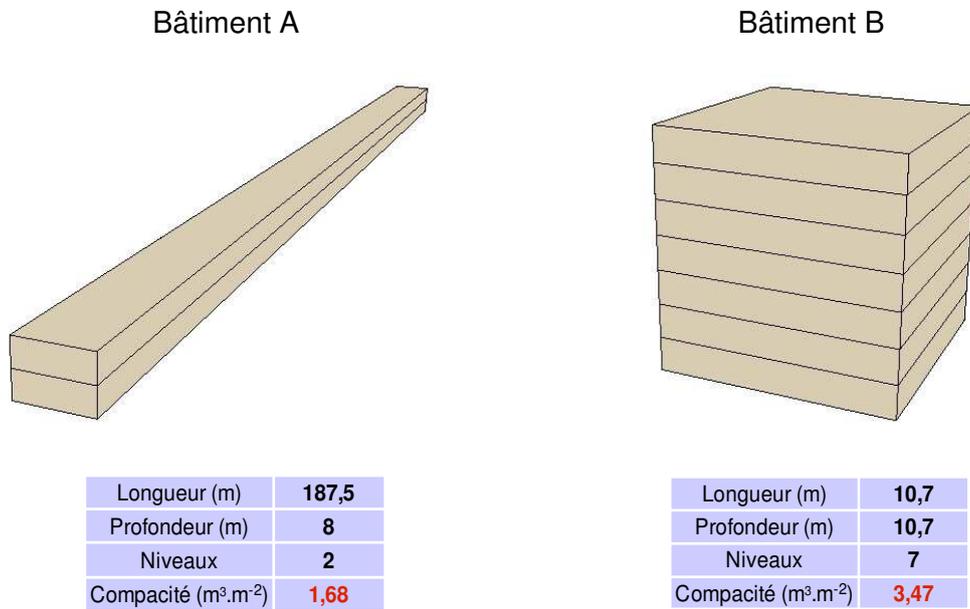
Restriction sur  $P$  : On fait varier la profondeur du bâtiment dans un intervalle de  $8 \text{ m}$  à  $30 \text{ m}$ . Ceci correspond respectivement à des morphologies d'aménagement d'étage type de bâtiments tertiaires. Voici le détail de l'aménagement transversal type :

- $8 \text{ m}$  : un petit bureau en bande ( $5,4 \text{ m}$ ) + une circulation ( $2 \text{ m}$ ) + l'épaisseur des murs ( $0,6 \text{ m}$ )
- $30 \text{ m}$  : un grand bureau ( $9 \text{ m}$ ) + une circulation ( $2,5 \text{ m}$ ) + un espace central (espace de réunion ou sanitaires) ( $6 \text{ m}$ ) + une circulation ( $2,5 \text{ m}$ ) + un grand bureau ( $9 \text{ m}$ ) + l'épaisseur des murs ( $0,6 \text{ m}$ )

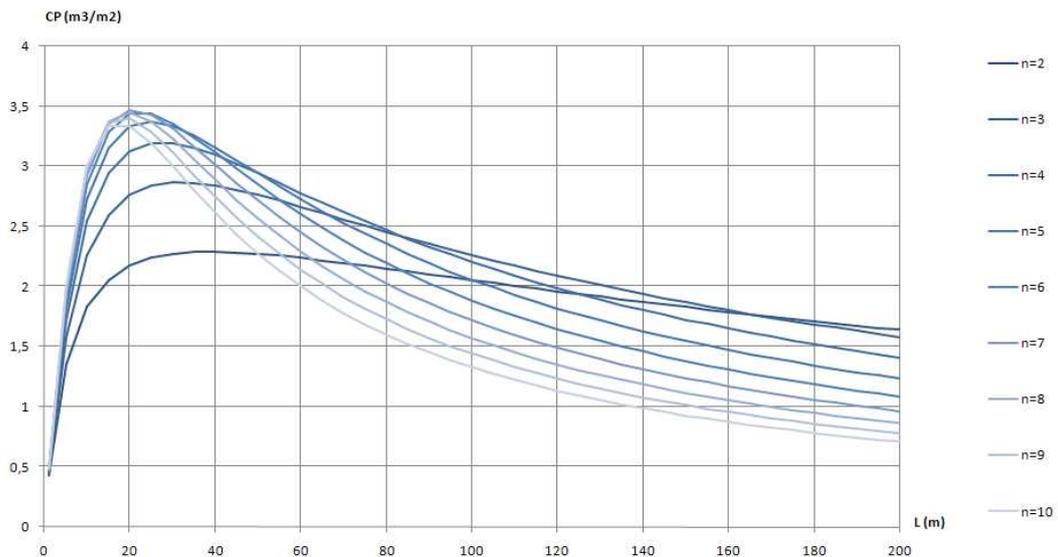
La valeur de  $L$  est donnée par  $L = \frac{S_{\text{plancher}}}{Pn}$  et on ne fixe pas de restriction sur la longueur du bâtiment sachant le calcul théorique donne la distance maximale pour  $n$  et  $P$  minimales :  $L = \frac{3000}{8 \times 2} = 187,5 \text{ m}$  (figure 3.10).

On peut visualiser figure 3.11 l'évolution de la compacité en fonction des deux variables de distance  $L$  et  $n$ . On observe que, dans nos gammes de longueurs et de hauteurs du bâtiment, la compacité maximale est d'environ  $3.47 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$ , elle correspond à un bâtiment de base carrée ( $L = P = 20.7 \text{ m}$ ), de 7 niveaux ( $H_b = 21 \text{ m}$ ). Il correspond bien au bâtiment réalisable par la méthode pseudo-aléatoire présentée précédemment qui s'approche au mieux de la forme

cubique. La compacité minimale est d'environ  $1.68 \text{ m}^3/\text{m}^{-2}$ , elle correspond à un bâtiment de 2 niveaux, de profondeur minimale  $P = 8 \text{ m}$  et de longueur maximale  $L = 187,5 \text{ m}$ .



**Figure 3.10** : Compacités limites : la plus faible compacité correspond au bâtiment A, la plus forte au bâtiment B



**Figure 3.11** : Évolution de la compacité en fonction de la longueur (L) et du nombre d'étage (n) du bâtiment de référence

## Le taux de vitrage

### ➤ Définition

Le taux de vitrage (noté  $T_V$ ) est défini comme le rapport entre la surface totale de vitrage et la surface totale des façades du bâtiment. Étant donné que nous considérons la présence des vitrages uniquement sur les façades latérales, et que le souci de modélisation géométrique impose le parti pris des vitrages en bandeaux, ce rapport donne directement, le rapport entre les hauteurs  $H_e$  et  $H_v$  définies sur la figure 3.8.

### ➤ Intervalle de variation

On fera varier  $T_V$  entre 20% et 90%. Ces taux sont en adéquation avec les taux de vitrage extrêmes observés sur les bâtiments urbains tertiaires.

## L'orientation

### ➤ Définition

Comme le montre la figure 3.12, l'orientation du bâtiment, notée  $Or$ , correspond à la distance angulaire entre l'axe Ouest-Est et l'axe principal du bâtiment (axe de symétrie longitudinal dans le sens de la longueur  $L$ )

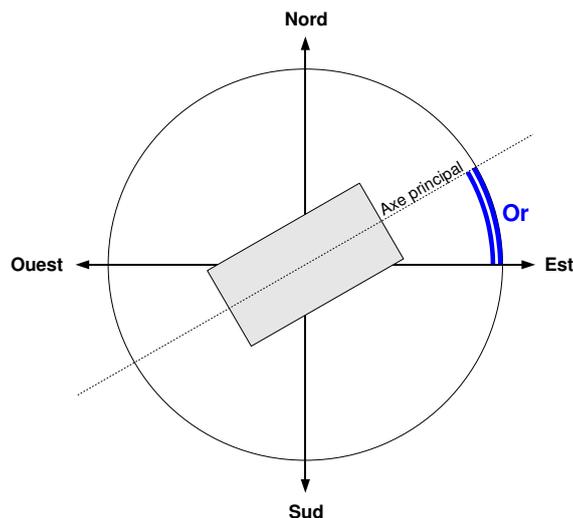


Figure 3.12 : Définition de l'orientation du bâtiment

➤ *Intervalle de variation*

Nous faisons varier l'orientation de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  de manière à avoir les deux dispositions extrêmes suivantes et leurs intermédiaires :

- façade principale (côté  $L$ ) plein Sud ( $0^\circ$ )
- façade principale plein Nord ( $90^\circ$ )

### 3.4.2 Les conditions météorologiques de référence

Les « semaines types » sont constituées d'un ensemble de scénarios horaires de variables climatiques : la température d'air ( $T_{air}$ ), taux d'humidité de l'air ( $Hu_{air}$ ), les flux solaires incidents directs et diffus ( $F_{sol(direct)}$  et  $F_{sol(diffus)}$ ) et les flux infrarouges atmosphériques ( $F_{IR-atm}$ ). Les scénarios moyens pour  $T_{air}$ ,  $Hu_{air}$  et  $F_{IR-atm}$  ont été construits en moyennant sur une journée de référence les données météorologiques de huit villes (Trappes, Nancy, Rennes, Macon, La Rochelle, Agen, Carpentras et Nice) représentatives des zones climatiques types de la France définies par la RT2005 (figure 3.13). Ces scénarios sont présentés sur les figures 3.14, 3.15 et 3.16.

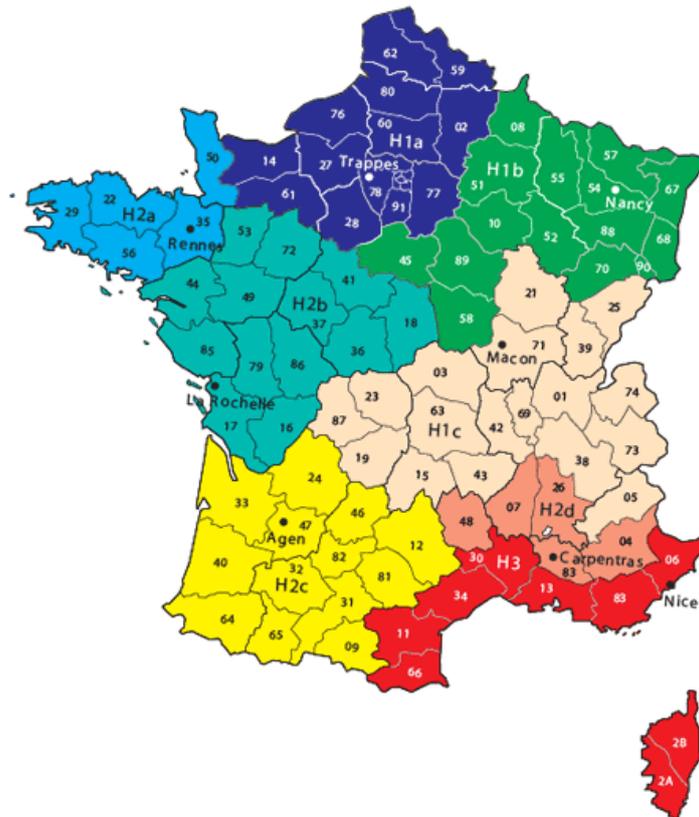


Figure 3.13 : Zones climatiques françaises selon la RT 2005

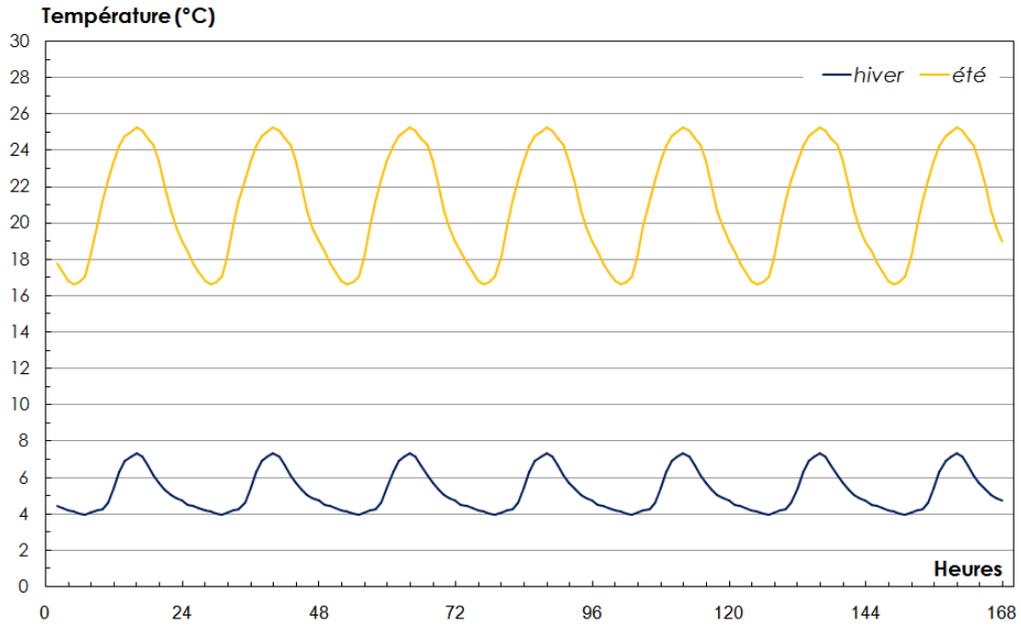


Figure 3.14 : Scénario moyen hebdomadaire de la température d'air

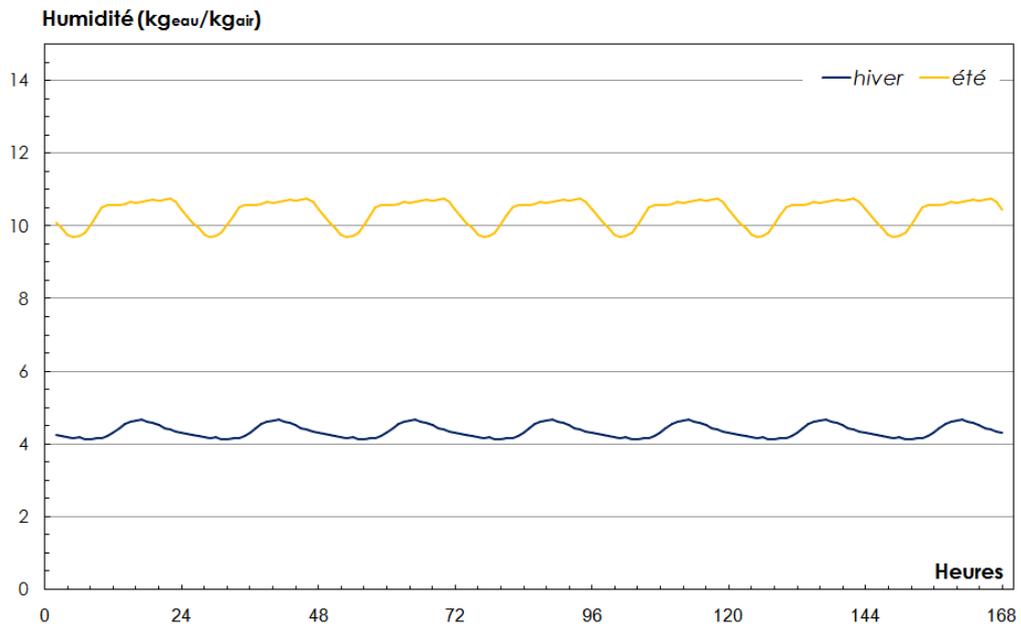
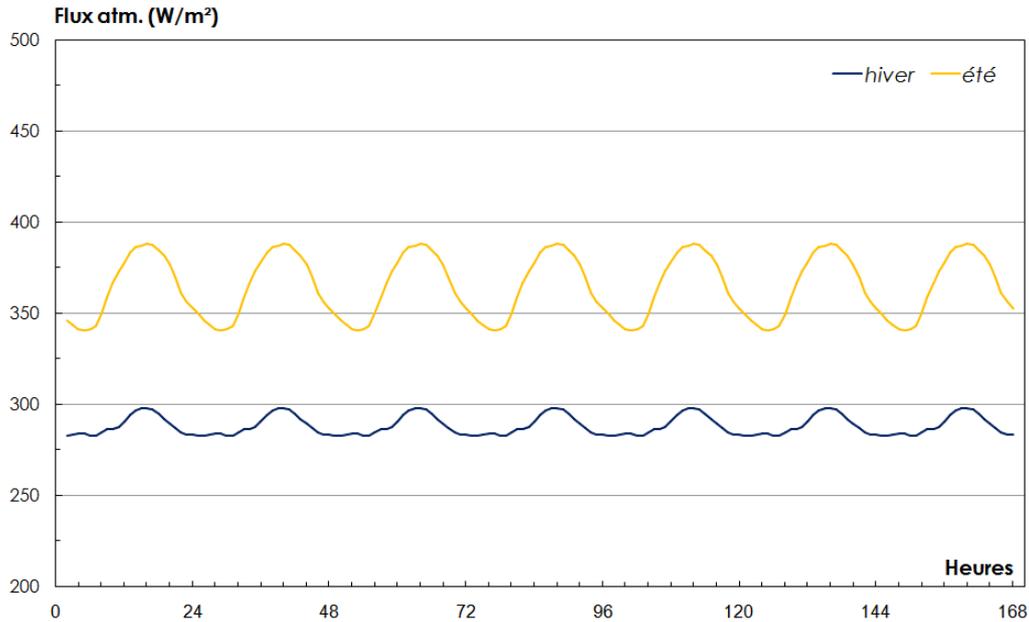


Figure 3.15 : Scénario moyen hebdomadaire de la masse d'humidité dans l'air



**Figure 3.16 :** Scénario moyen hebdomadaire des flux Infra Rouge atmosphériques

Les deux journées de référence constituées sont une journée type « chaude » et une journée type « froide », correspondant respectivement à des moyennes mensuelles en juillet et en janvier. Les flux solaires ont quant à eux été simulés théoriquement par le modèle *Solene* avec un modèle de ciel clair CIE, pour une latitude correspondant à la latitude française moyenne :  $46,5^\circ$ . Ces scénarios sont présentés sur les figures 3.17 et 3.18 où nous comparons les valeurs calculées en moyennant les valeurs météorologiques, à l'image des trois variables précédentes, et les valeurs calculées par *Solene*. Nous nous apercevons que les flux solaires globaux théoriques sont moins élevés que les flux solaires expérimentaux en été et qu'il se produit l'inverse en hiver. En prenant les valeurs obtenues pour les simulations théoriques, nous nous mettons dans des conditions plus défavorables pour les deux saisons. Nous nous privons d'apports gratuits en hiver alors que nous intensifions les effets de surchauffe possible en été. Ceci ne constitue pas une entrave à notre étude, au contraire, nous augmentons le niveau des charges du bâtiment quelle que soit la saison.

Pour toutes les variables présentées, les semaines types d'hiver puis d'été sont obtenues par la juxtaposition de sept journées météo moyennes statistiques de janvier puis de juillet respectivement.

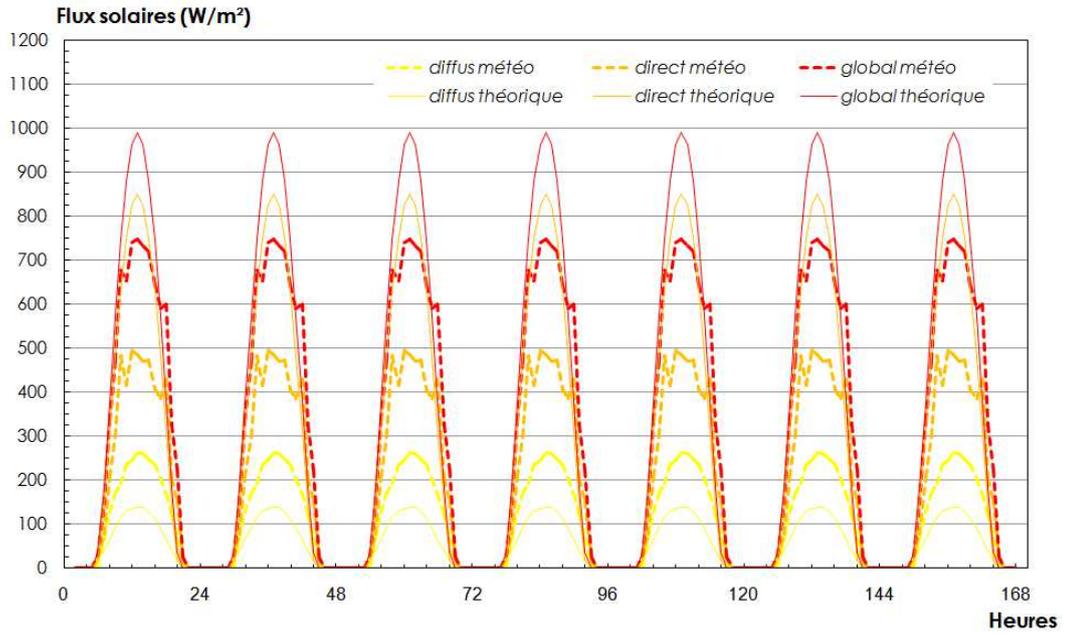


Figure 3.17 : Scénario moyen hebdomadaire des flux solaires direct et diffus

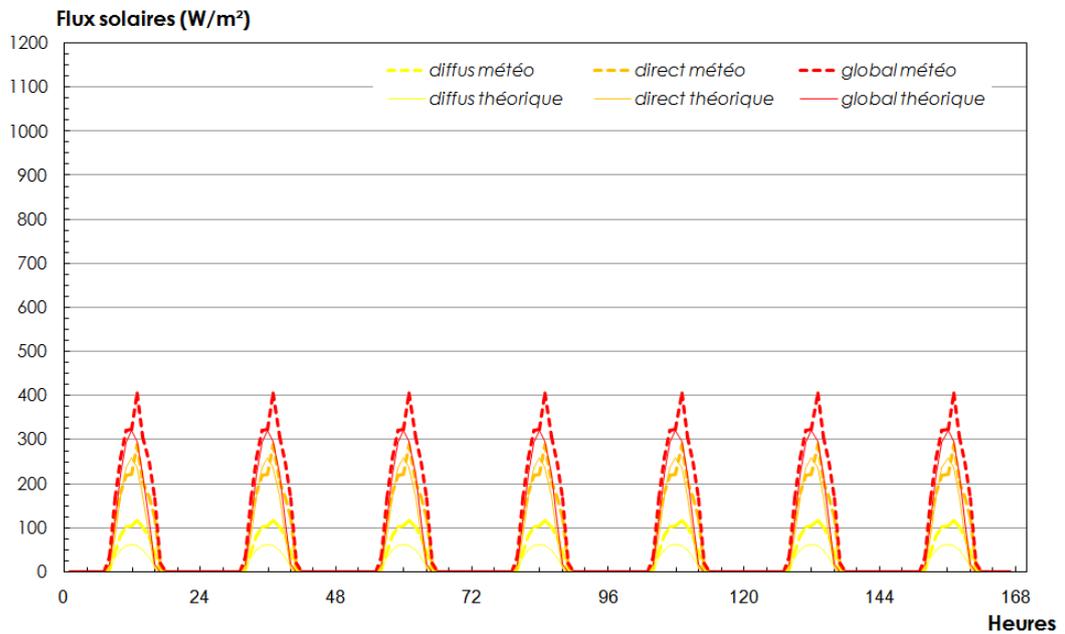


Figure 3.18 : Scénario moyen hebdomadaire des flux solaires direct et diffus

### 3.4.3 Les paramètres climatiques liés à l'environnement proche

#### Le coefficient d'échange superficiel convectif

➤ *Définition*

Le coefficient d'échange superficiel convectif ( $h_c$ ) a déjà été défini dans le premier chapitre de la thèse (voir p.11).

➤ *Intervalle de variation*

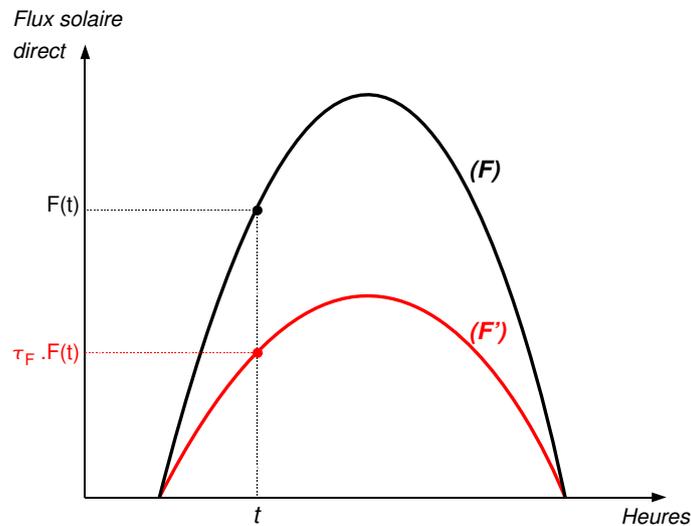
Nous établissons la gamme de variation de  $h_c$  en fonction de la vitesse du vent  $v_{air}$  et en utilisant la loi de Jayamaha donnée par l'équation 2.88. L'intervalle de vitesse est défini à partir des valeurs de vitesse que l'on peut trouver par la mesure en site urbain. Couramment, les vitesses maximales que l'on peut trouver ponctuellement dans des zones ventées (venturis, effet de contournement) ou dans des espaces urbains ouverts et ventés (grandes places) peuvent atteindre  $15 \text{ m.s}^{-1}$ . On obtient ainsi  $h_c(min) = 5,85 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$  et  $h_c(max) = 31,35 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$ . Par ailleurs dans notre modèle de simulation microclimatique numérique, il arrive régulièrement d'obtenir des valeurs ponctuelles de  $h_c$  inférieures à  $5,85 \text{ W/K.m}^2$ , voire à  $1 \text{ W/K.m}^2$ . Pour cette raison  $h_c$  l'intervalle de variation de ( $h_c$ ) est défini ainsi :  $h_c(min) = 0 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$  et  $h_c(max) = \text{W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$

#### Le taux de flux solaire incident

➤ *Définition*

Nous cherchons à pondérer le flux solaire par un coefficient d'atténuation, à l'image du rôle des protections solaires fixes sur le bâtiment, ou bien des masques solaires créés par des aménagements comme le relief, les arbres ou d'autres bâtiments environnants.

Nous traduisons cette pondération par la mise en place du taux de réduction du flux solaire direct, noté  $T_F$  et explicité sur la figure 3.19. Dans les calculs, il est affecté au flux solaire direct pour chaque pas de temps de calcul.



**Figure 3.19 :** Taux de flux solaire incident : le flux solaire théorique journalier  $F$  est pondéré par un  $T_F = 50\%$  pour donner le flux solaire réduit  $F'$

Nous ne l'attribuons pas au flux solaire diffus car les facteurs d'atténuation de l'irradiation solaire comme les dispositifs architecturaux de protection solaire ou la végétation, ou même les nuages d'un ciel couvert réduisent légèrement le flux diffus, tandis que l'on peut considérer un véritable contrôle du flux solaire direct.

➤ *Intervalle de variation*

Étant donné qu'on attribue ce coefficient uniquement au flux solaire direct en période d'été, on fera varier ce coefficient de 0% (cas sans protections) à 100% (cas de protection totalement occultantes).

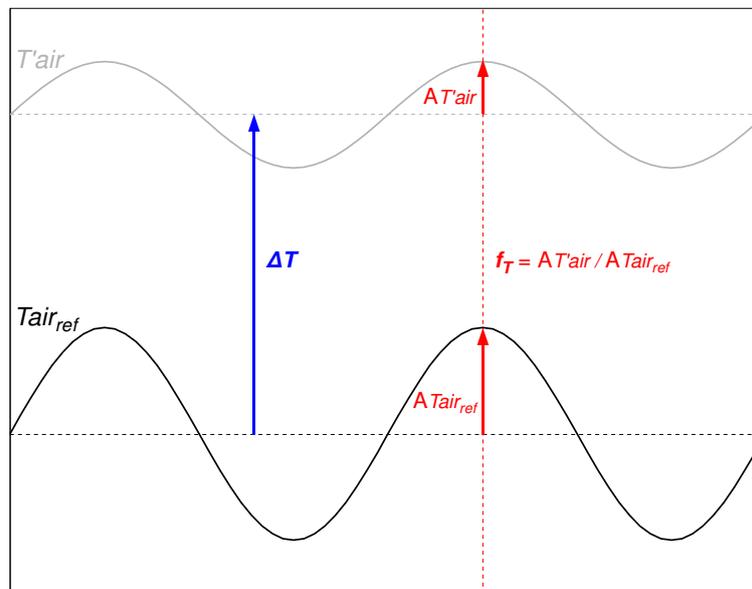
### Les paramètres liés à la température d'air

➤ *Méthode de calcul*

L'idée est de faire varier la courbe de température d'air moyenne par rapport à son amplitude jour nuit et à sa médiane journalière. On donc besoin de deux variables traduisant ses variations :

- Le facteur de réduction de l'amplitude jour-nuit de la température d'air :  $f_T$  [%]
- L'écart à la température d'air moyenne journalière :  $\Delta T$  [°C]

Ces deux variables sont illustrées sur la figure 3.20



**Figure 3.20 :** Paramètres  $f_T$  et  $\Delta T$  appliqués à un signal de température de référence induisant un signal de température modifiée

Les moyennes de températures d'air journalières calculées pour l'hiver et l'été sont respectivement égales à  $5,66\text{ }^\circ\text{C}$  et  $20,91\text{ }^\circ\text{C}$ .

➤ *Intervalle de variation*

En étudiant les températures des mois de janvier et de juillet pour les huit villes, on définit les coefficients limites décrivant les gammes des variations globales des deux paramètres, on trouve :

- les bornes 50% et 150% pour  $f_{T_{air}}$
- les bornes  $-3\text{ }^\circ\text{C}$  et  $+3\text{ }^\circ\text{C}$  pour  $\Delta T_{air}$

### 3.4.4 Les paramètres de sortie

Hormis les variables physiques usuellement calculées par le modèle thermique de bâtiment à chaque pas de temps, énumérées dans le chapitre précédent, des routines supplémentaires de post-traitement permettent de calculer neuf grandeurs thermo-énergétiques supplémentaires pour les semaines types hiver et été :

- ✓ La consommation énergétique sensible hebdomadaire hiver (1)
- ✓ La consommation énergétique latente hebdomadaire hiver (2)
- ✓ La consommation énergétique totale hebdomadaire hiver (somme de 1 et 2)

- ✓ Le pic de puissance sensible hiver
- ✓ La consommation énergétique sensible hebdomadaire été (3)
- ✓ La consommation énergétique latente hebdomadaire été (4)
- ✓ La consommation énergétique totale hebdomadaire été (somme de 3 et 4)
- ✓ Le pic de puissance sensible été
- ✓ L'écart moyen à la température de confort de référence en été

Les critères de consommation hebdomadaire sont directement représentatifs de l'efficacité énergétique du bâtiment dans les conditions microclimatiques définies, alors que les pics de puissance indiquent la puissance minimale à installer pour satisfaire à tout instant les consignes de confort dans les conditions météorologiques des semaines types. La facture énergétique d'un bâtiment chauffé en hiver ou climatisé en été repose non seulement sur le chauffage ou le refroidissement de l'air (charges sensibles) mais aussi sur la déshumidification de l'air humide (charges latentes). Pour les charges sensibles, une limite maximale d'humidité relative dans les locaux ( $Hu = 50\%$ ) est couramment fixée. En effet, nous ne cherchons pas à humidifier l'air quand  $Hu < 50\%$ . En hiver, l'air extérieur venant renouveler l'air intérieur par ventilation, est moins chargé d'humidité qu'en été. Les charges de déshumidification sont par conséquent très faibles voire nulles. Les résultats de nos simulations donnent au maximum  $23 Wh.m^{-2}$  hebdomadaires. De manière générale, les ingénieurs climaticiens conçoivent des systèmes de déshumidification d'air seulement pour l'été dans ce type de bâtiments. Nous pourrions éventuellement nous en soucier en hiver pour des locaux techniques ou industriels particuliers tels les salles blanches, mais ceci n'est pas une préoccupation dans les bureaux ou tout autre local d'activité humaine classique.

Finalement, l'indicateur énergétique d'hiver retenu pour la suite de l'étude est la consommation énergétique sensible hebdomadaire hiver, que nous nommons  $C_{hiver}$ . L'indicateur énergétique d'été sera quant à lui la consommation énergétique totale hebdomadaire été, que nous nommons  $C_{été}$ .

Le dernier critère retenu donne une information quantitative sur les conditions de confort thermique à l'intérieur du bâtiment à partir d'un indicateur basique, la température opérative :

$$T_{op} = aT_{air} + (1 - a)T_{mr} \quad (3.6)$$

avec  $T_{air}$  température d'air du local (en °C),  $T_{mr}$  température radiante moyenne (en °C) du local,  $a$  coefficient fonction de la vitesse d'air dans le local ( $a = 0.5$  pour une vitesse d'air inférieure à  $0.2 m.s^{-1}$ , d'après la norme NF EN ISO 7730 [AFNOR, 1994]).

Cet indicateur de confort est choisi car il est à la fois simple, s'adapte parfaitement aux grandeurs physiques en sortie du modèle, et, est bien connu des concepteurs. Nous construisons

alors un indice dérivé : l'écart moyen de confort  $\Delta T_{op}$ . Il correspond mathématiquement à une erreur moyenne quadratique sur les niveaux et le temps entre la température opérative intérieure calculée par le modèle ( $T_{op}$ ) et une température opérative de référence estivale ( $T_{opREF} = 26 \text{ °C}$ ) :

$$\Delta T_{op} = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{j=1}^m \left[ \sum_{i=1}^n [T_{opij} - T_{op(ref)}]^2 \right]} \quad (3.7)$$

avec  $m$  le nombre de pas de temps horaires et  $n$  le nombre de niveaux du bâtiment. L'erreur moyenne quadratique est préférée à l'erreur moyenne algébrique car elle est plus sensible aux grands écarts, et discrimine donc plus facilement les résultats entre eux.

## 3.5 Résultats de l'étude et analyse

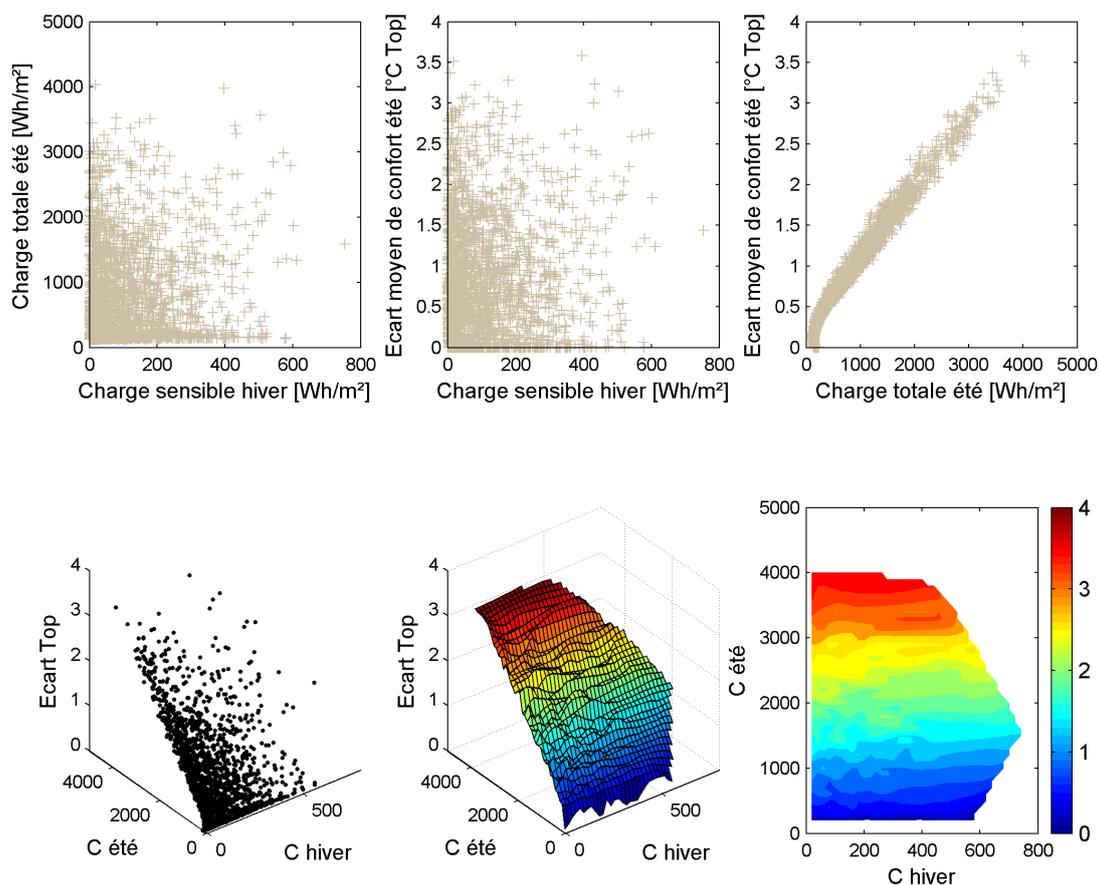
### 3.5.1 Échantillon d'entrée et de sortie des simulations

Un grand nombre de simulations a été réalisé à partir des différentes combinaisons des sept paramètres d'entrée obtenues par tirage aléatoire en préambule de chaque calcul. La taille de l'échantillon est de 2000 simulations. Cette taille a été jugée satisfaisante à la fois pour obtenir suffisamment de combinaisons différenciées des paramètres d'entrée et à la fois pour balayer rigoureusement les intervalles de variation de chacun des paramètres.

Chaque simulation a été réalisée pour un bâtiment répondant aux caractéristiques de compacité, d'orientation et de surfaces vitrées déterminées aléatoirement, alternativement pour la semaine type d'hiver et la semaine type d'été définies précédemment. Le choix d'une semaine de calcul est un intermédiaire entre la journée et la saison. Nous avons traité sept jours de suite pour caractériser le comportement thermique du bâtiment pendant la semaine type de travail suivie du week-end où les scénarios d'occupation sont être différent. Faire une étude sur une période plus longue, comme un mois, un trimestre, voire une année serait théoriquement l'idéal mais le temps de simulation aurait été beaucoup trop important. De plus, nous pouvons considérer qu'une semaine type météo est représentative et reproductible sur une saison. Les scénarios horaires climatiques de ces semaines moyennes statistiques ont alors été pondérées à chaque tirage aléatoire par les quatre paramètres d'entrée relatifs au microclimat (voir partie 3.4.3).

Pour disposer de températures nodales et surfaciques internes et externes proches de la réalité, nous avons initialisé l'état thermique du bâtiment. Pour cela, la semaine d'étude est précédée de deux semaines d'initialisation identiques à celle étudiée, mais non prises en compte pour les résultats.

Nous menons l'étude en analysant simultanément les trois critères  $C_{hiver}$ ,  $C_{été}$  et  $\Delta T_{op}$  pour différencier les configurations entre elles suivant un compromis énergétique saisonnier et un compromis confort et économie d'énergie. La répartition obtenue pour les différents résultats des simulations est visualisée sur la figure 3.21.



**Figure 3.21** : Répartition des 2000 résultats de simulation : Nuages des points en 2D suivant les trois systèmes d'axes et interpolation surfacique en 3D

Dans les systèmes d'axe 1 [ $C_{été}/C_{hiver}$ ] et 2 [ $\Delta T_{op}/C_{hiver}$ ] pour les graphiques en 2D de la figure 3.21 la répartition est assez diffuse. Le nuage de points s'étend jusqu'à des valeurs de consommation sensibles d'hiver de l'ordre de  $750 \text{ Wh.m}^{-2}$  et jusqu'à des valeurs de consommation été de l'ordre de  $4000 \text{ Wh.m}^{-2}$ . Il s'étend jusqu'à l'axe des ordonnées pour les basses valeurs de  $C_{hiver}$ ; c'est-à-dire que quelques bâtiments parmi les 2000 cas ne consomment pas ou peu d'énergie dans les conditions météorologiques de la semaine type d'hiver. Nous pouvons expliquer ceci premièrement par le fait que l'isolation respecte la nouvelle RT2005 très stricte, mais aussi et surtout parce que les conditions de la semaine de référence ne sont pas celles d'une période d'hiver très rude. Les températures d'air oscillent en effet entre

4 °C et 8 °C pendant la journée et les apports solaires et les charges internes compensent les déperditions dans ce cas. En ce qui concerne les valeurs basses de  $C_{été}$ , le nuage est délimité par un axe fictif de l'ordre de 100  $Wh.m^{-2}$ . Il correspond à la limite basse des consommations énergétiques latentes. La simple occupation des bureaux implique une charge latente résultante quelque soit le climat extérieur ou la forme du bâti. La masse d'humidité dégagée par les occupants ne peut pas être évacuée par l'air admis avec un taux de ventilation de 15  $m^3h^{-1}/occupant$ . Sans traiter l'humidité, certains bâtiments permettent cependant le respect de la consigne en température d'air sans un recours à la climatisation en été.

La visualisation dans le troisième graphe en 2D montre clairement que  $\Delta T_{op}$  est liée à  $C_{été}$  par une relation linéaire. Nous ne cherchons pas à déterminer une équation de comportement car généraliser des coefficients pour des bâtiments de géométrie, de composition et d'occupation différentes n'est pas envisageable.

Enfin, nous notons que la densité des points du nuage est plus importante dans la zone des basses consommations, que ce soit pour l'été ou pour l'hiver. Nous recensons ainsi plus de bâtiments énergétiquement efficaces que de bâtiments critiques.

### 3.5.2 Influence individuelle des paramètres d'entrée sur le comportement énergétique du bâtiment

Dans cette partie préliminaire, la répartition des paramètres de sortie est observée simultanément, en fonction de chacun des paramètres d'entrée pris indépendamment. Nous avons vu précédemment que le niveau de confort dans le bâtiment évoluait de manière linéaire en fonction des consommations hebdomadaires d'été. L'analyse peut donc se réduire à la répartition des points dans le repère défini par  $C_{hiver}$  et  $C_{été}$ . Nous procédons au découpage de l'échantillon total en quatre sous-échantillons pour lesquels la valeur du paramètre d'entrée étudié appartient à une gamme de valeur définie par les sous-intervalles égaux correspondant au 1<sup>er</sup>, 2<sup>e</sup>, 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> quart de l'intervalle de variation total du paramètre. Ensuite, paramètre par paramètre, nous analysons graphiquement la répartition des points énergétiques par rapport à leur affiliation à l'un ou l'autre des quatre sous-échantillons. Nous construisons systématiquement quatre graphes représentant les quatre sous-échantillons (les bornes des sous-intervalles sont référencées en tant que « classes » de valeurs au dessus des graphes) où sont identifiés les points correspondant au sous-intervalle examiné (points colorés) par rapport à l'ensemble des points de l'échantillon (points clairs).

L'objectif de cette étude préliminaire est d'identifier des tendances de cause à effet, et par conséquent, de déduire les actions à réaliser sur les paramètres d'entrée pour améliorer ou dégrader le comportement énergétique du bâtiment de référence.

### Relation avec la compacité

Il est difficile de caractériser graphiquement des tendances énergétiques propres à la compacité car le tirage des valeurs de compacité n'est pas homogène sur l'intervalle complet (de  $1,67 \text{ m}^3.m^{-2}$  à  $3,47 \text{ m}^3.m^{-2}$ ), ainsi le nombre de simulations n'est pas équivalent pour les quatre sous-intervalles (3.22). Ceci est dû à la méthode de tirage pseudo-aléatoire de la compacité en phase préliminaire de simulation. La compacité est calculée en fonction d'une longueur et du nombre d'étage (voir partie 3.4.1). Il y a environ douze fois plus de cas dans la quatrième classe, celles des bâtiments les plus compacts, que dans la première. L'analyse graphique ne dénote pas de phénomène de zonage. Nous ne pouvons pas supposer a priori que la classe de compacité à un rôle prépondérant dans la demande énergétique.

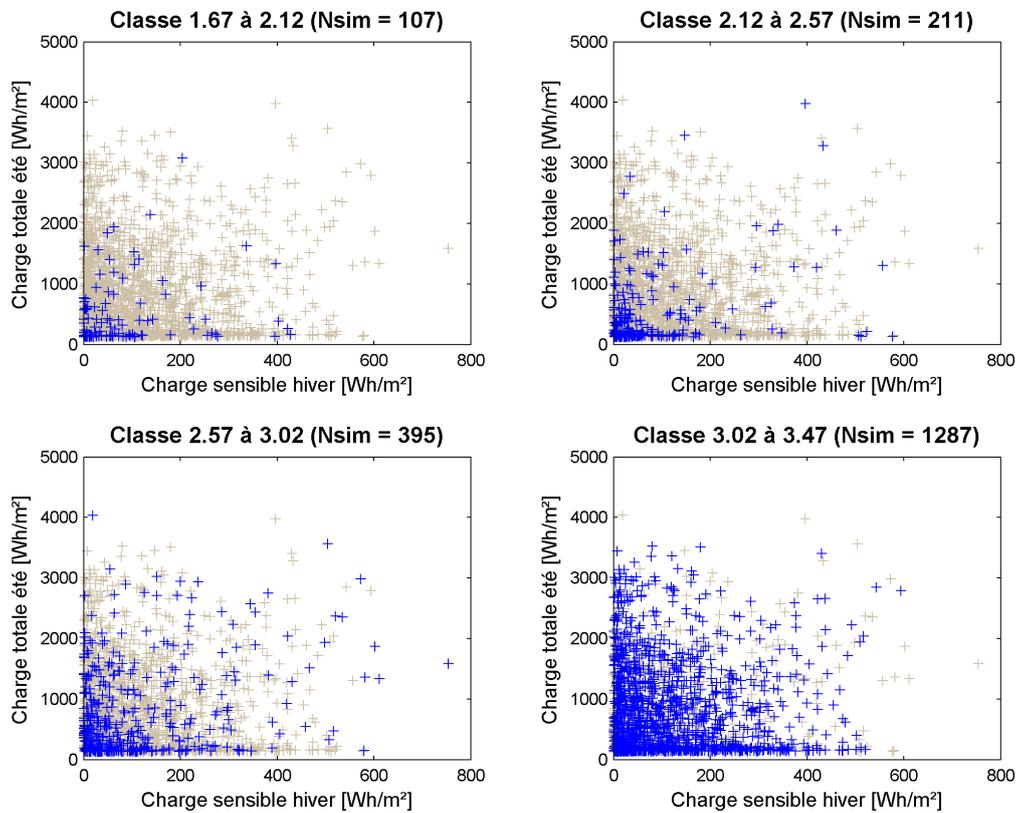


Figure 3.22 : Répartition des points de simulation selon les classes de compacité (en  $\text{m}^3.m^{-2}$ )

### Relation avec l'orientation

L'influence de l'orientation du bâti n'est pas clairement décelable graphiquement (3.23), nous ne notons pas de zone préférentielle occupée par les points colorés pour l'une ou l'autre des quatre classes. Nous pouvons quand même noter qu'à partir de  $45^\circ$ , mais surtout au delà de  $67,5^\circ$  les deux critères sont désavantagés simultanément. Les points critiques sont effectivement visualisés dans le dernier graphe.

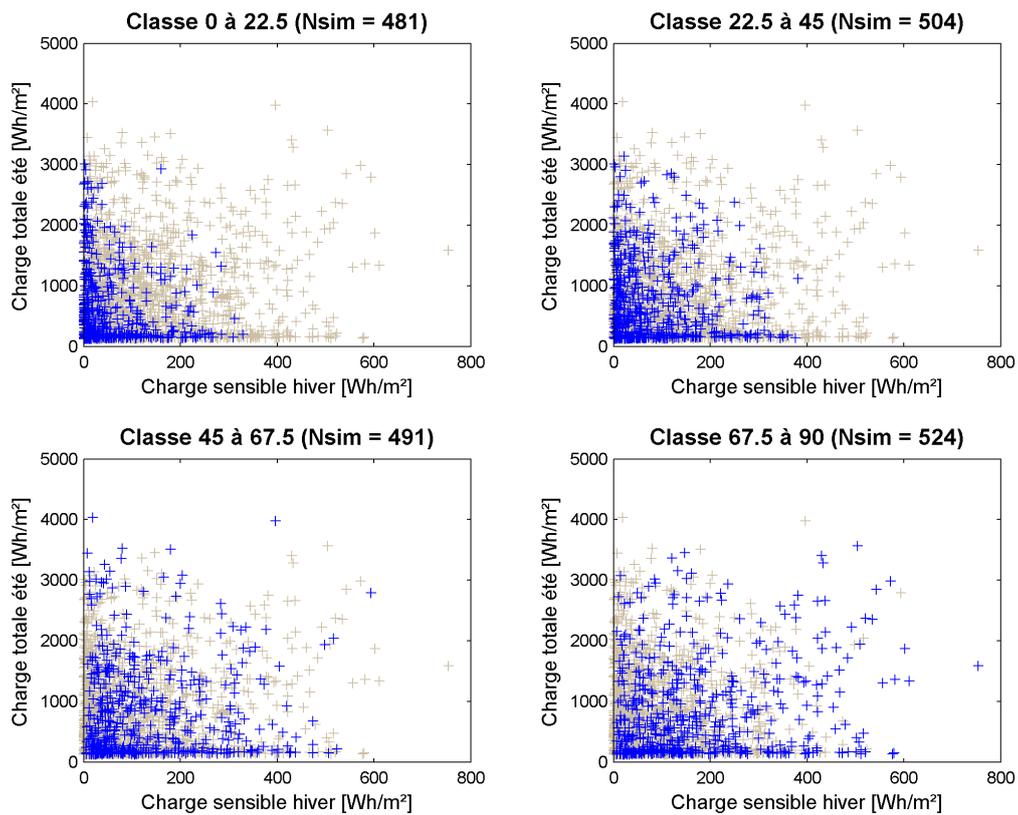


Figure 3.23 : Répartition des points de simulation selon les classes d'orientation (en  $^\circ$ )

### Relation avec le taux de vitrage

Pour diminuer les charges de climatisation, la valeur du taux de vitrage doit être de préférence inférieure à 37,5% (3.24). Dans ce cas, elles n'excèdent jamais  $2000 \text{ Wh}\cdot\text{m}^{-2}$ . A l'inverse, l'augmentation des taux de vitrage favorise l'économie de chauffage en hiver, mais ceci est moins évident que l'observation précédente. Au sens multicritère, les plus mauvais résultats sont plutôt obtenus pour des taux de vitrages importants ( $T_V > 0,725$ ). En effet, pour de nombreux cas en hiver, les apports solaires ne peuvent pas équilibrer les déperditions par transmission à travers une enveloppe très vitrée, se traduisant par un  $U_{bat}$  important.

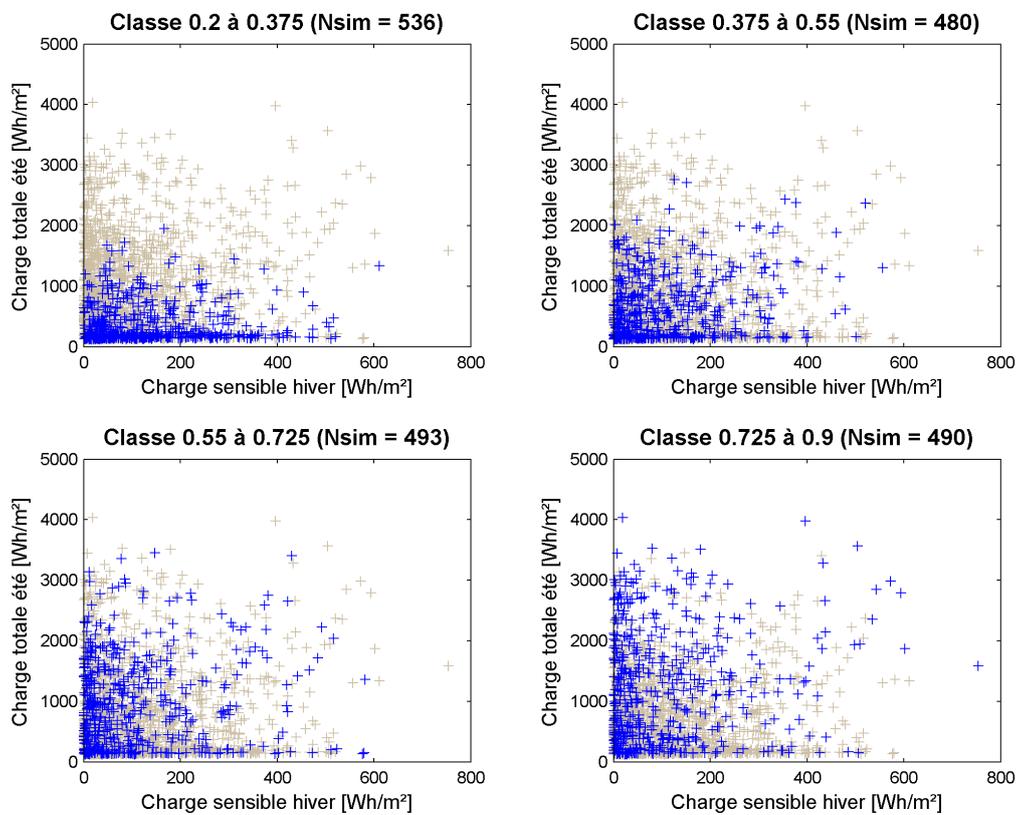
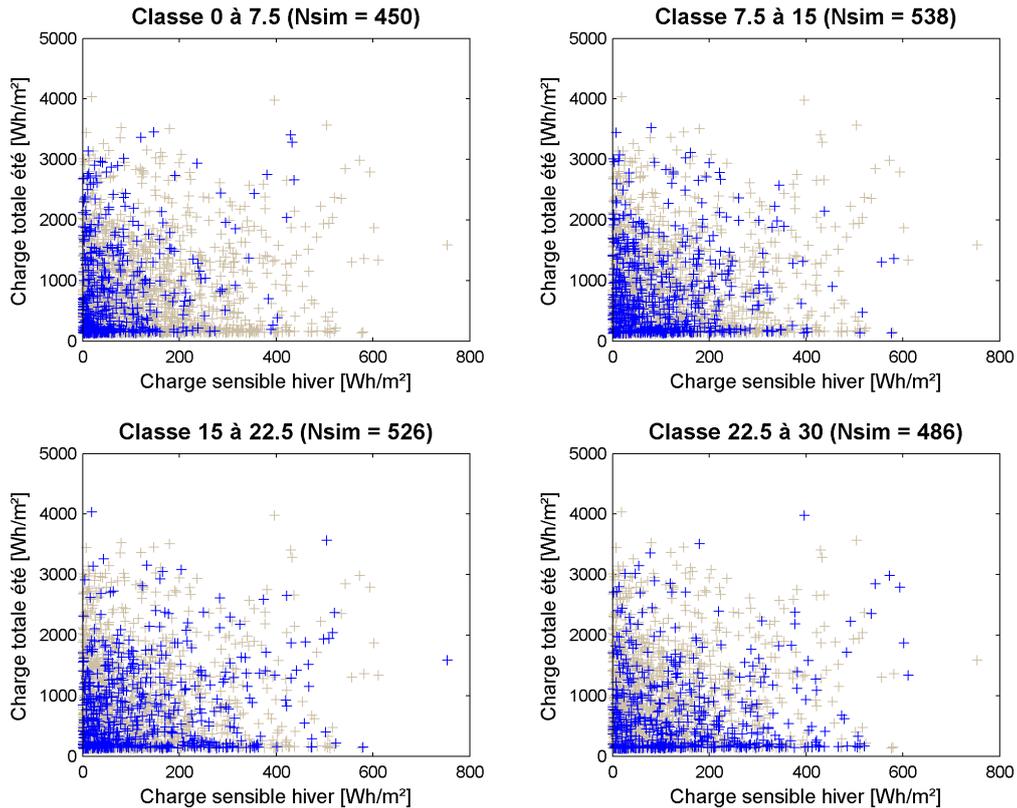


Figure 3.24 : Répartition des points de simulation selon les classes de taux de vitrage

### Relation avec le coefficient d'échange superficiel convectif

Pour ce paramètre, nous n'observons pas de tendance générale nette (figure 3.25). Le premier graphe confirme l'intuition suggérée par la loi de convection : plus  $h_c$  diminue, plus le flux convectif évacué diminue, ainsi plus la charge de chauffage baisse. Nous aurions pu également nous attendre à une baisse des  $C_{été}$  à mesure que  $h_c$  augmente, mais ce n'est pas manifeste.



**Figure 3.25** : Répartition des points de simulation selon les classes de coefficient d'échange superficiel convectif (en  $W.m^{-2}.K^{-1}$ )

### Relation avec le taux de flux solaire direct en été

Pour ce paramètre climatique, les quatre graphes affichent des tendances très prononcées (figure 3.26). Le critère taux de flux solaire inférieur à 0,25 est une condition suffisante pour assurer des charges de climatisation minimales. Elles sont alors de l'ordre de  $150 \text{ Wh.m}^{-2}$  et n'excèdent jamais  $1000 \text{ Wh.m}^{-2}$ . Pour des taux de flux solaire inférieurs à 0,5, elles sont inférieures à  $2000 \text{ Wh.m}^{-2}$ . Les deux derniers graphes montrent des nuages assez diffus et prouvent que des valeurs faibles de  $C_{\text{été}}$  sont envisageables avec des combinaisons particulières des quatre autres paramètres. Ces combinaisons semblent être également favorables à des valeurs faibles de  $C_{\text{hiver}}$  : quand  $C_{\text{été}} < 500 \text{ Wh.m}^{-2}$ ,  $C_{\text{hiver}} < 300 \text{ Wh.m}^{-2}$  à un point singulier près.

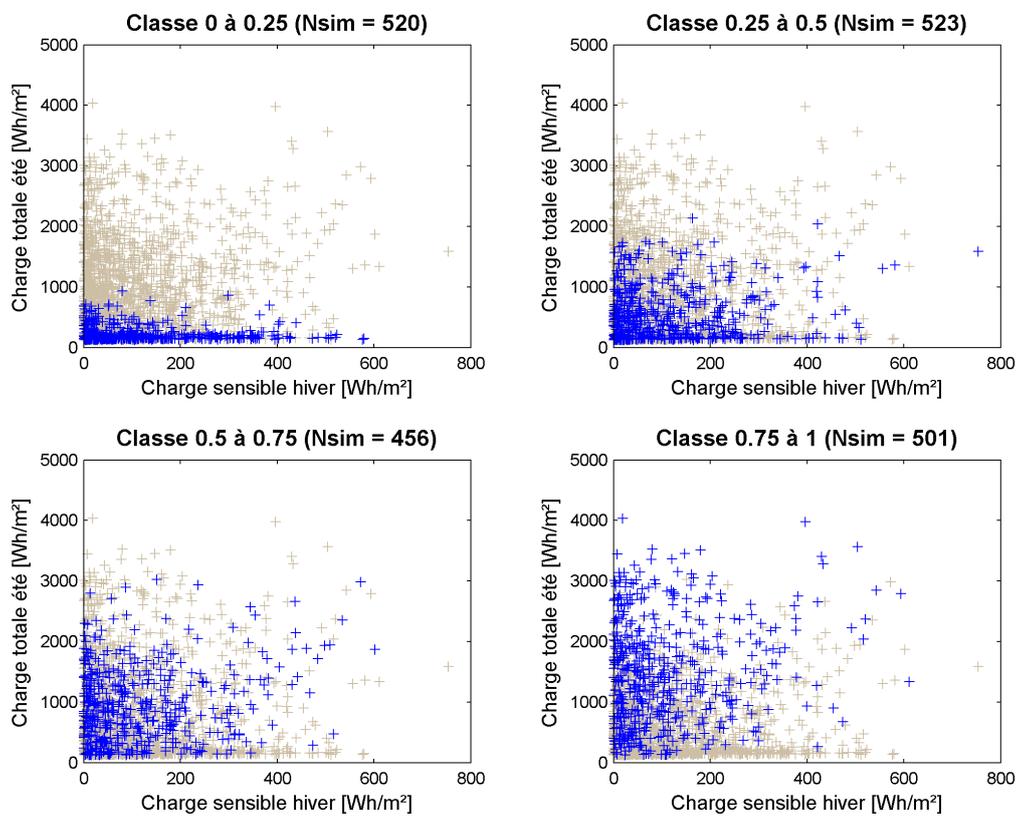


Figure 3.26 : Répartition des points de simulation selon les classes de taux de flux solaire direct

### Relation avec l'écart moyen de température d'air à la référence météo

Tout comme pour le taux de flux solaire incident en été, les quatre graphes mettent en relief certains comportements (figure 3.27). Plus l'offset de température d'air est important du côté des valeurs positives, plus les consommations en hiver sont faibles. Pour des températures d'air comprises entre  $+1.5^{\circ}\text{C}$  à  $+3^{\circ}\text{C}$ , les consommations d'hiver sont généralement inférieures à  $100\text{ Wh.m}^{-2}$  sans jamais excéder  $300\text{ Wh.m}^{-2}$ . C'est une condition suffisante pour améliorer l'efficacité énergétique du bâtiment en hiver. Nous présumons un rôle prédominant des charges de ventilation dans le bilan thermique du bâtiment. En ce qui concerne l'efficacité énergétique été, elle est améliorée pour des offsets de la température d'air de  $-1.5^{\circ}\text{C}$  à  $-3^{\circ}\text{C}$ . Le nuage est en effet plus dense dans la zone des  $150\text{ Wh.m}^{-2}$  pour les valeurs de  $C_{été}$  de  $150\text{ Wh.m}^{-2}$ . Pour cette classe d'offset, il existe tout de même des points présentant des valeurs de  $C_{été}$  élevées.

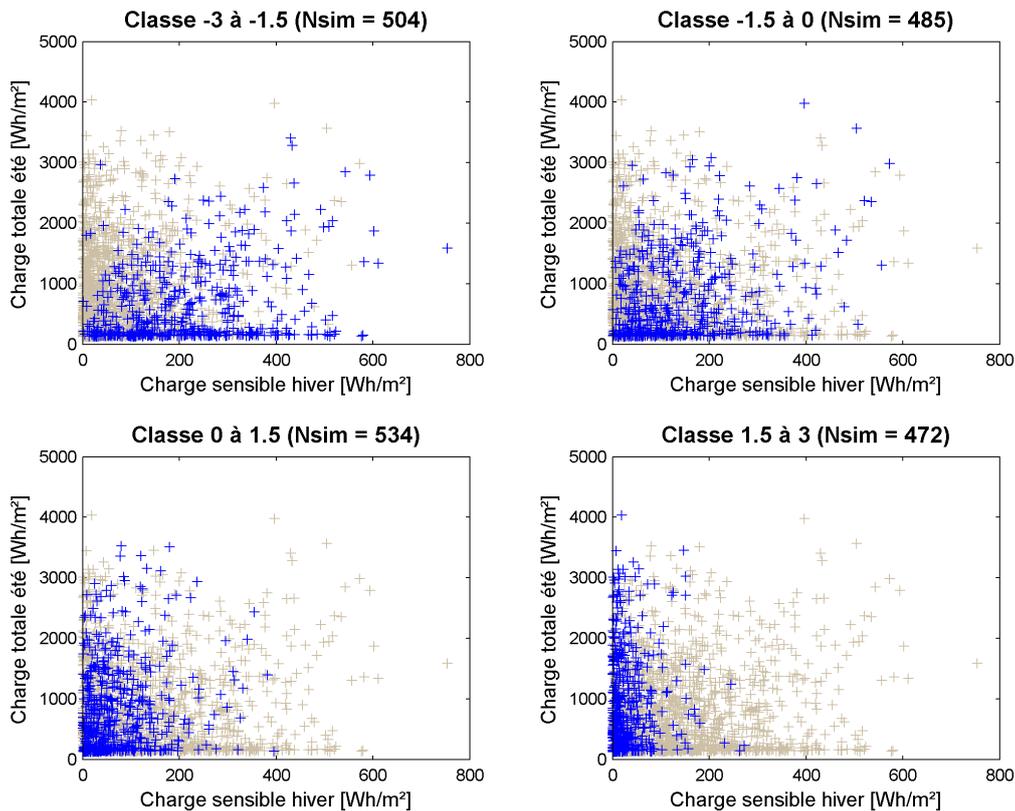
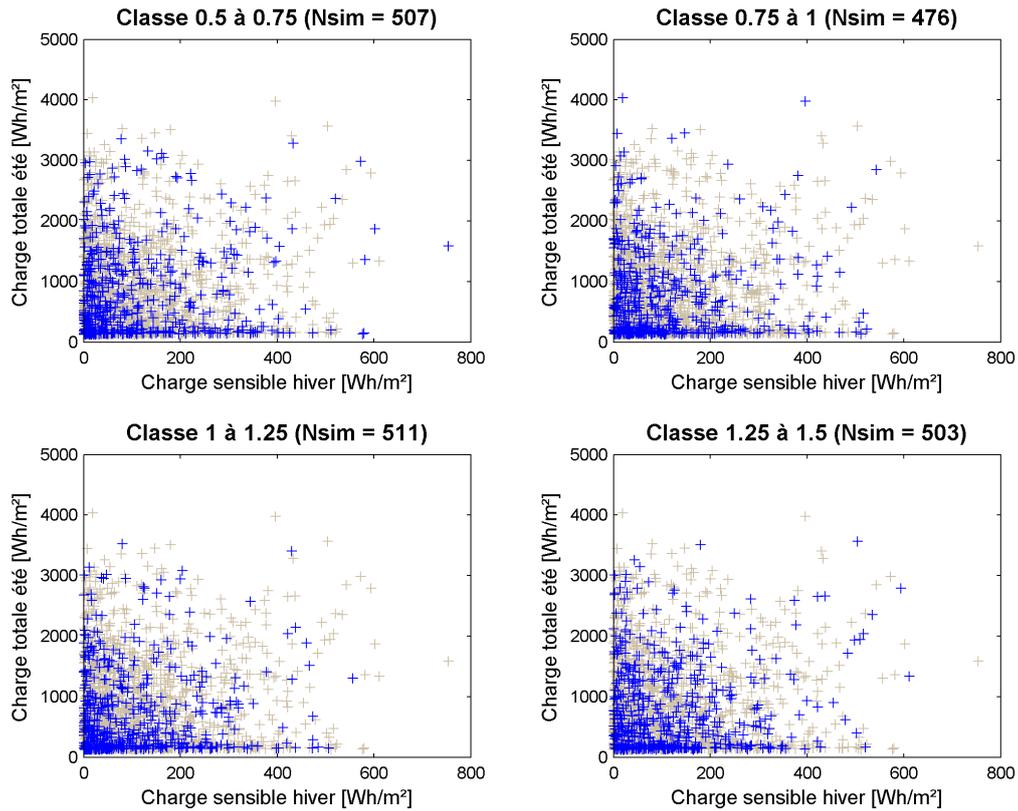


Figure 3.27 : Répartition des points de simulation selon les classes d'offset de température d'air

### Relation avec le pourcentage d'amplitude de la température d'air à la référence météo

L'observation des consommations énergétiques en fonction des classes de pourcentage d'amplitude de la température d'air par rapport à la référence n'apporte pas d'information nette (figure 3.27). Pour les quatre classes, les quatre nuages ont la même allure diffuse que le nuage global des 2000 simulations, à la densité près (plus faible).



**Figure 3.28** : Répartition des points de simulation selon les classes de pourcentage d'amplitude de la température d'air (en °C)

## Conclusion

De manière générale, les analyses précédentes enrichissent simplement les intuitions déjà suggérées par les lois thermiques relatives aux différents phénomènes de transfert présents dans le bilan thermique du bâtiment, comme les échanges convectifs ou le rayonnement solaire. Elles permettent tout de même de vérifier la fidélité de notre modèle thermique de bâtiment puisque les gammes de consommations hebdomadaires sont cohérentes.

Trois paramètres d'entrée semblent prédominants dans la modulation énergétique par rapport aux autres :

- le taux de vitrage du bâtiment
- le taux de flux solaire direct (en été)
- l'offset de température d'air moyenne journalière

Nous pouvons noter quelques indications supplémentaires, notamment au sujet du compromis entre charges climatiques été et hiver.

Malgré ces indications, nous ne disposons pas d'assez d'informations à exploiter pour des suggestions de conception. Tout d'abord, le découpage de l'intervalle de variation total des paramètres d'entrée en quatre sous-intervalles est arbitraire et ne peut pas nous donner de bornes précises pour fixer des objectifs préliminaires de consommations. Le mode d'interprétation est essentiellement graphique, donc manque de précision car l'observateur doit repérer des tendances dans un flou de 2000 points. Enfin, nous ne pouvons pas quantifier l'interaction des variables d'entrée entre elles.

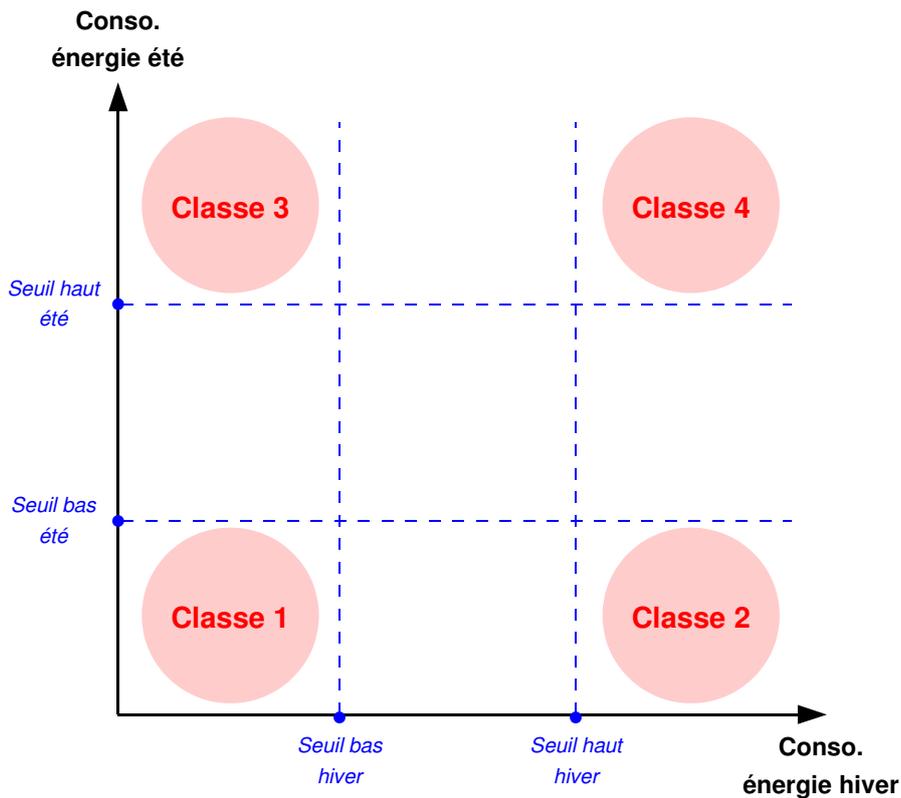
### 3.5.3 Influence cumulée des paramètres d'entrée sur le comportement énergétique du bâtiment

#### Détermination des classes

Dans la deuxième partie de l'étude, nous cherchons à déterminer quelles combinaisons des critères d'entrée sont à l'origine d'un comportement énergétique identifié. A l'inverse de la première partie, l'analyse part du résultat pour en expliquer les causes : des classes énergétiques sont en premier lieu définies sur le graphe complet des simulations, puis nous analysons classe par classe les configurations des valeurs des paramètres d'entrée qui engendrent ces ensembles de points. Comme nous l'avons introduit dans la description théorique de la méthode d'analyse multicritère, nous choisissons de partitionner notre échantillon des résultats de simulation en plusieurs classes énergétiques, plutôt que de discriminer un ensemble unique de simulations énergétiquement acceptables en utilisant le rangement de Pareto.

Pour chacun des trois critères d'évaluation énergétique, nous pouvons établir des *seuils maximum de basse consommation* ( $S_1$ ) et des *seuils minimum de haute consommation*

énergétiques ( $S_2$ ). Par exemple, une consommation de chauffage hebdomadaire faible correspondrait à une simulation donnant un  $C_{hiver}$  en dessous d'un seuil  $S_1$  alors qu'une consommation énergétique élevée correspondrait à une simulation donnant un  $C_{hiver}$  au dessus d'un seuil  $S_2$ . Nous pouvons raisonner de la même façon pour la consommation énergétique d'été, et la température de confort pour obtenir quatre seuils supplémentaires. L'espace de représentation des résultats est ainsi découpé en 9 partitions énergétiques présentées, figure 3.29.



**Figure 3.29 :** Définition des 4 classes énergétiques des bâtiments par division de l'espace des résultats des simulations en 9 domaines

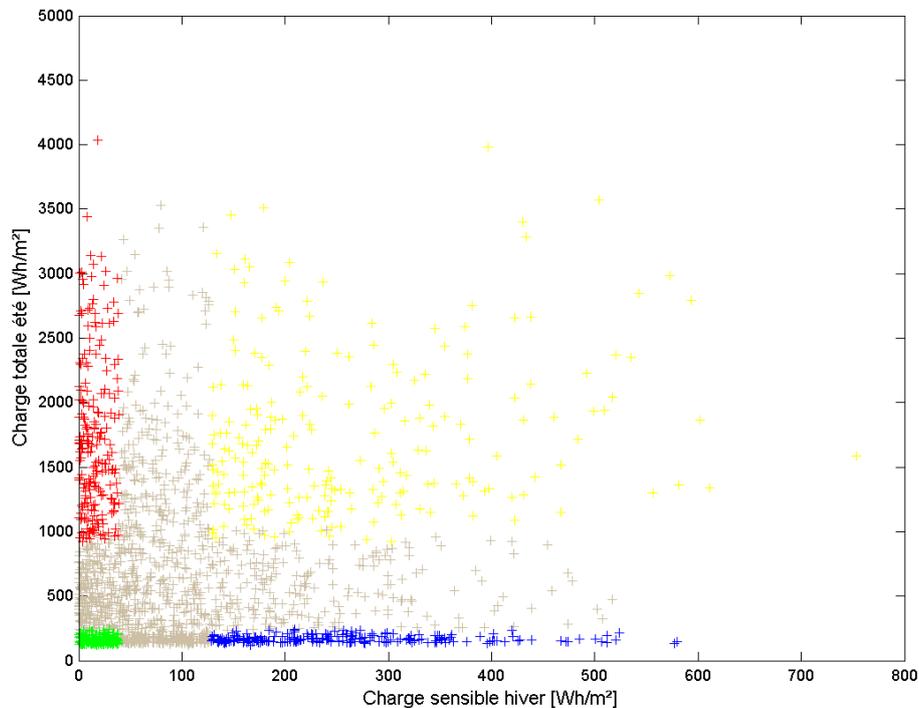
Les seuils énergétiques sont déterminés de telle façon que pour un critère pris individuellement (hiver ou été), le seuil bas est exactement supérieur à un tiers de toutes les valeurs et le seuil haut exactement supérieur à deux tiers de toutes les valeurs. Ces valeurs sont :

- $40 \text{ Wh.m}^{-2}$  pour le seuil bas  $C_{hiver}$
- $128 \text{ Wh.m}^{-2}$  pour le seuil haut  $C_{hiver}$
- $242 \text{ Wh.m}^{-2}$  pour le seuil bas  $C_{été}$
- $917 \text{ Wh.m}^{-2}$  pour le seuil haut  $C_{été}$

Par la suite, en considérant les quatre sous ensembles extrêmes, nous pouvons attribuer des dénominations énergétiques suivantes pour ces quatre classes associées :

- ✓ Classe 1 : Bâtiment « performant toute saison »
- ✓ Classe 2 : Bâtiment « seulement performant l'été »
- ✓ Classe 3 : Bâtiment « seulement performant l'hiver »
- ✓ Classe 4 : Bâtiment « non-performant toute saison »

Nous extrayons alors de l'échantillon total des 2000 simulations, les simulations appartenant à chaque classe par les deux opérations de seuillage successives. Leur répartition est illustrée par la figure 3.30.

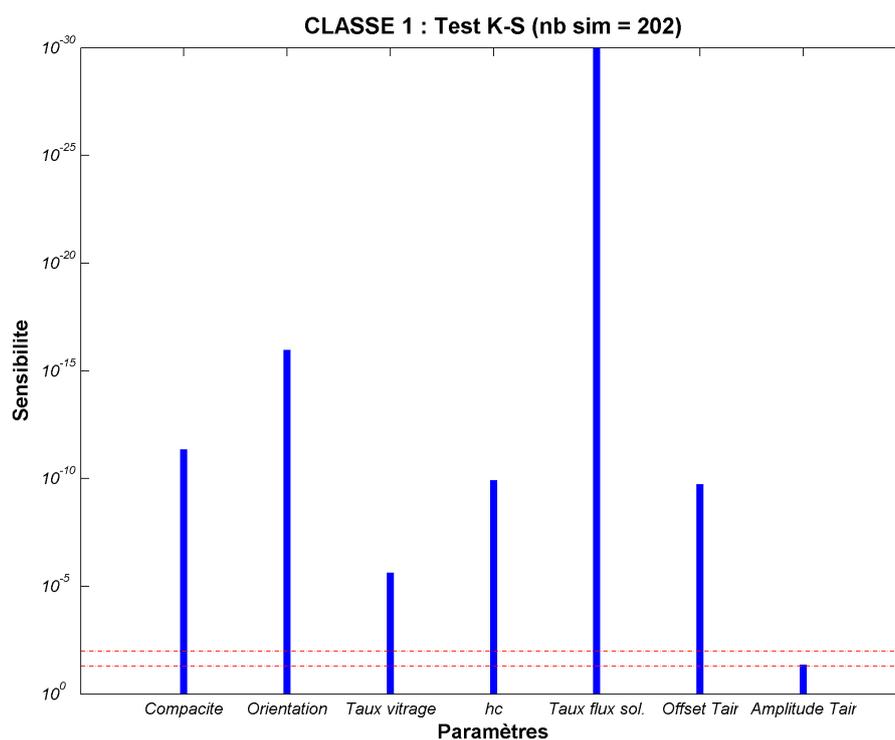


**Figure 3.30 :** Visualisation de la discrimination des 4 classes énergétiques de bâtiment parmi les points de l'échantillon

Enfin, nous pouvons utiliser l'outil statistique du test K-S pour déterminer s'il existe une dépendance entre les points appartenant aux classes énergétiques précédemment déterminées, identifiés par leur  $C_{hiver}$  et leur  $C_{été}$ , et la gamme des paramètres d'entrée sensibles conduisant à ces points. Pour chacun des sept paramètres d'entrée, et, à partir de la fonction de distribution cumulée, nous déterminons les valeurs des sensibilités relatives (valeur de la

probabilité de l'équation 3.4) et nous les comparons aux seuils de référence pour qualifier notre variable. Sur chacune des figures 3.31 à 3.34, un histogramme des sensibilités relatives est tracé en fonction des sept paramètres. Les seuils limites de probabilité à 0,1 et 0,5 sont représentés par les deux lignes pointillées.

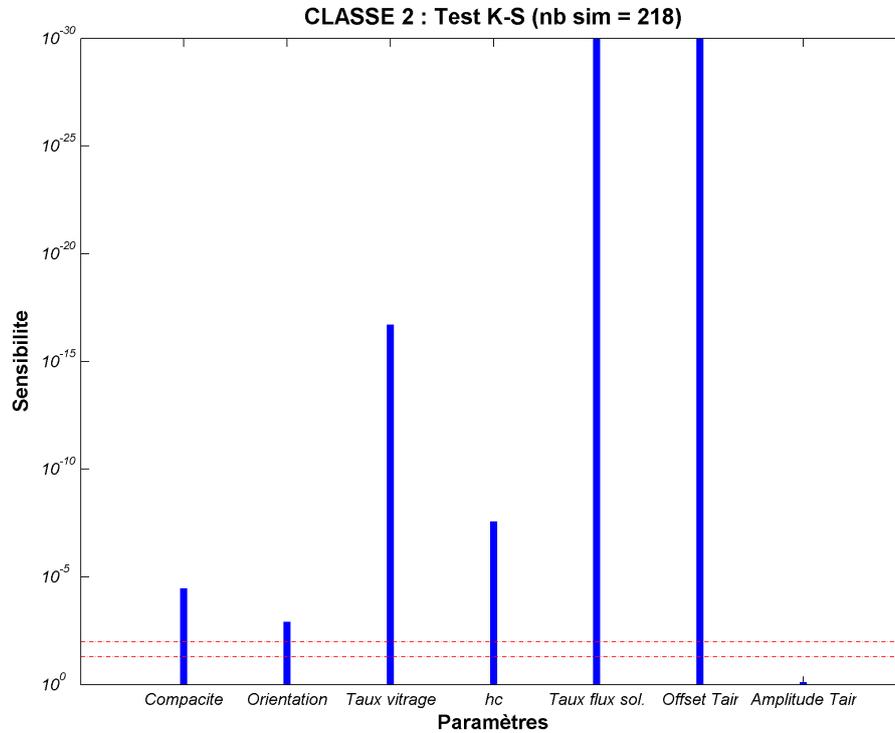
### Classe 1 : les bâtiments performants toute-saison



**Figure 3.31** : Tests de sensibilité des paramètres d'entrée pour l'échantillon des bâtiments correspondant à la classe 1

Sur la figure 3.31, 6 des 7 paramètres dépassent les seuils minimum de sensibilité. Seul le facteur de réduction de l'amplitude jour-nuit de la température d'air ( $f_T$ ) n'influe pas au sens statistique sur la demande énergétique du bâtiment. Le taux de flux solaire ( $T_F$ ) est le paramètre le plus influant loin devant l'orientation ( $Or$ ), la compacité ( $Cp$ ), le coefficient d'échange superficiel convectif ( $h_c$ ), l'écart de température d'air ( $\Delta T$ ) puis le taux de vitrage ( $T_V$ ). Pour ce cas, nous constatons ainsi une place importante des paramètres constructifs devant les paramètres climatiques, hormis le taux de flux solaire qui, nous le verrons par la suite, occupe systématiquement la première place de la hiérarchie des paramètres.

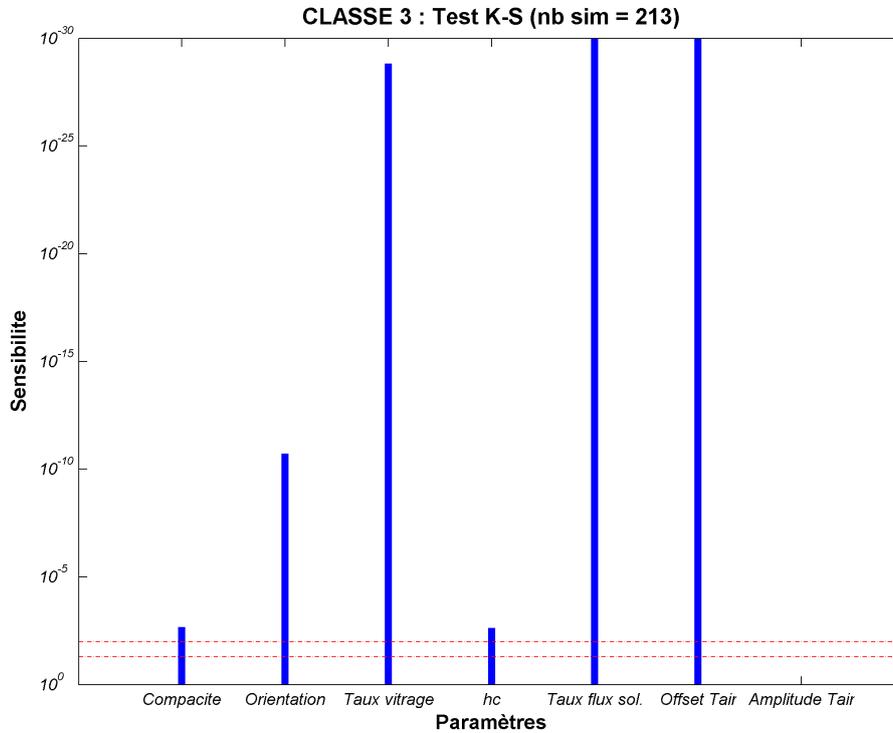
Classe 2 : les bâtiments seulement performant l'été



**Figure 3.32** : Tests de sensibilité des paramètres d'entrée pour l'échantillon des bâtiments correspondant à la classe 2

Le paramètre  $f_T$  ne rentre toujours pas dans les critères de sensibilité. Pour le bâtiment de classe 2, les deux paramètres déterminants sont  $T_F$  et  $\Delta T$ . A un degré de sensibilité moindre se trouve le paramètre  $T_V$ . Viennent ensuite les paramètres  $h_c$ ,  $C_p$  et  $Or$ . Si les niveaux de sensibilité des deux paramètres  $T_F$  et  $h_c$  sont équivalents à ceux du bâtiment de classe 1, au contraire l'échelle des sensibilités des 4 autres paramètres s'inverse par rapport à la classe 1 où  $\Delta T$  et  $T_V$  prennent cette fois le pas sur  $C_p$  et  $Or$ .

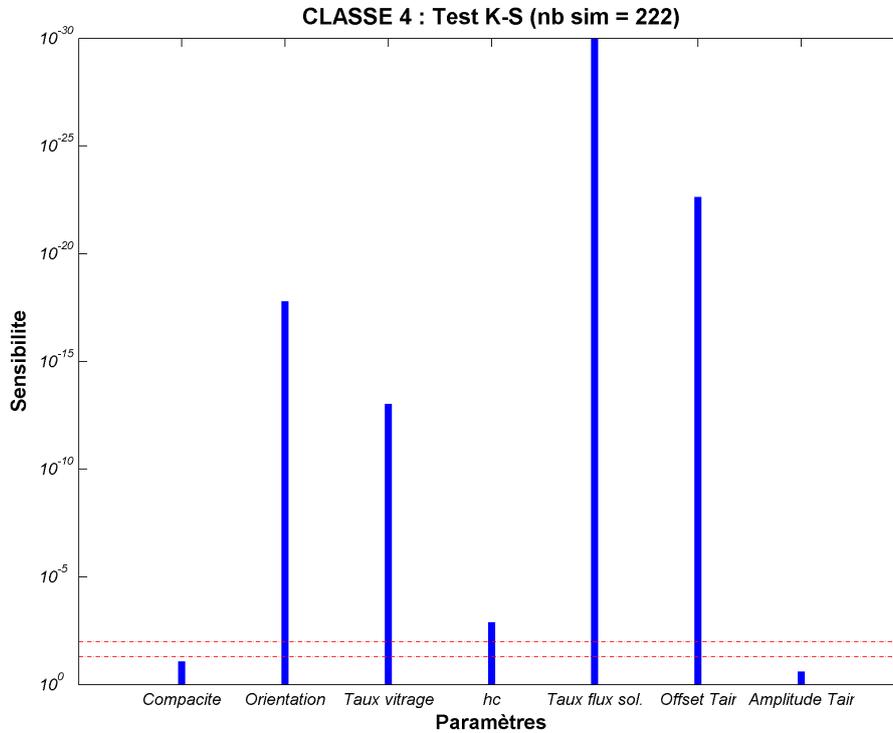
### Classe 3 : les bâtiments seulement performant l'hiver



**Figure 3.33** : Tests de sensibilité des paramètres d'entrée pour l'échantillon des bâtiments correspondant à la classe 3

Encore une fois,  $f_T$  n'est pas un paramètre sensible. Comme pour le bâtiment de classe 2, le bâtiment de classe 3 est en premier lieu dépendant des valeurs de  $T_F$  et  $\Delta T$ . Il est aussi très sensible aux valeurs de  $T_V$ . Les trois derniers paramètres sont également influents mais à un niveau moins important :  $Or$  devance  $h_c$  et  $Cp$  pour lesquels l'influence est bien moins prononcée que pour les classes énergétiques 1 et 2.

**Classe 4 : les bâtiments non-performants toute-saison**



**Figure 3.34** : Tests de sensibilité des paramètres d'entrée pour l'échantillon des bâtiments correspondant à la classe 4

Le paramètre  $C_p$  n'appartient plus à l'ensemble des paramètres sensibles tout comme  $f_T$ . Le paramètre  $T_F$  est toujours le plus influent, à un degré supérieur du paramètre  $\Delta T$ . Suivent ensuite  $Or$  et  $T_V$ .  $h_c$  est dans ce cas le moins influent des paramètres sensibles, avec un niveau aussi réduit que pour la classe 3.

**Bilan des quatre classes**

Les consommations énergétiques des bâtiments, chaque saison, sont systématiquement sensibles à tous les paramètres initialement définis, à l'exception du facteur de réduction de l'amplitude de température d'air ( $f_T$ ). Deux situations climatiques proposant des variations de températures jour-nuit de faible et/ou de grande amplitude ont ainsi le même impact énergétique sur un bâtiment, si la température moyenne journalière est équivalente dans les deux cas. Autrement dit, les modifications climatiques locales concernant la température d'air ne sont effectives que si elles se matérialisent dans le temps par un écart permanent de température comme le représente bien le paramètre  $\Delta T$ .

Nous pouvons approfondir l'analyse en tentant de hiérarchiser l'influence de chaque paramètre. Pour les quatre cas d'étude, un classement des six paramètres peut être établi suivant la valeur des sensibilités calculées dans les quatre cas. En sommant les rangs des quatre classements individuels, un classement général peut être établi en reconsidérant la valeur des sommes comme l'illustre le tableau 3.4.

Classes	$C_p$	$Or$	$T_V$	$h_c$	$T_F$	$\Delta T$	$f_T$
CL 1	3	2	6	4	1	5	7
CL 2	5	6	3	4	1	2	7
CL 3	5	4	3	6	1	2	7
CL 4	6	3	4	5	1	2	7
Somme	19	15	16	19	4	11	28
<b>Général</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>7</b>

**Tableau 3.4 :** Hiérarchisation de l'influence des paramètres d'entrée

Le classement arbitraire ainsi établi amène le taux de flux solaire estival  $T_F$  en première position de l'échelle d'impact énergétique. A juste titre puisqu'il montre la sensibilité la plus élevée pour chacune des classes de bâtiment. C'est le seul paramètre dont l'influence porte sur une seule saison. C'est donc lui qui gouverne principalement la partition de l'ensemble de bâtiments en deux (Classe 1 + 2 et 3 + 4) en fonction de leur consommation énergétique d'été, avant que la batterie des autres paramètres restants ne rétablissent la partition en quatre classes en fonction de performances énergétiques liées à l'hiver. L'analyse de l'influence individuelle des paramètres d'entrée nous montrait déjà pour  $T_F$  une tendance assez nette sur le premier des quatre graphes.

Le paramètre ayant le deuxième poids sur la classification énergétique est l'écart moyen de température d'air à la référence météorologique  $\Delta T$ . Il est à la fois impliqué dans la valeur des flux convectifs évacuant la chaleur transmise par l'enveloppe vers l'environnement extérieur, mais surtout dans la valeur des flux sensibles déperditifs pour le renouvellement d'air, d'autant plus que les débits de ventilation sont très importants dans les immeubles de bureaux. Il vient en deuxième position uniquement pour les classes 2, 3 et 4. Pour la classe 1, il constitue un critère moins prépondérant puisque ses valeurs requises s'opposent pour les performances d'été et d'hiver. C'est une limite qui résulte de la considération des valeurs des paramètres climatiques constante sur l'année.

Le premier paramètre « constructif » dans la hiérarchie est l'orientation qui se classe en troisième position du classement global. Si son influence ne paraît pas prédominante en

examinant indépendamment les performances de chaque saison (6<sup>e</sup> position pour la classe 2 et 4<sup>e</sup> pour la classe 3), elle le devient quand il s'agit de discriminer les bâtiments en fonction de leurs performances annuelles (2<sup>e</sup> position pour la classe 2 et 3<sup>e</sup> pour la classe 3).

En quatrième position, vient le taux de vitrage  $T_V$ . De la même façon que  $\Delta T$ , les valeurs de ce paramètre sont prépondérantes sur les consommations saisonnières prises individuellement, or il n'est pas un indicateur suffisant pour estimer sa performance globale.

Ensuite viennent à influence équivalente la compacité et le coefficient d'échange superficiel convectif qui ne prennent jamais le pied sur les autres paramètres. Le coefficient  $h_c$  est bien moins influent que les deux autres paramètres climatiques. Nous pouvons subodorer qu'avec le respect des règlements de la RT2005, l'action des flux convectifs sur l'enveloppe est très amoindrie par rapport à ce qu'il pourrait être dans le cas de parois moins isolées.

Enfin, le paramètre  $f_T$ , auquel les consommations énergétiques ne sont jamais sensibles en terme de seuil statistique, vient naturellement se classer en dernier.

Pour conclure, si l'on fait abstraction du coefficient d'échange superficiel convectif qui n'a pas l'influence escomptée, les paramètres relatifs au climat ont plus de poids sur la demande énergétique de ces bâtiments de référence que les paramètres constructifs ; et ceci avec une priorité des flux solaires devant les flux sensibles qui viennent de manière générale qu'au second plan. L'orientation est au sens statistique de la méthode, un critère de conception énergétique plus important que la définition du taux d'ouverture et/ou de vitrage de l'édifice, et, encore plus de sa compacité. Nous conservons une petite réserve sur notre jugement, puisque la compacité est calculée sur des bâtiments de géométrie basique parallélépipédique. Nous pourrions expliquer le sous classement d'influence entre ces trois paramètres constructifs de la manière suivante :

- l'orientation concerne l'enveloppe complète du bâtiment, tout au moins la surface allouée aux façades verticales ;
- le taux de vitrage ne concerne, comparé à l'orientation, uniquement la partie vitrée des façades verticales ;
- la compacité varie dans une gamme assez restreinte d'autant plus que le nombre de cas simulés augmente avec la valeur des compacités.

### **Gammes réduites des paramètres sensibles**

L'intérêt de la méthode du test statistique K-S est que l'on peut objectiver l'étude de sensibilité en donnant une plage de valeurs préférentielles pour chaque paramètre sensible. La position de la distance maximale entre les 2 fonctions de distribution ( $d_{m,n}$  sur la figure

3.7) relativement aux abscisses ( $\theta_d$ ) permet de borner cet intervalle de sélection des valeurs sensibles : il est soit délimité par  $\theta_{min}$  (échantillon classe) et  $\theta_d$  si la fonction de distribution du paramètre sur l'échantillon de la classe est au-dessus de celle de toutes les simulations ou par  $\theta_d$  et  $\theta_{max}$  (échantillon classe) dans le cas contraire. Nous répertorions la totalité des résultats des intervalles de sensibilité dans le tableau récapitulatif 3.5 :

Classes	$C_p$	$Or$	$T_V$	$h_c$	$T_F$	$\Delta T$
CL 1	1,6 à 2,9	0 à 36	0,20 à 0,42	0,6 à 7,7	0,00 à 0,40	0,3 à 3,0
CL 2	3,1 à 3,5	34 à 90	0,20 à 0,47	10,6 à 30,0	0,00 à 0,42	-3,0 à -0,5
CL 3	3,3 à 3,5	0 à 54	0,52 à 0,90	0,6 à 13,6	0,40 à 1,00	0,2 à 3,0
CL 4	-	48 à 90	0,53 à 0,90	11,8 à 30,0	0,40 à 1,00	-3,00 à -0,5

**Tableau 3.5 :** Bilan par classes des intervalles de sélection des paramètres sensibles

Chaque ligne du tableau prise individuellement peut permettre de classer un bâtiment réel ou fictif en fonction de sa construction et des modifications microclimatiques dues à son environnement urbain proche. Ce grand nombre de valeurs numériques laisse un terrain vaste pour une analyse détaillée et nous choisissons de représenter les résultats sous la forme d'un schéma synthétique (voir figure 3.35) pour expliquer les grandes tendances des divers intervalles obtenus, et, la variation de ceux-ci suivant le passage d'une classe à l'autre.

Le passage du tableau 3.5 à la figure 3.35 se matérialise en premier lieu par l'abstraction des valeurs numériques des intervalles préférentiels donnés pour les paramètres en large flèche verticale, orientée vers le haut ou le bas, si les valeurs du paramètre en question sont respectivement les valeurs les plus élevées de l'intervalle, ou les valeurs les plus faibles. L'avantage de cette représentation est que la lecture est plus directe. La première observation principale qui justifie la cohérence de notre étude est que le sens des six flèches associées au six paramètres est opposé entre les classes 1 et 4 (cas de la performance toute saison ou non) et entre les classes 2 et 3 (cas de la performance intermittente obtenue uniquement pour l'été ou pour l'hiver). La contrainte de compacité pour la classe 4 n'étant pas schématisée du fait de la non-sensibilité du paramètre.

Nous vérifions également toutes les constatations qui sont ressorties de l'analyse du nuage des points de sortie en fonction des paramètres pris individuellement. Sur la figure 3.35, les tendances entre consommations énergétiques saisonnières et gammes de valeurs des paramètres sont signalées par la coloration des cases ; la teinte la plus foncée correspondant à une tendance à l'origine plus marquée. Ainsi, pour la classe 2, nous vérifions l'hypothèse nette que pour une

	$C_p$	$Or$	$T_V$	$hc$	$T_F$	$\Delta T$
Classe 1	↓	↓	↓	↓	↓	↑
Classe 2	↑	↑	↓	↑	↓	↓
Classe 3	↑	↓	↑	↓	↑	↑
Classe 4	-	↑	↑	↑	↑	↓

↑ valeur élevée  
 ↓ valeur basse  
 ↔ équivalence des gammes de valeurs des paramètres entre classe 1 et 2  
 ↔ équivalence des gammes de valeurs des paramètres entre classe 1 et 3  
 ■ gamme de valeur clairement décelée lors de l'étude individuelle des paramètres  
 ■ gamme de valeur clairement décelée lors de l'étude individuelle des paramètres

**Figure 3.35** : Représentation synthétique des configurations des paramètres d'entrée déterminant chaque classe

restriction des consommations d'été, les paramètres  $T_V$ ,  $T_F$  et  $\Delta T$  doivent être à leur niveau le plus bas possible.

Pour les classes 3 et 4, nous appuyons les hypothèses qui étaient jusque là moins évidentes. Elles concernaient  $T_V$  et  $\Delta T$  pour la classe 3, puis  $Or$ ,  $T_F$  et  $\Delta T$  pour la classe 4.

La valeur ajoutée de cette dernière étape de la méthode RSA est véritablement l'obtention des conditions sur les paramètres d'entrée pour la classe 1 ; le « zonage » des points près de l'intersection des axes correspondant au compromis de performance été-hiver n'étant pas clairement identifiable sur les graphes. Cette étape nous fournit en sus les conditions manquantes pour les paramètres les moins influents dans la définition des trois autres classes.

L'examen de la classe 1, celle des bâtiments performant toutes saisons, dévoile des points communs avec les classes 2 et 3, qui nous le rappelons, s'opposent pour les six paramètres sensibles.

- La classe 2 est caractérisée par des orientations supérieures à  $34^\circ$ , c'est-à-dire avec les façades principales orientées Sud-Est Nord-Ouest jusqu'à Est Ouest. Cette classe privilégie également la diminution des surfaces vitrées de l'enveloppe et encourage une grande quantité

de masques, que ce soient des protections intégrées au bâtiment ou un environnement urbain proche haut et dense interférant avec la course solaire azimutale. Les coefficients d'échange superficiel convectif sont plutôt élevés pour évacuer un maximum de chaleur accumulée dans les parois extérieures provenant essentiellement des flux radiatifs. Enfin, les températures d'air locales sont souhaitées inférieures à la température météorologique pour favoriser encore une fois la dissipation de chaleur par convection externe, puis par la ventilation des locaux surchauffés par les apports internes des occupants, des équipements et des flux solaires transmis.

- La classe 3 privilégie quant à elle des orientations en deçà de  $54^\circ$ , où la façade principale est plutôt orientée plein Sud pour favoriser l'accessibilité solaire. Même s'ils sont plus déperditifs que les parois opaques, la quantité de vitrage est vu à la hausse puisque qu'au contraire de l'été les apports solaires sont un soutien important au confort thermique ; de même pour  $T_F$ . A l'inverse de la classe 2, une baisse de  $h_c$  et une hausse de température d'air microclimatique est souhaitable en vue de conserver la chaleur sensible à l'intérieur de l'immeuble.

En définitive, la classe 1 partage :

- avec la classe 2, les valeurs réduites pour  $T_V$  et  $T_F$
- avec la classe 3, les valeurs élevées pour  $Or$  et  $h_c$ , puis la valeur positive pour  $\Delta T$

Partant de ceci, le compromis été-hiver que suscite la définition de la classe 1 est traité par l'adoption des précautions solaires du bâtiment confortable l'été et des précautions sensibles confortable l'hiver. Autrement dit, il est préférable d'avoir une configuration bâti-microclimat susceptible de se protéger des flux solaires d'été, ce qui pénalise les apports gratuits en période de chauffe, mais sans forcément abaisser la température extérieure et augmenter le coefficient d'échange superficiel convectif, pour en contrepartie rétablir le confort d'hiver.

Le seul résultat discutable est celui obtenu pour la compacité. En effet les classes 2 et 3 proposent des compacités élevées pour réduire les consommations. Nous pouvons assez facilement expliquer qu'une forte compacité équivaut à une diminution de la surface déperditive en hiver, allant ainsi dans le sens de la classe 2. Augmenter la compacité pour réduire les charges de climatisation en été est une relation de cause à effet moins évidente. La classe 1 ne calque pas son comportement sur aucune des deux classes précédentes et propose de réduire la compacité pour gérer les consommations sur l'année. Encore une fois, la distribution des compacités sur son intervalle est peut-être une raison de remise en cause des résultats finaux.

## 3.6 Conclusion

Dans cette partie, nous avons dans un premier temps défini un bâtiment de référence utilisé pour étudier l'influence de l'aménagement urbain sur ses consommations énergétiques. Nous avons opté pour la typologie d'immeuble de bureau en précisant quelques caractéristiques inamovibles dont sa forme extérieure, les matériaux de construction de son enveloppe, la

répartition des surfaces vitrées puis la répartition des espaces intérieurs définissant son niveau d'occupation et d'équipement. Le but était la réalisation d'une étude paramétrique mettant en avant l'influence de certains paramètres constructifs, au cœur des problématiques de conception de l'architecte, et de certains paramètres climatiques, pouvant varier localement, et justifiant que le choix d'un type de bâtiment contraignait le type de modifications énergétiques pouvant être apportées par l'aménagement. Autrement dit, chaque bâtiment est un capteur microclimatique à la sensibilité différente.

En supposant un haut niveau d'interaction entre les variables constructives et climatiques, nous avons opté pour l'utilisation d'une méthode statistique d'étude de sensibilité multicritère, dite méthode RSA, où l'étape de sous-échantillonnage a été réadaptée pour définir quatre classes énergétiques de bâtiments. Deux mille simulations ont été réalisées pour qu'un grand suffisant de cas décrive chaque classe.

De manière générale, les résultats obtenus confirment l'intuition et les conseils qui sont déjà proposés au concepteur pour diminuer les consommations d'été et d'hiver. Si en été l'accent est mis sur la diminution des surfaces vitrées et la protection de celles-ci, tout en favorisant un renouvellement d'air à basse température, les précautions d'hiver sont plutôt d'ouvrir le bâtiment au soleil tout en diminuant sa surface totale déperditive et en évitant les pertes par exposition au vent. Les enseignements complémentaires apportés par cette méthode est d'une part de fournir des ordres de grandeur pour les valeurs des paramètres discutés en tenant compte de leurs interactions. Mais surtout, c'est de prendre parti sur le compromis entre consommations énergétiques d'été et d'hiver qui s'opposent dans les choix de conception.

La méthodologie utilisée peut être discutée sur plusieurs points :

1. Le choix délibéré de sept paramètres peut être vu à la hausse comme à la baisse. Par exemple, pour affiner l'analyse de l'influence de la compacité (dont le tirage aléatoire devrait être revu), on pourrait intégrer le coefficient de déperdition global du bâtiment  $U_{bat}$  pour prendre en compte les différents niveaux d'isolation de chaque entité de l'enveloppe. A l'inverse, est ce que la modification de la température d'air représentée à la fois par  $\Delta T$  et  $f_T$  ne pourrait pas se limiter à un paramètre synthétique.
2. Le taux de flux solaire mériterait peut être d'être revu. Nous rappelons que ce coefficient est seulement valide pour les simulations en été alors que même si le dimensionnement de la protection solaire peut autoriser le passage de 100 % de l'énergie en hiver (en particulier dans le cas de protections mobiles), les masques dus à l'environnement proches sont en réalité très influents en hiver.
3. Le découpage de l'espace des simulations avec les seuils de consommations est relatif par rapport à l'échantillon, et de ce fait arbitraire. N'est-on pas restrictif par rapport au

niveau de consommation ? Une méthode de calage des consommations hebdomadaires par rapport à celles annuelles pourrait être envisagée pour se servir des seuils proposés par les labels européens de performances énergétiques.

4. La sensibilité d'un paramètre est discutée en fonction d'un seuil proposé par [Demarty, 2001], qui n'est peut être pas adapté à notre domaine scientifique. La revue de ces seuils pourrait constituer une perspective.
5. Nous basons nos observations sur 2000 simulations, mais suffisent-elles réellement à rendre compte de la répartition générale des résultats ?

Finalement, malgré les améliorations qui pourraient être apportées aux différentes étapes de la méthode, cette étude en plus d'avoir testé le modèle de thermique du bâtiment a permis de préciser notre objet d'étude, les bâtiments de bureaux, et de mettre à disposition plus de moyens d'analyse de l'impact du microclimat sur ses consommations énergétiques. Nous pouvons ainsi envisager de partitionner l'étude du dernier chapitre en quatre cas, correspondant aux quatre classes, en supposant que les aménagements auront un effet différent sur chacun de ces bâtiments types.



## Etude de l'impact de l'aménagement sur les consommations énergétiques des bâtiments

### Sommaire

4.1	Introduction . . . . .	201
4.2	Choix du fragment urbain d'étude . . . . .	202
4.3	Choix des bâtiments correspondant aux classes énergétiques définies . . . . .	206
4.4	Les données météorologiques d'entrée . . . . .	211
4.5	Définition des scénarios d'aménagement urbain traités . . . . .	214
4.6	Analyse des résultats . . . . .	220
4.7	Conclusion . . . . .	258

### 4.1 Introduction

L'étude menée dans le chapitre précédent nous a permis de proposer, dans une situation de site isolé, quatre classes de performance associées à des bâtiments de bureaux selon des critères de consommation énergétique pour des périodes climatiques déterminées :

- les bâtiments performants toutes saisons (Classe 1) ;
- les bâtiments uniquement performants l'été (Classe 2) ;
- les bâtiments uniquement performants l'hiver (Classe 3) ;
- les bâtiments non performants toutes saisons (Classe 4).

Les valeurs seuils utilisées pour cette classification sont plutôt « arbitraires », mais elles ont permis de discriminer ces catégories en laissant tout de même la possibilité de les redéfinir.

L'apport de ce chapitre consiste en une intégration fine des variabilités microclimatiques locales, que nous avons jusqu'à présent représenté par des paramètres homogènes et intégrés sur toute l'enveloppe du bâtiment pour le flux solaire, la température, l'humidité et la vitesse

de l'air. Ayant établi certaines pistes pouvant expliquer le comportement de ces bâtiments vis-à-vis de l'interaction de ses paramètres constructifs avec l'environnement climatique moyen, nous cherchons maintenant à évaluer l'impact de la stratégie (composantes et configuration) d'aménagement urbain sur les consommations énergétiques de ces bâtiments de référence replacés dans un contexte urbain réel.

L'approche méthodologique s'appuiera alors sur ces quatre principales étapes :

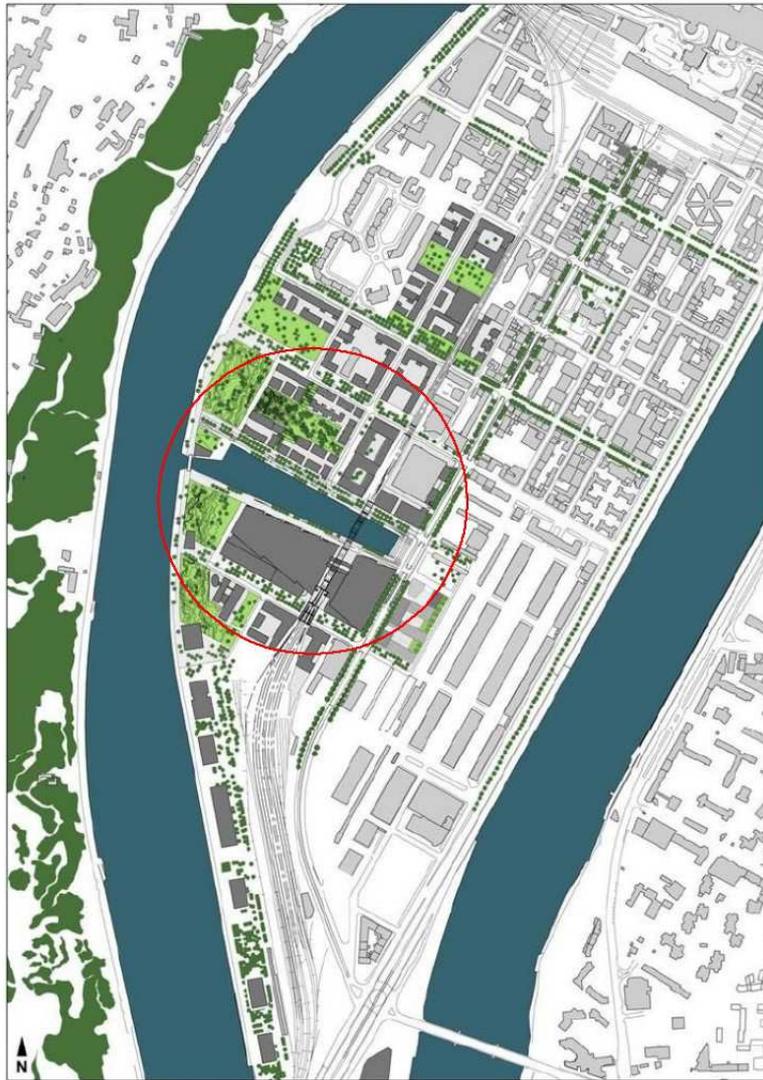
- la sélection d'un contexte urbain, d'un site puis d'un fragment dans lequel nous effectuerons les simulations ;
- le choix, au sein du fragment urbain, de quatre bâtiments répondant aux critères des classes énergétiques définies au chapitre précédent ;
- la définition des différents scénarios d'aménagement urbain à étudier ;
- la conduite des simulations et l'analyse des résultats.

## 4.2 Choix du fragment urbain d'étude

Deux solutions sont envisageables pour constituer les objets d'étude : le fragment urbain théorique ou réel. Le choix d'une configuration théorique était notre idée initiale. A partir d'un modèle urbain de base construit sur une trame théorique d'îlots, la composition des différents fragments d'étude résulterait d'une déclinaison morphologique de l'îlot de base ou ajout de volumes bâtis, et du système de rues, de cours et de places par modification des rapports de distances et de surfaces. L'inconvénient de ce type de méthode est que son exhaustivité dépend du nombre de cas et de leur aptitude à distinguer l'influence de la morphologie à celle du mode d'aménagement, deux aspects difficiles à dissocier. Comme annoncé dans le premier chapitre, ce travail n'ambitionne pas d'étudier les aspects morphologiques à une échelle de quartier, mais plutôt de concentrer la recherche sur les effets des éléments de l'aménagement relatifs aux surfaces et aux vides urbains.

Nous nous sommes alors dirigés vers la deuxième solution en étudiant un site existant que nous faisons évoluer d'un cas d'étude à l'autre en proposant des stratégies différenciées d'aménagement urbain fictif. Travailler sur un environnement urbain réel permet en outre de s'appuyer sur les aspects conceptuels arrêtés tels que les partis-pris architecturaux et urbains en terme d'occupation de l'espace et de volumétrie des bâtiments, ainsi que de la nature des constructions environnantes. Enfin, traiter un fragment urbain dans un contexte réel pourra démontrer que l'outil de simulation enrichi et utilisé dans cette thèse, s'adapte également à des problématiques d'études opérationnelles approfondies et pas seulement à des problématiques de recherche.

Le site choisi est situé au cœur d'un vaste projet de recomposition des friches urbaines de la ville de Lyon, le projet *Lyon Confluence*. Il est localisé sur la presqu'île dessinée par la rencontre de la Saône et du Rhône proposant 5 km de quais et une dimension maximale transversale de 800 m (voir figure 4.1). Le projet vise à reconstituer un quartier dynamique accueillant à la fois des logements, des commerces et des loisirs tout en réservant environ 60% des surfaces au sol aux espaces publics en accord avec la végétalisation naturelle que proposent les espaces du côté de la rive de la Saône.



**Figure 4.1** : Situation urbaine du projet Lyon Confluence et localisation de la première phase du projet, adapté de [SCI-Lyon-Confluence, 2006]

Les objectifs principaux de cet immense chantier de renouvellement urbain sont :

- renforcer le rayonnement de l'agglomération lyonnaise par la création d'un nouveau quartier de centre-ville, en réhabilitant 70 hectares de foncier, et en prévoyant une mixité de bâtiments publics et privés afin d'éviter le zonage des quartiers ;
- remettre en valeur les fleuves et les qualités paysagères du site ;
- développer une offre attractive de loisirs ;
- désenclaver le Sud de la presqu'île notamment par une refonte des voies de communication, des réseaux de transports en commun et des lieux publics sur l'ensemble des 150 hectares.

Ce projet se décompose dans le temps en plusieurs phases et notre objet d'étude repose sur l'élément principal de la première phase du projet. Elle correspond à la programmation et la conception d'un fragment urbain composé de trois îlots de bâtiments aux usages diversifiés : les îlots A, B et C. Ces trois îlots combinent des programmes d'habitat (700 logements, dont 20% de logements sociaux), d'activités tertiaires, et en pied d'immeuble, de commerces ou de services. Trois groupements de promoteurs, avec pour chacun une équipe de plusieurs cabinets d'architectes, ont été retenus pour les réaliser ; ce qui amène de la diversité au niveau des réalisations. Ce programme d'îlots s'insère dans un environnement de vastes espaces publics où un accent fort est mis sur la qualité paysagère (voir figure 4.2).



**Figure 4.2** : *Fragment urbain étudié : infographie en 3d de la première phase du projet Lyon-Confluence, ©Asylum-Axyz 03-2006*

Trois programmes principaux d'aménagements paysagers ont été prévus :

- la Place Nautique : un espace public de 4 hectares contenant un bassin de 2 hectares ;
- le Parc de Saône qui est réservé aux piétons et aux cycles ;



## 4.3 Choix des bâtiments correspondant aux classes énergétiques définies

Cette partie est fondamentale dans cette étude. En effet, la sélection des bâtiments qui respectent les gammes de paramètres définis par la conclusion du chapitre précédent n'est ni à priori immédiate, ni évidente. De plus, la correspondance en termes de paramètres constructifs s'envisage objectivement, celle en termes de paramètres climatiques paraît moins maîtrisable. Nous détaillons ci-après la procédure de choix des bâtiments d'étude par raffinement progressif des paramètres choisis.

### 4.3.1 Les paramètres constructifs

#### La volumétrie et la compacité

Le choix des bâtiments d'étude repose avant tout sur leur géométrie. Les calculs géométriques sont réalisés à partir d'un modèle 3d du projet, construit à partir de données numériques et papier fournis par chacun des architectes des bâtiments des îlots A Sud, B Nord et B Sud (figure 4.4). Peu de renseignements étaient disponibles pour les bâtiments de l'îlot A Nord, quelques approximations ont alors été nécessaires. Par ailleurs, les décaissements, les systèmes de parking sous rez-de cour ou jardins de cœurs d'îlots et les talutages au niveau des parcs paysagers ne sont pas conservés pour revenir à un aménagement de sol à altitude constante.

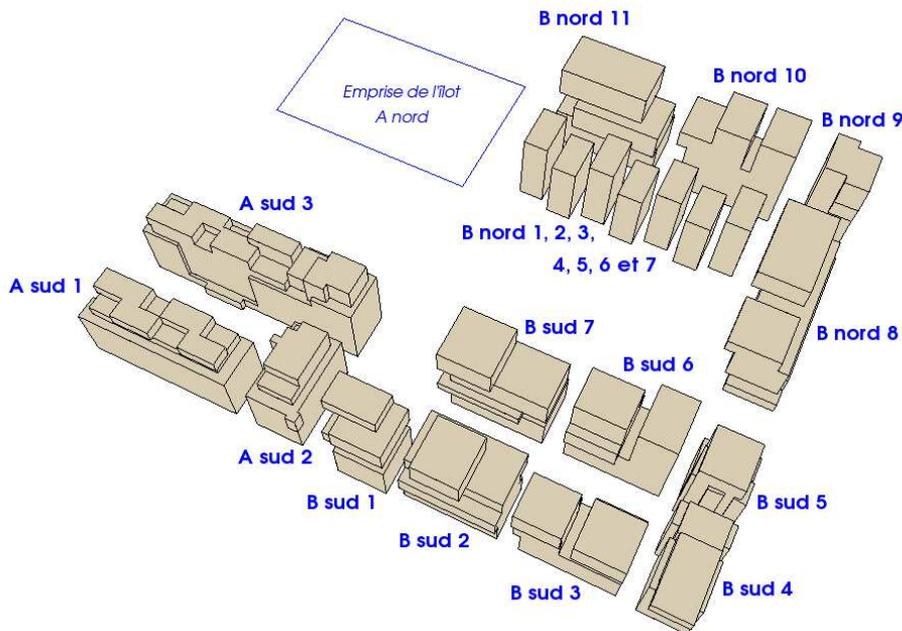


Figure 4.4 : Modèle en 3d de base et repérage des bâtiments

Une présélection a alors été effectuée en discriminant par leur volumétrie les bâtiments appartenant aux îlots A et B. Plusieurs étapes de calcul et réajustement géométrique ont été enchaînées du fait que les bâtiments sur site ont des volumes, et des configurations d'enveloppe, éloignés de ceux de l'étude théorique. La liste des bâtiments présélectionnés et ajustés, ainsi que leur volumes et compacités correspondant, figure dans le tableau 4.1 et le détail des étapes géométriques est décrit en Annexe A.2, tableaux A.1 à A.3.

### L'orientation

Nous conservons l'orientation des bâtiments en cohérence avec notre idée de base d'étudier un projet urbain dans son contexte réel. Deux orientations principales sont définies par les voies principales desservant les îlots des bâtiments du projet. Ils correspondent à des orientations de  $-29^\circ$  et  $+61^\circ$ . Du fait de la réversibilité de l'angle  $Or$  expliqué par la symétrie du bâtiment, l'orientation de  $-29^\circ$  est comprise, en valeur absolue, dans les gammes d'orientations de  $+0^\circ$  à  $+36^\circ$  et de  $+0^\circ$  à  $+54^\circ$  respectivement pour les classes 1 et 3. L'orientation de  $+61^\circ$  est comprise dans les gammes de  $+34^\circ$  à  $+90^\circ$  et de  $+48^\circ$  à  $+90^\circ$  respectivement pour les classes 2 et 4. Nous présentons les valeurs d'orientation pour les bâtiments dont nous avons réajusté la volumétrie dans le tableau 4.1.

Bâtiment	Volume ajusté [ $m^3$ ]	Surface de l'enveloppe [ $m^2$ ]	$C_p$ [ $m^3 \cdot m^{-2}$ ]	$Or$ [ $^\circ$ ]	Classe(s) possible(s)
A Nord 1	9000	2599	3,46	-29	3
A Nord 3	9000	2670	3,37	+61	2 ou 4
A Nord 4	9000	3317	2,71	-29	1
A Sud 2	9000	2670	3,37	+61	2 ou 4
B Nord 11	9000	2679	3,36	-29	3
B Sud 1	9000	2683	3,35	-29	3
B Sud 4	9000	2725	3,30	+61	2 ou 4
B Sud 7	9000	2670	3,37	-29	3

**Tableau 4.1** : Présélection des bâtiments en fonction de leurs volumes ajustés, compacités et orientations

### 4.3.2 Les paramètres climatiques

#### Le taux de flux solaire

Le flux solaire ( $T_F$ ) a été défini comme le pourcentage d'atténuation du flux solaire direct, en ne l'appliquant que pour la période estivale. Alors que pour l'étude théorique précédente

les valeurs de  $T_F$  étaient constantes durant la journée de référence, dans un site réel les valeurs de  $T_F$  évoluent à chaque instant en fonction des masques créés par l'environnement bâti.

A partir de la simulation du flux solaire direct avec **Solene**, nous calculons le  $T_F$  réel pour la liste des bâtiments établie dans le tableau 4.1. Le  $T_F$  réel est calculé par l'équation 4.1 :

$$T_F = \frac{\sum_{t=H_L}^{H_C} [\sum_{i=1}^n S_i F_{dir_i}(\text{bâtiment réel})]}{\sum_{t=H_L}^{H_C} [\sum_{i=1}^n S_i F_{dir_i}(\text{bâtiment isolé})]} \quad (4.1)$$

avec  $n$  le nombre de facettes de l'enveloppe du bâtiment,  $H_L$  l'heure de lever du soleil et  $H_C$  l'heure de coucher du soleil.

Les calculs effectués donnent des valeurs de  $T_F$  réel entre 70 % et 90 %, ceci montrant que les ombres portées par les bâtiments environnants n'altèrent que faiblement l'accessibilité solaire. Ces valeurs s'accordent à la gamme de  $T_F$  exigée pour les classes énergétiques 3 et 4 pour lesquelles ces valeurs doivent être comprises entre 40 % et 100%. Nous ne pouvons pas retrouver strictement les classes 1 et 2 dans l'échantillon des bâtiments possibles :

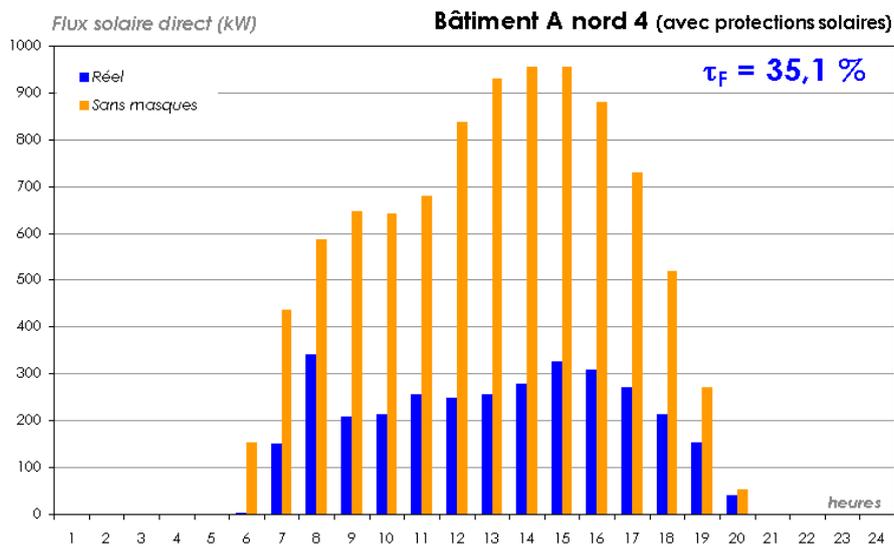
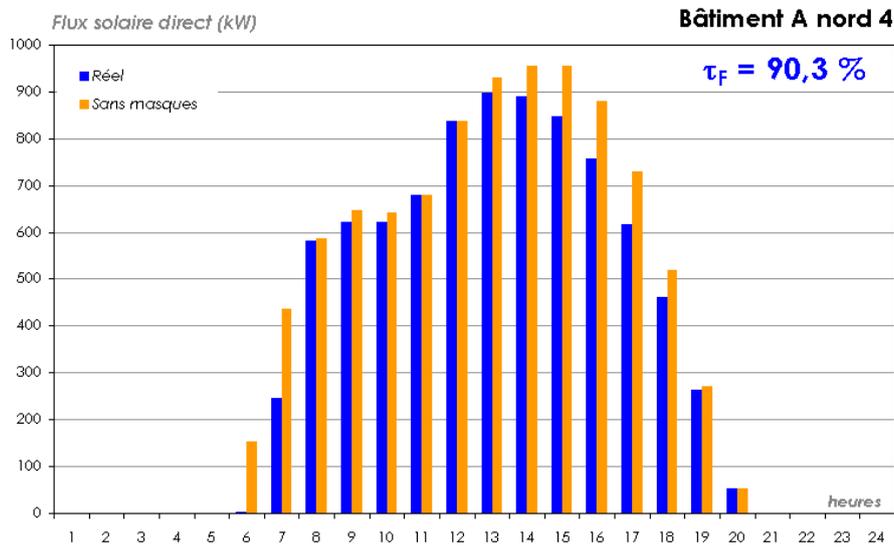
- A Nord 4 pour la classe 1 ;
- A Nord 3, A Sud 2 et B Sud 4, pour la classe 2.

Nous procédons donc à une autre opération de réajustement de l'enveloppe, par la mise en place de protections solaires réduisant les valeurs des flux solaires directs et rétablissant ainsi le taux de flux solaire nécessaire à l'obtention de bâtiments des classes 1 et 2. Notre choix se porte sur les bâtiments A Nord 4 et B Sud 4 pour obtenir respectivement ces classes. Nous définissons des protections planes horizontales de type casquettes ou balcons, dont la longueur nécessaire est ajustée par itérations. Pour le bâtiment A Nord 4, la protection simple des façades ne suffisant pas pour atteindre la valeur de  $T_F$  souhaitée, nous mettons en place une protection de toiture, plane et horizontale, pouvant être une résille semi-transparente. La géométrie de ces protections est donnée dans le tableau 4.2.

Bâtiment	Type de protection solaire
A Nord 4	casquette à chaque étage, largeur 1,5 m et protection plane de toiture, coefficient de transmission 40%
B Sud 4	casquette à chaque étage, largeur 2 m

**Tableau 4.2 :** *Détail des protections solaires pour rétablir les classes 1 et 2*

Sur la figure 4.5, nous présentons le détail du calcul de taux de flux solaire à partir des valeurs horaires simulées pour le bâtiment A Nord 4 avant et après la mise en place des protections solaires.



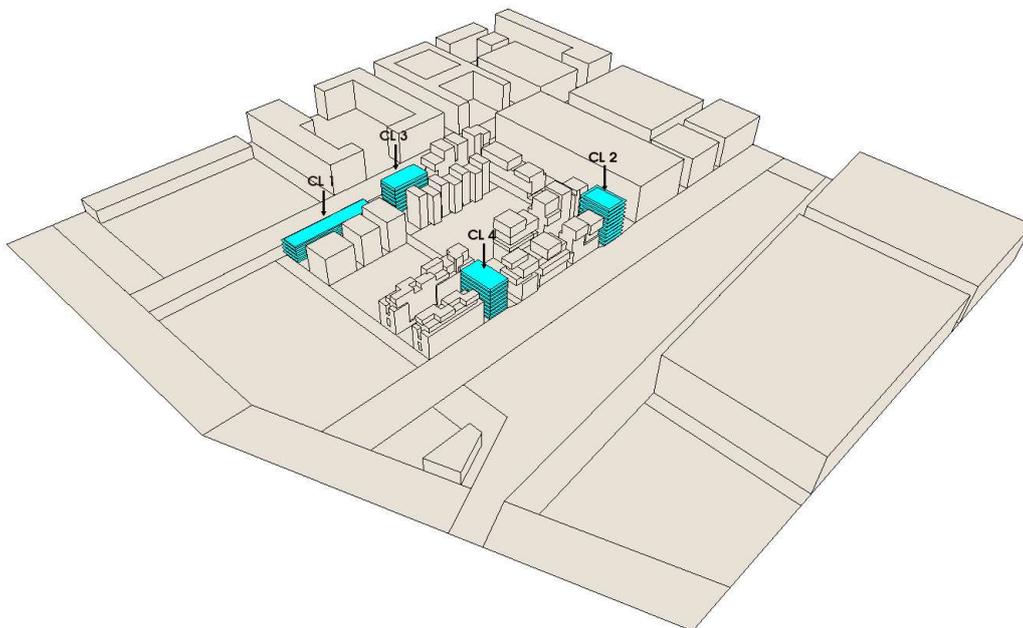
**Figure 4.5 :** Évaluation des taux de flux solaires à partir des flux horaires : flux solaires directs horaires sans et avec masques (en haut), sans et avec masques et protections solaires (en bas), pour l'enveloppe du bâtiment A Nord 4, le 15 Juillet par ciel clair

Le calcul de l'ensemble des  $T_F$  pour la présélection de 8 bâtiments nous permet finalement d'associer une classe différente à quatre d'entre eux. En effet, il reste à attribuer pour ces bâtiments un taux de vitrage respectant les valeurs admises pour chaque classe. Deux taux de vitrage sont affectés aux bâtiments, un taux haut  $T_{V(1)}$  et un taux bas  $T_{V(2)}$ . Les valeurs sont fixées arbitrairement :  $T_{V(1)}$  est égal à 66,6% et correspond à une hauteur du bandeau de vitrage de 2 m pour une hauteur d'étage de 3 m, alors que  $T_{V(2)}$ , égal à 33,3%, correspond à une hauteur du bandeau de vitrage de 1 m pour le même étage.

Le bilan des paramètres calculés ou fixés pour les quatre classes est présenté dans le tableau 4.3 et les bâtiments associés sont identifiés sur la figure 4.6.

Bâtiment	$C_p$ [ $m^3.m^{-2}$ ]	$Or$ [ $^\circ$ ]	$T_F$ [%]	$T_V$ [%]	Classe attribuée
A Nord 4	2,71	-29	35,1	33,3	<b>1</b>
B Sud 4	3,3	+61	37,4	33,3	<b>2</b>
B Nord 11	3,36	-29	82,6	66,6	<b>3</b>
A Sud 2	3,37	+61	74,5	66,6	<b>4</b>

**Tableau 4.3 :** Choix des quatre bâtiments et paramètres associés



**Figure 4.6 :** Repérage des bâtiments simulés correspondant aux classes

## Le coefficient d'échange superficiel convectif et l'écart de température d'air

Les deux derniers paramètres influant sur la sensibilité énergétique des quatre bâtiments de référence sont le coefficient d'échange superficiel convectif ( $h_c$ ) et l'écart à la température d'air moyenne journalière ( $\Delta T$ ). Ces paramètres, liés aux grandeurs physiques microclimatiques ne sont pas connus avant d'avoir effectué la simulation couplée. Contrairement au  $T_F$ , pour lequel l'évaluation s'effectue par simulation solaire informatique peu coûteuse en temps de calcul ou bien par approximation donnée par des outils graphiques ou numériques simplifiés, ils ne peuvent être évalués rapidement en cours de conception.

Ainsi, leurs valeurs seront connues post-simulation et utilisées pour discuter les résultats. Nous verrons alors si les bâtiments, affiliés à des classes énergétiques sans la connaissance de ces deux paramètres, sont effectivement bien classés.

## 4.4 Les données météorologiques d'entrée

### 4.4.1 Les scénarios de température, d'ensoleillement et d'humidité

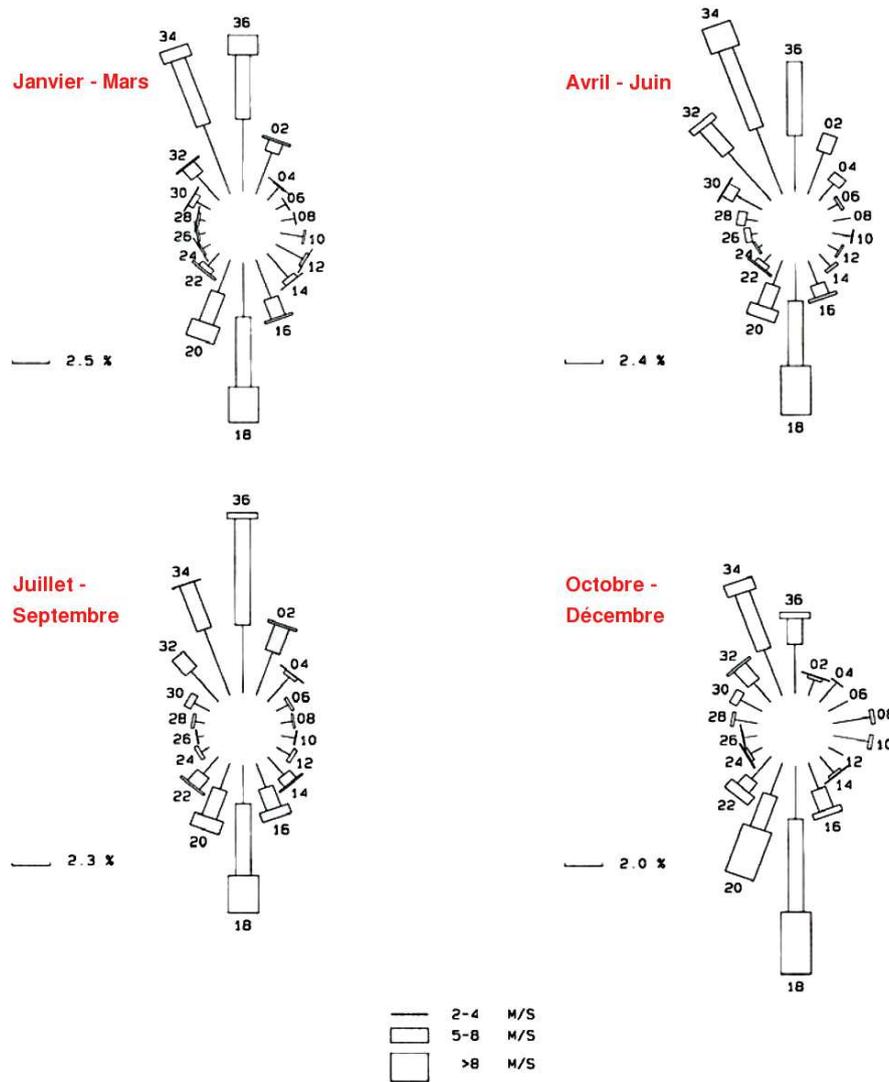
Les données météorologiques de température et d'humidité définissant les variables d'entrée de veine de simulation aéraulique sont les mêmes scénarios que ceux de l'étude de sensibilité du chapitre précédent, définies pour les semaines d'hiver et d'été sur les figures 3.14 et 3.15. De la même façon, les données des flux IR atmosphériques renseignant l'entrée de la simulation thermoradiative sont celles illustrées par la figure 3.16. En effet, nous conservons la même base de réflexion entre les deux parties de la thèse pour pouvoir discuter à la fois les résultats et les choix méthodologiques.

Pour les données de flux solaire sur les surfaces, nous effectuerons une simulation solaire en préambule de la simulation microclimatique. Cette simulation permet d'accéder au flux direct incident, diffus incident et diffus inter-réfléchi en fonction de la géométrie du fragment urbain et des coefficients de réflexion et de transmission solaires des matériaux. Comme pour l'étude de sensibilité, des conditions théoriques de ciel clair seront utilisées pour la date du 15 Janvier et du 15 Juillet conduisant aux flux direct et diffus en site dégagé représentés en traits pleins respectivement sur les figures 3.18 et 3.17.

### 4.4.2 Le régime du vent

Les roses des vents trimestrielles de la station météorologique de Lyon-Bron, concernant les vitesses supérieures à  $2 \text{ m.s}^{-1}$  (figure 4.7), font clairement apparaître deux directions de vents dominants aux secteurs Nord et Sud. En fréquence annuelle, pour une partition des directions

en 16 secteurs angulaires, ces deux vents dominants représentent 46,0% pour les secteurs (N-NNE-NNO) confondus et 31,6% pour les secteurs (S-SSE-SSO) confondus, soit plus des trois quarts des fréquences des vents sur l'ensemble des directions [CERMA, 1982].



**Figure 4.7 :** Roses des vents trimestrielles en fréquence et en intensité à la station de Lyon-Bron

Cette prédominance des vents de Nord et de Sud se retrouve à l'échelle mensuelle avec des fréquences d'apparition comprises entre 71% et 82%. Les vents de Nord, de secteurs (N-NNE-NNO), sont plus fréquents que les vents de Sud, de secteurs (S-SSE-SSO), excepté pour les mois de Mars et de Décembre. D'Avril à Août, les vents de Nord ont une fréquence d'apparition très marquée, puisqu'ils sont deux fois plus fréquents que les vents provenant du Sud.

### Vitesse du vent à 10m du sol

Les vitesses rapportées aux deux secteurs de vents dominants font apparaître, pour l'année, une prédominance des vents les plus forts pour le secteur Sud. La répartition des fréquences par groupe de vitesses et de secteurs s'établit comme suit :

- secteur Nord (N-NNE-NNO)
  - 1 à 2  $m.s^{-1}$  : 16%
  - 2 à 4  $m.s^{-1}$  : 45%
  - 5 à 9  $m.s^{-1}$  : 35%
  - 10  $m.s^{-1}$  : 3%
- secteur Sud (S-SSE-SSO)
  - 1 à 2  $m.s^{-1}$  : 17%
  - 2 à 4  $m.s^{-1}$  : 36%
  - 5 à 9  $m.s^{-1}$  : 37%
  - 10  $m.s^{-1}$  : 10%

En synthétisant, les vents de Nord, plus fréquents, soufflent avec des vitesses supérieures à 5  $m.s^{-1}$ , un peu plus d'un tiers du temps (38%). Pour les vents de Sud, c'est près de la moitié du temps que le seuil de 5  $m.s^{-1}$  est atteint et dépassé (47%).

La vitesse moyenne annuelle est de 3  $m.s^{-1}$ , d'après les statistiques 1951-1960. Elle varie entre 3 et 4  $m.s^{-1}$  au cours des mois d'hiver et de printemps (Novembre à Mai) mais reste inférieure à 3  $m.s^{-1}$  durant la période d'été puis d'automne. Le nombre de jours de vent violent, soit supérieur à 16  $m.s^{-1}$ , est de 49 pour l'année dont environ 5 à 6 jours pour chaque mois d'hiver. Des données horaires peuvent également mettre en évidence une vitesse moyenne journalière correspondant approximativement à la vitesse moyenne du vent à 9h, et des maxima et des minima se produisant respectivement à 15h et entre 3h et 6h du matin. Les spécificités du site Lyonnais qui ressortent de l'analyse statistique du vent sont ainsi :

- en incidence Nord, des vents fréquents quelque soit la saison, avec des vitesses souvent élevées ;
- en incidence Sud, des vents globalement moins fréquents, mais présents toute l'année, et pour lesquels on enregistre des fortes vitesses ;
- des vitesses moyennes de vent plus élevées le jour que la nuit.

Finalement, les paramètres utilisés pour décrire le profil de vent théorique par l'équation 2.20, à l'entrée de la veine de simulation, seront :

- $Z_{\text{ref}} = 10 \text{ m}$ , pour la hauteur de référence pour la vitesse de vent météo ;
- $U_{\text{ref}} = 3 \text{ m.s}^{-1}$ , pour la vitesse moyenne statistique météo, à la hauteur  $Z_{\text{ref}}$  ;
- $\alpha = 0,3$ , pour le coefficient puissance du profil de vent de la veine numérique, correspondant à une site d'une rugosité de type banlieue-ville [Gandemer et Guyot, 1976] ;

- un angle d'incidence de  $0^\circ$ , correspondant à une incidence de vent plein Sud. En effet, les vents de secteur Sud sont légèrement moins fréquents que les vents de secteur Nord, mais présents toute l'année dans des gammes de vitesses importantes. Nous ne traiterons volontairement pas les vents de Nord pour diminuer le nombre de simulations. De plus, outre leur prégnance en statistiques annuelles, les vents de secteur Sud semblent intuitivement intéressants par rapport à la présence d'une zone non bâtie (darse) au Sud du projet offrant des possibilités de régulation climatique des îlots A et B en fonction de l'aménagement urbain opéré dans cette zone.

## 4.5 Définition des scénarios d'aménagement urbain traités

Notre étude se limite à l'étude des quatre bâtiments implantés dans deux configurations d'aménagements urbains. Les caractéristiques principales des deux scénarios sont les suivantes :

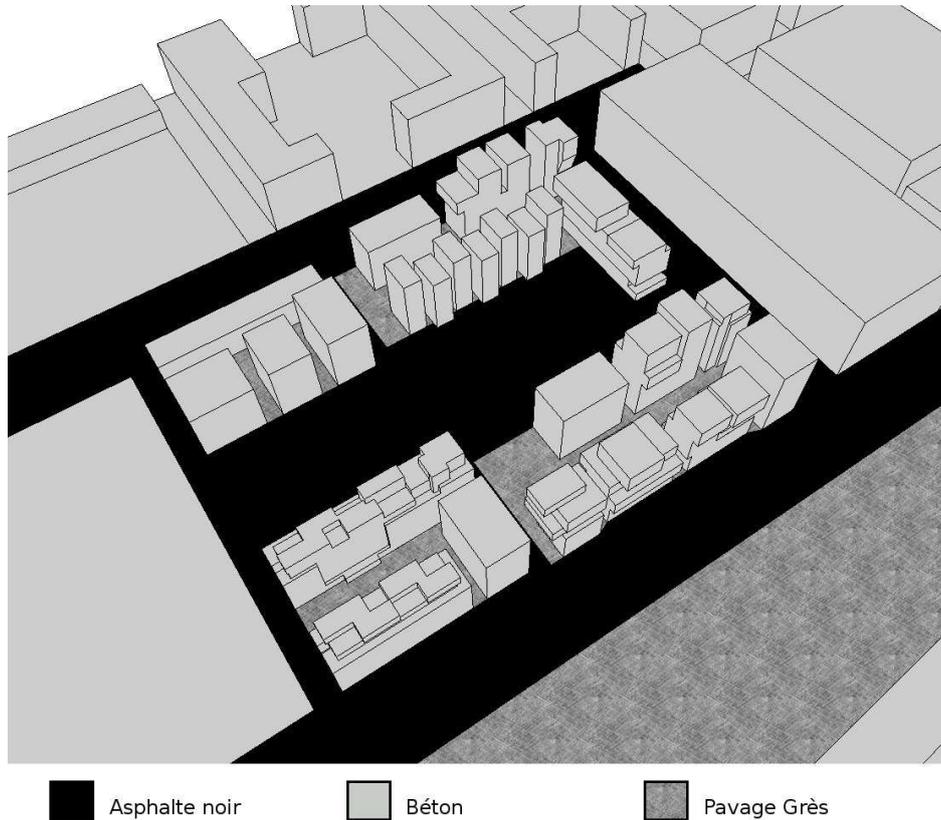
- un scénario où les surfaces urbaines sont largement minéralisées, censé favoriser le développement de l'îlot de chaleur ;
- un scénario où les parcelles non bâties (parcs, cœurs d'îlots...) sont végétalisées et plantées d'arbres et où les voies piétonnières sont également plantées d'arbres, ce qui est censé favoriser le rafraîchissement passif en été.

Le but est de tester deux stratégies très différenciées que nous décrivons plus précisément ci-après.

### 4.5.1 Scénario A

Dans cette configuration d'aménagement minéralisé, les esplanades dessinées par les deux espaces intermédiaires des A et B reliant les parties Nord et Sud, sont couvertes d'asphalte. Elles peuvent être dédiées par exemple à la création de parkings extérieurs pour les résidents (figure 4.8). Les cœurs d'îlots sont traités en pavage de grès. Le traitement du sol de la parcelle à l'Ouest des îlots A et B (Parc de la Saône, voir plan de la figure 4.3) sera en béton brut dans l'idée d'accueillir des espaces tels qu'un parc minéral, une place piétonne, un skate-park ou d'autres espaces ayant besoin d'un sol imperméable pour les activités hébergées.

Les quatre voies extérieures - Voie B, Rue Casimir Perrier, Rue Denuzière, Quai Nord (voir figure 4.3) - ainsi que la voie Nord-Sud passant entre les deux îlots, sont traitées en asphalte dans l'hypothèse d'accueillir la circulation de véhicules motorisés.

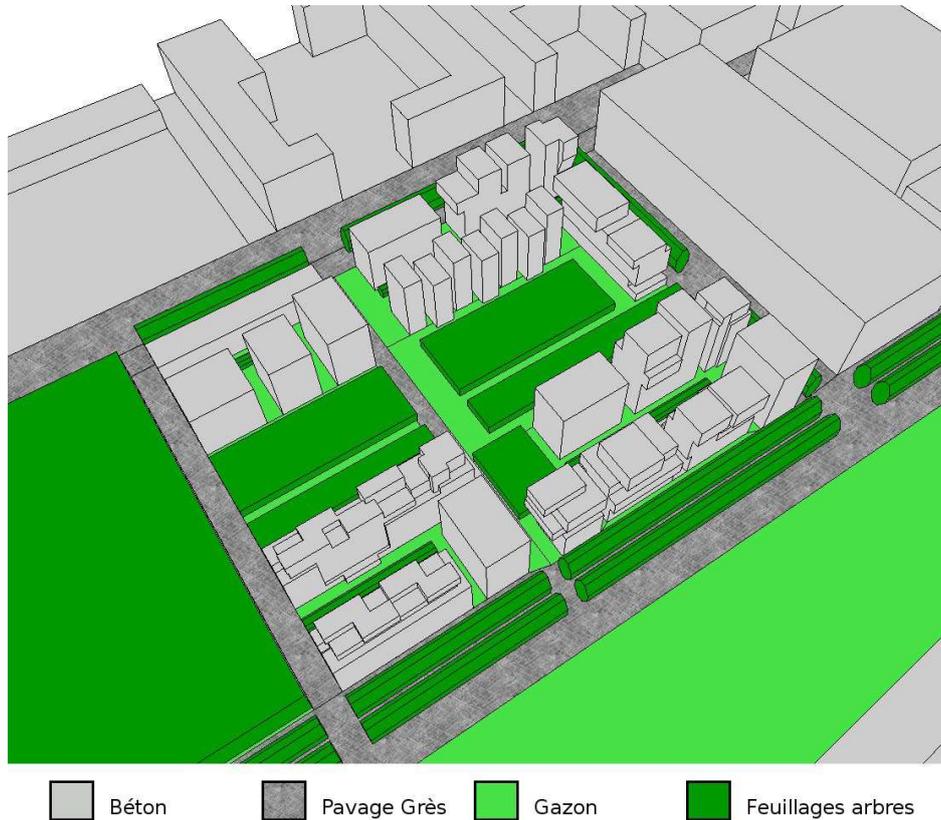


**Figure 4.8 :** Configuration de l'îlot dans le cas de l'aménagement minéral (Aménagement A)

#### 4.5.2 Scénario B

##### L'aménagement des sols

- Contrairement au scénario d'aménagement A, la priorité est de végétaliser le plus possible la surface des sols. L'aménagement des surfaces reposera alors sur deux types de traitements :
- les cœurs d'îlots, les espaces inter-îlots Nord-Sud et le parc de la Saône sont recouverts de pelouse, ceci s'approchant de l'aménagement prévu pour le projet réel, avec des cheminements en sol naturel perméables (qu'il est peu pertinent de représenter étant données la taille des mailles 2D du modèle géométrique) ;
  - les voies périphériques de desserte des îlots sont pavées de grès pour une utilisation piétonnière contrairement au scénario A.



**Figure 4.9 :** Configuration de l'îlot dans le cas de l'aménagement végétal (Aménagement B)

### La plantation des arbres

La question de la géométrie des arbres a été réfléchi brièvement en se servant des données du projet réel (figure 4.10), de classifications paysagistes et morphologiques d'arbres [Vinet, 2000] [Duprat *et al.*, 2008] et du bon sens. Deux types d'arbres ont été utilisés. Leur géométrie, en particulier leur hauteur, est différente en fonction de l'utilisation de ceux-ci, la section de feuillage est ovoïde dans les deux cas. Le long des voies piétonnes, on utilisera une double rangée de grands arbres, d'une hauteur de 15 mètres pour dessiner les cheminements piétonniers et créer des ombrages des bâtiments en bordure de voies. Les espaces intermédiaires et les cœurs d'îlots seront non plus des parkings mais des parcs destinées au activités récréatives des résidents. Ainsi l'espace sera traité comme un petit parc urbain et planté de plus petits arbres, 12 m, avec une répartition éparse pour ne pas altérer la luminosité de l'espace et de ses cheminements. En pratique, nous modélisons en 3D des volumes continus occupé par les feuillages sur des zones plantés (figure 4.8), nous adaptons en suite la LAD et les propriétés solaires pour respecter au plus juste la disposition réelle. Les caractéristiques de ces zones sont répertoriées dans les tableaux 4.4 et 4.5.



**Figure 4.10** : Aménagement paysager prévu dans le projet initial [SCI-Lyon-Confluence, 2006] : vue d'ensemble de l'îlot A (à droite) et coupe sur l'îlot A Sud (à gauche)

Type de zone	Hauteur (m)	LAD ( $m^2 \cdot m^{-3}$ )	albédo (-)	transmissivité (-)	absorptivité (-)	émissivité (-)
Rangées sur voies	15	1	0,3	0,2	0,5	0,97
Cœur d'îlots	12	0,5	0,15	0,6	0,25	0,97

**Tableau 4.4** : Caractéristiques physiques associés aux zones volumiques de feuillage dans le modèle 3D, valeurs pour l'été

Type de zone	Hauteur (m)	LAD ( $m^2 \cdot m^{-3}$ )	albédo (-)	transmissivité (-)	absorptivité (-)	émissivité (-)
Rangées sur voies	15	0,2	0,15	0,70	0,15	0,97
Cœur d'îlots	12	0,1	0,075	0,85	0,075	0,97

**Tableau 4.5** : Caractéristiques physiques associés aux zones volumiques de feuillage dans le modèle 3D, valeurs pour l'hiver

### 4.5.3 Les matériaux composant les parois des bâtiments

La surface des façades et des toitures des bâtiments environnants sera le béton. Les vitrages seront ignorés en supposant que leur quantité est suffisamment faible pour qu'ils n'influent que de manière négligeable sur les données climatiques du site d'étude (températures de surface et albédos moyens des façades). Les bâtiments d'études auront exactement la même composition que celle définie dans le chapitre précédent (voir p.148).

#### 4.5.4 Les données thermophysiques des matériaux

Nous donnons dans le tableau 4.6 la description complète des différentes compositions de surfaces urbaines utilisées dans les deux scénarios avec l'ensemble des propriétés thermophysiques associées.

		e (m)	$\lambda$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	C (J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	$\rho$ (kg.m <sup>-3</sup> )	$\rho_s$ (-)	$\epsilon$ (-)
<b>Revêtement : Asphalte</b>							
Mat 1	Asphalte noir	0,1	0,75	950	2100	0,07	0,95
Mat 2	Terre	0,5	0,7	900	1600	-	-
<b>Revêtement : Pavage en grès</b>							
Mat 1	Grès	0,1	2,6	880	2500	0,46	0,9
Mat 2	Terre	0,5	0,7	900	1600	-	-
<b>Revêtement : Béton</b>							
Mat 1	Béton	0,1	1,8	1000	2300	0,3	0,9
Mat 2	Terre	0,5	0,7	900	1600	-	-
<b>Revêtement : Pelouse</b>							
Mat 1	Pelouse	-	-	-	-	0,23	0,98
Mat 2	Terre	0,6	0,7	900	1600	-	-
<b>Parois bâtiments</b>							
Mat 1	Béton	0,2	1,8	1000	2300	0,3	0,9
Mat 2	Laine de roche	0,08	0,04	1000	30	-	-

**Tableau 4.6 :** Détails de composition et propriétés thermophysiques des revêtements urbains, de l'extérieur vers l'intérieur

#### 4.5.5 Les données des modèles géométriques

Pour les simulations, nous réalisons un maillage volumique de la veine aérodynamique pour la partie des simulations exécutées par Fluent. Les données géométriques du maillage sont données tableaux 4.7.

Domaines	Cellules volumiques
Air	1698554
Arbres	26603
Total	1725157

**Tableau 4.7 :** Nombre de cellules pour la géométrie volumique (calcul aéraulique)

Le modèle surfacique est extrait de ce modèle volumique, et quatre nouveaux maillages surfaciques sont recrées autour des bâtiments d'études en dilatant la taille des facettes afin de réduire le temps de calcul des facteurs de formes et de la radiosité dans chaque géométrie. Exécuter des calculs thermoradiatifs sur tout le domaine îlot A + îlot B n'est pas réalisable du fait du nombre trop important de mailles surfaciques de base (55484 facettes pour la configuration intégrant les arbres) Le nombre de facettes de chaque sous-géométrie maillée est donné dans le tableau 4.8.

Géométrie	Total Facettes	Total Facettes (avec arbres)	Facettes bâtiment d'étude
Bâtiment 1	7802	9822	1800
Bâtiment 2	6362	7708	2158
Bâtiment 3	7838	9040	1545
Bâtiment 4	7450	9114	2062

**Tableau 4.8 :** *Nombre de facettes pour les maillages surfaciques simplifiés (calcul thermoradiatif)*

Le transfert de données de Fluent vers Solene (géométrie plus fine vers géométrie plus grossière) est assuré par une fonctions d'interpolation de données qui a spécialement été créée pour ce travail.

## 4.6 Analyse des résultats

Pour faciliter la lecture, nous définissons une nomenclature pour identifier les bâtiments, les scénarios d'aménagement et les semaines de référence de simulation, ainsi pour les bâtiments :

- le bâtiment A Nord 4, présumé appartenir à la classe 1, sera désigné *bâtiment 1* ;
- le bâtiment B Sud 4, présumé appartenir à la classe 2, sera désigné *bâtiment 2* ;
- le bâtiment B Nord 11, présumé appartenir à la classe 3, sera désigné *bâtiment 3* ;
- le bâtiment A Sud 2, présumé appartenir à la classe 4, sera désigné *bâtiment 4* ;

pour les aménagements :

- l'aménagement minéral sera désigné *aménagement A* ;
- l'aménagement végétal sera désigné *aménagement B* ;

pour les périodes de simulation :

- les résultats de la semaine de référence correspondant à la succession de 7 jours moyens de janvier sera désigné *cas hiver* ;
- les résultats de la semaine de référence correspondant à la succession de 7 jours moyens de juillet sera désigné *cas été*.

### 4.6.1 Analyse des cycles hebdomadaires des températures et des puissances

#### Bâtiment 1

##### ➤ *Cas hiver*

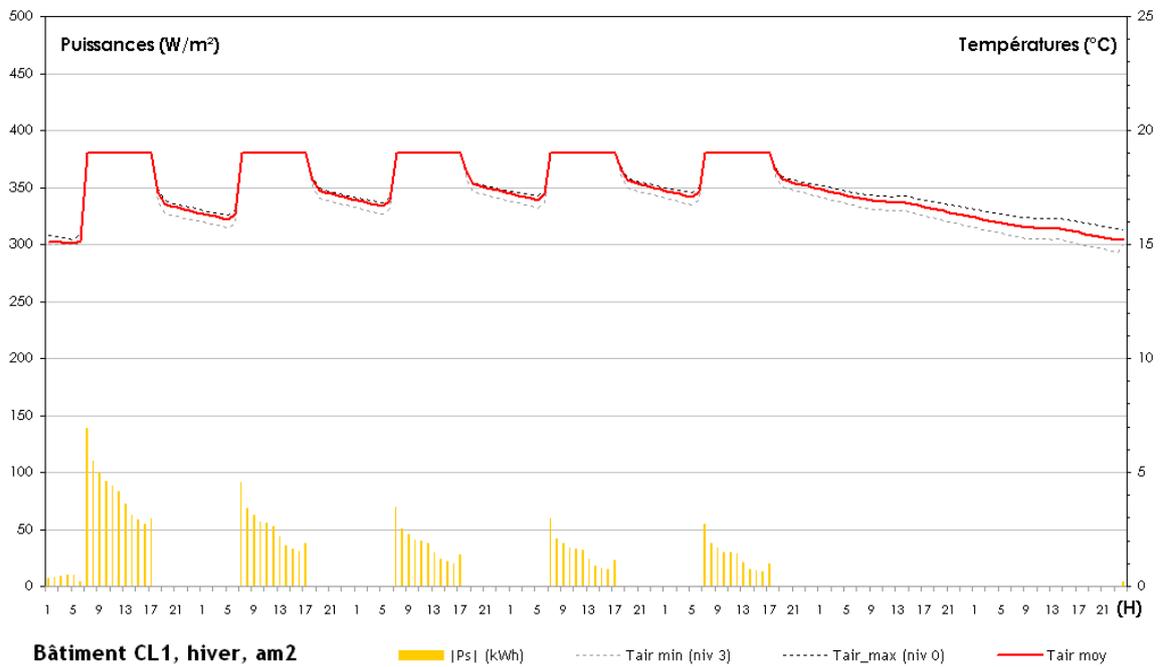
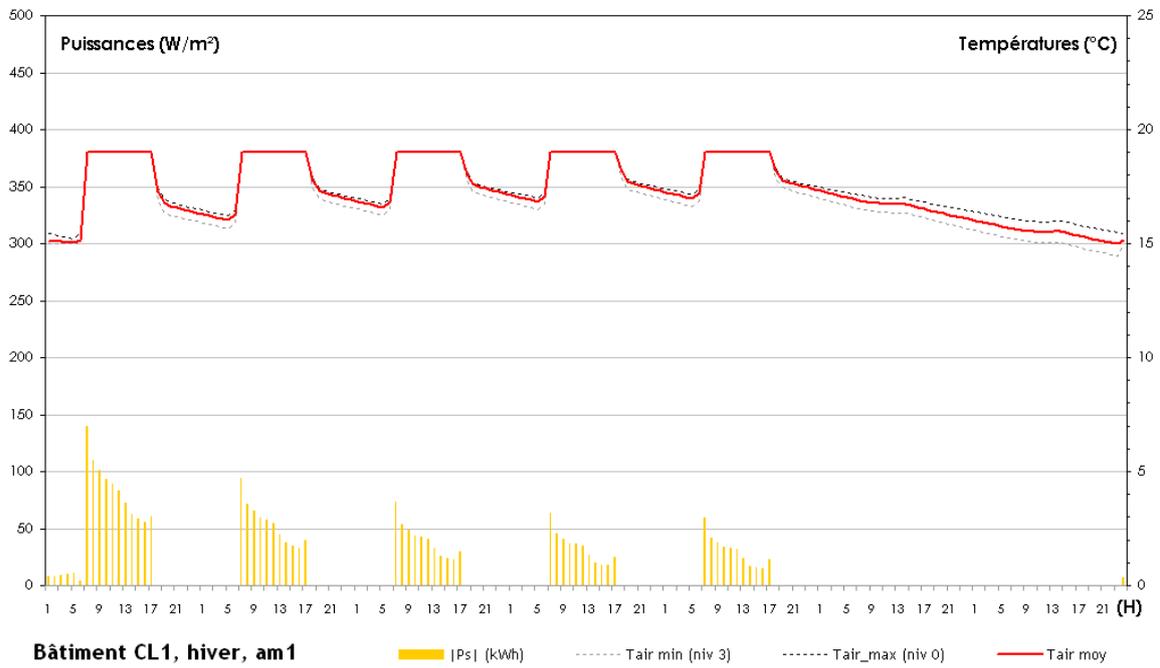
Sur la figure 4.11, nous vérifions une évolution des températures caractéristiques des bâtiments de bureaux : à savoir pour les jours ouvrés (lundi au vendredi), un forçage thermique à la température de consigne ( $19^{\circ}\text{C}$ ) pendant les heures d'occupation, puis pendant les périodes intermédiaires, une décroissance en deux parties. Elle est tout d'abord brutale de 17 h à 19 h, période correspondant au début du dépeuplement des bureaux<sup>1</sup>, puis elle s'adoucit entre 20 h et 6 h le lendemain jusqu'au moment de la reprise d'activité. En ce qui concerne le week-end, la température entame une décroissance lente jusqu'au lundi matin, estimée à environ  $-0,05^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{-1}$ . Dans le cas du bâtiment 1, et pour les deux configurations d'aménagement, la température d'air à chaque étage n'atteint jamais la valeur basse de  $15^{\circ}\text{C}$ . Il n'y a donc pas de remise en route du système de chauffage pour assurer une température minimale. Nous pouvons également supposer que durant cette période, aux horaires compris entre 10 h et 14 h, la clémence des températures extérieures combinée aux apports solaires permet de maintenir un équilibre thermique.

---

<sup>1</sup>nous exprimons les horaires d'observation en heures solaires ce qui correspond à un décalage d'environ 1 h avec l'heure légale d'hiver et de 2h avec l'heure légale d'été, soit la considération de la tranche horaire de 18 h à 20 h légales pour la présente remarque

Au niveau des puissances de chauffage, nous remarquons que les besoins n'interviennent que pour les phases séquentielles d'occupation du bâtiment. En dehors de ces périodes, seulement une compensation est nécessaire de 0 h à 6 h le lundi matin pour préchauffer l'espace intérieur à  $15^{\circ}\text{C}$  ; les puissances horaires sont de l'ordre d'une dizaine de  $kW$ . D'un jour à l'autre, les puissances thermiques mises en jeu pour les mêmes horaires diminuent progressivement. Du lundi au vendredi, les consommations journalières sont réduites d'environ deux tiers ; elles passent de  $983 kWh$  et  $969 kWh$  le lundi à  $330 kWh$  et  $295 kWh$  le vendredi respectivement pour les aménagements A et B. Cette décroissance des puissances a une allure inversement exponentielle : entre le lundi et le mardi, les puissances horaires sont réduites d'environ 40% pour les deux configurations, alors que du jeudi au vendredi, les puissances ne sont réduites que de 10%. Le profil horaires des puissances suit chaque jour une évolution qui s'oppose typiquement au profil d'occupation des locaux ; ceci sera retrouvé pour les trois autres bâtiments. A partir de l'horaire d'entrée dans les locaux (6 h), où elle est à son niveau maximal, la puissance décroît fortement pour se stabiliser pendant la pause-déjeuner, puis elle décroît à nouveau en début d'après midi avant d'augmenter légèrement à partir de (16 h) lorsque les apports internes diminuent à mesure que les employés quittent leurs bureaux.

La comparaison des deux cas montre qu'en hiver, pour ce type de bâtiment, la différence d'aménagement urbain modifie très peu les consommations énergétiques et les variations des températures d'air. Sur la figure 4.11, il est difficile de déceler des écarts entre les températures d'air moyennes ou entre les températures d'air d'étage minimales et maximales des deux cas de simulation. De la même façon, les écarts de puissances horaires sont négligeables d'une simulation à l'autre. La différence est révélée par la valeur cumulée : la consommation énergétique hebdomadaire pour l'aménagement A est de  $2704 kWh$  alors qu'elle est de  $2570 kWh$  pour l'aménagement B, soit une réduction de 5%.



**Figure 4.11** : Évolution des températures intérieures d'air et des charges sensibles de chauffage du bâtiment 1, cas hiver, aménagement A (en haut) et B (en bas)

➤ *Cas été*

Une première constatation est suggérée par les deux graphes de la figure 4.12 : le retour en fin de semaine à l'état thermique initial est mieux respecté dans le cas de l'aménagement A que dans le cas B. Les simulations indiquent une température moyenne d'air intérieur de  $24,2^{\circ}\text{C}$  au pas de temps de départ et une température de  $24,7^{\circ}\text{C}$  au pas de temps final pour l'aménagement A. Pour l'aménagement B, nous passons de  $23,1^{\circ}\text{C}$  à  $24,3^{\circ}\text{C}$ , soit un décalage de  $1,2^{\circ}\text{C}$ . Nous ne reviendrons pas sur cet aspect qui se produit dans certains cas, car celui-ci est le plus « critique » ; les deux semaines suffisant dans la majeure partie des cas à réduire l'écart de température intérieure entre le début et la fin de semaine à moins de  $1^{\circ}\text{C}$ . Ici, l'inertie thermique du bâtiment combinée au faible apport de chaleur par l'environnement climatique dans une configuration d'aménagement très végétal ne favorise pas la montée en température par rapport à la température initiale des parois et de l'air ( $20^{\circ}\text{C}$ ) et la stabilisation du cycle dynamique répétitif du bâtiment. Malgré tout, nous ne remettons pas en cause le choix de deux semaines d'initialisation pour l'étude de nos bâtiments. D'une part, nous nous intéressons à la comparaison des valeurs obtenues pour chaque bâtiment et non pas aux valeurs exactes, et d'autre part, dans une situation météorologique réelle, il est peu probable que quatre semaines identiques en terme de variables climatiques horaires se suivent dans le temps.

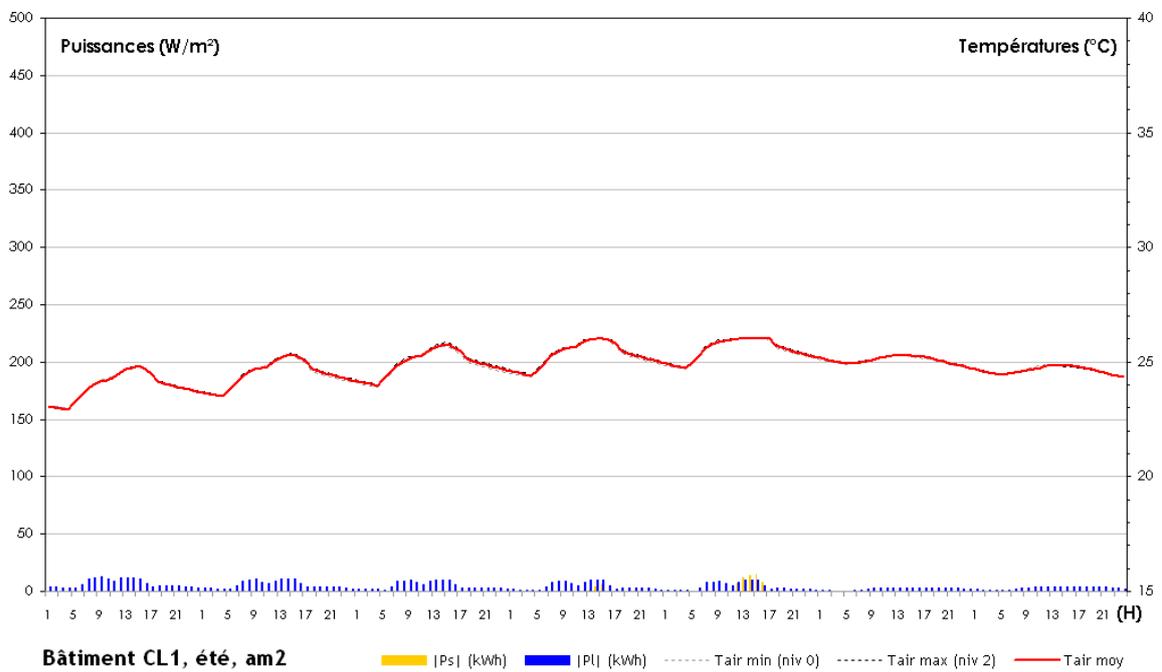
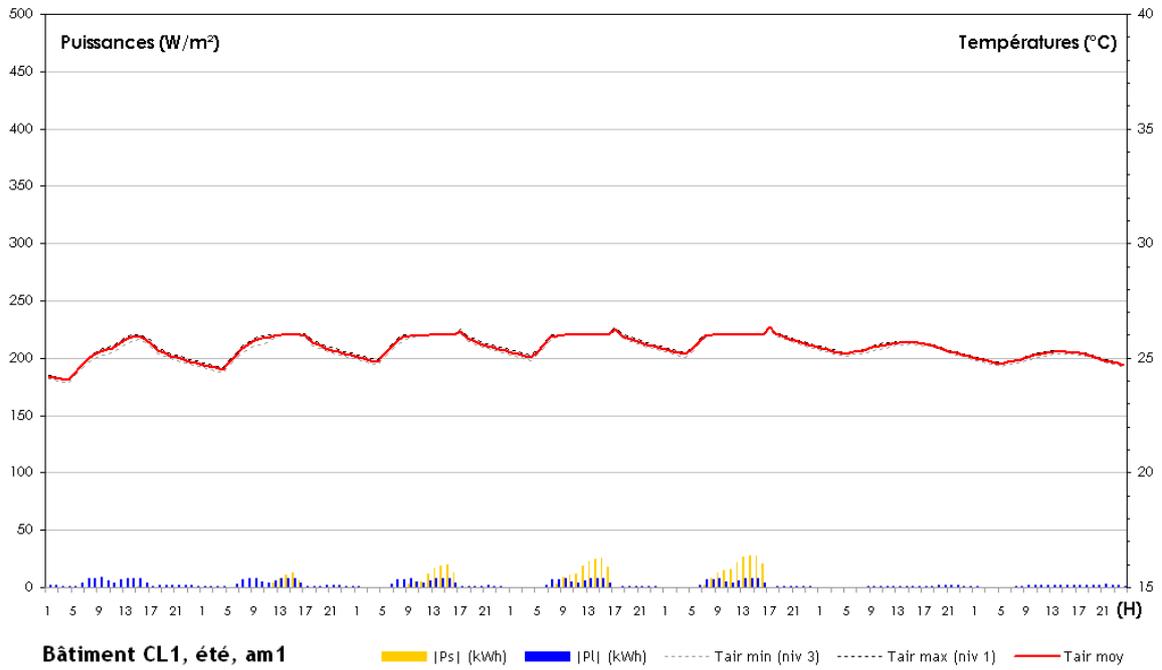
Les températures journalières évolue entre  $24^{\circ}\text{C}$  et  $26^{\circ}\text{C}$  pour le bâtiment placé dans l'aménagement A, et entre  $23^{\circ}\text{C}$  et  $26^{\circ}\text{C}$  pour l'aménagement B, correspondant à la consigne de température d'air maximale acceptable. Pour l'aménagement A, le forçage à la consigne est opéré pour quatre jours - mardi, mercredi, jeudi, vendredi - alors que pour l'aménagement B, la consigne n'est atteinte que pour les deux derniers jours ouvrés, seulement pendant 2 h pour le jeudi. Le cas de l'aménagement B nous montre une évolution quasi-libre des températures. La température est en règle générale très marquée par le scénario d'occupation. En début de matinée la température s'élève pour atteindre un palier entre 11 h et 12 h. Une nouvelle hausse de température, plus prononcée, est constatée jusqu'au milieu de l'après-midi, du fait que les températures extérieures sont plus élevées. A partir de 15 h, instant où la température d'air météorologique extérieure (à l'entrée de la veine de simulation) atteint son maximum ( $25,2^{\circ}\text{C}$ ), la température rechute rapidement jusqu'à 18 h, pour enfin connaître une diminution nocturne plus atténuée. Pour les deux cas, on perd approximativement  $2^{\circ}\text{C}$  durant le week-end selon un signal thermique oscillant.

L'observation des puissances de climatisation confirme que le bâtiment 1 satisfait sa performance présumée en été. En effet, les puissances sensibles sont très faibles. Pour le scénario d'aménagement végétal, les puissances deviennent même nulles pour les trois premiers jours de simulation. Ceci montre que même pour un bâtiment déjà naturellement confortable, on peut toujours réduire le dimensionnement, voire totalement se priver de la climatisation. Les

charges latentes sont cependant plus importantes que dans le cas de l'aménagement B. Cette nécessité supplémentaire de déshumidifier les locaux peut être associée à deux phénomènes simultanés :

- l'augmentation de l'humidité relative intérieure à mesure que la température d'air sec décroît en deçà de la consigne de  $26^{\circ}\text{C}$  ;
- l'apport d'humidité produite par les éléments de végétation urbaine dans l'air renouvelé du bâtiment.

Dans les deux cas, les puissances sensibles ont tendance à augmenter au fil de la semaine alors que les puissances latentes conservent les mêmes valeurs horaires d'un jour à l'autre. Nous pouvons déduire que pour le flux sensible, le bâtiment n'a pas assez de temps pendant la nuit pour décharger toute l'énergie accumulée pendant la journée. D'où l'intérêt de techniques de sur-ventilation nocturne abordées dans d'autres travaux [Chlela, 2008], mais qui ne sont pas l'objet de notre recherche axée sur les effets microclimatiques et non pas aux techniques de fonctionnement propres au bâtiment.



**Figure 4.12 :** Évolution de températures intérieures d'air et des charges totales de climatisation du bâtiment 1, cas été, aménagement A (en haut) et B (en bas)

## Bâtiment 2

### ➤ Cas hiver

Les courbes de température de la figure 4.13 sont très proches de celles obtenues pour les simulations effectuées pour le bâtiment 1. Le comportement du bâtiment 2 en hiver se rapproche en fait de celui du bâtiment 1 alors qu'il devrait en théorie se différencier sur cet aspect. Nous retrouvons l'alternance entre les périodes de travail, où la température atteint la consigne de  $19^{\circ}\text{C}$ , et les périodes d'inoccupation où la température décroît plus ou moins brusquement. Nous retrouvons également les périodes des week-ends durant lesquelles la température intérieure se stabilise sur des paliers. Cependant, elles durent plus longtemps que dans le cas précédent (de 8 h à 15 h, où les températures atteignent  $17,0^{\circ}\text{C}$  et  $15,9^{\circ}\text{C}$  respectivement le samedi et le dimanche, dans les deux cas d'aménagement). Le gain des trois heures d'équilibre thermique peut s'expliquer par l'augmentation des apports externes ( $T_F$  passant de 35,1% à 37,4%) et une moindre inertie.  $Cp$  passant de  $2,71\text{m}^3.\text{m}^{-2}$  à  $3,30\text{m}^3.\text{m}^{-2}$ , la surface totale d'enveloppe diminue et en particulier celle du plancher bas en contact direct avec le sol ; l'inertie peut alors être estimée plus faible. Ainsi, le bâtiment 2 est plus influencé que le bâtiment 1 par les sollicitations externes.

L'histogramme des charges horaires suit également le même type d'évolution journalière, avec la distinction du profil pour chaque demi-journée, et hebdomadaire, avec la décroissance globale des puissances du lundi au vendredi.

La comparaison entre les modes d'aménagement A et B ne nous fournit pas véritablement d'éléments objectifs pour statuer sur l'intérêt de l'un ou l'autre en hiver. La consommation hebdomadaire dans le cas 1 est de  $2433\text{ kWh}$  alors qu'elle est de  $2418\text{ kWh}$  dans le cas 2, soit des valeurs quasiment identiques.

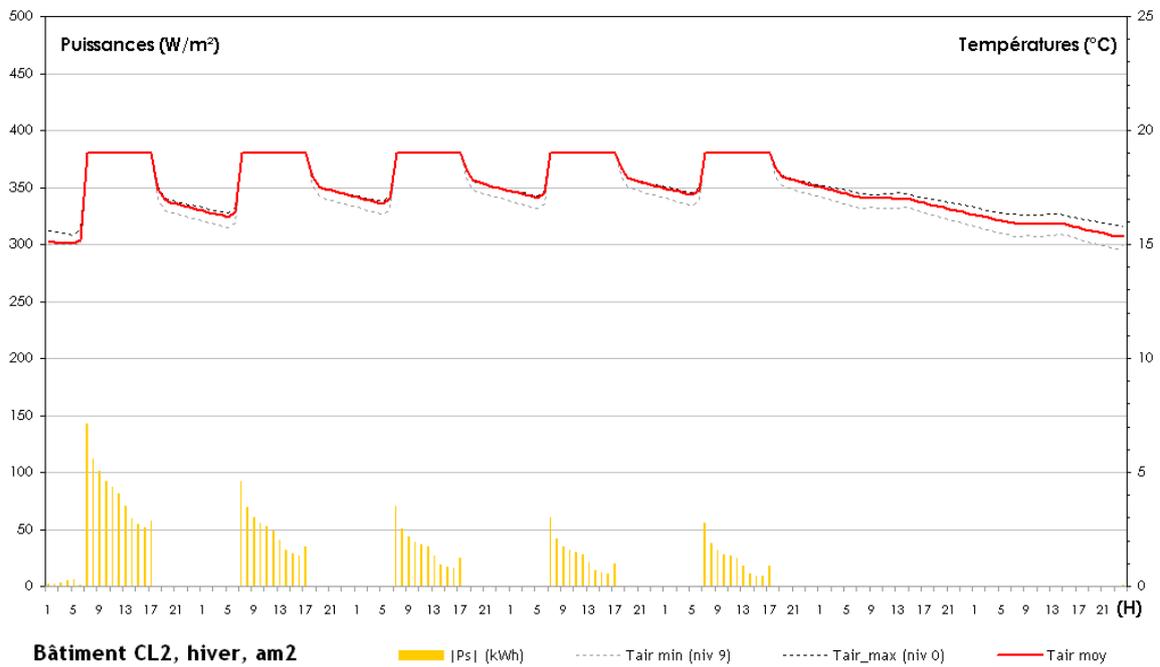
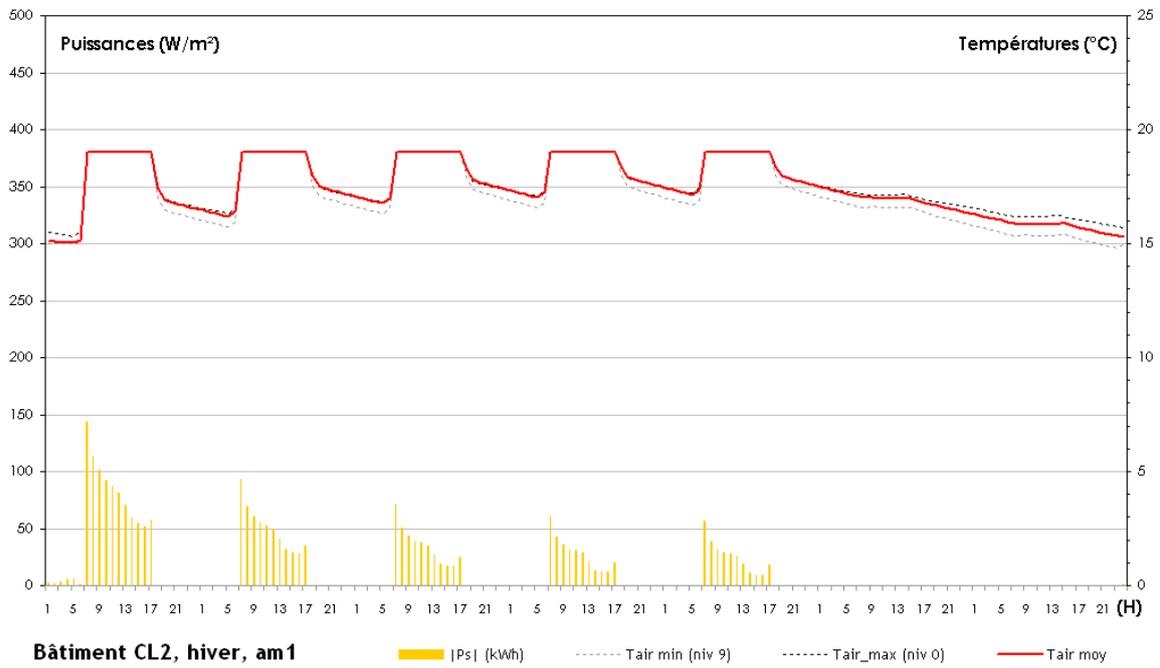


Figure 4.13 : Évolution des températures intérieures d'air et des charges sensibles de chauffage du bâtiment 2, cas hiver, aménagement A (en haut) et B (en bas)

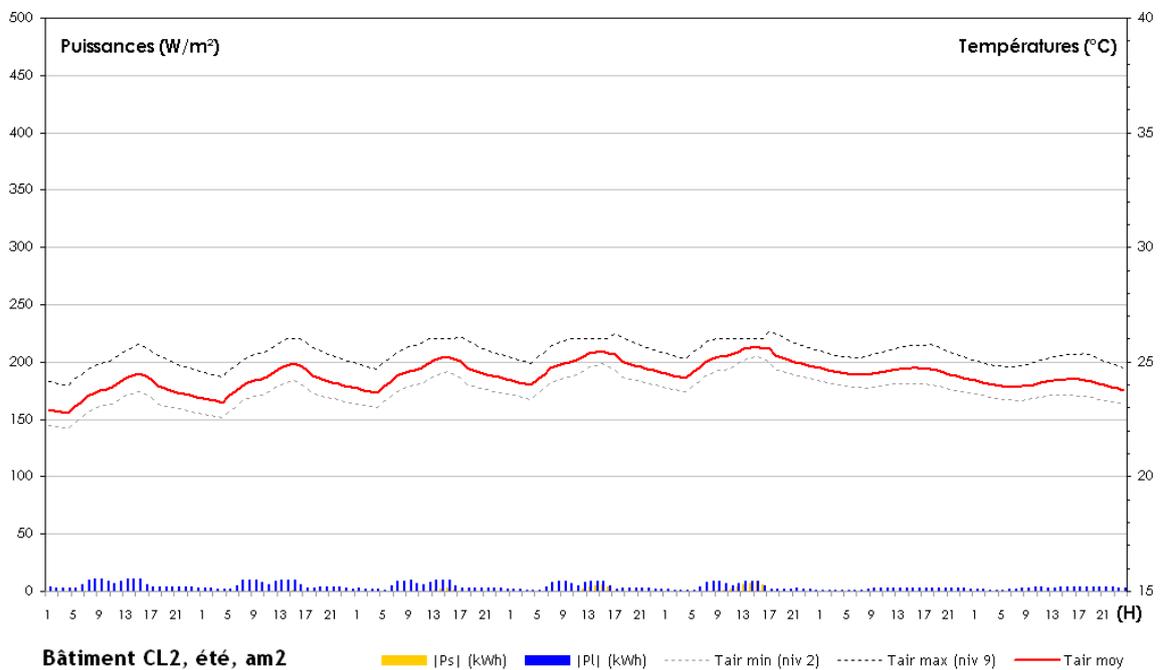
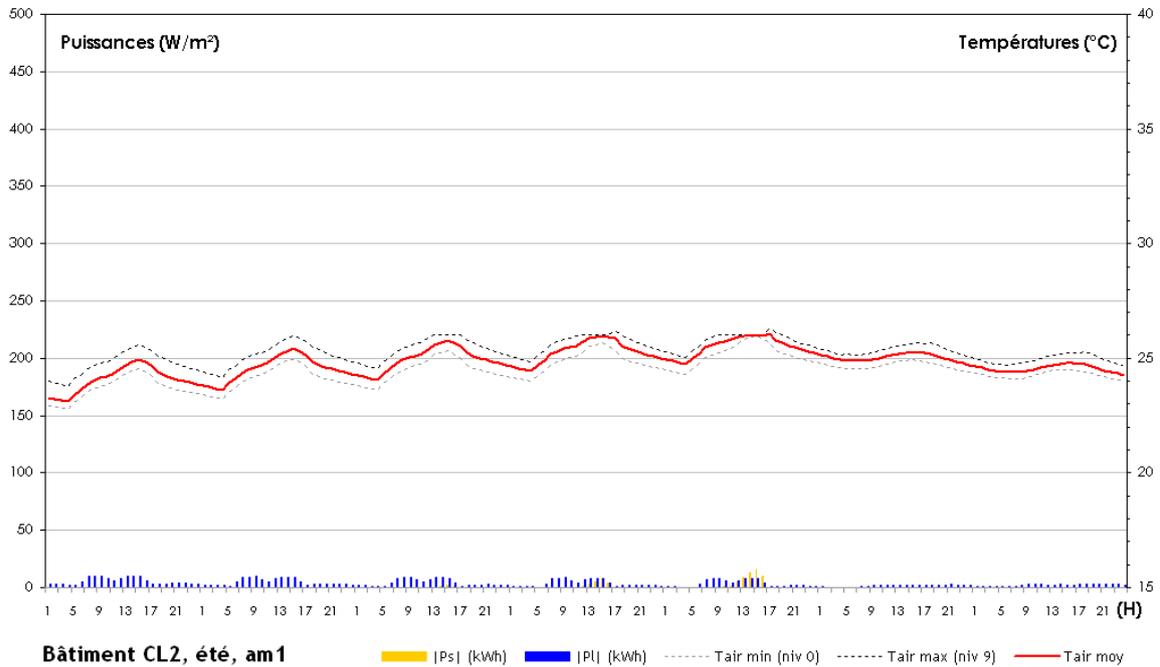
➤ *Cas été*

Sur la figure 4.14, nous constatons que les températures de l'air intérieur oscillent entre  $23^{\circ}\text{C}$  et  $26,3^{\circ}\text{C}$  (en dehors de la période d'occupation) pour le cas de l'aménagement A et entre  $22,8^{\circ}\text{C}$  et  $26,3^{\circ}\text{C}$  pour le cas de l'aménagement B. La température de consigne n'est presque jamais atteinte pendant les périodes d'occupation : au niveau 9 du bâtiment, la climatisation n'est activée que du mercredi au vendredi, alors qu'au niveau 0, elle n'est jamais active ( $T_{air_{max}(niv0)} = 25,8^{\circ}\text{C}$  et  $T_{air_{max}(niv2)} = 25,2^{\circ}\text{C}$  dans les cas d'aménagement A et B respectivement). L'allure des courbes est assez similaire à celle vue précédemment, toutefois le décalage entre les températures minimales et maximales sont plus importants que pour les simulations du bâtiment 1. Nous relevons un écart moyen entre ces courbes de  $0,8^{\circ}\text{C}$  pour le cas de l'aménagement A. Cet écart est beaucoup plus prononcé dans le cas de l'aménagement B et atteint  $1,7^{\circ}\text{C}$ . Ceci est provoqué par une baisse de la température minimale, au niveau 2, où les effets microclimatiques d'ombrage et de réduction locale de la température d'air peuvent être imputés aux alignements d'arbres, en façade Sud et Est. Ceci ne concerne que les étages en dessous de 15 m, du fait de la hauteur limitée des arbres.

Les puissances sensibles de climatisation sont très faibles, voire quasiment nulles la plupart du temps. Elles n'interviennent que du mercredi au vendredi et ceci uniquement pour l'après-midi. Elles sont tout le temps inférieures aux puissances latentes et pourraient en quelque sorte ne pas être délivrées au dépend d'une température d'air légèrement au delà de  $26^{\circ}\text{C}$  pour les étages supérieurs de l'immeuble. Le scénario de l'aménagement B montre une meilleure disposition à l'économie d'énergie par rapport au cas A, en particulier pour la journée du vendredi. Le bâtiment se charge moins rapidement de chaleur avec un tel environnement urbain. Cette observation est confirmée en comparant les bâtiments 1 et 2 dans le cas de l'aménagement B :

- pour le bâtiment 1, le déclenchement de la climatisation n'intervient qu'à partir du jeudi avec une durée cumulée de fonctionnement de  $10h$ , pour un pic de puissance de  $15,1\text{ kW}$  et une consommation d'énergie sensible hebdomadaire de  $67,7\text{ kWh}$  ;
- pour le bâtiment 2, le déclenchement de la climatisation intervient à partir du mardi avec une durée cumulée de fonctionnement de  $23h$ , pour un pic de puissance de  $8,4\text{ kW}$  et une consommation d'énergie sensible hebdomadaire de  $64,9\text{ kWh}$ .

Ainsi, pour une consommation d'énergie hebdomadaire équivalente, la puissance de climatisation à installer est environ moitié moindre.



**Figure 4.14 :** Évolution des températures intérieures d'air et des charges totales de climatisation du bâtiment 2, cas été, aménagement A (en haut) et B (en bas)

### Bâtiment 3

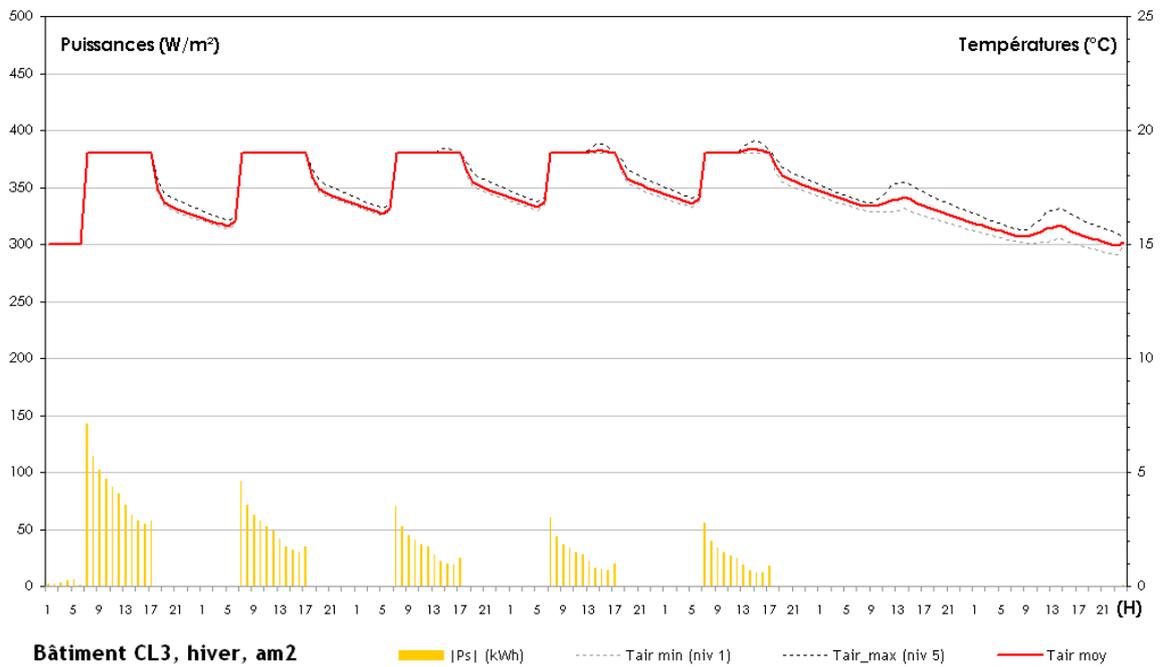
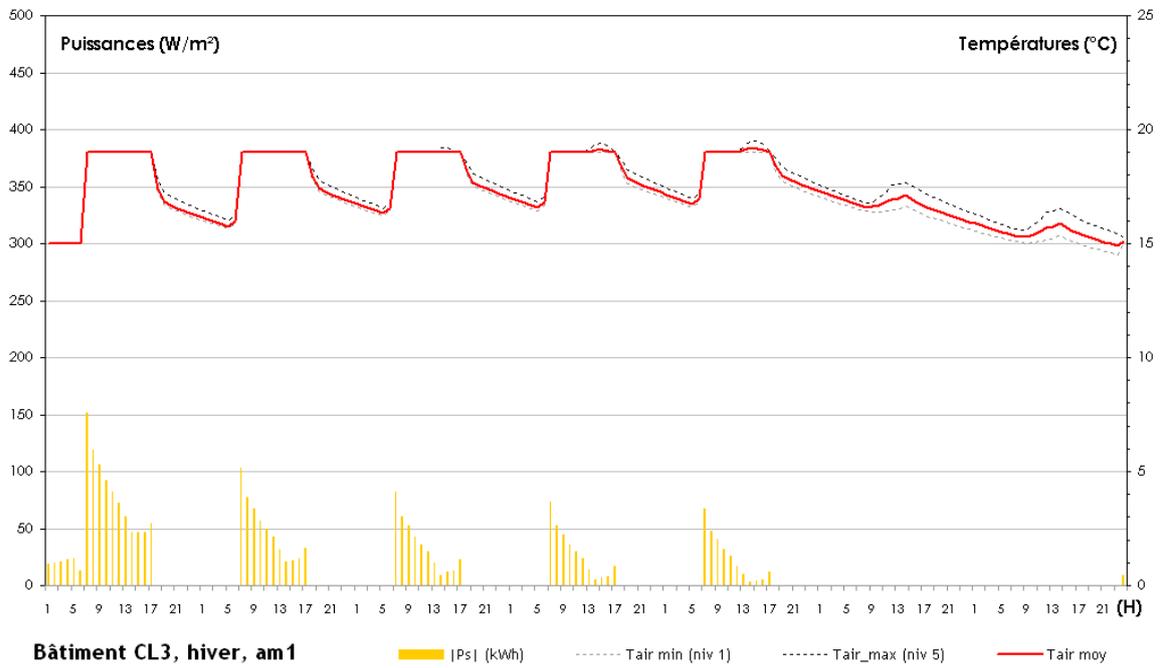
#### ➤ *Cas hiver*

Que ce soit pour les configurations d'aménagement A ou B, les courbes de température de l'air intérieur démarrent à la température de  $15^{\circ}\text{C}$ , imposée au minimum par le système de chauffage (voir figure 4.15). Ensuite, durant les cycles alternés d'occupation et d'inoccupation, les températures nocturnes redescendent plus bas que dans les deux cas précédents, sans pour autant atteindre la consigne basse. La particularité de ce cas par rapport aux précédents est qu'à partir du mercredi, l'apport de chauffage n'est plus nécessaire pour atteindre les  $19^{\circ}\text{C}$ , durant la période comprise entre 14h et 16h pour les niveaux 4 et 5 le mercredi, entre 14h et 17h pour les niveaux 4, 5 et 6 le jeudi et entre 12h et 17h pour les niveaux 3, 4, 5 et 6 le vendredi. Les critères de la classe des bâtiments seulement performants l'hiver, sont alors vérifiés en comparant ce bâtiment aux autres cas. Cette constatation est renforcée par l'évolution des températures en régime libre pendant le week-end. Alors que dans les deux cas précédents, les courbes de température restaient constantes durant la mi-journée, nous observons ici des hausses de température entre 9h et 14h qui diminuent la chute globale de température entre le début et la fin du week-end. Cette particularité renforce également le fait que le fonctionnement des étages est assez différencié, avec une amplitude de température assez importante entre les niveaux 1 et 5.

L'allure des histogrammes de puissance est similaire à celle des cas précédents. Nous pouvons tout de même souligner qu'entre le cas d'aménagement A et B, la décroissance horaire des puissances délivrées pendant les heures de travail est différente.

- pour l'aménagement A, après le pic délivré à 7h, la décroissance en puissance est très abrupte et quasiment linéaire jusqu'à 14h, avant que la demande de chauffage n'augmente à nouveau jusqu'à 17h
- pour l'aménagement B, nous retrouvons une allure d'histogramme plus proche des cas précédents avec une décroissance en deux parties, à savoir une stabilisation de la demande autour de midi puis une nouvelle décroissance en début d'après midi.

Ceci peut être dû aux filtres solaires résiduels constitués par les branches des arbres, empêchant la transmission d'une partie des apports solaires gratuits dans les bâtiments. Si les aspects dynamiques de la demande de chauffage varient faiblement d'un cas d'aménagement à un autre, la consommation totale hebdomadaire est en tout cas quasi-équivalente avec  $2487\text{ kWh}$  pour le scénario 1 et  $2500\text{ kWh}$  pour le cas de l'aménagement B. Nous concluons que le bâtiment 3 ne démontre pas une économie notable réalisée sur les consommations de chauffage, par rapport au bâtiment 2, théoriquement moins performant l'hiver, puisqu'on reste dans les mêmes ordres de grandeur que les consommations observées précédemment.

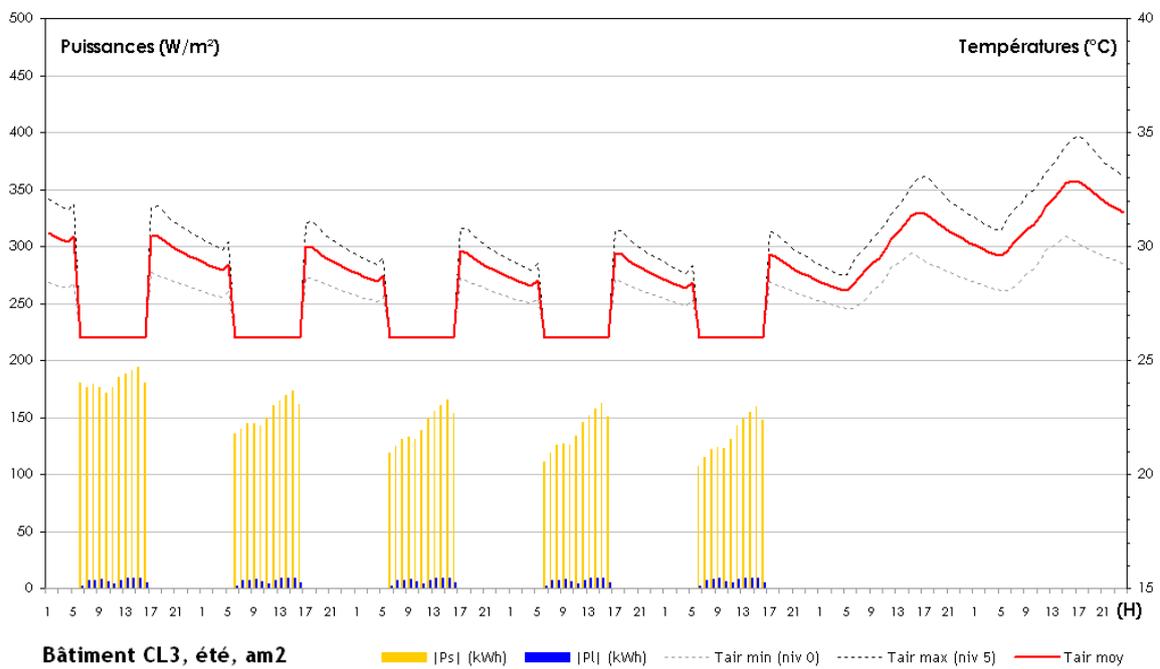
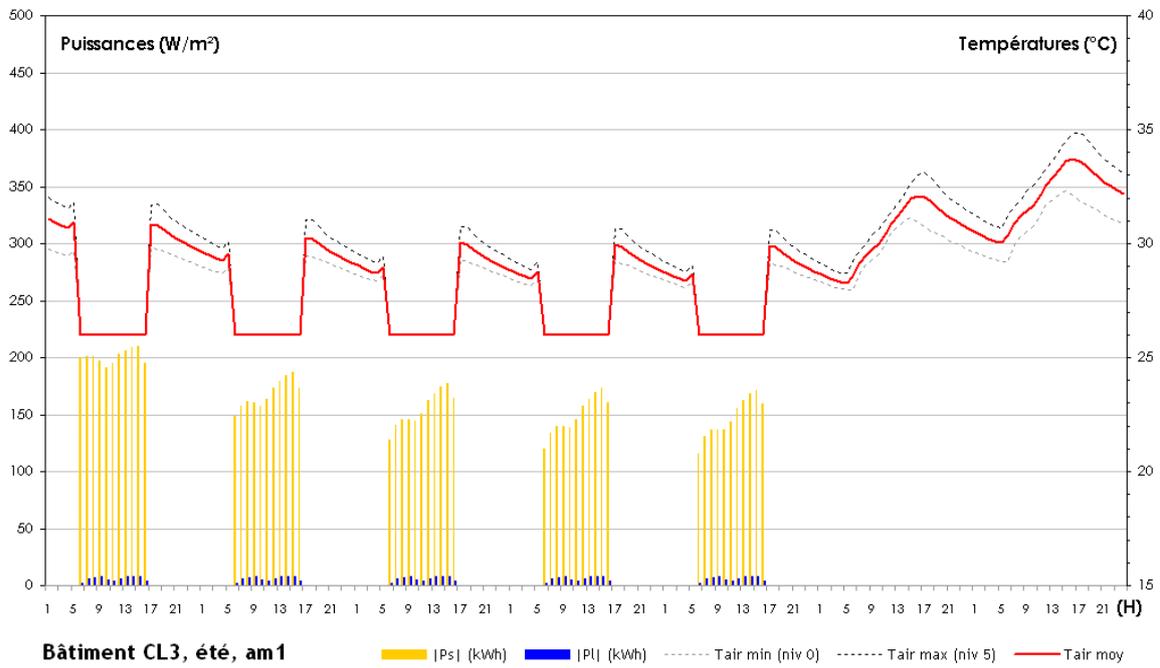


**Figure 4.15 :** Évolution des températures intérieures d'air et des charges sensibles de chauffage du bâtiment 3, cas hiver, aménagement A (en haut) et B (en bas)

➤ *Cas été*

Si l'analyse de la figure 4.15 ne faisait pas ressortir une amélioration de la performance thermique en hiver, la dégradation de celle d'été est en revanche incontestable. En effet, comme nous le voyons sur la figure 4.16, le recours à la climatisation est nécessaire et substantiel pendant les périodes occupées. Ceci nous donne alors des températures maintenues à  $26^{\circ}\text{C}$  entre 6 h et 16 h (solaires) du lundi au vendredi et l'augmentation subite de celles-ci pendant la période inoccupée. Les maxima de température sont obtenus pour l'horaire de 17 h et ceux-ci ont tendance à diminuer au cours de la semaine : ( $T_{air_{moy18h(lundi)}} = 30,8^{\circ}\text{C}$  et  $T_{air_{moy18h(vendredi)}} = 29,9^{\circ}\text{C}$ ). Les températures d'air en régime libre nocturne diminuent d'environ  $1,5^{\circ}\text{C}$  entre 17 h et 5 h le lendemain. Lors de l'évolution libre du samedi et du dimanche, le niveau moyen des températures de l'air intérieur est en augmentation constante avec une amplitude jour-nuit très marquée. Les minima et les maxima sont respectivement obtenus pour 5 h et 16 h, ce qui correspond à un déphasage de 1 h avec ceux de la température de l'air extérieur (voir figure 3.14). En confrontant les résultats calculés pour chaque cas d'aménagement, nous observons que la différence réside essentiellement sur les étages ayant les températures les plus faibles. La figure 4.16 montre que pour le niveau 0, la température de l'air est en moyenne de  $0,7^{\circ}\text{C}$  inférieure dans le cas B; ceci probablement en raison de l'effet de rafraîchissement passif de la végétation à basse altitude. La répercussion sur la température moyenne de l'air du bâtiment est une réduction d'environ  $0,3^{\circ}\text{C}$  pendant les périodes d'inoccupation.

Contrairement aux deux bâtiments précédents, la charge sensible de climatisation est déjà très importante en début de semaine, puisque le bâtiment accumule beaucoup d'énergie durant le week-end. Ainsi, les consommations vont en décroissant au fil de la semaine. L'évolution journalière des puissances sensibles suit le scénario des charges internes, avec la « double parabole » relative aux scénarios des deux demi-journées. Toutefois, les charges de l'après-midi sont amplifiées par les conditions climatiques. Cette distinction entre matinée et après-midi se renforce journée après journée. les puissances sensibles sont systématiquement plus faibles dans le cas d'aménagement B. Les puissances latentes quant à elles s'annulent entre les périodes d'occupation, du fait de l'augmentation de la température intérieure qui diminue le niveau de l'humidité relative. L'aménagement B nécessite une déshumidification plus forte, certainement pour les mêmes raisons que celles présumées pour les cas d'été du bâtiment 1.



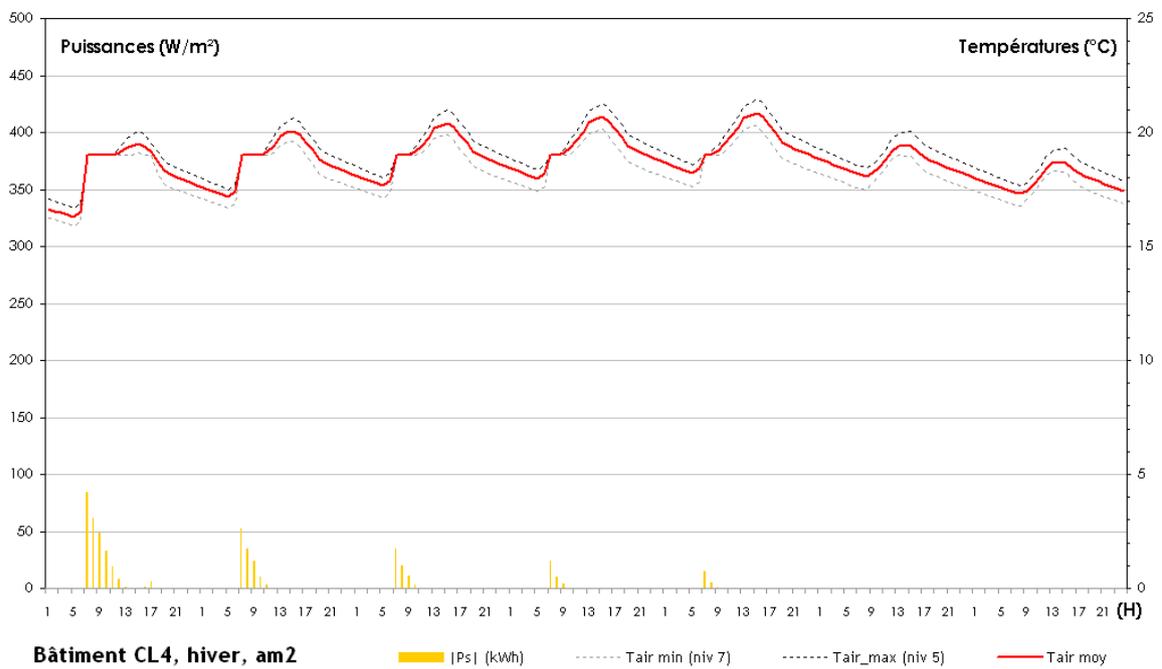
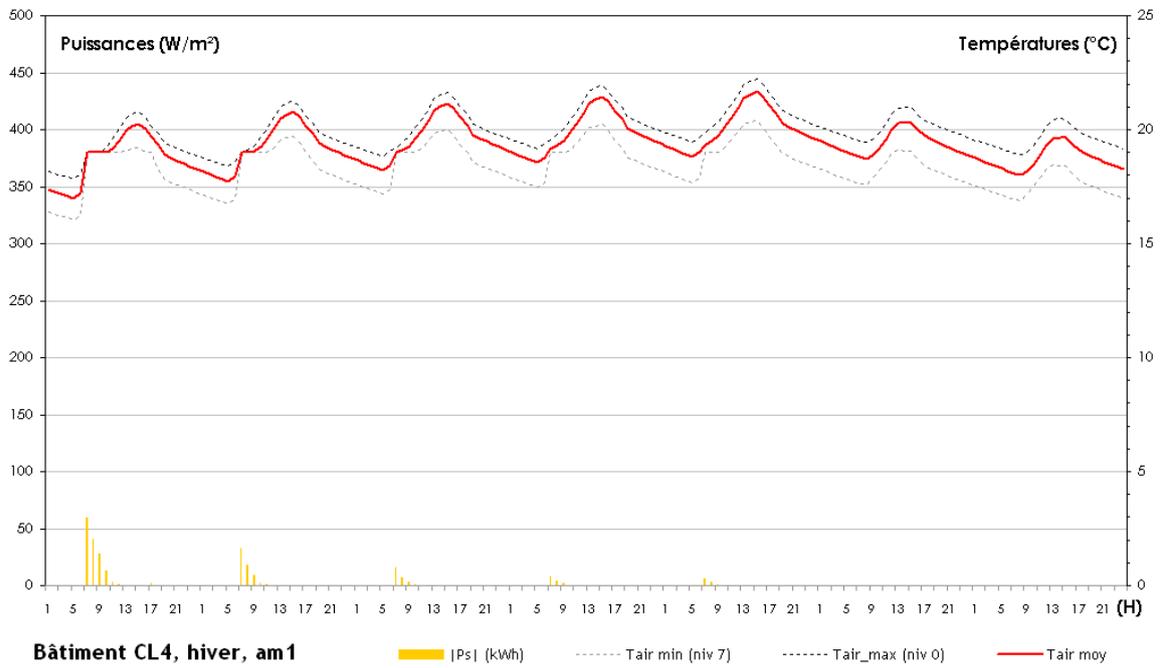
**Figure 4.16 :** Évolution des températures intérieures d'air et des charges totales de climatisation du bâtiment 3, cas été, aménagement A (en haut) et B (en bas)

## Bâtiment 4

### ➤ *Cas hiver*

Parmi tous les résultats de simulation en hiver, ce cas est sûrement le plus surprenant. En effet le bâtiment 4 est sensé être représentatif d'un bâtiment non performant quelle que soit la saison. Or, d'après la figure 4.17, pour la saison de chauffe, il apparaît que les besoins sont négligeables puisque les températures dépassent assez largement la température de confort fixée à  $19^{\circ}C$  la plupart du temps d'occupation. Au 7ème niveau, les températures peuvent même atteindre  $22,2^{\circ}C$  et  $21,5^{\circ}C$  respectivement pour le scénario d'aménagement A et B. Pour le cas de l'aménagement A, l'écart entre les températures d'étage est plus important que pour le B.

Les consommations de chauffage dans ces conditions sont très faibles et ne concernent que le début de matinée, où l'approvisionnement en chaleur sert à combler la perte minimale d'énergie nocturne. La différence de consommation est très importante par rapport au trois bâtiments précédents puisqu'on réduit celle-ci de près d'un facteur 10, avec  $260 kWh$  pour le cas de l'aménagement A et  $513 kWh$  pour le B. La construction du bâtiment n'est pas responsable de ce comportement mais nous pouvons l'expliquer en partie par l'inexistence de masques proches obstruant le rayonnement solaire sur la façade Sud. D'autres phénomènes microclimatiques peuvent être à l'origine de ce comportement et nous approfondirons les explications dans une partie suivante.

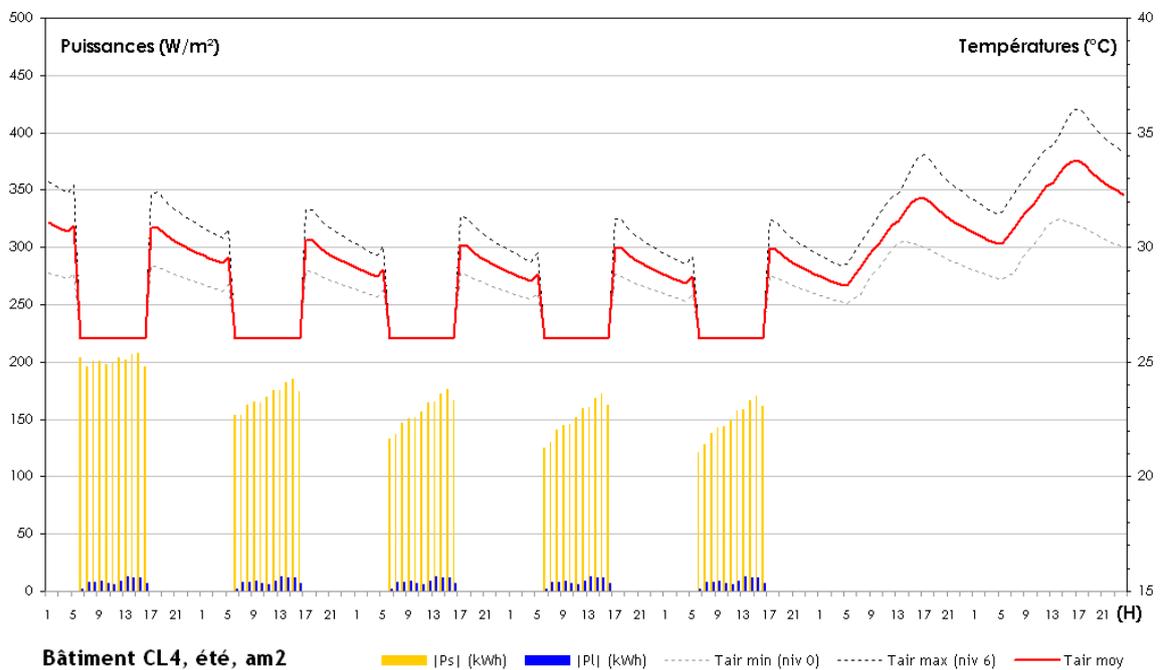
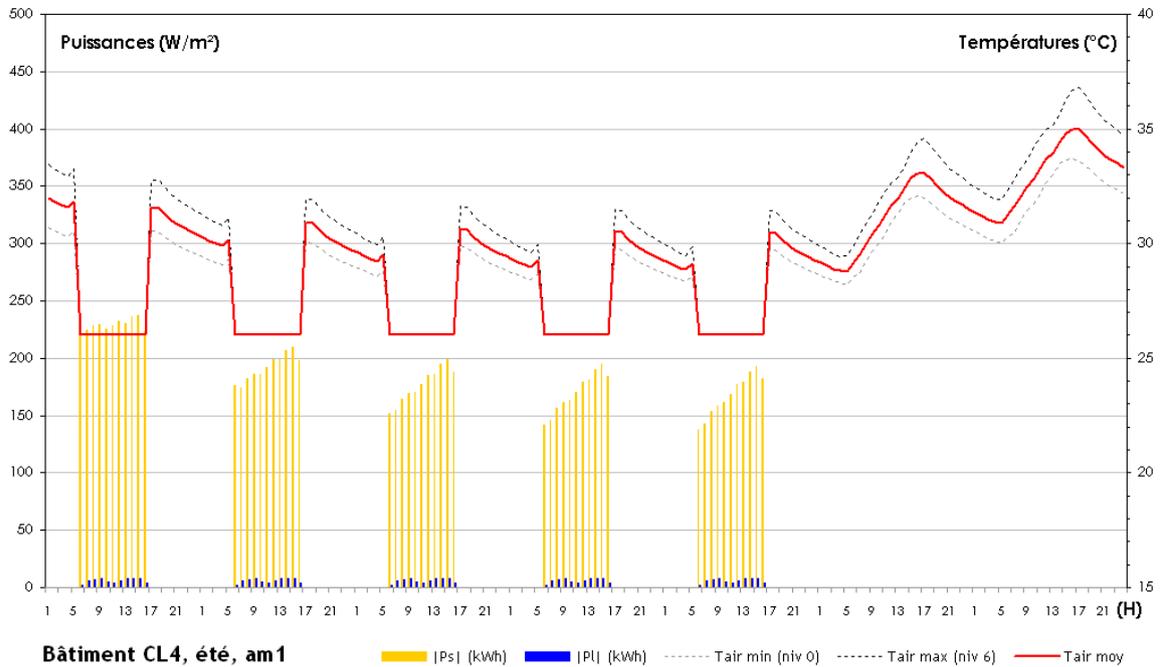


**Figure 4.17 :** Évolution des températures intérieures d'air et des charges sensibles de chauffage du bâtiment 4, cas hiver, aménagement A (en haut) et B (en bas)

➤ *Cas été*

Les deux simulations d'été du bâtiment 4 (figure 4.18) sont quasiment équivalentes à celle du bâtiment 3 (figure 4.16) au niveau des scénarios de température. A la différence près que les températures maximales atteintes dépassent les précédentes : au niveau 6, la température d'air atteint au maximum  $36,8^{\circ}C$  et  $36,1^{\circ}C$  pour le cas d'aménagement A et B respectivement. Comme pour le cas précédent, le type d'aménagement urbain se répercute sur les différences de température suivant les étages avec des températures plus faibles observées pour les niveaux plus près du sol.

L'histogramme des puissances montre, dans les deux cas d'aménagement, que le bâtiment 4 est de loin le plus énergivore avec des puissances sensibles en moyenne 14,3 % supérieures à celles simulées pour le bâtiment 3. Le comportement des puissances latentes est quant à lui identique.



**Figure 4.18 :** Évolution des températures intérieures d'air et des charges totales de climatisation du bâtiment 4, cas été, aménagement A (en haut) et B (en bas)

### Bilan des consommations énergétiques

Pour la semaine d'hiver, nous établissons un diagramme comparant la consommation de chauffage de tous les bâtiments suivant les deux types d'aménagements simulés (figure 4.19). Les bâtiments 1, 2 et 3 ont approximativement la même demande de chauffage<sup>2</sup> comprise entre 800 et 900  $Wh.m^{-2}$ . Comme le laissaient pressentir les graphes précédents, le passage de l'aménagement urbain minéral à l'aménagement urbain végétal ne modifie que de manière négligeable les consommations de chauffage, en particulier pour les bâtiments 2 et 3 ; l'économie réalisée pour le bâtiment 1 s'élevant à seulement à 44  $Wh.m^{-2}$ . Cependant, un cas parmi les quatre se démarque. Les consommations de chauffage du bâtiment 4, supposé être un exemple de la classe des bâtiments non performants pendant les deux saisons, sont en effet près de dix fois plus faibles que celles des autres bâtiments, soit 87  $Wh.m^{-2}$  pour la simulation avec l'aménagement A. Pour ce même bâtiment, le passage à l'aménagement B double quasiment ses consommations (171  $Wh.m^{-2}$ ). C'est le cas où la variation relative, et même absolue, entre les deux modes d'aménagement est la plus importante. Ainsi, l'analyse globale d'hiver permet de tirer deux points de conclusion immédiats :

- la distance entre la théorie et la pratique concernant les trois indicateurs climatiques conduit à des différences importantes entre prévision de consommations et consommations effectives, en valeurs relatives d'une classe à une autre ;
- l'impact de l'aménagement urbain, dans une morphologie de bâtiments établie, n'est effectif que pour les bâtiments ayant une consommation faible.

On s'appuiera sur d'autres éléments que les consommations pour approfondir ces observations : la comparaison entre ces simulations couplées et les simulations théoriques correspondantes, puis l'analyse des paramètres microclimatiques effectifs obtenus dans les simulations couplées constitueront d'ailleurs les deux prochaines parties.

Nous réalisons le même type de graphe pour le cas de l'été, à la différence près que nous détaillons ici les consommations en part d'énergie sensible et d'énergie latente (figure 4.20). Les valeurs des charges sensibles des bâtiments 3 et 4 ont un ordre de grandeur 10 à 100 fois supérieur à celui des bâtiments 1 et 2, ce qui semble justifier voire amplifier les caractéristiques de performance des classes les unes par rapport aux autres. La tendance s'inverse pour les charges latentes, où les ordres de grandeur sont les mêmes pour les quatre bâtiments, avec même une légère augmentation de celles des bâtiments 1 et 2 par rapport aux 3 et 4. C'est l'inverse pour les charges sensibles, où celles des bâtiments B Nord 11 et A Sud 2 sont d'un ordre de grandeur 10 à 100 fois supérieur.

Pour les quatre cas, le passage du cas d'aménagement A au cas B réduit systématiquement les charges sensibles et augmente toujours les charges latentes. En termes de consommations

---

<sup>2</sup>les consommations hebdomadaires sont exprimées en  $Wh.m^{-2}$  de plancher

totales, trois des quatre bâtiments bénéficient d'une réduction. Seul le bâtiment 2, pouvant quasiment assurer le confort sans apport de climatisation dans les deux cas d'aménagement, voit sa consommation totale augmenter en accord avec l'augmentation de la charge de déshumidification.

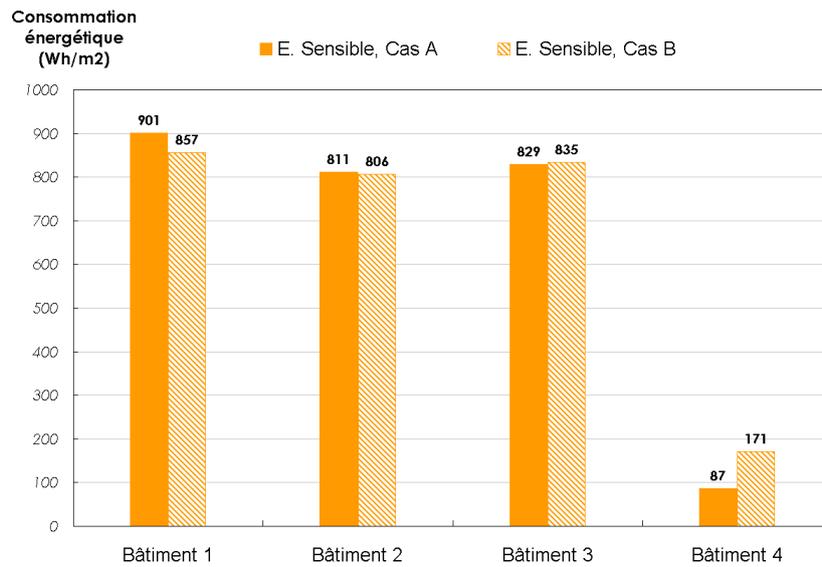


Figure 4.19 : Histogramme des consommations totales hebdomadaires d'hiver pour les 4 bâtiments

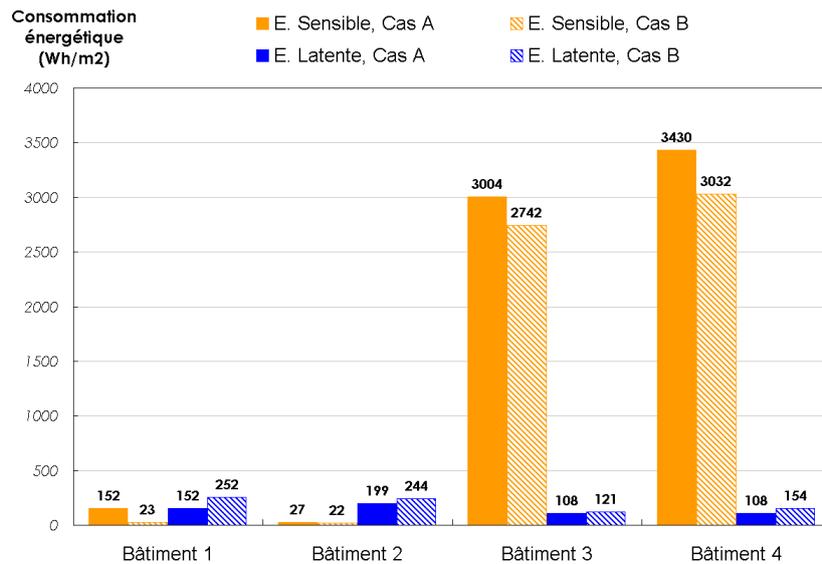


Figure 4.20 : Histogramme des consommations totales hebdomadaires d'été pour les 4 bâtiments

Pour compléter l'observation directe des consommations énergétiques hebdomadaires, nous proposons une analyse en fréquence des puissances fournies durant cette période. Nous avons constaté précédemment une influence du type de bâtiment et de l'aménagement urbain sur les consommations totales, en particulier l'été. Mais les histogrammes des puissances montrent que la quantité d'énergie délivrée n'est pas la même d'un jour à l'autre. Il est alors légitime d'évaluer les niveaux des puissances de chauffage ou de climatisation à installer, d'un bâtiment à un autre et d'un cas d'aménagement à un autre.

Nous donnons les fréquences cumulées des puissances en hiver et en été, respectivement sur les figures 4.21 et 4.22. Les fonctions de distribution en hiver apportent deux informations intéressantes :

- pour le bâtiment 3, malgré le peu de différence entre ses consommations totales calculées pour chaque mode d'aménagement, le passage à un aménagement végétal permet de réduire assez significativement la puissance maximale délivrée par le système de chauffage. Dans le cas de l'aménagement B, 55 kW sont nécessaires pour couvrir les besoins de chauffage à 90% du temps alors que 82 kW sont nécessaires pour l'aménagement A ;
- pour le bâtiment 4, nous avons aussi la possibilité de réduire le dimensionnement des systèmes mais en passant dans ce cas de l'aménagement B à A. 32 kW sont nécessaires pour couvrir les besoins de chauffage à 90% du temps pour l'aménagement A, alors que 52 kW sont nécessaires pour l'aménagement B.

Concernant les puissances de climatisation et pour tous les bâtiments, le passage à l'aménagement végétal déplace la gamme des puissances de climatisation vers les valeurs basses, conformément aux économies d'énergies réalisées sur la semaine. Ainsi, plus le bâtiment appartient à une classe prétendue non performante en été, plus l'aménagement végétal est susceptible d'avoir un rôle positif dans le dimensionnement des systèmes en diminuant la puissance maximale nécessaire.

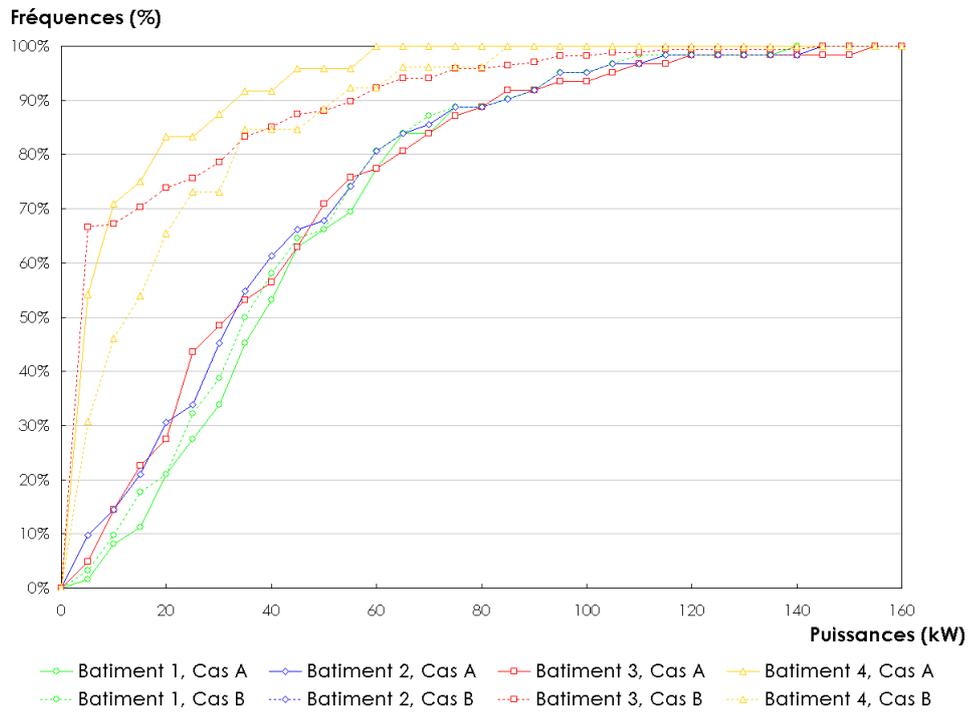


Figure 4.21 : Fréquences cumulées des puissances totales de chauffage

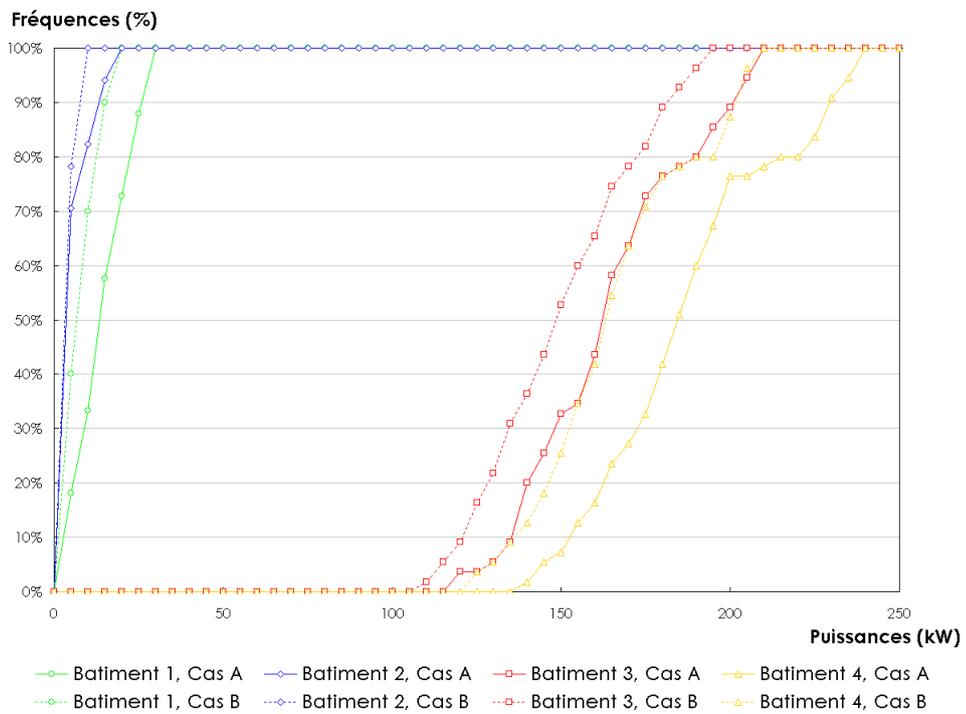


Figure 4.22 : Fréquences cumulées des puissances totales de climatisation

#### 4.6.2 Analyse de l'impact de la prise en compte des interactions bâtiment-microclimat dans les simulations énergétiques

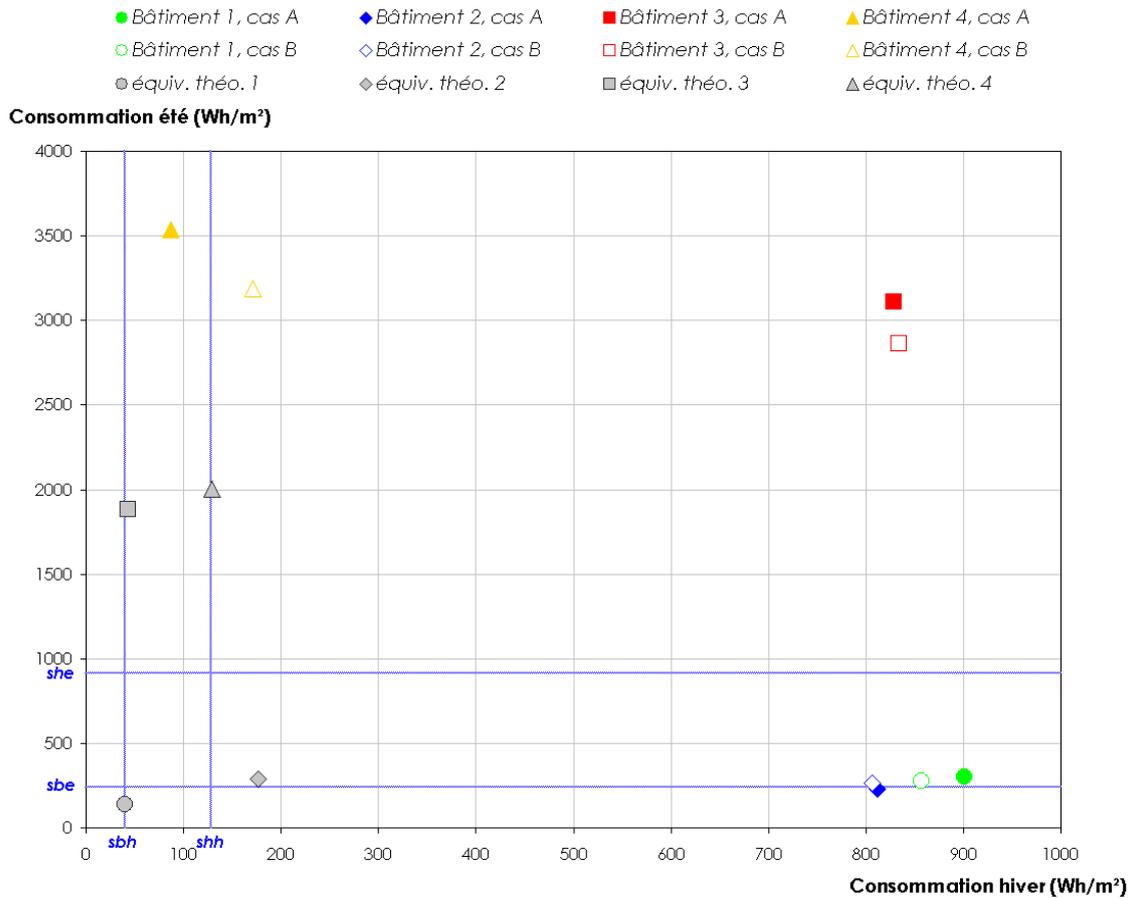
Un des objectifs majeurs de cette thèse était d'enrichir les modèles physiques et la technique d'interfaçage des outils **Solene** et **Fluent**, afin de prendre en compte l'influence de l'environnement urbain et des variables microclimatiques sur le calcul des consommations énergétiques d'un bâtiment. Nous nous proposons d'analyser l'influence de ce couplage microclimatique - thermique intérieure sur les résultats des simulations. Pour cela, nous comparons les résultats des simulations des huit cas d'étude (les quatre bâtiments dans deux contextes différents d'aménagement urbain) effectuées dans une configuration couplée, à quatre cas issus de simulations réalisées pour l'étude de sensibilité du chapitre précédent. Cette analyse est rendue possible par l'utilisation dans les deux parties de la thèse, de scénarios identiques des variables météorologiques de base, desquels dépendent nos classes énergétiques et par l'utilisation du même modèle thermique dynamique.

Les calculs énergétiques des quatre bâtiments théoriques en site isolé (simulations théoriques) sont réalisés avec des valeurs pour les trois paramètres constructifs ( $C_p$ ,  $Or$  et  $T_V$ ) et pour le taux de flux solaire ( $T_F$ ) donnés dans le tableau 4.3. Les deux autres paramètres climatiques sont homogènes sur l'enveloppe des bâtiments, et égaux aux valeurs des conditions aux limites météorologiques utilisées en entrée de la veine de simulation microclimatique en été et en hiver.

Le coefficient d'échange superficiel convectif est défini par rapport à la vitesse de référence du vent à 10 m, soit de  $3 \text{ m.s}^{-1}$  : l'équation 2.88 nous donne alors  $h_c = 10,95 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$ . Cette valeur est légèrement supérieure à la borne maximale de l'intervalle de sélection associé à la classe 1 ( $7,7 \text{ W/K.m}^2$ ), et légèrement inférieure à la borne minimale de l'intervalle de sélection associé à la classe 4 ( $11,8 \text{ W/K.m}^2$ ).

La température d'air suit le scénario météorologique horaire de référence, ainsi  $\Delta T = 0^\circ\text{C}$ . Cette valeur théorique, est tantôt légèrement inférieure aux intervalles de définition, pour les classes 1 et 3 respectivement définis entre  $0,3$  et  $3^\circ\text{C}$  et  $0,2$  et  $3^\circ\text{C}$ , et tantôt légèrement supérieure, pour les classes 2 et 4 respectivement définis entre  $-3$  et  $-0,52^\circ\text{C}$  et  $-3$  et  $-0,5^\circ\text{C}$ . Ces petites différences ne nuisent pas à notre analyse car il s'agit essentiellement d'une comparaison entre simulation théorique et simulation couplée, les classes énergétiques n'étant à la base qu'un moyen de discrimination des bâtiments entre eux.

Nous restituons les résultats des huit configurations simulées précédemment sur le graphe de la figure 4.23 où l'axe des ordonnées représente les consommations énergétiques totales d'été, et l'axe des abscisses, les consommations énergétiques hiver. A ces huit points, nous ajoutons les quatre points obtenus par la simulation théorique des bâtiments équivalents.



**Figure 4.23 :** Répartition des cas simulés dans le diagramme des classes avec identification des cas les plus proches de l'étude de sensibilité

A la lecture du graphe, nous constatons en premier lieu que les quatre points des simulations énergétiques des bâtiments selon la description théorique de l'environnement est cohérente avec la définition des classes par les seuils énergétiques. Même si la position des points par rapport aux quatre seuils (*sbh* : seuil bas hiver ; *shh* : seuil haut hiver ; *sbe* : seuil bas été ; *she* : seuil haut été) n'est pas rigoureusement respectée pour chaque cas, le zonage et la position relative des points entre eux sont vérifiés. Seul, le bâtiment théorique similaire au 1 dépasse le seuil bas été de  $49 \text{ Wh.m}^{-2}$ , et le bâtiment théorique similaire au 3 dépasse le seuil bas hiver de  $3 \text{ Wh.m}^{-2}$ . Ceci est dû, d'une part, à l'incertitude qui existe dans la définition des intervalles de confiance à partir des fonctions de distribution des paramètres qui n'intègrent pas toutes les valeurs résiduelles d'un point de vue statistique. D'autre part, le non respect de la valeur de  $\Delta T$  peut jouer un rôle important du fait de son poids dans la hiérarchisation de la sensibilité énergétique des bâtiments (2<sup>e</sup> au classement arbitraire du tableau 3.4). La tendance qui associe les faibles compacités aux bâtiments performants toutes saisons est également confirmée par la simulation du bâtiment théorique similaire au 4 qui vient se positionner dans

le quadrant au-dessous des deux seuils  $sbh$  et  $sbe$ . Globalement, la position des quatre points est d'avantage concentrée vers les basses consommations, n'excédant pas  $200 Wh.m^2$  en hiver et  $2000 Wh.m^2$  en été. Ces quatre simulations démontrent la fidélité de la méthode d'étude de sensibilité multicritère utilisée dans ce travail, en vérifiant la reproductibilité des valeurs des consommations énergétiques pour une batterie d'indicateurs constructifs et climatiques préalablement définis.

Le remplacement des huit cas d'étude dans le graphe des classes soulève plusieurs remarques. En effet, chaque point résultant d'une simulation couplée montre un décalage important avec sa simulation théorique associée, qui peut s'apparenter à un changement de classe.

Les bâtiments 1, 2 et 3 montrent des consommations d'hiver bien plus importantes que celles des configurations théoriques correspondantes, avec des valeurs augmentées de  $600 Wh.m^{-2}$  au minimum. Si ce comportement ne modifie pas théoriquement la classe du bâtiment 2, il dégrade le bâtiment 1 de la classe 1 vers 2 et le bâtiment 3 de la classe 3 vers 4. Seuls les points associés au bâtiment 4 restent dans l'ordre de grandeur de l'équivalent théorique.

Le calcul des consommations de climatisation donne des résultats équivalents entre la procédure théorique et la procédure couplée pour les bâtiments supposés économes (classes 1 et 2), alors que pour les bâtiments supposés non performants pendant cette saison (classes 3 et 4), la procédure de calcul théorique sous-évalue les consommations en prenant en compte l'environnement microclimatique. L'écart entre les points théoriques et microclimatiques est de près de  $1500 Wh.m^{-2}$ , soit presque un passage du simple au double pour les deux cas.

Ces tendances de base mises en évidence contestent la validité des classes énergétiques pour des bâtiments en site urbain réel. En effet, les gammes de consommations sont plus élevées à la fois en été mais surtout en hiver, et les bâtiments ne respectent plus entre eux la même hiérarchie en terme de performance. Par rapport aux seuils, seuls les bâtiments 2 et 4 ont une position relative correcte. En hiver, le bâtiment 1 devient moins performant que le bâtiment 2 alors que ce devrait être l'inverse. Le même constat, encore plus flagrant et déjà relevé sur l'histogramme de la figure 4.19, est fait pour le bâtiment 3 par rapport au bâtiment 4. Plusieurs phénomènes sont à l'origine des écarts énergétiques constatés entre les simulations sans et avec prise en compte de l'environnement urbain et du microclimat :

- le surplus de consommation d'hiver pour les simulations couplées est occasionné en grande partie par l'existence de masques permanents, dus aux bâtiments, non pris en compte par l'intégration d'un taux de flux solaire appliqué à l'hiver dans la description paramétrique des bâtiments de classe théoriques ;

- les modifications des variables microclimatiques telles que la température d’air, l’humidité et les coefficients d’échange superficiel convectif ne sont pas pris en compte dans les simulations paramétriques ;
  - les échanges radiatifs IRT ne sont pas pris en compte dans les simulations paramétriques, si bien qu’en hiver, la déperdition nocturne par échange avec le ciel, ou en été, les apports par les surfaces urbaines chaudes, ne peuvent pas amener un surplus de consommation.
- Finalement, la simulation des consommations énergétiques par couplage microclimatique en site urbain a un effet d’augmentation des consommations énergétiques.

En ce qui concerne l’impact des aménagements, les écarts énergétiques relevés entre les points sont assez faibles, et pour le plus souvent en deçà d’un écart nécessaire pour changer la classe du bâtiment. Le seul cas qui échappe à cette règle est le bâtiment 4, pour lequel l’écart des consommations de chauffage entre les deux modes d’aménagement ( $84 Wh.m^{-2}$ ) est de l’ordre de grandeur de l’écart entre les deux seuils *sbh* et *shh* ( $88 Wh.m^{-2}$ ) et équivalent à un passage de la classe 4 à la classe 3. Ainsi, pour un même bâtiment, le passage d’une simulation avec des approximations théoriques du climat et de l’environnement bâti à une simulation couplée microclimatique-énergétique entraîne des écarts de consommations plus important que le passage d’une simulation couplée d’une configuration d’aménagement à une autre.

Pour conclure cette partie, la comparaison entre les bâtiments théoriques et leurs homologues implantés en site urbain montre de grandes différences. Non seulement les masques solaires non pris en compte, puisque non souhaités dans la conception, en hiver, mais aussi la modification et l’hétérogénéité des variables climatiques dues au contexte urbain, sont à l’origine de ces comportements. Approcher la simulation énergétique en milieu urbain par une simulation d’un bâtiment en site isolé modifié par une batterie de paramètres climatiques et constructifs n’est pas suffisant. Nous allons maintenant analyser de plus près le rôle des conditions microclimatiques réelles sur les consommations énergétiques des bâtiments, dans la prochaine et dernière partie du travail. Les variables microclimatiques seront observées plus finement dans l’environnement proche d’un des bâtiments afin de les comparer aux paramètres théoriques.

### 4.6.3 Analyse de l'influence des variables associées au microclimat

L'objectif de cette dernière partie est d'évaluer de manière plus approfondie l'impact énergétique des variables climatiques, liées à l'implantation du site d'étude dans le milieu urbain de la presqu'île de la Confluence et aux deux configurations d'aménagement des îlots urbains étudiés. La simulation couplée nous renseigne en effet sur l'hétérogénéité des variables microclimatiques dans la canopée urbaine et en particulier à l'interface bâtiment-air. Précédemment, les résultats présentés sur la figure 4.23 nous ont suggéré que la prise en compte du site pouvait modifier le classement d'un bâtiment par rapport aux seuils de consommations énergétiques théoriques. C'est pourquoi nous étudions plus finement les résultats des simulations associées au cas du bâtiment 3. L'intérêt de ce bâtiment est que sa consommation énergétique d'hiver obtenue par simulation couplée excède largement celle obtenue par simulation théorique en site isolé où les trois paramètres climatiques ( $T_F$ ,  $h_c$  et  $\Delta T$ ) traduisent les conditions météorologiques statistiques à l'échelle régionale ainsi que les masques solaires pour l'été. L'intérêt de cette étude est que l'impact énergétique des variables climatiques en hiver est rarement étudié dans les travaux présentés dans le chapitre 1.

Trois cas sont passés en revue afin d'alimenter la discussion :

1. En hiver, avec la configuration d'aménagement A, pour analyser les raisons du décalage entre théorie et simulation couplée. Le cas avec la configuration d'aménagement B n'est pas réétudié du fait de l'équivalence des consommations avec la configuration A.
2. En été, avec la configuration d'aménagement A, pour expliquer de la même façon la valeur supérieure de la consommation pour le rafraîchissement dans le cas de la simulation couplée.
3. En été, avec la configuration d'aménagement B, pour expliquer par rapport au cas précédent le rôle de l'aménagement dans la réduction des consommations d'énergie.

Notons que l'analyse détaillée concernera dans chacun des cas, que ce soit pour la saison d'été ou d'hiver, uniquement une journée, le 5<sup>e</sup> jour de la semaine type. C'est le dernier des jours ouvrés, celui où le régime des charges climatiques est le mieux établi en fonction du passé thermique du bâtiment. Cette analyse s'opérera sur des horaires choisis au cas par cas en fonction des données météorologiques saisonnières et en fonction des phénomènes à mettre en évidence et des spécificités de chaque configuration urbaine.

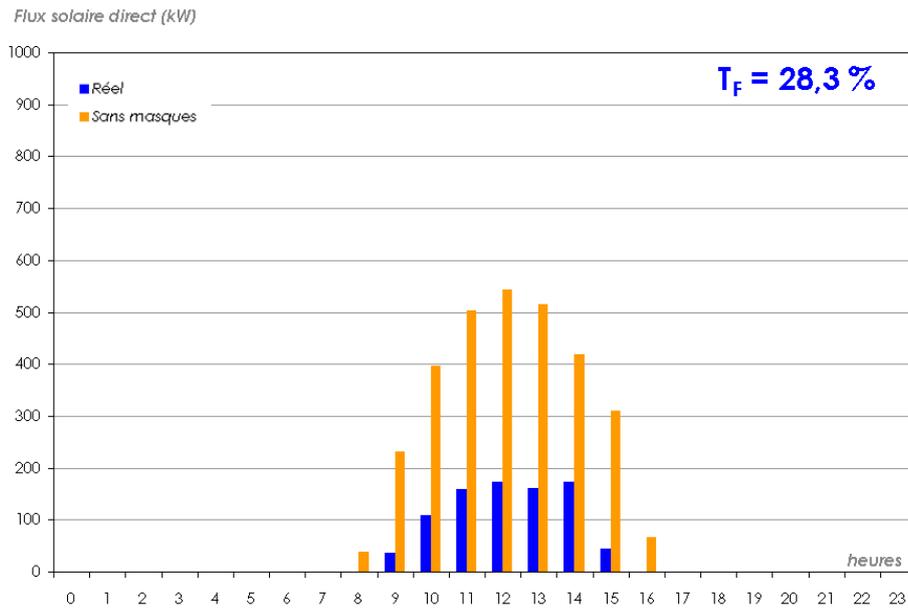
### Cas de la semaine d'hiver avec l'aménagement A

L'analyse détaillée des flux solaires passe par le calcul du taux de flux solaire pour la journée de référence d'hiver (figure 4.24). Il évalue l'impact des masques réels des îlots A et B et de l'environnement urbain contigu sur la quantité énergie solaire directe incidente atteignant l'enveloppe du bâtiment 3. La valeur du taux (28,3%) est très faible. Le bâtiment est ainsi privé de la majeure partie des apports énergétiques gratuits qui auraient pu venir limiter la demande de chauffage. Les rayons solaires faiblement inclinés en hiver ont une accessibilité réduite aux façades des bâtiments des îlots A et B en général, du fait des hauteurs importantes des bâtiments devant les distances caractéristiques des espaces intermédiaires. Le mode d'occupation des parcelles donne une impression de dé-densification, mais l'échelle des bâtiments, et leur disposition en plots, augmente la quantité d'ombres portées dans le projet. De plus, les parties Nord et les parties Sud de chaque îlot d'étude A et B, sont organisées en deux alignements parallèles de bâtiments, les alignements côté Sud constituent les masques solaires principaux des alignements côté Nord (dont fait partie le bâtiment 3). Toutes ces raisons expliquent le faible taux de flux solaire obtenu pour le bâtiment 3. C'est la cause première expliquant l'excédent de chauffage de la simulation couplée par rapport à la simulation théorique, qui utilisait implicitement un taux de 100%.

Pour en revenir aux autres bâtiments, le calcul du taux de flux solaire en hiver, pour le cas d'aménagement A, nous donne :

- pour le bâtiment 1 :  $T_F = 11,4\%$
- pour le bâtiment 2 :  $T_F = 61,1\%$
- pour le bâtiment 4 :  $T_F = 66,8\%$

Ces trois résultats confirment la prégnance du flux solaire dans le bilan d'énergie, où les comportements des bâtiment 1 et 4 par exemple sont inversés sur la figure 4.23 du au déficit de flux du 1 et à la bonne exposition du 4.



**Figure 4.24 :** Taux de flux solaire calculé pour le bâtiment 3, cas de la semaine hiver (Cas A)

La deuxième partie de l'analyse porte sur la température d'air simulée au niveau de la surface extérieure de l'enveloppe du bâtiment 3. Cette variable est sensée être déterminante au niveau des consommations énergétiques puisqu'elle concerne à la fois les déperditions par échanges convectifs et par renouvellement d'air. Les figures 4.25 et 4.26 montrent la différence entre la température d'air obtenue par simulation avec le couplage microclimatique<sup>3</sup> et la température d'air issue des statistiques météorologiques, à 6h et à 14h respectivement<sup>4</sup>. Pour 6h, l'instant où la température d'air météorologique est la plus froide au cours de la journée de référence, nous relevons des écarts de température en dessous de 1 °C, à la fois positifs et négatifs. Les températures d'air en partie haute des bâtiments ont tendance à être plus fraîches que la température météorologique. Au cœur de l'îlot, la tendance s'inverse. A 14h, l'écart sur une facette peut atteindre localement 4,5 °C ; les zones les plus touchées par l'augmentation de température sont à la jonction des bâtiments et du sol, c'est à dire dans les parties de l'îlot protégées au vent.

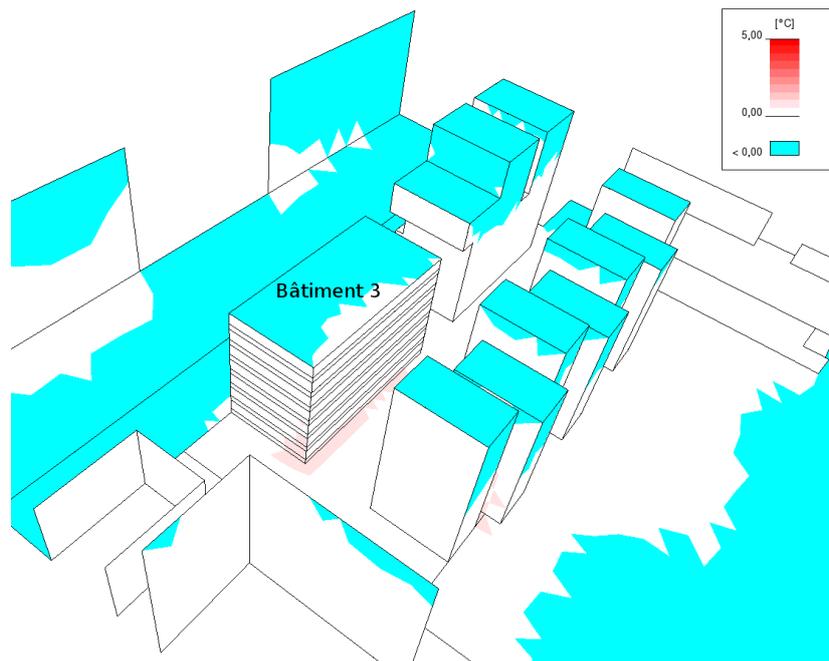
La figure 4.27 représente l'évolution simultanée de la température d'air météorologique et de la température d'air moyenne surfacique au niveau de la surface extérieure du bâtiment à chaque pas horaire de la journée d'analyse. A titre indicatif, la température de surface moyenne de l'enveloppe du bâtiment issue de la simulation est également fournie. La courbe de la

<sup>3</sup>Les figures 4.25, 4.26, 4.29, 4.30, 4.31 et 4.32 représentent les températures de l'air extérieur calculées par **Fluent** au centre de gravité de la première cellule volumique en contact avec les facettes de paroi, mais visualisées ici avec l'interface graphique de **Solene**

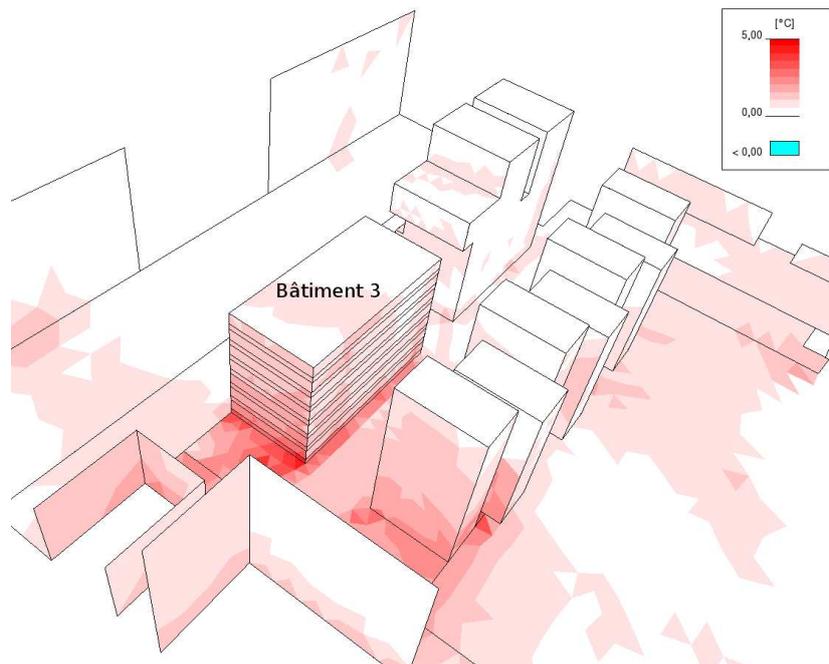
<sup>4</sup>L'heure est toujours donnée en heure solaire et nous rappelons que l'heure de lever du soleil le 15 Janvier est 07h35, alors que l'heure de coucher est de 16h25

température d'air simulée est toujours située au-dessus de la courbe météorologique, et l'écart entre les deux courbes est toujours supérieur à  $0,14^{\circ}\text{C}$ . Ce phénomène est renforcé pendant la période ensoleillée de la journée où l'écart moyen atteint  $0,84^{\circ}\text{C}$  à 12h00. Cette hausse de température est due à la rétroaction du bâtiment sur le climat. Lors de son mouvement de contournement des bâtiments, l'air s'échauffe au contact des parois en puisant la chaleur accumulée principalement par radiation solaire.

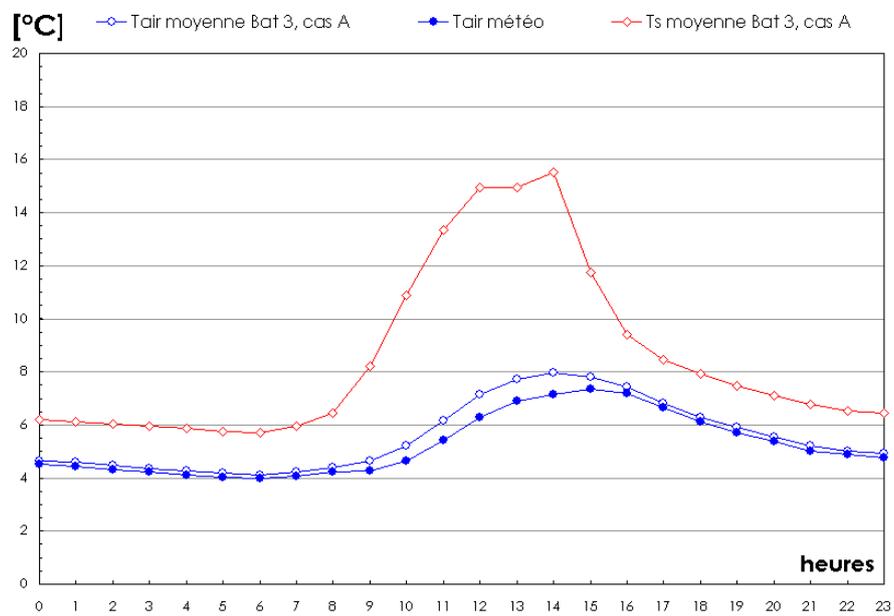
Un déphasage de 1h entre les deux maxima des courbes de température d'air est également constaté. Alors que la température maximale météorologique est obtenue à 15h ( $7,34^{\circ}\text{C}$ ), la température d'air moyenne simulée autour du bâtiment atteint son maximum à 14h ( $7,97^{\circ}\text{C}$ ). Ainsi, en milieu urbain la température d'air est plus en phase avec les phénomènes radiatifs qu'en site dégagé. Cette hypothèse est appuyée par la corrélation entre la courbe des températures d'air simulées et celle des températures de surface. A l'image du phénomène d'îlot de chaleur urbain, le passage de la simulation théorique à la simulation couplée entraîne des températures d'air plus élevées. Toutefois, ceci ne suffit pas à contrebalancer le déficit en énergie solaire.



**Figure 4.25** : Écarts entre la température de l'air proche des parois simulée et la température d'air météorologique, 06h, jour 5, semaine hiver, aménagement A

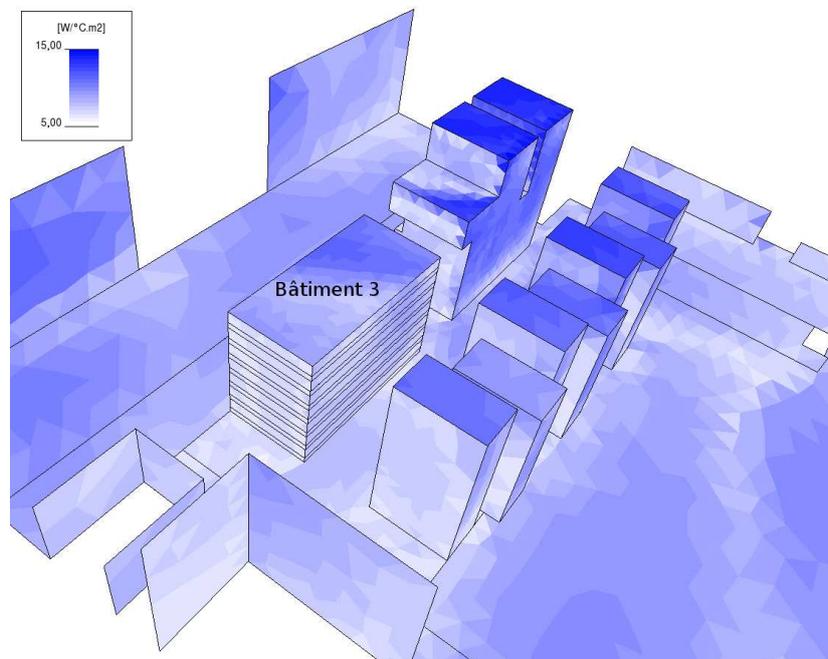


**Figure 4.26 :** Écarts entre la température de l'air proche des parois simulée et la température d'air météorologique, 14h, jour 5, semaine hiver



**Figure 4.27 :** Température d'air moyenne proche des parois, température d'air météorologique et température de surface moyenne

Enfin, l'implication des coefficients d'échange superficiel convectifs réels dans le bilan énergétique du bâtiment est analysée. Comme les températures d'air, ils déterminent l'intensité du flux convectif. Ces coefficients sont calculés une seule fois lors de la simulation d'initialisation puisqu'ils dépendent uniquement de la variable vitesse, et que les équations de mouvement sont désactivées lors de la simulation couplée pour diminuer le temps de calcul. La figure 4.28 montre la répartition des coefficients  $h_c$  à l'interface bâtiment-air au niveau du fragment urbain contenant le bâtiment 3. Nous remarquons que les valeurs varient de 5 à 15  $W.K^{-1}.m^{-2}$ . Les zones les plus sensibles aux échanges convectifs sont celles situées en partie haute des bâtiments. Le bâtiment 3 montre des valeurs plutôt modérées car il profite de la protection de l'alignement des bâtiments B Nord 1 à B Nord 7 qui filtrent les vents dominants provenant de la direction Sud. La zone juste au-dessus de la toiture terrasse du bâtiment implique également des valeurs de  $h_c$  plus importantes que sur les façades à cause d'une accélération du vent au niveau des zones de décollement autour du bâtiment. Le calcul de la moyenne surfacique des valeurs de  $h_c$  sur le bâtiment 3 donne une valeur de 7,77  $W.K^{-1}.m^{-2}$ . La valeur théorique utilisée dans la simulation théorique paramétrée était de 10,95  $W.K^{-1}.m^{-2}$  : pour le même écart de température entre la surface et l'air, l'évacuation de chaleur par flux convectif est réduit d'environ 30%. Cette modification microclimatique va dans le même sens que l'augmentation de la température d'air minimisant les déperditions de chaleur. Comme précédemment, ce comportement n'est cependant pas suffisant pour rééquilibrer le manque d'irradiation solaire.



**Figure 4.28** : Coefficients  $h_c$  pour le fragment urbain d'étude, cas A, semaine d'hiver

## Cas de la semaine d'été

### ➤ Cas de l'aménagement A

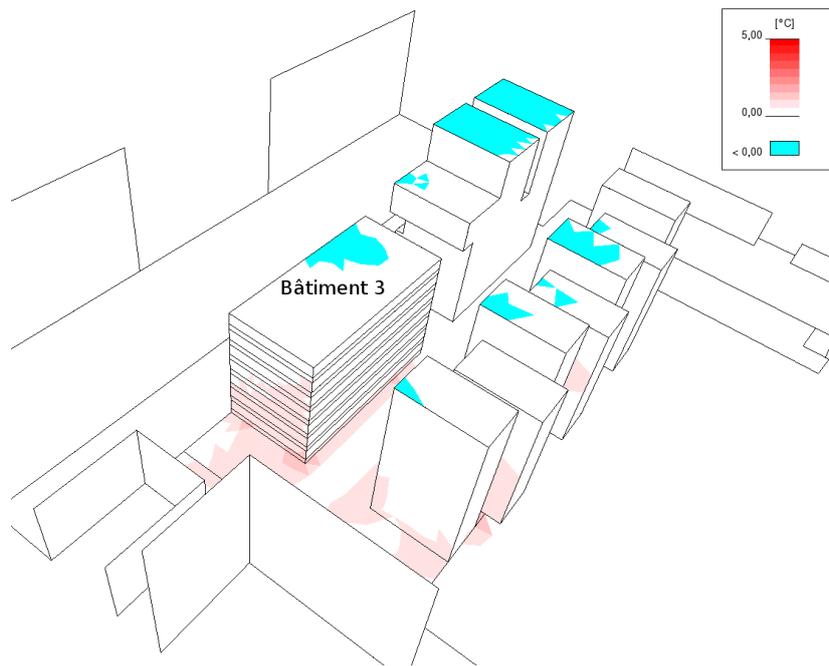
Les figures 4.29 et 4.30 montrent les écarts entre les températures d'air simulées au niveau des parois et la température d'air météo, respectivement à 4h et 14h. Ces horaires sont choisis car ils correspondent au minimum et au maximum des températures d'air moyennes dans le fragment.

A 4 h, les températures d'air simulées sont très proches de la valeur météorologique égale à  $16,6^{\circ}\text{C}$ . Les rares zones où les températures sont en dessous des valeurs météorologiques sont au niveau des toitures. Ces zones sont celles qui ont le plus grand facteur de vue du ciel, donc les plus sujettes au refroidissement radiatif des surfaces horizontales et dégagées en contact direct avec l'air. Les températures les plus élevées sont plutôt localisées près du sol au niveau des angles entre les bâtiments et les voies de circulation en asphalte, où la chaleur s'accumule de façon importante durant la journée. La possibilité d'existence d'un îlot de chaleur nocturne dans les zones urbaines denses que certains auteurs signifient dans la littérature est en quelque sorte remis en cause par la très faible plage de variation des écarts pour ce cas de figure.

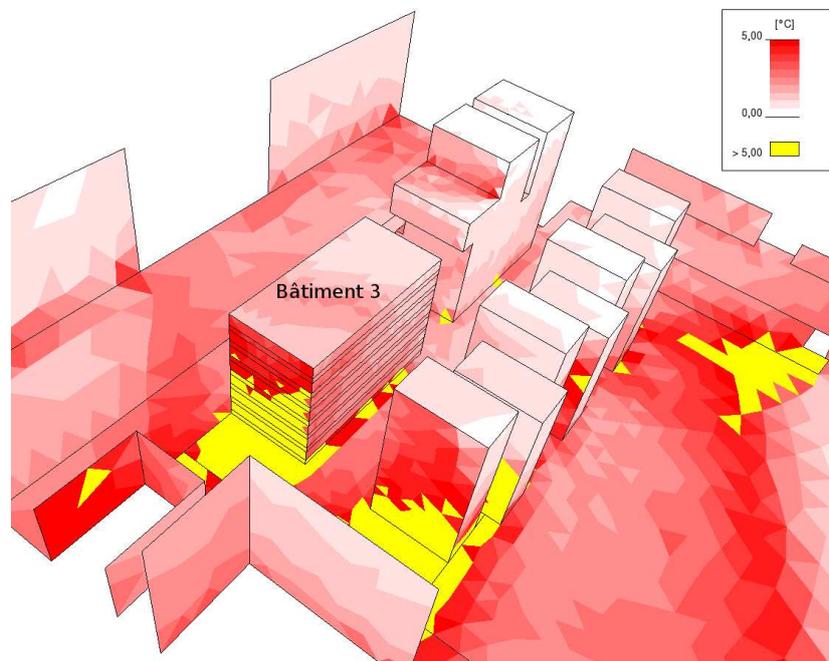
A 14 h, l'échauffement de l'air par les surfaces urbaines est manifeste. Les écarts sont pour la plupart compris entre  $0^{\circ}\text{C}$  et  $5^{\circ}\text{C}$ , mais dépassent ce seuil dans certaines zones. Ainsi, un écart jusqu'à  $16,5^{\circ}\text{C}$  peut être constaté au niveau des jonctions entre le bâtiment 3 et le sol. Ailleurs, les écarts les plus élevés se retrouvent au niveau des aménagements de sol entre l'îlot Nord et l'îlot Sud, au niveau du sol constituant les espaces interstitiels entre les bâtiments B Nord 1 à B Nord 4, et, au niveau de la rue séparatrice des deux îlots principaux A et B qui est aussi complètement revêtue d'asphalte.

L'analyse spatiale de coefficients d'échange superficiel convectifs n'apporte quant à elle peu d'information supplémentaire que celles du cas d'hiver. Le calcul des coefficients  $h_c$  moyens surfaciques sur l'enveloppe du bâtiment donne une valeur quasiment équivalente à celle obtenue pour le cas d'hiver :  $h_c = 7,79 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$ . La distribution spatiale des coefficients s'établit à peu près de la même façon, puisque la corrélation du calcul de  $h_c$  est faite avec la vitesse d'air et que les obstacles ne changent pas. C'est un cas de convection forcée en vitesse où :

- la vitesse d'entrée est une moyenne annuelle, elle ne varie donc pas entre une simulation sur les semaines de référence de Janvier et de Juillet ;
- la variation du niveau moyen de température de la veine a une influence réduite sur les résultats de  $h_c$ , ce qui conduit à seulement un écart de  $0,02 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$ .



**Figure 4.29 :** Écart entre la température de l'air proche des parois et la température d'air météorologique - 04h, jour 5, semaine été, bâtiment 3, aménagement A



**Figure 4.30 :** Écart entre la température de l'air proche des parois et la température d'air météorologique - 14h, jour 5, semaine été, bâtiment 3, aménagement A

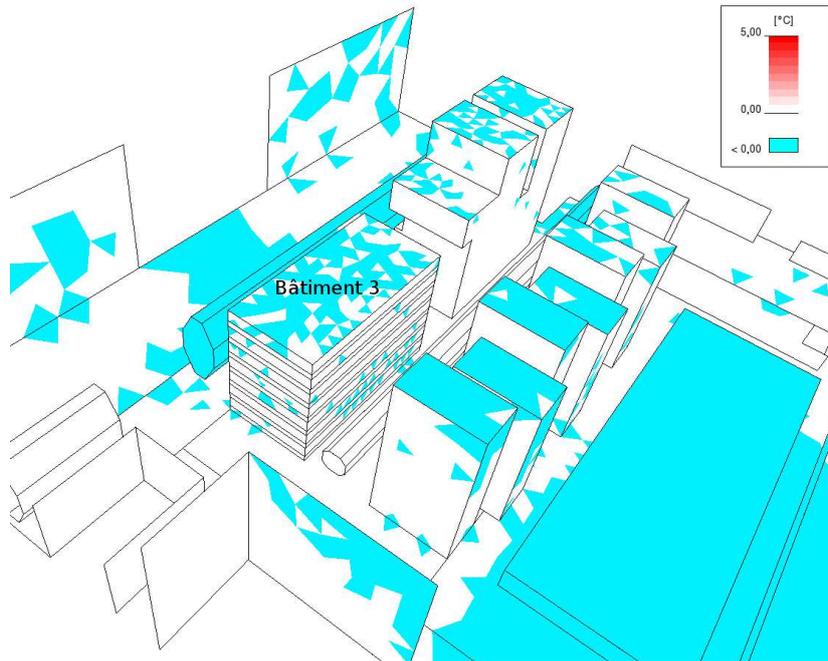
➤ *Cas de l'aménagement B*

Les figures 4.31 et 4.32 représentent les mêmes écarts de température d'air aux deux horaires 4 h et 14 h pour l'aménagement B.

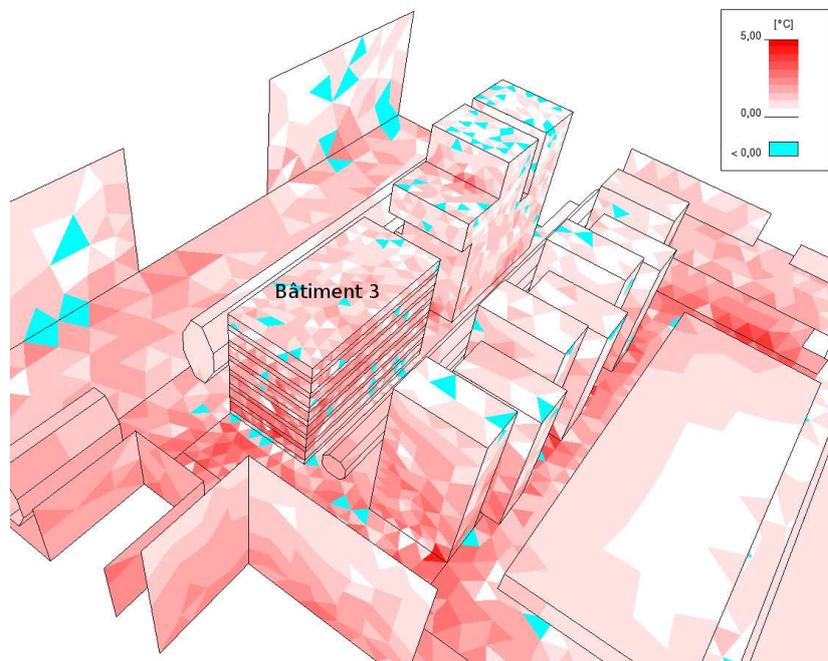
A 4 h, les températures d'air simulées sont assez proches des températures météorologiques, de telle sorte que les écarts sont compris entre  $-0,7$  et  $+0,7$  °C. L'échelle de couleur de la figure 4.31, identique à celle des figures précédentes, laisse présager de faibles gradients de température. Cependant la couleur seuil spécifique aux valeurs négatives met en évidence que les températures d'air nocturnes les plus fraîches sont trouvées au niveau des toitures et des zones arborées.

A 14h, la répartition des écarts est assez différente du cas de l'aménagement 1. Non seulement la répartition des valeurs est plus hétérogène, mais les valeurs sont aussi globalement plus faibles. Le seuil des 5 °C d'écart n'est jamais dépassé. La capacité des arbres à climatiser passivement par évapotranspiration entraîne une réduction significative des températures d'air de la canopée urbaine au niveau de l'îlot. Ces températures sont cependant majoritairement supérieures à la température météorologique à cet horaire.

Comme précédemment, l'analyse des coefficients  $h_c$  n'apporte pas d'information supplémentaire au niveau des zones protégées ou exposées. Les parties basses des bâtiments sont moins soumises aux flux convectifs grâce à la protection fournie par les arbres culminant à une hauteur maximale de 15 m le long des voies de desserte, et à 12 m dans le jardin central reliant l'îlot B Nord et B Sud. L'information principale est donnée par le calcul moyen du coefficient  $h_c$  pour les parois du bâtiment d'étude, où la valeur est égale à  $7,31 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$ . Ceci représente une réduction de  $0,47 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$  par rapport au cas de l'aménagement minéral, et de  $3,64 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$  par rapport à la simulation théorique. Ainsi, d'un point de vue énergétique, la plantation d'arbre implique deux effets qui s'opposent : le freinage aérodynamique des feuillages, diminuant le rafraîchissement convectif, et la réduction de la température d'air, l'augmentant.



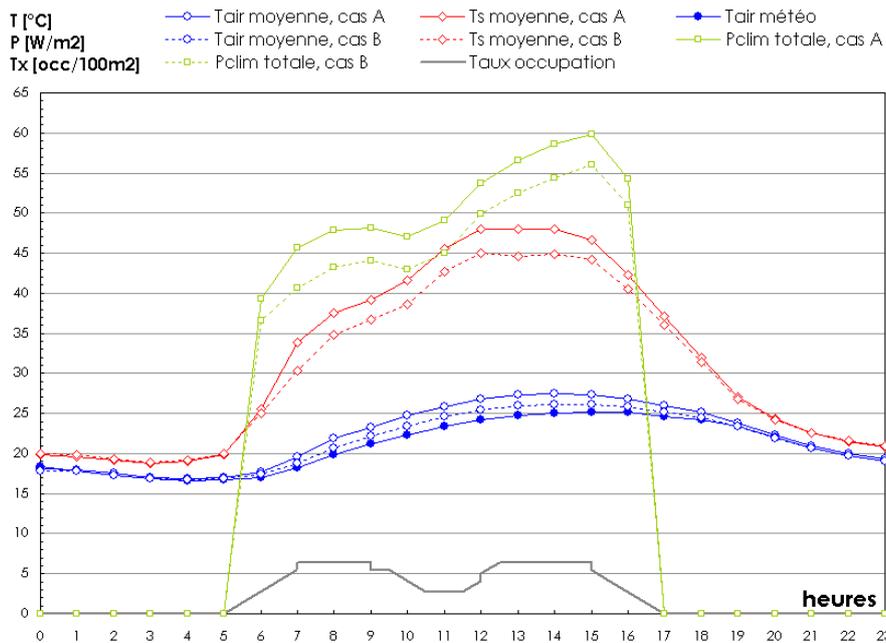
**Figure 4.31** : Écarts entre la température de l'air proche des parois et la température d'air météorologique - 04h, jour 5, semaine été, bâtiment 3, aménagement B



**Figure 4.32** : Écarts entre la température de l'air proche des parois et la température d'air météorologique - 14h, jour 5, semaine été, bâtiment 3, aménagement B

➤ *Comparaison entre les deux aménagements*

Sur la figure 4.33, sont représentées les températures moyennes surfaciques de l'air extérieur, les températures de surface; nous avons également ajouté les puissances totales de climatisation et le taux d'occupation du bâtiment pour les deux aménagements.

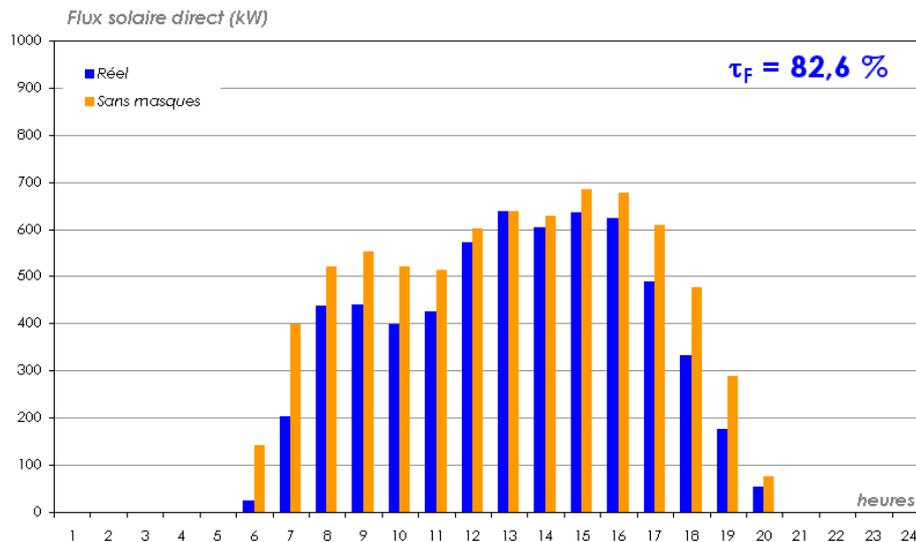


**Figure 4.33 :** Température d'air moyenne proche des parois et la température d'air météorologique, températures de surfaces moyennes, puissances totale de climatisation et taux d'occupation, pour les deux cas d'aménagement (bâtiment 3)

Les courbes de température d'air sont décalées en amplitude. La température d'air proche des parois dans le cas de l'aménagement A affiche à chaque heure les valeurs les plus importantes tandis que la courbe météorologique affiche les plus faibles. Le cas d'aménagement végétal est intermédiaire. Les écarts moyens avec la température météorologique vont de  $-0,38^{\circ}\text{C}$  à  $2,62^{\circ}\text{C}$  pour le cas A et de  $-0,61^{\circ}\text{C}$  à  $1,23^{\circ}\text{C}$  pour le cas B. Comme pour l'hiver les données météorologiques de température sont plus faibles que les températures urbaines, même dans le cas d'un site végétalisé. La valeur brute de l'écart microclimatique est plus importante en été qu'en hiver où il s'élevait seulement à  $0,84^{\circ}\text{C}$  au maximum. La différence des intensités de flux entre les phénomènes radiatifs et les phénomènes sensibles est plus importante en été qu'en hiver dans le bilan énergétique urbain. L'évacuation de l'énergie radiative stockée dans les parois passe par le réchauffement de l'air. L'implantation de végétation dans le site contribue à réduire de moitié cette augmentation de chaleur par rapport aux conditions en site extra urbain. Il subsiste toujours un déphasage de 1h entre le maximum de température simulé

(15h) et le maximum météorologique pour le cas d'aménagement minéral alors que la courbe de l'aménagement végétal est synchronisée avec la météo. En dehors des périodes ensoleillées, les trois courbes sont quasiment confondues ce qui va à l'encontre du phénomène d'îlot de chaleur nocturne. Toutefois, les rejets anthropogéniques directs dans l'air ne sont pas pris en compte alors qu'ils pourraient en être la principale cause.

Les courbes des températures moyennes de surface du bâtiment ont la même allure, la montée se faisant en deux temps comme pour les flux solaires directs (figure 4.34). Celle correspondant au cas d'aménagement B est simplement décalée au maximum de  $3,4^{\circ}\text{C}$  à 13h. A cet instant, les températures moyennes sont maximales et atteignent jusqu'à  $47^{\circ}\text{C}$  pour l'aménagement minéral. L'écart de température de surface est plus prononcé que celui de la température d'air car, non seulement les ombrages créés par les arbres en partie basse mais aussi les échanges IR avec les surfaces extérieures des canopées végétales, proches de la température d'air, viennent réduire les apports énergétiques sur chaque facette extérieure du bâtiment.



**Figure 4.34 :** Évaluation du taux de flux solaire (été), bâtiment 3, aménagement A

Finalement, en examinant les puissances de climatisation mises en œuvre ce cinquième jour de la simulation, l'allure de la courbe des puissances synthétise bien l'ensemble des phénomènes pris individuellement. Premièrement, le début et la fin de l'activation de la climatisation est évidemment conditionné par le début et la fin de l'occupation et la sévérité des conditions de

surchauffe à l'extérieur du bâtiment. L'allure de la courbe entre ces deux instants est alors donnée par celle des températures de surface ou bien du flux solaire direct global reçu par les parois qui ont une variation similaire. L'intensité relative des deux montées en régime se rapproche des flux solaires alors que la pente moyenne est d'avantage calquée sur un intermédiaire entre celle des températures de surface et celle des températures d'air.

## 4.7 Conclusion

Cette dernière partie de la thèse était dédiée à la réponse aux objectifs initiaux principaux :

- Quelle est l'influence de l'environnement urbain sur les consommations énergétiques d'un bâtiment ?
- Peut-on diminuer ses charges énergétiques en modifiant la stratégie d'aménagement urbain à l'échelle spatiale microclimatique ?

Ceci a été possible en s'appuyant sur les résultats du chapitre précédent pour définir nos cas d'étude de référence. Après l'étude de configurations théoriques, nous avons étudié une situation urbaine existante, appartenant à un projet urbain actuel : le projet Lyon Confluence. Une campagne de 16 simulations, combinant 4 bâtiments d'études, 2 saisons et 2 configurations d'aménagement a alors été réalisée en utilisant l'outil de simulation microclimatique et énergétique couplé. Une partie des résultats bruts, les températures d'air intérieures des bâtiments, les puissances horaires et une partie des variables microclimatiques à l'interface bâtiment microclimat, ont été analysés et post-traités pour argumenter nos observations.

La simulation des températures et des puissances de chauffage ou de climatisation se sont révélées cohérentes par rapport aux comportements classiques saisonniers des bâtiments, et laissent présager une justesse et une intégration adaptée dans l'outil global du modèle thermique de bâtiment développé dans ce travail. Une validation de l'outil avec des mesures, ou par comparaison avec des outils de simulation thermique du bâtiment renseignés par des entrées climatiques réadaptées au microclimat serait tout de même souhaitée.

Ces simulations livrent certains enseignements généraux sur les bâtiments de bureaux :

- les bâtiments non performants pendant l'été stockent la chaleur durant le week-end entraînant une surconsommation en début de semaine pour le atteindre à nouveau le niveau de confort exigé ;
- les puissances de climatisation des bâtiments performants l'été augmentent jour après jour pour évacuer le flux accumulé au cours l'occupation de la semaine, ces bâtiments évacuant habituellement la chaleur durant le week-end ;
- en hiver, les variations journalières de puissance sont assez comparables entre les différences classes énergétiques, d'un niveau assez élevé durant la matinée pour diminuer au fil de la journée, puis au fil de la semaine ;

- les bâtiments de bureaux sont avant tout sensibles au taux d'occupation ; dans le cas d'une occupation moins importante, l'effet de l'aménagement sur les puissances mises en jeu pourrait être d'avantage efficient.

La comparaison entre les résultats des simulations couplées sur les bâtiments urbains et les simulations théoriques sur les bâtiments équivalents paramétrés a montré un écart important entre les valeurs des consommations énergétiques relatives. Bien que les niveaux de consommations en été des classes les moins consommatrices (1 et 2) soient respectés, ceux des classes les moins performantes (3 et 4) sont amplifiés. Le positionnement des bâtiments les uns par rapport aux autres n'est alors pas remis en cause mais c'est l'échelle des consommations qui se dilate. Néanmoins, en hiver, les niveaux de consommation de toutes les classes, excepté la 4, augmente considérablement. Ainsi le bâtiment 4, supposé être le plus vulnérable au climat d'hiver affiche finalement la plus basse consommation de chauffage. De même, les bâtiments 1 et 3 supposés être les plus performants lors de cette saison, le sont finalement moins que le 2. Ce dysfonctionnement est lié en grande partie à la non prise en compte des masques solaires en hiver, alors qu'ils sont matérialisés en été dans la simulation théorique par la variable taux de flux solaire. En effet un calcul de  $T_F$  en hiver a révélé que la configuration urbaine ne laisse pas 100 % du flux solaire incident atteindre les façades et la toiture, ce qui perturbe énormément le bien fondé des classes énergétiques théoriques. D'autres phénomènes peuvent être à l'origine de l'écart entre l'évaluation théorique et l'évaluation fine, comme la modification des variables microclimatiques par l'environnement urbain et le type d'aménagement des îlots, ce qui a été discuté dans une dernière partie.

L'observation des champs des variables microclimatiques sur les modèles surfaciques des îlots simulés a montré l'intérêt de la simulation couplée dans l'évaluation des consommations énergétiques. Le déplacement des points dans le diagramme des classes en fonction du type d'aménagement peut s'expliquer par la variation des répartitions des températures d'air, des coefficients d'échange superficiel convectifs, ou à l'aide du champ de la variable la plus synthétique de toutes, la température de surface. Entre aménagement minéral et aménagement végétal, il a été montré que la température d'air peut varier en moyenne sur toute l'enveloppe de  $1,4^\circ\text{C}$  et localement de plus de  $10^\circ\text{C}$ . Quant aux coefficients d'échange superficiel convectifs, ils peuvent varier en moyenne sur l'enveloppe de  $0,5\text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$ . Ceci conduit par exemple en été à des écarts de température de surface d'environ  $3^\circ\text{C}$  pour toute une journée, et réduire de manière non négligeable les consommations de climatisation si l'on choisit un aménagement urbain très végétalisé. En effet, la température de surface est très corrélée à la puissance délivrée pour le même pas de temps de simulation. Même si cette analyse plus détaillée a été réalisée seulement pour un bâtiment, le bilan des consommations énergétiques révèle que le passage de l'aménagement minéral à végétal réduit systématiquement les charges de climatisation été pour les bâtiments les moins efficaces pour cette saison. Cependant, les

puissances latentes sont plus importantes en végétalisant l'environnement proche du bâtiment à concevoir, à la fois parce que la baisse de température d'air conduit à une hausse d'humidité relative et que la végétation injecte une masse d'humidité supplémentaire dans l'air en la supposant bien irriguée. Pour l'hiver, il est plus difficile de se prononcer de manière générale pour l'influence des aménagements, puisque deux cas sur quatre restent insensibles à ces modifications urbaines. Les deux autres cas ont des affinités différentes avec l'aménagement puisque pour le bâtiment 1 l'aménagement végétal réduit les consommations de chauffage, alors que pour le bâtiment 4 la théorie de l'îlot de chaleur favorable en hiver donne du crédit à l'aménagement urbain minéral.

Cette partie ponctue naturellement les étapes définies en début de travail et montre bien les apports et les limites de la méthode employée. Si certains aspects entre la simulation théorique et la simulation microclimatique couplée avec intégration des aménagements n'ont pas été disséqués, la séparation de l'étude en plusieurs cas correspondant aux saisons et aux qualités constructives et d'implantation du bâtiment montre en premier lieu que la formulation de règles microclimatiques pour l'économie d'énergie doit être adaptée à des cas de référence.

## Conclusion générale

### Synthèse

La consommation énergétique des bâtiments représente aujourd'hui la part la plus importante de la facture énergétique globale et elle pourrait encore croître du fait de l'augmentation permanente de la population mondiale et de l'évolution simultanée des exigences des usagers pour maintenir leur confort. Des innovations en technique de construction permettent aujourd'hui de hausser la performance énergétique des bâtiments, cependant, elles ne suffiront peut-être pas à atteindre les objectifs énergétiques fixés par les directives politiques environnementales internationales. En effet, nous savons que le comportement énergétique des bâtiments n'est pas seulement régi par leur construction, mais dépend avant tout de la sévérité des conditions climatiques environnantes. Or, le climat dans les grandes villes n'est pas propice à la réduction de ces consommations, particulièrement en été, où la densification urbaine associée à l'utilisation excessive de matériaux à forte absorptivité solaire favorise le développement d'un îlot de chaleur. De plus, les champs hétérogènes des variables thermoradiatives, aérodynamiques et hydriques ne sont pas directement liés aux phénomènes de grande échelle comme l'îlot de chaleur. L'aménagement local peut encore complètement modifier le climat au sein d'un fragment urbain. Notre travail proposait alors d'évaluer l'impact du microclimat sur les consommations énergétiques des bâtiments et plus précisément par la contribution de l'aménagement urbain.

En préambule de ce travail, une revue bibliographique a permis de dresser un panorama théorique et d'identifier un ensemble de travaux se rapportant au plus proche de la question. Les principaux enseignements sont issus de résultats de mesure nous rapportant des modifications du climat à l'échelle méso et à l'échelle micro. L'accès à toutes les variables directement liées aux consommations énergétiques des bâtiments n'est pas systématique puisqu'il est difficile d'instrumenter un bâtiment sur toute son enveloppe et faire le lien avec

les consommations énergétiques uniquement dédiées au chauffage ou à la climatisation. Un moyen pertinent pour traiter le sujet semble être les techniques de simulation. Il n'existe toutefois pas d'outil directement destiné à l'étude ou l'optimisation climatique et énergétique des projets lors de la phase de conception. Les outils CFD, à l'origine développés pour des applications industrielles, reposent sur des modèles physiques non destinés à la configuration du fragment urbain. Les outils de thermique du bâtiment ne prennent pas correctement en compte les conditions aux limites microclimatiques. Les outils intermédiaires simplifiés sont développés sur des objets théoriques et montrent leurs limites géométriques et physiques sur des objets urbains réels.

La scène urbaine entourant un bâtiment d'étude est composée de multiples éléments d'aménagement et il est difficile d'isoler l'impact de chacun de ceux-ci sur la performance énergétique du bâtiment tout au long de l'année et d'en extraire une loi comportementale facilitant les prises de décision pour le concepteur.

Trois hypothèses avaient été proposées pour appuyer la méthodologie de la recherche :

- une conception réfléchie des aménagements urbains peut contribuer significativement à la réduction des consommations énergétiques des bâtiments ;
- l'influence de chacun des paramètres caractéristiques du bâti ou du microclimat ne peut pas être traité individuellement parce qu'il existe de très nombreuses interactions entre eux ;
- le bâtiment peut être assimilé à un capteur microclimatique qui nécessite un étalonnage préalable.

L'objectif premier de ce travail fut de se munir d'un outil de simulation adapté aux objectifs. Une amélioration de la plate-forme de simulation constituée de Solene (simulation thermoradiative) et Fluent (simulation CFD) a été réalisée pour pouvoir simuler les interactions climatiques {bâtiment}-{environnement urbain}. Pour cela nous avons :

- construit un modèle de sol permettant de différencier les sols artificiels et naturels en prenant en compte les flux évaporatifs de surface ;
- construit et intégré à Solene un modèle thermique de bâtiment permettant de calculer ses consommations énergétiques au moyen d'une représentation intérieure nodale ;
- modifié la procédure de couplage pour contrôler les flux convectifs et les variables échangées entre les deux outils.

En réponse à la deuxième et à la troisième hypothèses citées plus haut, nous avons étudié le comportement d'un bâtiment de bureaux de référence décliné selon des critères constructifs et climatiques de son environnement proche théorique. Quel que soit le capteur physique, il

est nécessaire de maîtriser sa sensibilité aux variables mesurées. Dans notre cas, il s'agissait d'évaluer la sensibilité du bâtiment aux sept variables définies, tout en prenant en compte leurs interactions. Une méthode d'analyse statistique de type RSA (Regionalized Sensitivity Analysis) personnalisée nous a, à la fois, permis d'établir quatre classes énergétiques de bâtiment, en fonction de leur comportement sur une semaine d'été et sur une semaine d'hiver, d'évaluer et de hiérarchiser l'influence des sept variables constructives et climatiques prédéfinies. Un premier constat est qu'une des variables choisies s'est révélée non influente au sens statistique, quelle que soit la classe de bâtiment et quelle que soit la saison : la consommation énergétique d'un bâtiment au cours du temps est d'abord sensible à la valeur moyenne de la température d'air journalière et non à son amplitude. Une variable se démarque des autres en montrant systématiquement la plus élevée des sensibilités calculées : le « taux de flux solaire direct été ». C'est cette variable qui détermine en priorité l'appartenance à une classe énergétique suivant le niveau de consommations en été. Un constat intéressant est que pour traiter au mieux le compromis été-hiver, traduit dans l'étude par l'appartenance à la classe 1, il faut privilégier l'apport de chaleur par énergie sensible (stratégie d'hiver et non d'été) et privilégier la protection solaire (stratégie d'été et non d'hiver) et cela quelle que soit la saison.

Ces classes énergétiques ont été réutilisées dans la dernière partie du travail. La démonstration de la première hypothèse est possible uniquement si les prédispositions microclimatiques du bâtiment d'étude sont connues. Nous avons mené une étude sur un fragment urbain réel où ont été identifiés quatre bâtiments correspondant de part leur construction et leur implantation aux classes énergétiques établies précédemment. Le projet étudié est « Lyon-Confluence », un grand projet de renouvellement urbain. Le projet propose peu de mitoyenneté et une place importante est laissée à l'espace public. Deux stratégies d'aménagement ont été mises en place, l'une avec une minéralisation importante et l'autre avec la végétalisation des sols et la plantation d'arbres. Le modèle a été testé sur ces cas d'étude réalistes, avec toutes leurs spécificités géométriques. L'observation première est qu'il existe une énorme différence entre la simulation couplée et la simulation théorique avec des conditions aux limites homogènes et supposées, en particulier en hiver si l'évaluation des flux solaires incidents ne tiennent pas compte des masques. Nous avons aussi pu remarquer que l'aménagement urbain avait un effet sur les consommations énergétiques des bâtiments et que celui-ci s'amplifie en été à mesure que les consommations d'énergie sont importantes. Finalement, cette étude redémontre un savoir intuitif que le flux solaire est la variable climatique sur laquelle agir en priorité par modulation de l'aménagement. Que ce soit en hiver ou en été, respectivement pour les apports gratuits ou pour les possibilités de surchauffes, c'est cet échange thermique qui pilote en priorité la consommation énergétique du bâtiment pour le conditionnement des ambiances thermiques. L'accessibilité solaire de l'enveloppe du bâtiment en fonction du temps,

définit principalement l'allure des puissances horaires de climatisation fournies en été. La hauteur des arbres adultes doit être mise en relation avec la hauteur des bâtiments à protéger.

## Discussion

Ce travail s'inscrivait dans une suite de travaux menés au CERMA [Vinet, 2000] [Robitu, 2005] sur la simulation microclimatique au service de l'analyse du confort thermique en espace extérieur. Le nouveau pas franchi dans ce travail au niveau de la modélisation, est la possibilité d'analyser avec les mêmes outils à la fois le confort climatique, mais aussi les consommations énergétiques des bâtiments de manière objective. De plus il est possible de comparer d'un point de vue énergétique plusieurs solutions de conception architecturale et/ou urbaine entre elles. Ceci est envisageable au vu de la cohérence des résultats obtenus en sortie du modèle de bâtiment même si la validation de certains modèles n'a pas été encore menée.

Nous avons mis en évidence dans la revue de littérature, le partitionnement des études concernant l'influence des éléments de l'aménagement (le sol, les arbres, etc.). Nous avons pu dans la dernière partie du travail montrer que l'outil de simulation utilisé permet d'étudier des stratégies réelles d'aménagement mixtes à une échelle de fragment urbain (juste au-dessus de celle de l'îlot) en fonction des usages destinés aux surfaces de sols libres ou réservés à la voirie. Seulement deux scénarios ont été étudiés ici, mais il aurait été possible d'en imaginer d'autres. Dans cette thèse, nous avons privilégié le nombre de cas de bâtiments d'étude plutôt que le nombre de cas d'aménagement.

Par rapport aux résultats des autres études, nous avons une description microclimatique plus complète de l'environnement urbain étudié qui nous permet d'avoir toutes les données relatives au bâtiment d'étude, ce qui n'est pas vraiment systématique dans les articles et travaux qui ont été rapportés dans l'étude bibliographique. Nos résultats ne nous permettent pas, comme les études d'Akbari [Akbari *et al.*, 1992], d'associer un nombre d'arbres à une quantité d'économie d'énergie potentielle d'un bâtiment individuel. Cependant, ils sont plus en accord avec le processus de conception urbaine où les bâtiments construits interagissent entre eux et où l'aménagement ne se limite pas à celui d'une parcelle résidentielle individuelle comme c'est le cas pour la majeure partie de ces études.

Les variables simulées montrent que l'influence du microclimat est plus prononcée en été qu'en hiver, en particulier pour les températures d'air où les écarts avec la température d'air météorologique au niveau de l'enveloppe peuvent aller jusqu'à 15°C. Ceci confirme l'intérêt de prendre en compte le microclimat de la manière la plus exacte possible pour évaluer les consommations énergétiques de bâtiments sans s'éloigner de la réalité. Le fait que la non-prise en compte des masques solaires en hiver pour les simulations théoriques atténuent

considérablement la consommation de chauffage par rapport au cas en site réel confirme également cette recommandation.

L'originalité de ce travail réside avant tout dans le déroulé méthodologique et en particulier dans l'étape intermédiaire d'étude de sensibilité qui a permis de construire la grille d'étude de la dernière partie. L'utilisation de ce type de méthode statistique, habituellement utilisée pour d'autres domaines scientifiques, a montré des résultats satisfaisants. Elle se démarque d'autres méthodes plus classiques comme l'étude paramétrique mono-critère ou comme les plans d'expériences, car les interactions des paramètres d'entrée ont été prises en compte sans les établir au préalable comme pour les plans d'expériences. De plus, nous avons déterminé des classes énergétiques de bâtiment déterminant la méthodologie à suivre. Les classes énergétiques ont aussi l'avantage d'être suffisamment explicites pour dialoguer avec les concepteurs. Cependant, les seuils énergétiques peuvent être discutés ; bien que le niveau d'isolation thermique du bâtiment soit élevé, ceci ne peut expliquer, à lui seul, des niveaux de consommations aussi faibles. Le fait d'évaluer les consommations uniquement pour une semaine de référence, avec de conditions d'hiver modérées et sans prendre en compte les postes déperditifs comme les ponts thermiques, explique peut être en partie cette tendance. Un autre détail surprenant de ces résultats est la remise en cause de l'effet attendu de la compacité. Visiblement, la diminution de la compacité favoriserait le compromis d'économie d'énergie en été et en hiver, alors que l'inverse est plutôt avancé dans les ouvrages d'architecture climatique. Notre propos pourra cependant être modéré par une poursuite de la réflexion autour de ces trois éléments :

- le tirage non-aléatoire de la compacité dans son intervalle de définition ;
- les coefficients de déperdition non égaux sur chaque façade, plancher et toiture du bâtiment ;
- le déséquilibre entre la durée de la période d'hiver et la période d'été.

Ce dernier point concerne la définition des classes énergétiques et introduit le fait que celle-ci s'appuie sur un jugement équivalent entre une semaine d'hiver et une semaine d'été dans l'échelle des performances, alors que l'hiver est plus long et que les charges de climatisation en été sont d'un ordre de grandeur beaucoup plus important que les charges de chauffage. Ce dernier point est aussi associé aux autres variables et la classification énergétique des bâtiments en tant que telle mérite d'être ré-explorée.

## Perspectives

Au terme de ce travail de thèse, une partie des objectifs initiaux ont été atteints. Toutefois, des améliorations techniques et des pistes de recherches peuvent être proposées pour aboutir à

une analyse énergétique des bâtiments dans leur environnement climatique encore plus directe, précise et instructive pour la pratique opérationnelle.

### **La modélisation physique**

La modélisation est un des éléments clé de ce travail. Nous avons intégré le modèle de bâtiment au sein des autres modèles, mais des améliorations sont encore envisageables. En modélisation physique, tout peut évidemment être modifié, tout peut être amélioré, c'est pourquoi nous proposons ici les perspectives nous paraissant prioritaires en les déclinant selon trois échelles sous-jacentes.

#### *➤ L'échelle microclimatique urbaine*

Cette échelle est propre aux éléments d'aménagement urbain. Nous avons associé des modèles thermoradiatifs et aérauliques à chaque élément caractéristique du paysage urbain.

#### *La végétation*

La question du comportement saisonnier n'a pas vraiment été travaillé. Il est cependant possible de changer les valeurs de transmission solaire et de LAD en hiver. Il serait souhaitable d'intégrer des fonctions d'évolution de ces paramètres de l'architecture foliaire selon les saisons. De plus, faut-il traiter l'évapotranspiration en hiver des arbres caducs et si oui des pistes sont à rechercher. En milieu urbain, on trouve souvent des petits groupes d'arbres agglomérés. Il serait également souhaitable de s'intéresser aux valeurs de ces paramètres pour un petit groupe d'arbres puisque la modélisation géométrique en mailles volumiques et surfaciques nous entraîne à regrouper ces éléments en général en un volume unique.

Nous avons uniquement proposé l'élément arbre dans notre outil de simulation, ne faudrait-il pas disposer d'une gamme élargie de dispositifs végétaux de référence comme les plantes, les haies, les buissons, les pergolas ? Comment adapter le modèle d'arbre à ces architectures végétales différentes ?

#### *Les sols*

Le modèle développé pour la simulation des sols urbains est très simplifié. Si la modélisation mono-dimensionnelle paraît suffisante compte tenu du niveau de complexité des autres modèles, le nombre de noeuds de calcul de température semble un peu faible pour gérer le stockage thermique. De plus, traiter l'évapotranspiration au noeud de surface est une approche qu'il faut affiner en établissant un bilan d'humidité dans la profondeur. A la surface, pour

les sols naturels, on ne peut actuellement s'intéresser de manière précise qu'au gazon. Une option pour traiter les sols nus et perméables serait souhaitable. Une des perspectives serait de coupler notre modèle, au modèle SM2-U [Dupont, 2001], pour avoir une meilleure évaluation du stockage thermique et hydrique.

### *L'eau*

Les transferts d'eau doivent être mieux traités dans notre outil qui les intègre avec parcimonie sans équilibrer réellement le bilan hydrique. Pour illustrer notre propos, on considère que les arbres sont systématiquement bien irrigués en zone racinaire ce qui leur permet de générer une évapotranspiration optimale à travers leur feuillage, alors que dans des conditions réelles, ce n'est pas le cas. De même, ces conditions d'humidité du sous-sol peuvent alimenter la modélisation des sols. Nous n'avons pas traité des aménagements comprenant des bassins d'eau, car les travaux de Robitu se sont déjà concentrés sur cet aspect [Robitu, 2005]. Toutefois, nous pourrions intégrer de manière générale un ensemble de dispositifs utilisant l'eau comme moyen de rafraîchissement évaporatif : bassins, cours d'eau, fontaines, sprays.

### *➤ L'échelle de l'interface bâtiment-microclimat*

Un premier point concerne les rejets dans la canopée urbaine des flux anthropogéniques dus aux équipements utilisés par les usagers des bâtiments, en particulier les rejets des équipements de chauffage, climatisation, cuisson. Les rejets de climatisation ont été traités dans la thèse de Bozonnet [Bozonnet, 2005]. Ce type de rejet ne paraît pas une priorité dans notre travail, puisque l'objectif de conception est d'éviter l'utilisation de la climatisation par l'étude microclimatique et énergétique. Toutefois, on peut se poser la question de l'influence de ces rejets sur la modification du microclimat et de quelle manière les intégrer.

La description des surfaces vitrées sur le modèle de paroi des bâtiments doit être améliorée compte tenu du rôle des inter-réflexions solaires. La réflectivité solaire est considérée purement diffuse et non pas mixte. La prise en compte de ce type de phénomène a du sens quand on cherche à optimiser l'aménagement en fonction des conditions microclimatiques.

Les enveloppes bâties évoluent et s'orientent maintenant beaucoup vers des éléments d'enveloppe végétale, comme les façades ou les toitures. Il pourrait être intéressant de disposer de ce type de modèle pour enrichir la description des façades de bâtiment et augmenter la possibilité de climatisation passive.

➤ *L'échelle architecturale*

L'échelle architecturale est celle qui correspond à la description intérieure du modèle de bâtiment développé dans ce travail. Plusieurs points semblent pouvoir être retravaillés pour augmenter la performance du modèle sans pour autant l'alourdir énormément :

- la possibilité de simuler les consommations d'énergie de plusieurs bâtiments à la fois dans le modèle ;
- la modélisation du stockage et du déstockage d'humidité dans les parois des bâtiments ;
- la modélisation des toitures non terrasse, avec combles ;
- la modélisation des ponts thermiques ;
- la modélisation des vides sanitaires ;
- la prise en compte de formes d'enveloppe plus complexes que des prismes.

➤ *Le couplage*

Le couplage entre modèle thermoradiatif et modèle aéraulique est un élément déterminant pour la performance de l'outil, à la fois pour des questions de temps de calcul et pour des questions de précision des résultats. Nous avons mis en place une technique d'échange de variables passant les températures de surface de Solene vers Fluent et les températures d'air, les concentrations massiques d'humidité et les coefficients d'échange superficiel convectif de Fluent vers Solene. Pour le coefficient d'échange superficiel convectif, nous avons réadapté la loi de calcul pour obtenir des flux thermiques échangés plausibles à la surface des parois urbaines. Nous avons utilisé une loi simpliste de forçage en vitesse, mais cette loi est-elle vraiment adaptée ? Doit-on utiliser des lois de parois spécifiques [Xu *et al.*, 1998] ou des méthodes de calcul empiriques renseignées par des données d'entrée issues de mesures en milieu urbain [Hénon, 2008] ?

Le temps de calcul prohibitif pour un calcul en « couplage complet » (voir p.139) nous a poussé à résoudre uniquement les équations de transport d'énergie et d'humidité dans Fluent, à l'exception de la phase d'initialisation. La non-résolution des équations de mouvement empêche de prendre en compte les mouvements de convection naturelle et mixte dans l'air circulant dans la canopée. Deux solutions peuvent être envisagées pour calculer ces équations sans découpler le temps de calcul et dégrader la convergence :

- diminuer la taille de la veine numérique, en attribuant des conditions aux limites adaptées à ses nouvelles frontières fictives ;
- changer de modèle de turbulence ou de méthode de résolution des équations.

Ces modifications au sein des modèles physiques pourraient alors permettre d’optimiser le couplage proprement dit et de tester véritablement les solutions proposées par Zhai [Zhai *et al.*, 2002] (voir p.139). Par ailleurs, cela permettrait d’éviter l’extrapolation faite par Fluent sur les variables physiques en surface en dehors du domaine de simulation thermoradiative, si la veine et le maillage surfacique englobent le même domaine.

## La validation

Comme il est souvent précisé dans la littérature, la connaissance des phénomènes d’échanges énergétiques en contexte urbain nécessite de croiser des approches liées à l’expérimentation, la simulation et la télédétection [Mestayer et Anquetin, 1994]. Arnfield rappelle que la simulation numérique, méthode parfaitement adaptée pour traiter la complexité et la non-linéarité des systèmes climatiques urbains, se développe à grande vitesse dans la communauté scientifique sans que la validation des modèles soit faite de manière immédiate, ou bien le cas échéant de manière trop légère [Arnfield, 2003]. Ainsi, les travaux futurs devraient peut-être avoir la validation comme fil conducteur avant de proposer l’intégration de nouveaux modèles physiques d’aménagements urbains. Une collaboration étroite entre les modélisateurs numériques et les expérimentateurs de terrain serait souhaitable pour combler les manques ou révéler les points particuliers où les deux domaines doivent se compléter.

Pour la modélisation thermique du bâtiment, il existe des benchmarks de validation et de comparaison des résultats avec d’autres modèles (procédure BesTest). Il serait souhaitable de tester les performances du modèle de bâtiment déconnecté de l’environnement de simulation couplé complet dans des conditions climatiques standard.

Toujours est-il que les résultats à la sortie des modèles dépendent sensiblement de la qualité de ces derniers, mais aussi et surtout de la qualité des données d’entrée telles les propriétés thermophysiques des matériaux. Pour évaluer la qualité des modèles d’aménagements ou de bâtiment il faut s’assurer de la qualité des données physiques en entrée de modèle. En effet les propriétés telles que la conductivité thermique, la capacité calorifique ou la masse volumique sont obtenues par des données bibliographiques, différentes d’un ouvrage à l’autre. De plus sur le site, on n’est pas toujours précisément renseigné sur le type des matériaux mis en oeuvre en particulier pour les différentes couches du sous-sol. Les incertitudes liées à la technique de modélisation elle-même peuvent être de l’ordre de grandeur des incertitudes liées aux propriétés physiques.

## Les aspects méthodologiques

La décomposition du travail en deux parties, l’une consacrée à l’étude du bâtiment seul, l’autre à l’étude du bâtiment dans le système climatique urbain a permis de montrer que

l'impact énergétique des aménagements ne peut pas s'entrevoir de manière générale, mais en le mettant en relation avec les caractéristiques intrinsèques du bâtiment étudié. Pour caractériser ce bâtiment de référence observé, l'étude de sensibilité a permis de mettre en relief certaines tendances par le biais de paramètres calculables sur une version simplifiée du bâtiment. Nous pouvons tout de même relever des limites concernant les paramètres constructifs et climatiques ci-dessous :

➤ *La compacité*

C'est l'indicateur qui a conduit aux résultats les plus surprenants. Si, nous devions refaire l'étude paramétrique, le tirage aléatoire se ferait directement sur les valeurs de la compacité pour générer ensuite les cotes - longueur, profondeur et hauteur (nombre de niveaux) - du bâtiment. Ceci permettrait de nous prémunir des problèmes de distribution des compacités sur leur intervalle de définition. Une autre possibilité pourrait être de scinder le paramètre compacité en deux indicateurs de compacité relatifs aux façades puis aux toitures - plancher bas, comme l'a fait Groleau dans son travail [Groleau et Bourges, 2005]. Ceci permettrait de prendre en compte la différence de coefficient d'isolation entre les parois verticales et les planchers hauts et bas.

➤ *Le taux de vitrage*

Considérer des taux de vitrage constant sur toute l'enveloppe du bâtiment était une bonne première approche, surtout en contexte urbain. Cependant, il est rare de trouver pour des bâtiments non mitoyens, des façades Sud ayant un taux de vitrage identique aux autres façades. Une revue de bâtiment de bureaux ou tertiaires pourrait être réalisée afin d'alimenter la définition de cette variable en fonction des orientations.

➤ *Le taux de flux solaire*

Le taux de flux solaire ( $T_F$ ) est le paramètre qui a suscité le plus d'observations du fait de son importance au niveau de l'influence de l'environnement climatique sur les consommations énergétiques. Nous listons ainsi toutes les possibilités qui sont offertes pour affiner la prise en compte de ce phénomène dans la caractérisation énergétique du bâtiment :

- la prise en compte indispensable de  $T_F$  en hiver ;
- une séparation de  $T_F$  en deux sous-indicateurs, un pour les protections solaires, un pour l'environnement bâti avec éventuellement une corrélation des valeurs de ce dernier pour l'hiver et l'été (relation avec le facteur de vue du ciel?) ;
- une séparation des  $T_F$  pour les parois opaques et vitrées ;

- l'intégration du flux solaire diffus qui représente une partie non négligeable des apports énergétiques ;

Nous avons classé le taux de flux solaire comme une variable climatique, elle peut finalement être classée comme une variable constructive puisque d'une part elle dépend de l'implantation du bâtiment tout comme l'orientation et, d'autre part, elle dépend des dispositifs mis en oeuvre sur l'enveloppe pour filtrer le flux solaire.

➤ *Les autres paramètres climatiques*

Les trois autres paramètres climatiques avaient pour but de représenter l'influence de l'environnement climatique en l'homogénéisant à la surface de l'enveloppe pour observer les interactions avec les variables constructives. Les deux paramètres influents ne peuvent intervenir dans le choix des bâtiments à traiter dans le site d'étude puisqu'il est impossible de donner une valeur pour ceux-ci sans avoir réalisé la simulation. Leur pertinence dans l'étude paramétrique peut être remise en cause et nous pouvons envisager de reconduire cette étude uniquement avec les paramètres constructifs.

Concernant la méthode statistique proprement dite, plusieurs perspectives sont envisageables. Le premier aspect est celui de la construction des intervalles de sensibilité. La méthode du test K-S permet de définir une des bornes (inférieure ou supérieure) de l'intervalle sensible prise à l'intérieur de l'intervalle de définition. La deuxième borne de l'intervalle sensible est alors prise égale à la borne (supérieure ou inférieure, respectivement) de l'intervalle de définition en fonction de la répartition des valeurs sensibles. Nous pourrions alors affiner la définition de cette deuxième borne en faisant un deuxième passage des cas classifiés dans la procédure statistique. Ce deuxième passage est notamment utilisé dans les applications de calibration de modèle.

Les classes énergétiques sont définies à partir de seuils énergétiques arbitraires. Ceux-ci ont du sens au niveau statistique puisqu'ils permettent de discriminer des cas appartenant au même échantillon à partir de valeurs relatives, mais ils ne sont pas mis en confrontation avec les seuils de consommation proposés par les réglementations thermiques ou les labels de haute performance énergétique. De plus les seuils de consommation sont établis pour des consommations annuelles alors que nous avons délibérément choisi de simuler des cas sur une semaine étant donné les temps de simulation importants requis par notre outil de simulation. Les classes énergétiques ne peuvent être de ce fait corrélées aux réglementations en vigueur.

Ceci pose le problème plus général de l'adaptation de la période de simulation à la réalité du besoin à savoir simuler les consommations sur une année. Si l'allègement des modèles physiques va contre l'intérêt de ce type de travail, des efforts pourraient se porter sur des procédés

d'extrapolation de consommations journalières ou hebdomadaires vers des consommations au mois, à la saison ou à l'année. Nous pourrions également nous intéresser à des travaux faits sur la traduction des conditions du microclimat sur la modification des degrés-jours ou degrés-heures de chauffage ou de climatisation.

### **Les moyens d'aide à la conception**

Dans sa configuration actuelle, l'outil développé reste plutôt à destination des chercheurs, pour tirer des enseignements d'études systémiques à l'image des résultats produits dans ce travail. Mais au vu de l'adaptabilité (géométrie et description des matériaux) à la configuration urbaine réelle illustrée par l'étude du dernier chapitre, cet outil peut également être pris en main par un utilisateur averti pour étudier l'optimisation énergétique de son projet architectural ou urbain en phase d'esquisse. Le facteur le plus contraignant reste le temps de calcul, pas toujours en phase avec le temps accordé à ce type d'étude en phase opérationnelle.

Aussi, dans une perspective à plus long terme, cet outil pourrait permettre la constitution de guides à la conception, comme par exemple :

- une liste de cas architecturaux ou urbains de référence, simulés, analysés et documentés, pouvant constituer une base de comparaison pour la conception d'un nouveau projet ;
- un ensemble de conseils pouvant être adaptés à n'importe quel bâtiment en décrivant l'objet d'étude et son environnement par l'intermédiaire d'indicateurs architecturaux ou urbain faciles à calculer à partir d'une première esquisse. Dans ce cas nous avons commencé à établir une liste d'indicateurs décrivant l'interface bâtiment-microclimat ; mais du travail semble encore nécessaire pour évaluer le potentiel des indicateurs architecturaux et urbains à décrire ou être corrélés avec les phénomènes microclimatiques et énergétiques.

Rappelons toutefois que la réalisation de ces guides doit prendre la forme de recueil d'informations et de suggestions à destination des architectes, pour leur laisser une liberté certaine de création.



## Annexes

### Sommaire

---

A.1	Rappels théoriques sur les échelles climatiques . . . . .	274
A.2	Choix des bâtiments d'étude au sein du projet Lyon Confluence : les ajustements volumétriques . . . . .	284

---

## A.1 Rappels théoriques sur les échelles climatiques

### A.1.1 Définir le climat

Le terme climat vient du mot grec *klima* signifiant inclinaison. Le rayonnement solaire constitue l'unique source d'énergie externe permettant le réchauffement de l'atmosphère et de la surface terrestre ; ce flux radiatif varie effectivement en fonction de l'inclinaison des rayons solaires suivant la latitude du lieu et la période de l'année. De là résultent des déséquilibres zonaux du bilan radiatif, puis la création concomitante des mouvements des vents à l'échelle planétaire et du cycle de l'eau, qui conduisent ensemble à la formation des différents climats à la surface du globe.

Une observation de la surface terrestre permet alors de distinguer à différentes échelles des régions assez étendues, ou plus localement, des sites, dont chacun rassemble deux catégories interdépendantes de traits distinctifs :

- une *homogénéité géographique*, déterminée notamment par le positionnement en latitude, la distance par rapport à l'océan, la configuration du relief, le type de couverture végétale et d'implantation humaine
- une *régularité temporelle* des variations subies au cours d'une année par les grandeurs météorologiques et par les apparitions de phénomènes atmosphériques, cette régularité étant typique de la région ou du site d'observation

Ces associations peuvent se retrouver dans différentes zones de la surface terrestre, auxquelles sont attribuées par définition un même nom de climat. Chaque zone de climat donné est découpée en une succession d'époques dont les limites restent sensiblement les mêmes d'une année sur l'autre : les saisons climatiques. Elles sont décrites à partir des valeurs moyennes des grandeurs météorologiques concernées, par les types de fluctuations de ces grandeurs autour de leurs moyennes et par les phénomènes atmosphériques qui peuplent cette époque. Le terme climat peut alors être défini comme une présentation synthétique du comportement des couches atmosphériques où s'observent les grandeurs et les phénomènes météorologiques au-dessus d'une zone donnée [MeteoFrance, 2008].

En ce sens, la climatologie est la branche de la météorologie consacrée à l'étude de ces climats. Les observations météorologiques, reposant sur un ensemble de variables mesurées - parmi elles la pression atmosphérique, la température, la vitesse et la direction du vent, la masse d'humidité, la hauteur des précipitations, l'ensoleillement - et archivées pour un grand nombre de sites géographiques et sur le plus grand nombre possible d'années pour chaque site, constituent le matériel statistique grâce auquel la climatologie peut étudier l'état physique moyen de l'atmosphère et les fluctuations de cet état dans le temps et l'espace. Ainsi cette science se propose d'examiner les caractéristiques et l'évolution du climat global de la Terre, mais aussi de discriminer, classifier et décrire à différentes échelles divers types de climat.

Comme pour beaucoup d'autres sciences à base physique, la théorie de la climatologie repose sur deux types d'échelles : celle du temps et celle de l'espace. Ainsi un phénomène météorologique, suivant sa nature (perturbation, cyclone tropical, orage, brise, échange thermique ou turbulent), est caractérisé par une dimension spatiale et une durée de vie qui s'écartent assez peu d'un ordre de grandeur de référence en fonction du type de phénomène observé [MeteoFrance, 2008]. La climatologie est en quelque sorte partitionnée en autant de spécialités que de types d'échelle. Nous détaillons successivement dans les paragraphes suivants les caractéristiques liées aux grandes échelles jusqu'à celles propres à la climatologie urbaine.

### A.1.2 Les échelles temporelles climatiques

Notre climat est soumis à deux principales variabilités temporelles : la variabilité diurne occasionnée par la rotation de la terre sur elle-même et la variabilité saisonnière conditionnée par l'évolution de l'incidence solaire. Pour les météorologistes, les saisons ne coïncident pas avec les saisons astronomiques définies par les positions extrêmes et intermédiaires du soleil. En effet, le maximum de chaleur ne se produit pas au niveau du solstice d'été mais aux alentours de la mi-juillet. De même la période la plus froide de l'année n'a pas lieu au moment du solstice d'hiver mais vers le 15 janvier. Ce décalage est essentiellement dû à l'inertie thermique de l'océan et de l'atmosphère. Pour des commodités dans les calculs statistiques, le mois est pris comme période de référence. Pour les mêmes raisons, on découpe les saisons de manière trimestrielle : les trois mois les plus chauds correspondent à l'été, les plus froids à l'hiver, et les périodes de transition d'intersaison au printemps et à l'automne.

Plus localement et plus spécifiquement, l'apparition et la disparition d'un phénomène météorologique particulier ne sont pas complètement désordonnées, mais le phénomène se maintient et évolue distinctement durant un certain intervalle de temps pouvant varier de la dizaine de minutes à quelques heures, voire à plusieurs jours [MeteoFrance, 2008]. Les variations des caractéristiques générales des grandes familles de climats dépendent de phénomènes météorologiques correspondant à des échelles de temps rythmées par les périodes saisonnières, mais aussi à des échelles d'espaces en dessous des millions de kilomètres carrés. La notion d'échelle temporelle ne prend de sens que lorsqu'elle est associée à une échelle spatiale ; on parle alors habituellement d'échelles spatio-temporelles. On peut cependant introduire la notion d'échelle spatiale sans considérer le temps pour décrire le fonctionnement général du système atmosphérique à différents niveaux.

### A.1.3 Les échelles spatiales climatiques

Les spécialistes de la climatologie ou de la météorologie se réfèrent à des échelles spatiales associées à des phénomènes climatologiques se développant dans cette étendue. La description

de ces échelles passe par la définition de deux types de découpages verticaux et horizontaux qui associées définissent les volumes d'atmosphère correspondant à l'expansion de ces phénomènes.

### **Les échelles climatiques horizontales ou échelles de surface**

On décrit généralement les échelles horizontales en réduisant successivement les ordres de grandeur correspondant à des unités de surface de référence approximatives. Ces échelles sont imbriquées et pour chacune d'elles, des théories spécifiques et des modèles de simulation ont été développés.

L'échelle climatique la plus étendue que l'on peut distinguer est l'**échelle planétaire**, encore appelée échelle globale, échelle climatologique ou macro-échelle. A cette échelle, les hétérogénéités aérodynamiques de surface correspondent aux grandes caractéristiques du relief à l'échelle du globe, et les hétérogénéités thermiques et hydriques sont liées aux grands modes de recouvrement, continent ou océan, aux conditions météorologiques régionales et à l'altitude des surfaces. L'ordre de grandeur des surfaces est de quelques millions de kilomètres carrés, on parle de sous-continent. La dimension horizontale de cellules des modèles de calcul est de l'ordre de plusieurs centaines de kilomètres. A ces échelles, les modèles ont notamment pour objectif de prévoir l'évolution du climat sur Terre sur une période de plusieurs dizaines d'années, de comprendre l'influence des océans sur le climat, mais aussi d'intégrer les émissions de gaz à effet de serre comme le  $CO_2$  ou le  $CH_4$  [Dupont, 2001]. Les phénomènes météorologiques comme les anticyclones et les dépressions sont à l'origine de mouvements d'air caractéristiques de l'échelle planétaire, notamment entre l'équateur plutôt chaud et les pôles plutôt froids.

Une échelle de dimension un peu plus faible est également définie : l'**échelle synoptique**. S'étendant de quelques centaines à quelques milliers de kilomètres carrés, cette échelle compose le cadre du suivi opérationnel des perturbations tempérées ; les cyclones tropicaux relèvent quant à eux d'une échelle subsynoptique légèrement plus réduite, tandis que les migrations des dépressions et celles, moins rapides, des anticyclones s'observent dans le contexte d'une échelle suprasynoptique plus étendue (en dessous du million de kilomètre carré), du moins lorsque l'échéance de prévision atteint déjà 3 ou 4 jours [MeteoFrance, 2008].

Vient ensuite l'échelle des climats régionaux ou la **méso-échelle**, qui s'applique à des étendues de quelques centaines de kilomètres carrés soumises à des phénomènes météorologiques bien particuliers. A cette échelle, les observations, les études ou les modèles de prévision s'intéressent aux processus aérodynamiques, physiques et chimiques engendrés par l'interaction entre la circulation générale et des particularités de surface comme les zones urbaines dans leur ensemble ou le relief ; l'objectif secondaire est de fournir des prévisions

météorologiques sur plusieurs jours et d'alimenter les modèles de plus petites échelles en termes de conditions aux limites. Une illustration de ces phénomènes est l'apparition des vents dominants observables sur plusieurs centaines de kilomètres et ils fluctuent sur des périodes de l'ordre de la journée [Bozonnet *et al.*, 2006]. A cette échelle, les hétérogénéités aérodynamiques de surface correspondent principalement au relief et aux éléments de rugosité du sol ; les hétérogénéités thermiques et hydriques sont généralement liées aux grands modes d'occupation du sol et aux variations spatiales des conditions météorologiques comme les précipitations ou l'ombrage des surfaces induits par les nuages [Dupont, 2001].

Quelques spécialistes utilisent une échelle intermédiaire sous-jacente appelée échelle des climats locaux. Elle peut encore porter le nom de petite méso-échelle ou **échelle sub-méso**. Elle s'applique à des sites s'étendant sur plusieurs dizaines de kilomètres carrés en moyenne. Les particularités environnementales sont de nature équivalente à celles de l'échelle méso mais peuvent se différencier localement par des phénomènes de vents locaux, d'écarts de température et d'humidité. Ces particularités peuvent avoir une origine humaine, s'agissant alors essentiellement du climat urbain, ou peuvent être entretenues par un milieu naturel tel qu'un rivage marin ou lacustre, une forêt ou bien une vallée [MeteoFrance, 2008]. La dimension horizontale des cellules de calcul des modèles est de l'ordre de quelques centaines de mètres. A ces échelles, les modèles ont souvent pour objectif de déterminer la qualité de l'air et le transfert de polluants à l'échelle de zones urbaines [Dupont, 2001].

Enfin, la plus petite échelle climatique définie par les spécialistes est l'**échelle microclimatique**. Elle s'applique à des sites peu étendus : quelques milliers de mètres carrés en moyenne, parfois beaucoup moins. Les traits spécifiques de la topographie et de l'environnement à petite échelle (bâtiments et obstacles divers, couvert végétal) modifient sur des aires réduites, mais de façon parfois très notable, les caractéristiques générales de l'écoulement aérien, de l'ensoleillement, de la température et de l'humidité. A ces échelles, les modèles ont généralement pour objectif d'évaluer, dans les rues considérées, le confort des piétons, la qualité de l'air, etc., mais aussi de comprendre les processus physiques se produisant à l'intérieur de la canopée afin de les intégrer dans des modèles de plus grandes échelles, en particulier les flux de chaleur sensibles, radiatifs, d'humidité et de polluants à l'interface canopée-atmosphère [Dupont, 2001]. La dimension horizontale de leurs cellules de calcul est de l'ordre de quelques mètres. A ces échelles, les hétérogénéités aérodynamiques de surface correspondent aux différentes rugosités des matériaux recouvrant les surfaces, et les hétérogénéités thermiques et hydriques correspondent aux différences de température et d'humidité des surfaces.

## Les échelles climatiques verticales ou échelles atmosphériques

Les principales échelles climatiques ont été présentées précédemment. Les 3 échelles principales sont par taille décroissante l'échelle climatologique, la méso-échelle et la micro-échelle; les deux échelles intermédiaires que sont l'échelle synoptique et l'échelle sub-méso venant s'intercaler. Leur emprise surfacique est ainsi déterminée mais leur expansion verticale n'a pas été présentée. La partie suivante se propose d'établir les correspondances entre les échelles horizontales exposées précédemment et des échelles verticales distinctives de l'air atmosphérique.

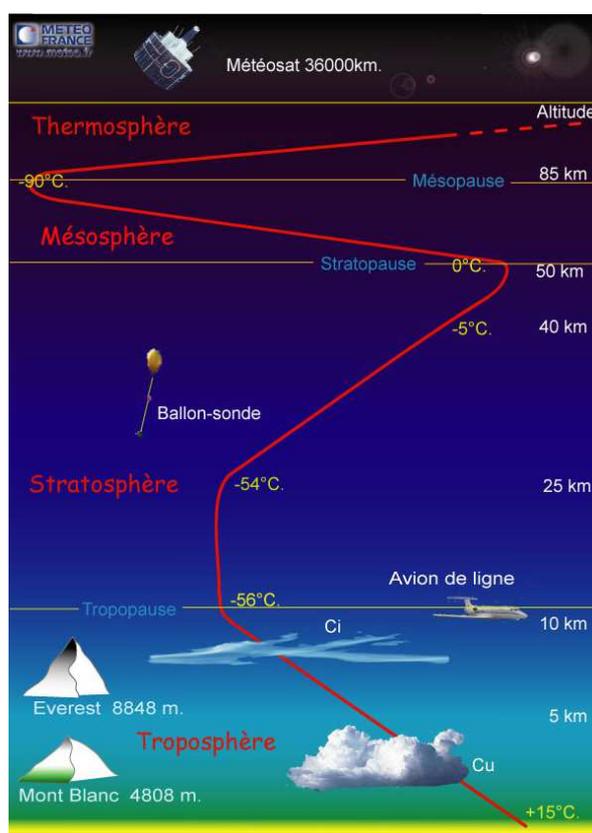


Figure A.1 : Coupe verticale de l'atmosphère terrestre [MeteoFrance, 2008]

L'atmosphère terrestre est divisée en plusieurs couches caractérisées principalement par leur profil vertical de température (figure A.1). Ainsi, le domaine de la basse atmosphère s'identifie à la **troposphère**, riche en vapeur d'eau et en nuages, et au sein de laquelle la température décroît assez régulièrement avec l'altitude. L'épaisseur de cette troposphère se réduit quand la latitude augmente. Son ordre de grandeur est de la dizaine de kilomètres dans les régions tempérées. Il se réduit à sept kilomètres aux pôles et frôle la vingtaine de km au-dessus de la zone équatoriale [MeteoFrance, 2008]. L'air, mélange de gaz et de particules solides ou liquides constitué à 99% par de l'oxygène et de l'azote [Turbelin, 2000], se trouve concentré dans cette

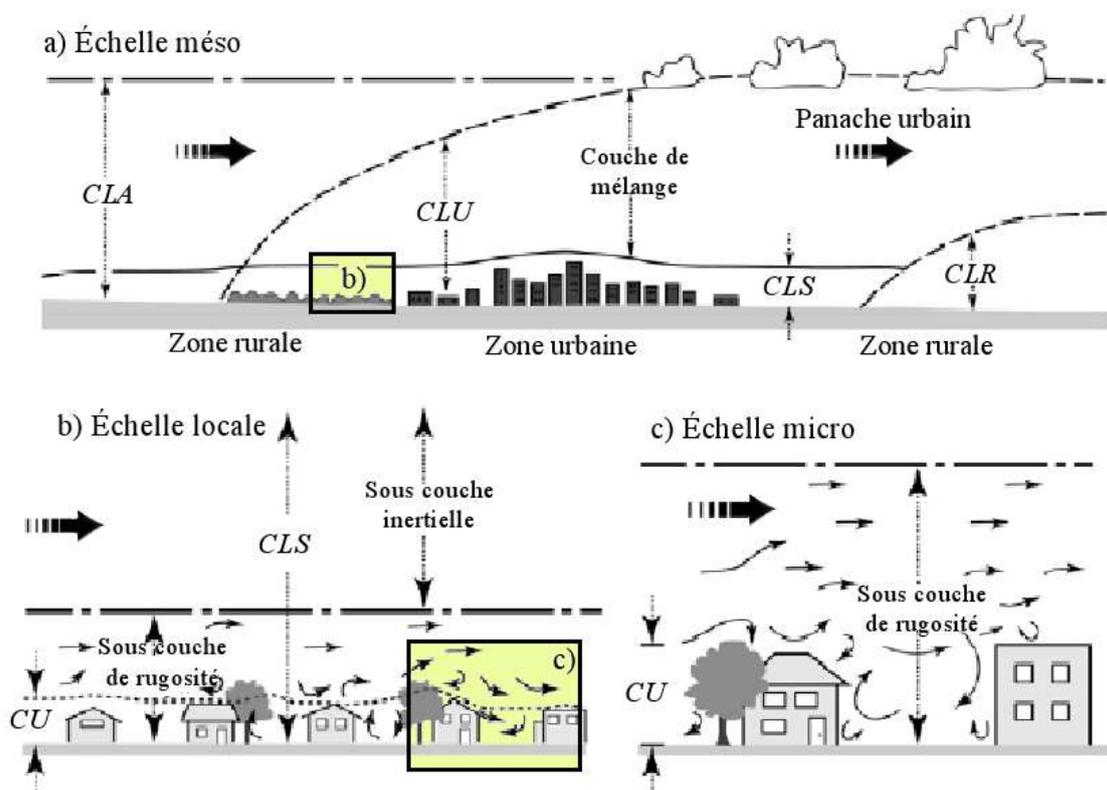
basse couche de l'atmosphère puisque 90% et 99% de la masse d'air se situent respectivement en dessous de 16 km et 30 km d'altitude respectivement [MeteoFrance, 2008].

A mesure que l'on s'éloigne de la surface terrestre en altitude, vient le domaine de la moyenne atmosphère qui recouvre la **stratosphère**, jusqu'à une cinquantaine de kilomètres d'altitude et la **mésosphère**. L'air y garde une composition quasiment identique à celle de la basse atmosphère et ses mouvements sont régis par les mêmes lois. Cependant, les réactions photochimiques induites par la présence d'ozone stratosphérique fournissent à l'air un apport de chaleur, de sorte que lorsqu'on s'élève dans la stratosphère, la température devient d'abord constante, puis se met à croître; ce n'est que plus haut, dans la mésosphère, que le profil thermique vertical est à nouveau décroissant.

Enfin, vient le domaine de la haute atmosphère, où, dans la **thermosphère**, des transformations physiques et chimiques affectent de plus en plus profondément un air devenu très raréfié et soumis à une température considérablement croissante avec l'altitude. La thermosphère est prolongée par l'**exosphère**, où l'altitude est désormais suffisante pour qu'une part notable des particules ionisées constituant alors l'atmosphère échappe à l'attraction de la gravitation terrestre. On peut ainsi considérer que l'épaisseur de l'enveloppe atmosphérique ne va pratiquement pas au-delà de 1 500 km, ce qui dépasse tout de même de très loin la pellicule d'air où se situent la grande majorité des phénomènes météorologiques, lesquels restent enserrés dans la troposphère et la basse stratosphère.

Les interactions entre l'atmosphère et la surface terrestre sont limitées à la troposphère. A l'échelle journalière, l'influence terrestre, en considérant les aspects thermiques, aérodynamiques et topographiques, est restreinte à une couche inférieure de la troposphère de 1 à 2 kilomètres d'épaisseur que l'on appelle la couche limite atmosphérique (CLA) [Dupont, 2001]. Au dessus de la CLA, se situe l'atmosphère libre où les champs météorologiques sont déterminés par la dynamique et la thermodynamique des échelles planétaires ou synoptiques et où l'écoulement aérien est globalement laminaire.

La CLA est associée aux méso-échelles et aux échelles sous-jacentes. Son étude a fait l'objet de nombreuses publications. Son épaisseur, varie de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres en fonction de la vitesse du vent, de la rugosité des sols, de l'ensoleillement variable [Turbelin, 2000]. Sa structure est variable selon l'heure de la journée [Glockner, 2000]. Elle se découpe en deux couches :



**Figure A.2 :** Imbrication des échelles climatiques et atmosphériques, de l'échelle méso à l'échelle micro, de la CLA à la CU, adapté de [Oke, 2006]

**La couche d'Ekman :** Elle correspond à la partie supérieure de la CLA et peut aussi être appelée couche de mélange (figure A.2, a). Dans cette couche, la circulation d'air est causée par un équilibre entre le gradient de pression, la force de Coriolis - due à la rotation quotidienne de la Terre - et les forces de frottement au sol diminuant graduellement jusqu'à l'atmosphère libre. Les effets de frottement étant faibles comparés à la force de Coriolis, le vent y subit une déviation angulaire dans le sens anticyclonique par rapport à son orientation au sol [Dupont, 2001].

**La couche limite de surface (CLS) :** Elle se situe juste au dessus du sol et ne dépasse pas le dixième de celle de l'ensemble de la CLA (figure A.2, a, b). Dans cette couche, l'effet de la force de Coriolis est négligeable devant les effets du sol et les mouvements d'air internes sont causés par la convection due aux différences de températures et par les effets dynamiques du relief [Dupont, 2001]. La faible viscosité de l'air y entraîne des valeurs du nombre de Reynolds<sup>1</sup> importantes, de l'ordre de  $10^6$  à  $10^9$ . La proximité du

<sup>1</sup>Nombre sans dimension représentant le ratio entre les forces d'inertie et les forces visqueuses. Pour une viscosité et une géométrie donnée, il donne aussi la transition entre un écoulement laminaire et un écoulement turbulent.

sol modifie le profil de vitesse du vent du fait d'un fort cisaillement et de la présence d'obstacles; des discontinuités obligent également le vent à modifier sa trajectoire. La distribution verticale de la température induit des mouvements verticaux de masses d'air chauffées et refroidies a proximité du sol [Turbelin, 2000].

La CLA est également coiffée d'une zone d'entraînement ou d'inversion qui attire l'atmosphère moins turbulente présente au-dessus de la couche de mélange, ce qui augmente la hauteur de cette dernière. La zone d'entraînement est souvent caractérisée par une stabilité thermique qui bloque les ascensions d'air et par conséquent une zone où les polluants sont bloqués [Glockner, 2000].

On peut rediviser la couche limite de surface en plusieurs couches propres aux phénomènes physiques induits par les éléments de rugosité naturels ou artificiels installés par l'homme. Au dessus d'une zone homogène, on peut redécouper la couche de surface en trois nouvelles sous-couches, de l'altitude maximale au niveau du sol :

**La sous-couche d'inertie ou d'équilibre** : L'échelle des éléments de rugosité des surfaces continentales étant plus petite que celle des grands tourbillons de la CLS, les fluctuations spatiales associées à ces éléments sont absorbées par le mélange turbulent à partir d'une certaine altitude. On parle à cette altitude d'une sous-couche en équilibre (figure A.2, b). Dans celle-ci, l'écoulement moyen est spatialement homogène horizontalement, c'est-à-dire qu'il est structuré comme si la surface de support était homogène. Sa structure est celle d'une couche à flux constant ; les profils de vitesse, de température, et d'humidité spécifiques sont logarithmiques et dépendent tous d'une hauteur de déplacement et chacun respectivement d'une rugosité dynamique, thermique et hydrique du sol. La hauteur de déplacement s'interprète comme un décalage d'origine des altitudes. La hauteur de rugosité dynamique est la hauteur à laquelle la vitesse moyenne longitudinale s'annulerait si le profil logarithmique était prolongé au-delà de son domaine de validité. Elle exprime la capacité de la canopée à absorber le flux de quantité de mouvement tandis que les longueurs de rugosité thermique et hydrique caractérisent respectivement la capacité d'absorption ou d'émission du flux de chaleur sensible et du flux d'humidité. Dans une couche en équilibre, l'écoulement étant spatialement homogène, il est possible de déterminer une paramétrisation des profils de variables caractérisant l'écoulement à partir d'une technique dite théorie de similitude [Dupont, 2001].

**La sous couche de rugosité** : Dans cette couche s'étendant quelques mètres au dessus des obstacles (figure A.2, b, c), les sillages créés par les éléments de rugosité les plus hauts et accidentés interagissent entre eux, créant une turbulence importante où les structures turbulentes se propagent dans les trois directions. L'influence individuelle des éléments de rugosité est importante et l'écoulement n'est pas homogène horizontalement. Les transferts de quantité de mouvement et de chaleur se font à l'intérieur de cette

sous-couche par le processus de diffusion turbulente de petite échelle induite par les traînées au-dessus des obstacles. Cette turbulence joue un rôle crucial sur les premières transformations chimiques des polluants émis à l'intérieur de la canopée et dans la sous-couche rugueuse pour les zones urbaines. Cette sous-couche étant fortement perturbée, il est difficile de paramétrer le profil moyen des variables caractérisant l'écoulement. Au dessus d'un sol hétérogène, la sous-couche rugueuse est nettement plus épaisse que celle pour un sol homogène à cause de l'interaction des différentes sous-couches limites internes et de l'interférence entre les sillages induits par les hétérogénéités de surface. La sous-couche de rugosité se délimite généralement entre la cote à hauteur moyenne des bâtiments et celle à 2 ou 3 voire à 5 fois leur hauteur.

**La couche de canopée végétale ou urbaine (CU)** : Dans une canopée végétale, le flux de quantité de mouvement n'est pas absorbé juste au niveau de la surface mais sur toute l'épaisseur du couvert végétal ; il en est de même pour un quartier urbain homogène. A l'intérieur de la couche de canopée, l'air circule entre les éléments de rugosité et peut remonter au niveau de la sous-couche rugueuse par des phénomènes de convection turbulente ou d'entraînement liés à la rencontre d'obstacles (figure A.2, b, c). Les processus physiques qui se déroulent à l'intérieur de la canopée sont très complexes et difficiles à évaluer du fait de la configuration aléatoire des volumes d'air et de par la présence de sources et de puits de quantité de mouvement, de chaleur et d'humidité. La canopée urbaine est certainement la plus complexe à cause de la variété des matériaux composant les différentes surfaces qui ont des propriétés thermiques très différentes, et à cause de la présence de sources de chaleur anthropiques. Les échelles de temps des processus physiques concernés dans cette couche sont très courtes, en particulier la plupart des échanges thermiques (rayonnement solaire et infrarouge, flux de chaleur sensible, flux d'énergie produite par l'activité humaine).

On parle souvent de couche limite urbaine ou CLU (figure A.2). La CLU est un cas particulier de la CLA quand l'air circule au dessus d'une ville. A la campagne l'expansion verticale de la CLS est déterminée par les conditions de l'échelle régionale alors qu'en ville c'est plutôt les effets internes qui déterminent son étendue. L'aspect qui la différencie nettement de la couche limite atmosphérique, c'est l'existence au-dessus des villes d'un *îlot de chaleur urbain* (ICU), caractérisé par des températures plus élevées qu'au-dessus de la campagne environnante. L'allure de la CLU (et de l'ICU), d'après [Oke, 1987] puis [Mestayer et Anquetin, 1994], oscille entre deux configurations extrêmes :

- par vent fort, elle décrit un **panache urbain** isolé au-dessus de la couche limite rurale (*urban plume* sur la figure A.3) par lequel les polluants de la ville peuvent être transportés ;

- par vent faible ou par situation anticyclonique en hiver, celle d'un **dôme urbain** (*urban dome* sur la figure A.3) formé par les effets thermiques ascensionnels conduisant à une circulation fermée d'air (brise urbaine).

L'ICU est ainsi le principal phénomène spécifique à la climatologie urbaine. Il s'observe à grande échelle mais il est engendré par une multitude de phénomènes propres à l'échelle microclimatique. Une partie de ce chapitre est dédiée à la description de ce phénomène et à son origine.

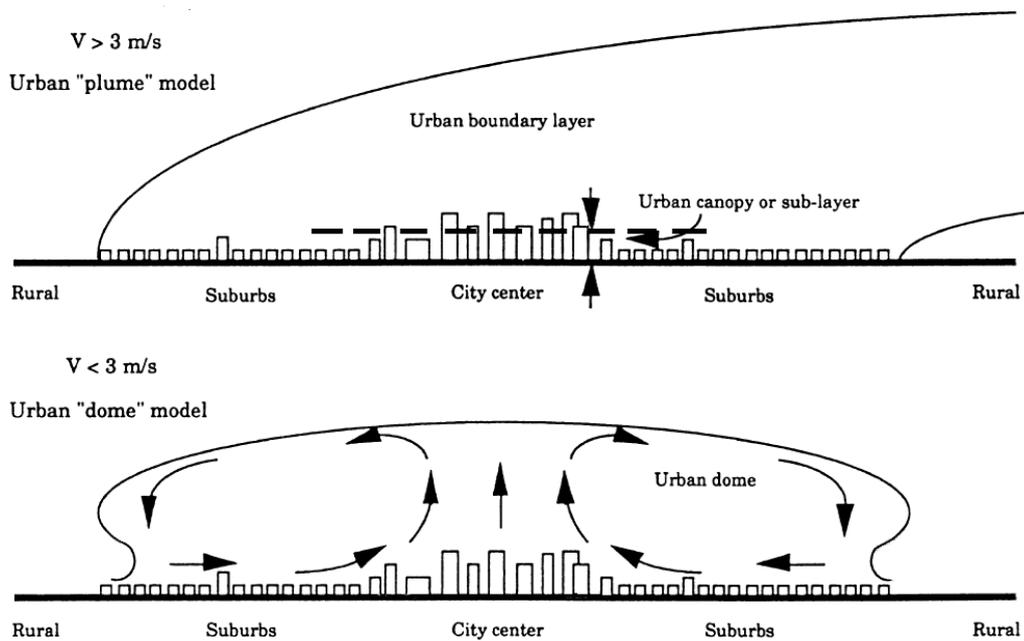


Figure A.3 : Les deux figures classiques de couches limites urbaines [Mestayer et Anquetin, 1994]

## A.2 Choix des bâtiments d'étude au sein du projet Lyon Confluence : les ajustements volumétriques

### ILOT A SUD

	Bâtiment réel			« Boite englobante »		
	Volume (m3)	Surface (m2)	CP	Volume (m3)	Surface (m2)	CP
Bâtiment 1	12592	4217	2.98	16411	4248	3.86
Bâtiment 2	6873	2390	2.88	8753	2632	3.32
Bâtiment 3	20077	6268	3.2	27832	6489	2.33

### ILOT B SUD

	Bâtiment réel			« Boite englobante »		
	Volume (m3)	Surface (m2)	CP	Volume (m3)	Surface (m2)	CP
Bâtiment 1	5323	2324	2.29	8482	2571	3.3
Bâtiment 2	8989	3179	2.83	13064	3487	3.8
Bâtiment 3	8983	3417	2.63	13283	3487	3.8
Bâtiment 4	7302	2722	2.68	10228	2975	3.43
Bâtiment 5	5487	2182	2.51	6551	2206	2.97
Bâtiment 6	10189	3528	2.89	13086	3423	3.82
Bâtiment 7	9402	3406	2.76	14066	3618	3.88

### ILOT B NORD

	Bâtiment réel			« Boite englobante »		
	Volume (m3)	Surface (m2)	CP	Volume (m3)	Surface (m2)	CP
Bâtiment 1,3,5,7	2148	1124	1.91	idem	idem	idem
Bâtiment 2,4,6	1866	1002	1.86	idem	idem	idem
Bâtiment 8	16502	5097	3.24	24238	5400	4.48
Bâtiment 9	5031	1951	2.58	5974	2093	2.85
Bâtiment 10	11657	3880	3	14123	3786	3.73
Bâtiment 11	12438	3996	3.11	17252	4160	4.15

**Tableau A.1 :** Calcul exact des volumes des bâtiments des îlots A sud, Bnord et Bsud à partir de la modélisation 3D (Nous rappelons que nous ne disposons pas du modèle de l'îlot A nord 4 que nous reconstruirons en fonction de besoins). Les bâtiments dont les cases sont sur-lignées sont les bâtiments pré-sélectionnés par leur volume (ou celui de leur boite englobante).

**« Boite ajustée »**

	Volume (m3)	Surface (m2)	CP	Orientation	Classe possible
Bâtiment A nord 1	9000	2599	3,46	-29	3
Bâtiment A nord 3	9000	2670	3,37	61	2 ou 4
Bâtiment A nord 4	9000	3317	2,71	-29	1
Bâtiment A sud 2	9000	2670	3,37	61	2 ou 4
Bâtiment B nord 11	9000	2679	3,36	-29	3
Bâtiment B sud 1	9000	2683	3,35	-29	3
Bâtiment B sud 4	9000	2725	3,3	61	2 ou 4
Bâtiment B sud 7	9000	2670	3,37	-29	3

**Tableau A.2 :** Ajustement volumétrique : nous reconstruisons une boite parallélépipédique d'un volume de 9000 m<sup>3</sup>, correspondant au plus juste à la volumétrie des bâtiments présélectionnés

N° bâtiment	Compacité	Orientation (°)	Taux de flux solaire (%)	Taux de flux solaire avec protection solaires (%)	Classe possible	Taux de vitrage (%)
Bâtiment A nord 1	3.46	-29	85.4		3	
Bâtiment A nord 3	3.37	61	78.9		4	
Bâtiment A nord 4	2.71	-29	90.3	35.1*	1	33.3
Bâtiment A sud 2	3.37	61	74.5		4	66.6
Bâtiment B nord 11	3.36	-29	82.6		3	66.6
Bâtiment B sud 1	3.35	-29	76.6		3	
Bâtiment B sud 4	3.3	61	75.7	37.4**	2	33.3
Bâtiment B sud 7	3.37	-29	73.3		3	66.6

\* (débord 1.5m à chaque étage + protection toiture T=40%)

\*\* (débord de 2.0m à chaque étage)

**Tableau A.3 :** Bilan des paramètres de sensibilités calculés : Pour chaque bâtiment, nous calculons quatre paramètres constructifs et climatiques dépendant de la configuration du projet. Les bâtiments dont les cases sont sur-lignées sont les quatre bâtiments sélectionnés par élimination. Deux bâtiments ont été munis de protections solaires pour accorder leur taux de flux solaire direct été avec les classes 1 et 2.



## Références bibliographiques

- [ADEME, 2005] ADEME (2005). Les chiffres clés du bâtiment 2005 : Parcs et usages de l'énergie dans les logements et bâtiments non résidentiels. <http://www2.ademe.fr/>.
- [Adolphe, 2001] ADOLPHE, L. (2001). A simplified model of urban morphology : application to an analysis of the environmental performance of cities. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 28:183–200.
- [AFNOR, 1994] AFNOR (1994). *Ambiances thermiques modérées – Détermination des indices PMV et PPD et spécifications des conditions de confort thermique. NF EN ISO 7730*.
- [AFNOR, 2004] AFNOR (2004). *Performance thermique des bâtiments. Calcul des besoins d'énergie pour le chauffage des locaux. NF EN ISO 13790*.
- [Akbari *et al.*, 1992] AKBARI, H., DAVIS, S., DORSANO, S., HUANG, J. et WINNETT, S. (1992). *Cooling our communities : A guide book on tree planting and light-colored surfacing*. United States Environmental Protection Agency EPA, Berkeley (CA) Usa.
- [Ali-Toudert et Mayer, 2006] ALI-TOUDERT, F. et MAYER, H. (2006). Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Building and Environment*, 41(2):94 – 108. voir le fichier erratum pour la correction de certains graphiques.
- [Ali-Toudert et Mayer, 2007] ALI-TOUDERT, F. et MAYER, H. (2007). Effects of asymmetry, galleries, overhanging facades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons. *Solar Energy*, 81(6):742 – 754.
- [Allen *et al.*, 1998] ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D. et SMITH, M. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage*. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations.

- [Arnfield, 2003] ARNFIELD, A. (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*, 23:1–26.
- [Asaeda et Ca, 1993] ASAEDA, T. et CA, V. T. (1993). The subsurface transport of heat and moisture and its effect on the environment : a numerical model. *Boundary layer meteorology*, 65:159–179.
- [AUDIENCE, 1999] AUDIENCE (1999). Auto-formation à distance au contrôle d'environnement des constructions et des équipements. <http://audience.cerma.archi.fr/>. [En ligne ; accès le 01-12-08].
- [Benzerzour, 2004] BENZERZOUR, M. (2004). *Transformations urbaines et variations du microclimat : application au centre ancien de Nantes et proposition d'un indicateur "morpho-climatique"*. Thèse de doctorat, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes.
- [Bouyer, 2004] BOUYER, J. (2004). Caractérisation du confort thermique dans les espaces semi-extérieurs. DEA ambiances architecturales et urbaines, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, Nantes.
- [Bozonnet, 2005] 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 et al., 2006] BOZONNET, E., ALLARD, F., MUSY, M., CHAZELAS, M. et GUARRACINO, G. (2006). *URBAT : Approche méthodologique de la construction durable en milieu urbain : le microclimat urbain et son impact environnemental sur les constructions*. Plan Urbanisme Construction Architecture.
- [Brophy et al., 2000] BROPHY, V., O'DOWD, C., BANNON, R., GOULDING, J. et LEWIS, J. (2000). Sustainable urban design. Energy Research Group, with the support of the European Commission, Directorate-General Energy and Transport.
- [Brutsaert, 1982] BRUTSAERT, W. (1982). *Evaporation into the atmosphere : theory, history and applications*. Environmental Fluid Mechanics. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland. réédition sur commande.
- [Cantat, 2005] CANTAT, O. (2005). Météo des villes et météo des champs, l'îlot de chaleur urbain parisien. <http://www2.cnrs.fr/presse/thema/>. [En ligne ; accès le 09-12-08].
- [CERMA, 1982] CERMA (1982). Etude climatique exploratoire d'un quartier central à lyon : l'ensemble zac + gare routière de lyon - la part dieu.
- [CERMA, 1998] CERMA (1998). Solene : Logiciel de simulation d'ensoleillement, d'éclairement et de rayonnement - Guide d'utilisation. Nantes.
- [CERMA, 2007] CERMA (2007). start - Wiki Solene. <http://solene.cerma.archi.fr/>. [En ligne ; accès le 18-02-09].

- [Chanzy et Bruckler, 1990] CHANZY, A. et BRUCKLER, L. (1990). *Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse*, chapitre Estimation de l'évaporation du sol nu à partir des mesures hyperfréquences, pages 43–53. AUPELF-UREF. John Libbey Eurotext.
- [Chlela, 2008] CHLELA, F. (2008). *Développement d'une méthodologie de conception de bâtiments à basse consommation d'énergie*. Thèse de doctorat, Université de La Rochelle. directeur Christian Inard LEPTAB.
- [Chlela et al., 2007] CHLELA, F., HUSAUNDEE, A., RIEDERER, P. et INARD, C. (2007). Numerical evaluation of earth to air heat exchangers and heat recovery ventilation systems. *International Journal of Ventilation*, 6:31–42.
- [Colombier et al., 1997] COLOMBIER, N., BOUTIÈRE, F. et DIOT, F. (1997). Bâtiment type de bureaux et scénarii de fonctionnement thermique types associés. Rapport technique, EDF, Note EDF n° 97NM00013.
- [Dalpé et Masson, 2007] DALPÉ, B. et MASSON, C. (2007). Recommended practices when analysing wind flow near a forest edge with wasp. *In European Wind Energy Conference, EWEC 2007 Proceedings*, Milan, Italy.
- [Demarty, 2001] DEMARTY, J. (2001). *Développement et application du modèle SiSPAT-RS à l'échelle de la parcelle et dans le cadre de l'expérience Alpilles ReSeDA*. Thèse de doctorat, Université Denis Diderot Paris 7.
- [Doulos et al., 2004] DOULOS, L., SANTAMOURIS, M. et LIVADA, I. (2004). Passive cooling of outdoor urban spaces. the role of materials. *Solar Energy*, 77(2):231 – 249.
- [Dupont, 2001] DUPONT, S. (2001). *Modélisation dynamique et thermodynamique de la canopée urbaine : réalisation du modèle de sols urbains pour SUBMESO*. Thèse de doctorat, Université de Nantes.
- [Duprat et al., 2008] DUPRAT, F., MAYEUR, J., MEYRUEIS, C. et VERGER, M. (2008). Aménagements des accompagnement de voiries - guide de l'utilisateur. Rapport technique, INH, Plantes et Cités.
- [Duthoit, 2006] DUTHOIT, S. (2006). *Prise en compte de l'agregation des cultures dans la simulation du transfert radiatif : Importance pour l'estimation de l'indice foliaire (LAI) de la parcelle au paysage*. Science de l'univers, de l'environnement et de l'espace, spécialité : Télédétection et transfert radiatif, Université Toulouse III Paul Sabatier.
- [Elnahas et Williamson, 1997] ELNAHAS, M. et WILLIAMSON, T. (1997). An improvement of the CTTC model for predicting urban air temperatures. *Energy and Buildings*, 25:41–49.
- [Filfi, 2006] FILFLI, S. (2006). *Optimisation bâtiment / système pour minimiser les consommations dues à la climatisation*. Thèse de doctorat, Ecole des mines de Paris.
- [Fluent, 2006] FLUENT (2006). *Fluent 6.3 User Guide*. Fluent Inc., Centerra Resource Park, 10 Cavendish Court, Lebanon, NH 03766, USA.

- [Fraisse *et al.*, 2002] FRAISSE, G., VIARDOT, C., ACHARD, G. et SOUYRI, B. (2002). Modélisation thermique des bâtiments basée sur l'analogie électrique. *In Méthodes, modèles et simulation des bâtiments : Actes de la conférence*, Saint-Denis La Plaine. IBPSA France, IBPSA France.
- [Fraisse et Virgone, 2001] FRAISSE, G. et VIRGONE, J. (2001). Modélisation numérique d'un bâtiment multizone sous trnsys. *In 4ème journées TRNSYS Francophones. Lyon, France, 10 septembre 2001, 19 p.*
- [Gandemer et Guyot, 1976] GANDEMER, J. et GUYOT, A. (1976). *Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti*. Ministère de l'Équipement, Direction de l'Aménagement foncier et de l'Urbanisme, Paris.
- [Glockner, 2000] GLOCKNER, S. (2000). *Contribution à la modélisation de la pollution atmosphérique dans les villes*. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux I.
- [Goupy, 2001] GOUPY, J. (2001). *Introduction aux plans d'expériences*. Industries techniques, série : conception. Dunod, Paris.
- [Groleau, 2000] GROLEAU, D. (2000). Solene un outil de simulation des éclairagements solaires et lumineux dans les projets architecturaux et urbains. *In Les professionnels de la Construction - Confort intérieur : Outils informatiques d'aide à la conception et à la prévision du confort thermique, acoustique et d'éclairage*, Rouen.
- [Groleau et Bourges, 2005] GROLEAU, D. et BOURGES, B. (2005). Contrat de recherche et de développement relatif à l'approche bioclimatique globale des ambiances urbaines et des stratégies énergétiques, à l'échelle d'un territoire en renouvellement urbain : le gpv malakoff pré gauchet - rapport final -. Rapport technique, Nantes.
- [Groleau *et al.*, 2003] GROLEAU, D., FRAGNAUD, F. et ROSANT, J.-M. (2003). Simulation of the radiative behavior of an urban quarter of marseille with the Solene model. *In ICUC'5 Fifth International conference on urban climate*, Lodz (Poland). University of Lodz : Faculty of geographical sciences : Department of meteorology and Climatology.
- [Groleau et Marenne, 1995] GROLEAU, D. et MARENNE, C. (1995). Evaluation et simulation de l'ensoleillement dans les projets architecturaux et urbains. ii solene approche numérique de l'ensoleillement les techniques héliodon et masque. CERMA UMR CNRS 1563. 35p.
- [Gross, 1987] GROSS, G. (1987). A numerical study of the air flow within and around a single tree. *Boundary-layer meteorology*, 40(4):311-327.
- [Guyot, 1999] GUYOT, G. (1999). *Climatologie de l'environnement : Cours et exercices corrigés*. Dunod, Paris, 2e édition.
- [Hastie, 2003] HASTIE, C. (2003). *The benefits of urban trees : A summary of the benefits of urban trees accompanied by a selection of research papers and pamphlet*. Warwick District Council.

- [Hénon, 2008] HÉNON, A. (2008). *Températures mesurées, modélisées et observées par télédétection infrarouge, dans la canopée urbaine : modélisation aéro-thermo-radiative des flux de chaleur urbains*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes.
- [Hénon et al., 2007] HÉNON, A., GROLEAU, D. et MESTAYER, P. G. (2007). Thermo-radiative modeling and energy balance of the urban canopy : relations between simulated and measurable temperatures. *In The 7th conference on coastal atmospheric and oceanic prediction and processes joint with 7th symposium on the urban environment*, San-Diego. American Meteorological Society.
- [Idczac et al., 2007] IDCZAC, M., GROLEAU, D., MESTAYER, P. G., ROSANT, J.-M. et SINI, J.-F. (2007). An application of the thermo-radiative Solene model for the evaluation of street-canyon energy balance. *In 6th International Conference on Urban Air Quality*, Cyprus.
- [Inard, 1988] INARD, C. (1988). *Contribution à l'étude du couplage thermique entre un émetteur de chauffage et un local. Etudes expérimentales en chambre climatique*. Génie civil et sciences de l'habitat, INSA de Lyon.
- [Jacquemoud, 2002] JACQUEMOUD, S. (2002). *Fonctionnement des écosystèmes terrestres - Modélisation et apports de la télédétection dans l'extraction des propriétés biogéophysiques caractérisant les surfaces naturelles*. Université Paris 7 – Denis Diderot.
- [JORF, 2006] JORF (2006). *Arrêté du 24 mai 2006 relatif aux caractéristiques thermiques des bâtiments nouveaux et des parties nouvelles de bâtiments*. Ministre de l'emploi, de la cohésion sociale et du logement, JORF 121 du 25 mai 2006 page 7747, texte 14.
- [Katul et al., 2004] KATUL, G., MAHRT, L., POGGI, D. et SANZ, C. (2004). One and two equation models for canopy turbulence. *Boundary-Layer Meteorology*, 113:81–109.
- [Lavigne et al., 1994] LAVIGNE, P., BREJON, P. et FERNANDEZ, P. (1994). *Architecture climatique : une contribution au développement durable*, volume Tome 1. EDISUD.
- [Lesieur, 1994] LESIEUR, M. (1994). *La turbulence*. Presses Universitaires de Grenoble.
- [Liébard et DeHerde, 2006] LIÉBARD, A. et DEHERDE, A. (2006). *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques. Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*. Le Moniteur. avec 1 CD-ROM.
- [Lövenstein et al., 1995] LÖVENSTEIN, H., LANTINGA, E., RABBINGE, R. et van KEULEN, H. (1995). Les principes de la théorie de l'écologie de la production. Traduction d'un cours du département de la théorie de l'écologie de la production de l'université agricole de wageningen (tpe-luw), Rapports du projet Production Soudano-Sahélienne (PSS) n.13. Traduction en français par A. Coulibaly, D. Jardot & M. Vaksman.
- [Marchio et al., 2007] MARCHIO, D., FILFLI, S., FLEURY, E., ALESSANDRINI, J.-M., MILLET, J. R., DAMOLIS, P. et GOURMEZ, D. (2007). *Quelles solutions pour des bâtiments de bureaux climatisés à moins de 100 kWh/m<sup>2</sup>/an ? Guide des solutions pratiques*. CSTB, Armines, Alto Ingénierie, eCahiers du CSTB, cahier 3588.

- [Menut, 1997] MENUT, L. (1997). *Etude expérimentale et théorique de la couche limite atmosphérique en agglomération parisienne*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie.
- [Mestayer et Anquetin, 1994] MESTAYER, P. G. et ANQUETIN, S. (1994). Climatology of cities. In *Diffusion and transport of pollutants in atmospheric mesoscale flow fields*, volume 1 de *ERCOTAC series*, pages 165–189. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- [MeteoFrance, 2008] METEOFRACTANCE (2008). Comprendre la météo - glossaire. <http://comprendre.meteofrance.com/>. [En ligne ; accès le 09-12-08].
- [Miguet, 2000] MIGUET, F. (2000). *Paramètres physiques des ambiances architecturales : Un modèle numérique pour la simulation de la lumière naturelle dans le projet urbain*. Thèse de doctorat, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes.
- [Miguet et Groleau, 2007] MIGUET, F. et GROLEAU, D. (2007). Urban bioclimatic indicators for urban planners with the software tool Solene. In *Portugal SB07 Sustainable Construction, materials and practices : challenges of the industry for the new millenium*, Lisbonne. IOS Press.
- [Mochida et al., 2006] MOCHIDA, A., YOSHINO, H., MIYAUCHI, S. et MITAMURA, T. (2006). Total analysis of cooling effects of cross-ventilation affected by microclimate around a building. *Solar Energy*, 80(80):371–382.
- [Monteith, 1965] MONTEITH, J. (1965). Evaporation and environment. *The state and movement of water in living organisms, Part II Water in the plant*, Symposia of the Society for experimental biology (NumberXIX).
- [Musy, 2005] MUSY, A. (2005). Cours d'hydrologie générale - l'évaporation et l'interception. <http://echo.epfl.ch/e-drologie/>. [En ligne ; accès le 23-08-08].
- [Nikolopoulou, 2004] NIKOLOPOULOU, M. (2004). Concevoir des espaces extérieurs en environnement urbain : une approche bioclimatique. résultats du projet RUROS (Rediscovering the Urban Realm and Open Spaces), Centre for Renewable Energy Sources (C.R.E.S).
- [Nowak, 1995] NOWAK, D. J. (1995). The effects of urban trees on air quality, usda forest service, syracuse, ny.
- [Oke, 1987] OKE, T. R. (1987). *Boundary layer climates*. Londres, 2 édition.
- [Oke, 2006] OKE, T. R. (2006). *Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites*. Instruments and Observing Methods, Report No. 81, WMO/TD No. 1250.
- [Oudin, 2004] OUDIN, L. (2004). *Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global*. Thèse de doctorat, Doctorat Sciences de l'eau, ENGREF.

- [Pardyjak *et al.*, 2004] PARDYJAK, E., BROWN, M. et BAGAL, N. (2004). Improved velocity deficit parameterizations for a fast response urban wind model. *In Symposium on Planning, Nowcasting, and Forecasting in the Urban Zone, 84th Annual Mtg. AMS*, numéro WA. Paper 7.4., Seattle.
- [Piboule, 2005] PIBOULE, A. (2005). *Influence de la structure du peuplement forestier sur la distribution de l'éclairement sous couvert. Cas d'une forêt hétérogène feuillue sur plateau calcaire*. Thèse de doctorat, École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, ENGREF.
- [Pillet, 1997] PILLET, M. (1997). *Les plans d'expériences par la méthode Taguchi*. Les éditions de l'organisation, Paris. 330p.
- [Raymond, 1998] RAYMOND, F. (1998). Etude aérodynamique d'un bâtiment solaire site de plan-les ouates. Rapport technique, Laboratoire CERMA, Nantes.
- [Ries et Eichhorn, 2001] RIES, K. et EICHHORN, J. (2001). Simulation of effects of vegetation on the dispersion of pollutants in street canyons. *Meteorologische Zeitschrift*, 10:229–233.
- [Rigenbach, 2004] RIGENBACH, N. (2004). *Bilan radiatif et flux de chaleur en climatologie urbaine : Mesures, modélisation et validation sur Strasbourg*. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur Strasbourg I.
- [Robitu, 2005] ROBITU, M. (2005). *Etude de l'interaction entre le bâtiment et son environnement urbain : influence sur les conditions de confort en espaces extérieurs*. Thèse de doctorat, Ecole polytechnique de l'université de Nantes.
- [Roux, 1984] ROUX, J.-J. (1984). *Proposition de modèles simplifiés pour l'étude du comportement thermique des bâtiments*. Thèse de doctorat, INSA de Lyon.
- [Sanchez de la Flor et Alvarez Dominguez, 2004] SANCHEZ DE LA FLOR, F. et ALVAREZ DOMINGUEZ, S. (2004). Modelling microclimate in urban environments and assessing its influence on the performance of surrounding buildings. *Energy and Buildings*, 36(5):403 – 413. EPIC-3rd European Conference on Energy Performance and Indoor Climate in Buildings.
- [Sanchez de la Flor *et al.*, 2006] SANCHEZ DE LA FLOR, F. J., SALMERON LISSEN, J. M. et ALVAREZ DOMINGUEZ, S. (2006). A new methodology towards determining building performance under modified outdoor conditions. *Building and Environment*, 41(9):1231 – 1238.
- [Santamouris, 2005] SANTAMOURIS, M. (2005). *Advances of solar energy*, chapitre Passive cooling of buildings. James and James Science Publishers.
- [Satel-Light, 2008] SATEL-LIGHT (2008). The european database of daylight and solar radiation. <http://www.satel-light.com/>. [En ligne ; accès le 20-01-09].

- [Saxena, 2002] SAXENA, M. (2002). Microclimate modification : Calculating the effect of trees on air temperature. In SOCIETY, A. S. E., éditeur : *SOLAR 2002, Proceedings of the Annual Conference of the American Solar Energy Society (ASES)*. American Solar Energy Society.
- [SCI-Lyon-Confluence, 2006] SCI-LYON-CONFLUENCE (2006). Projet Lyon Confluence, permis de construire, volet paysager.
- [Sini *et al.*, 1996] SINI, J.-F., ANQUETIN, S. et MESTAYER, P. G. (1996). Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons. *Atmospheric Environment*, 30(15):2659–2677.
- [Streiling et Matzarakis, 2003] STREILING, S. et MATZARAKIS, A. (2003). Influence of single and small clusters of trees on the bioclimate of a city : A case study. *Journal of Arboriculture*, 29(6):309–316.
- [Taha, 1997] TAHA, H. (1997). Urban climates and heat islands : albedo, evapotranspiration and anthropogenic heat. *Energy and Buildings*, 25:99–103.
- [Takahashi *et al.*, 2004] TAKAHASHI, K., YOSHIDA, H., TANAKA, Y., AOTAKE, N. et WANG, F. (2004). Measurement of thermal environment in kyoto city and its prediction by CFD simulation. *Energy and Buildings*, 36(8):771–779.
- [Turbelin, 2000] TURBELIN, G. (2000). *Modélisation de la turbulence atmosphérique en vue de l'étude du chargement aérodynamique des structures soumises aux effets du vent*. Thèse de doctorat, Université d'Evry Val d'Essonne.
- [Twarowski, 1967] TWAROWSKI, M. (1967). *Soleil et architecture*. Paris.
- [Vinet, 2000] 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, Ecole polytechnique de l'université de Nantes.
- [Xu *et al.*, 1998] XU, W., , CHEN, Q. et NIEUWSTADT, F. T. M. (1998). A new turbulence model for near-wall natural convection. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 41(21):3161 – 3176.
- [Yu et Hien, 2006] YU, C. et HIEN, W. N. (2006). Thermal benefits of city parks. *Energy and Buildings*, 38(2):105 – 120.
- [Zhai *et al.*, 2002] ZHAI, Z., CHEN, Q., HAVES, P. et KLEMS, J. H. (2002). On approaches to couple energy simulation and computational fluid dynamics programs. *Building and Environment*, 37(8-9):857 – 864.

## Liste des figures

1.1	Imbrication des échelles climatiques et atmosphériques, de l'échelle méso à l'échelle micro, de la couche limite atmosphérique (CLA) à la canopée urbaine (CU), adapté de [Oke, 2006] . . . . .	7
1.2	Modélisation d'un élément de surface urbaine, adapté de [Oke, 1987] . . . . .	9
1.3	Représentation schématique de l'îlot de chaleur urbain . . . . .	15
1.4	Classification simplifiée de formes urbaines hiérarchisées selon leur effet potentiel sur le climat local, adapté de [Oke, 2006] . . . . .	19
1.5	Le phénomène de piégeage radiatif d'après Estournel [Rigenbach, 2004] . . . . .	20
1.6	Profils verticaux de vitesses de vent, en fonction puissance, au dessus de 3 terrains de rugosités différentes. $z_G$ est la hauteur de rugosité et $\alpha$ est un paramètre de terrain issu de mesures en vraie grandeur [Gandemer et Guyot, 1976] . . . . .	22
1.7	Écoulement de vent autour d'un bâtiment cubique. A gauche, en coupe verticale selon Thurow [Robitu, 2005] et à droite en coupe horizontale et avec incidence du vent oblique [Liébard et DeHerde, 2006] . . . . .	22
1.8	Quelques effets aérodynamiques types [Gandemer et Guyot, 1976] . . . . .	23
1.9	Photo et thermographies IRT des revêtement testés dans l'étude de [Doulos <i>et al.</i> , 2004] . . . . .	26
1.10	Influence de la hauteur et de la forme du houppier sur l'efficacité de l'ombrage, la géométrie de l'arbre de droite est plus avantageuse à la fois en hiver et en été ( $Y_2 < Y_1$ et $X_2 > X_1$ ) . . . . .	30
1.11	Influence des arbres sur l'humidité et la température de l'air dans des quartiers résidentiels, adapté de [Saxena, 2002] . . . . .	34
1.12	Accroissement de l'îlot de chaleur urbain par la puissance dissipée des systèmes de génie climatique [Bozonnet, 2005] . . . . .	46

1.13 Etude de Bozonnet : Schématisation des 4 références de température d'air - Modélisation zonale dans le canyon urbain - Comparaison des 4 types d'évaluation des charges climatiques selon les deux orientations des façades [Bozonnet, 2005] . . . . .	47
1.14 Influence des arbres et de la ventilation naturelle sur les charges de climatisation, adapté de [Mochida <i>et al.</i> , 2006] . . . . .	51
2.1 Modèle géométrique d'un arbre au centre d'une cour ouverte (A) et discrétisation de la géométrie en facettes triangulaires (B) . . . . .	74
2.2 Courbes d'irradiation solaire selon la formulation de Perrin de Brinchambault pour les trois types de condition de l'atmosphère [Miguet et Groleau, 2007] . . .	76
2.3 Simulation des flux solaires directs pour la géométrie de la figure 2.1, le 10 juillet, à 15H00 solaires, à Nantes, selon le modèle standard de Perrin de Brinchambault	76
2.4 Triangulation géodésique de la voûte céleste en 1024 éléments [Miguet, 2000] . .	77
2.5 Repère et angles sphériques (à gauche), distribution de luminances pour une latitude de 45 ° à 14h solaires pour un ciel clair CIE (au milieu) et pour un ciel couvert clair $\varepsilon = 1$ ; $\Delta = 0,35$ (à droite) . . . . .	78
2.6 Simulation des flux solaires diffus pour la géométrie de la figure 2.1, le 10 juillet, à 15H00 solaires, à Nantes, avec un modèle de ciel clair CIE . . . . .	79
2.7 Définition géométrique du facteur de forme [Miguet, 2000] . . . . .	80
2.8 Calcul du facteur de forme par la méthode d'intégrale de contour [Miguet, 2000]	81
2.9 Principe des échanges radiatifs entre deux éléments de surface opaques 1 et 2 [Miguet, 2000] . . . . .	83
2.10 Bilan radiatif sur un élément de surface $i$ . Sa radiosité est égale à l'émission directe de la surface augmentée de la partie réfléchie de l'irradiation [Miguet, 2000]	83
2.11 Simulation des températures de surface pour la géométrie de la figure 2.1, le 10 juillet, à 15H00 solaires . . . . .	85
2.12 Représentation de la vitesse instantanée du vent sur une période $T$ [Gandemer et Guyot, 1976] . . . . .	89
2.13 Procédure générale de calcul pour une résolution en équation de pression - mode découplé à gauche ( <b>Segregated solver</b> ) et couplé à droite ( <b>Coupled solver</b> ) - et possibilités d'intégrations des diverses UDF dans la procédure . . . . .	95
2.14 Schématisation d'une veine numérique de simulation . . . . .	96
2.15 Les 5 classes de couverts végétaux en fonction de l'inclinaison de leurs feuilles. Graphe des fréquences cumulées [Guyot, 1999] . . . . .	100
2.16 Profil vertical de densité foliaire moyenne pour les feuillus (A) et les conifères (B) [Ries et Eichhorn, 2001] . . . . .	101
2.17 Profil vertical de densité foliaire mesuré dans une forêt d'épicéa de Sitka (A) et dans une forêt de Pins (B) [Dalpé et Masson, 2007] . . . . .	101

2.18	Flux solaires à la surface des arbres [Robitu, 2005]	102
2.19	Attribution du flux solaire surfacique aux cellules volumiques [Robitu, 2005]	104
2.20	Thermographies IRT d'un arbre au cours d'une journée d'été ensoleillée à Séville, Espagne, $T_{air}$ moyenne = 28°. Isothermes à 27°, 28° et 29°	104
2.21	L'analogie électrique du cheminement de l'eau dans la plante [Guyot, 1999]	108
2.22	Schématisation du modèle de sol	116
2.23	Analogie électrique pour un modèle thermique de paroi	126
2.24	Modèle thermique pour les parois extérieures	128
2.25	Modèle thermique pour les planchers	129
2.26	Modèle thermique pour les parois intérieures	129
2.27	Modèle thermique pour le volume d'air intérieur	130
2.28	Agrégation des flux traversant les facettes extérieures vers un nœud de température de paroi intérieure unique (La description extérieure des parois est locale alors que la description intérieure est globale)	132
2.29	Schématisation de la modélisation thermique complète d'un bâtiment dans l'outil de simulation	133
2.30	Principe de la simulation couplée	138
2.31	Les différentes méthodes de couplage [Zhai <i>et al.</i> , 2002]	140
3.1	Plans d'étage du bâtiment Beethoven	146
3.2	Profil de référence d'occupation journalière des bureaux	150
3.3	Profil de référence d'occupation journalière des salles de réunion	150
3.4	Taux de charge interne due aux ordinateurs dans les bureaux et les secrétariats	151
3.5	Ensemble de Pareto (trait continu) obtenu dans un cas simple à deux critères [Demarty, 2001]	158
3.6	Rangement de Pareto complet [Demarty, 2001]	159
3.7	Évaluation de la distance maximale $d_{m,n}$ pour un paramètre $\theta \in [\theta_{min}; \theta_{max}]$ à partir de la fonction de distribution cumulée	160
3.8	Géométrie du bâtiment de référence	163
3.9	Influence de la forme, de la taille et de la mitoyenneté d'autres volumes sur la compacité de formes simples [Liébard et DeHerde, 2006]	164
3.10	Compacités limites : la plus faible compacité correspond au bâtiment A, la plus forte au bâtiment B	166
3.11	Évolution de la compacité en fonction de la longueur (L) et du nombre d'étage (n) du bâtiment de référence	166
3.12	Définition de l'orientation du bâtiment	167
3.13	Zones climatiques françaises selon la RT 2005	168
3.14	Scénario moyen hebdomadaire de la température d'air	169
3.15	Scénario moyen hebdomadaire de la masse d'humidité dans l'air	169

3.16	Scénario moyen hebdomadaire des flux Infra Rouge atmosphériques . . . . .	170
3.17	Scénario moyen hebdomadaire des flux solaires direct et diffus . . . . .	171
3.18	Scénario moyen hebdomadaire des flux solaires direct et diffus . . . . .	171
3.19	Taux de flux solaire incident : le flux solaire théorique journalier $F$ est pondéré par un $T_F = 50\%$ pour donner le flux solaire réduit $F'$ . . . . .	173
3.20	Paramètres $f_T$ et $\Delta T$ appliqués à un signal de température de référence induisant un signal de température modifiée . . . . .	174
3.21	Répartition des 2000 résultats de simulation : Nuages des points en 2D suivant les trois systèmes d'axes et interpolation surfacique en 3D . . . . .	177
3.22	Répartition des points de simulation selon les classes de compacité (en $m^3.m^{-2}$ )	179
3.23	Répartition des points de simulation selon les classes d'orientation (en $^\circ$ ) . . .	180
3.24	Répartition des points de simulation selon les classes de taux de vitrage . . . .	181
3.25	Répartition des points de simulation selon les classes de coefficient d'échange superficiel convectif (en $W.m^{-2}.K^{-1}$ ) . . . . .	182
3.26	Répartition des points de simulation selon les classes de taux de flux solaire direct	183
3.27	Répartition des points de simulation selon les classes d'offset de température d'air . . . . .	184
3.28	Répartition des points de simulation selon les classes de pourcentage d'amplitude de la température d'air (en $^\circ C$ ) . . . . .	185
3.29	Définition des 4 classes énergétiques des bâtiments par division de l'espace des résultats des simulations en 9 domaines . . . . .	187
3.30	Visualisation de la discrimination des 4 classes énergétiques de bâtiment parmi les points de l'échantillon . . . . .	188
3.31	Tests de sensibilité des paramètres d'entrée pour l'échantillon des bâtiments correspondant à la classe 1 . . . . .	189
3.32	Tests de sensibilité des paramètres d'entrée pour l'échantillon des bâtiments correspondant à la classe 2 . . . . .	190
3.33	Tests de sensibilité des paramètres d'entrée pour l'échantillon des bâtiments correspondant à la classe 3 . . . . .	191
3.34	Tests de sensibilité des paramètres d'entrée pour l'échantillon des bâtiments correspondant à la classe 4 . . . . .	192
3.35	Représentation synthétique des configurations des paramètres d'entrée déter- minant chaque classe . . . . .	196
4.1	Situation urbaine du projet Lyon Confluence et localisation de la première phase du projet, adapté de [SCI-Lyon-Confluence, 2006] . . . . .	203
4.2	Fragment urbain étudié : infographie en 3d de la première phase du projet Lyon-Confluence, ©Asylum-Axyz 03-2006 . . . . .	204

4.3	La première phase du projet Lyon-Confluence : identification du fragment urbain étudié, adapté de [SCI-Lyon-Confluence, 2006] . . . . .	205
4.4	Modèle en 3d de base et repérage des bâtiments . . . . .	206
4.5	Évaluation des taux de flux solaires à partir des flux horaires : flux solaires directs horaires sans et avec masques (en haut), sans et avec masques et protections solaires (en bas), pour l’enveloppe du bâtiment A Nord 4, le 15 Juillet par ciel clair . . . . .	209
4.6	Repérage des bâtiments simulés correspondant aux classes . . . . .	210
4.7	Roses des vents trimestrielles en fréquence et en intensité à la station de Lyon-Bron . . . . .	212
4.8	Configuration de l’îlot dans le cas de l’aménagement minéral (Aménagement A)	215
4.9	Configuration de l’îlot dans le cas de l’aménagement végétal (Aménagement B)	216
4.10	Aménagement paysager prévu dans le projet initial [SCI-Lyon-Confluence, 2006] : vue d’ensemble de l’îlot A (à droite) et coupe sur l’îlot A Sud (à gauche) . . . .	217
4.11	Évolution des températures intérieures d’air et des charges sensibles de chauffage du bâtiment 1, cas hiver, aménagement A (en haut) et B (en bas) . .	222
4.12	Évolution de températures intérieures d’air et des charges totales de climatisation du bâtiment 1, cas été, aménagement A (en haut) et B (en bas) .	225
4.13	Évolution des températures intérieures d’air et des charges sensibles de chauffage du bâtiment 2, cas hiver, aménagement A (en haut) et B (en bas) . .	227
4.14	Évolution des températures intérieures d’air et des charges totales de climatisation du bâtiment 2, cas été, aménagement A (en haut) et B (en bas) .	229
4.15	Évolution des températures intérieures d’air et des charges sensibles de chauffage du bâtiment 3, cas hiver, aménagement A (en haut) et B (en bas) . .	231
4.16	Évolution des températures intérieures d’air et des charges totales de climatisation du bâtiment 3, cas été, aménagement A (en haut) et B (en bas) .	233
4.17	Évolution des températures intérieures d’air et des charges sensibles de chauffage du bâtiment 4, cas hiver, aménagement A (en haut) et B (en bas) . .	235
4.18	Évolution des températures intérieures d’air et des charges totales de climatisation du bâtiment 4, cas été, aménagement A (en haut) et B (en bas) .	237
4.19	Histogramme des consommations totales hebdomadaires d’hiver pour les 4 bâtiments . . . . .	239
4.20	Histogramme des consommations totales hebdomadaires d’été pour les 4 bâtiments . . . . .	239
4.21	Fréquences cumulées des puissances totales de chauffage . . . . .	241
4.22	Fréquences cumulées des puissances totales de climatisation . . . . .	241
4.23	Répartition des cas simulés dans le diagramme des classes avec identification des cas les plus proches de l’étude de sensibilité . . . . .	243

---

4.24	Taux de flux solaire calculé pour le bâtiment 3, cas de la semaine hiver (Cas A)	248
4.25	Écarts entre la température de l'air proche des parois simulée et la température d'air météorologique, 06h, jour 5, semaine hiver, aménagement A . . . . .	249
4.26	Écarts entre la température de l'air proche des parois simulée et la température d'air météorologique, 14h, jour 5, semaine hiver . . . . .	250
4.27	Température d'air moyenne proche des parois, température d'air météorologique et température de surface moyenne . . . . .	250
4.28	Coefficients $h_c$ pour le fragment urbain d'étude, cas A, semaine d'hiver . . . . .	251
4.29	Écarts entre la température de l'air proche des parois et la température d'air météorologique - 04h, jour 5, semaine été, bâtiment 3, aménagement A . . . . .	253
4.30	Écarts entre la température de l'air proche des parois et la température d'air météorologique - 14h, jour 5, semaine été, bâtiment 3, aménagement A . . . . .	253
4.31	Écarts entre la température de l'air proche des parois et la température d'air météorologique - 04h, jour 5, semaine été, bâtiment 3, aménagement B . . . . .	255
4.32	Écarts entre la température de l'air proche des parois et la température d'air météorologique - 14h, jour 5, semaine été, bâtiment 3, aménagement B . . . . .	255
4.33	Température d'air moyenne proche des parois et la température d'air météorologique, températures de surfaces moyennes, puissances totale de climatisation et taux d'occupation, pour les deux cas d'aménagement (bâtiment 3) . . . . .	256
4.34	Évaluation du taux de flux solaire (été), bâtiment 3, aménagement A . . . . .	257
A.1	Coupe verticale de l'atmosphère terrestre [MeteoFrance, 2008] . . . . .	278
A.2	Imbrication des échelles climatiques et atmosphériques, de l'échelle méso à l'échelle micro, de la CLA à la CU, adapté de [Oke, 2006] . . . . .	280
A.3	Les deux figures classiques de couches limites urbaines [Mestayer et Anquetin, 1994]	283

## Liste des tableaux

2.1	Constantes empiriques pour le modèle de turbulence $k-\varepsilon$ [Fluent, 2006] . . . . .	93
2.2	Propriétés solaires et thermiques moyennes des feuillages d'arbres . . . . .	103
2.3	Valeurs des constantes empiriques pour l'expression de la turbulence dans la végétation . . . . .	106
3.1	Répartition surfacique des espaces par niveau pour le bâtiment Beethoven . . .	147
3.2	Coefficients de transmission thermique de référence et maximum pour les éléments de l'enveloppe des bâtiments selon la RT2005 [JORF, 2006] . . . . .	148
3.3	Puissances de référence apportées par les équipements bureautiques . . . . .	151
3.4	Hiérarchisation de l'influence des paramètres d'entrée . . . . .	193
3.5	Bilan par classes des intervalles de sélection des paramètres sensibles . . . . .	195
4.1	Présélection des bâtiments en fonction de leurs volumes ajustés, compacités et orientations . . . . .	207
4.2	Détail des protections solaires pour rétablir les classes 1 et 2 . . . . .	208
4.3	Choix des quatre bâtiments et paramètres associés . . . . .	210
4.4	Caractéristiques physiques associés aux zones volumiques de feuillage dans le modèle 3D, valeurs pour l'été . . . . .	217
4.5	Caractéristiques physiques associés aux zones volumiques de feuillage dans le modèle 3D, valeurs pour l'hiver . . . . .	217
4.6	Détails de composition et propriétés thermophysiques des revêtements urbains, de l'extérieur vers l'intérieur . . . . .	218
4.7	Nombre de cellules pour la géométrie volumique (calcul aéraulique) . . . . .	218
4.8	Nombre de facettes pour les maillages surfaciques simplifiés (calcul thermora- diatif) . . . . .	219

A.1	Calcul exact des volumes des bâtiments des îlots A sud, Bnord et Bsud à partir de la modélisation 3D (Nous rappelons que nous ne disposons pas du modèle de l'îlot A nord 4 que nous reconstruirons en fonction de besoins). Les bâtiments dont les cases sont sur-lignées sont les bâtiments pré-sélectionnés par leur volume (ou celui de leur boîte englobante). . . . .	284
A.2	Ajustement volumétrique : nous reconstruisons une boîte parallélépipédique d'un volume de $9000 m^3$ , correspondant au plus juste à la volumétrie des bâtiments présélectionnés . . . . .	285
A.3	Bilan des paramètres de sensibilités calculés : Pour chaque bâtiment, nous calculons quatre paramètres constructifs et climatiques dépendant de la configuration du projet. Les bâtiments dont les cases sont sur-lignées sont les quatre bâtiments sélectionnés par élimination. Deux bâtiments ont été munis de protections solaires pour accorder leur taux de flux solaire direct été avec les classes 1 et 2. . . . .	285

## Table des matières

<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1 Microclimat, aménagements urbains et interactions énergétiques avec les bâtiments</b>	<b>5</b>
1.1 Introduction . . . . .	5
1.2 Les spécificités du climat urbain . . . . .	6
1.2.1 L'échelle climatique urbaine . . . . .	6
1.2.2 Le bilan énergétique d'une surface urbaine . . . . .	7
1.2.3 Conclusion . . . . .	14
1.3 L'influence de l'aménagement sur le microclimat urbain . . . . .	15
1.3.1 Le phénomène d'îlot de chaleur urbain . . . . .	15
1.3.2 La morphologie urbaine . . . . .	18
1.3.3 Les matériaux . . . . .	24
1.3.4 Les arbres et les aménagements végétaux . . . . .	29
1.3.5 L'eau . . . . .	35
1.3.6 Conclusion . . . . .	36
1.4 Les consommations énergétiques du bâtiment . . . . .	38
1.4.1 Constat global pour le chauffage et la climatisation . . . . .	38
1.4.2 Les techniques alternatives de réduction des consommations énergétiques du bâtiment . . . . .	40
1.4.3 Conclusion . . . . .	44
1.5 L'influence du microclimat urbain sur les consommations énergétiques du bâtiment . . . . .	45
1.5.1 La température d'air . . . . .	45
1.5.2 Les flux solaires . . . . .	48

---

1.5.3	Les échanges radiatifs infrarouges . . . . .	48
1.5.4	Influence du vent . . . . .	49
1.5.5	Les transferts d'humidité . . . . .	52
1.5.6	L'interaction des paramètres climatiques . . . . .	52
1.5.7	Conclusion . . . . .	54
1.6	L'influence des aménagements sur les consommations énergétiques des bâtiments	54
1.7	Problématique . . . . .	59
1.7.1	Les interactions climatiques entre le bâtiment et son environnement proche	59
1.7.2	Les outils de simulation . . . . .	60
1.7.3	La caractérisation de l'impact microclimatique sur l'énergétique . . . . .	63
1.8	Hypothèses de la recherche . . . . .	64
1.9	Méthodologie de notre recherche . . . . .	65
<b>2</b>	<b>Modélisation des systèmes climatiques urbains</b>	<b>71</b>
2.1	Introduction . . . . .	71
2.2	Modélisation thermoradiative et simulation avec le code Solene . . . . .	72
2.2.1	Introduction . . . . .	72
2.2.2	Les objets de Solene . . . . .	73
2.2.3	La simulation solaire . . . . .	74
2.2.4	Facteurs de forme . . . . .	79
2.2.5	Traitement des inter-réflexions et du bilan radiatif . . . . .	82
2.2.6	Simulation énergétique ou thermoradiative . . . . .	83
2.2.7	Autres fonctionnalités . . . . .	84
2.3	Modélisation thermo-aéraulique et simulation avec le code Fluent . . . . .	86
2.3.1	Principes généraux et équations de base en simulation aérodynamique CFD . . . . .	86
2.3.2	Les fonctions spécifiques utilisateur de Fluent . . . . .	94
2.3.3	La technique de la veine numérique . . . . .	95
2.4	Modélisation des arbres . . . . .	98
2.4.1	Modélisation géométrique des arbres . . . . .	98
2.4.2	Bilan radiatif des arbres . . . . .	102
2.4.3	Modélisation thermo-aéro-hydrique des arbres . . . . .	105
2.5	Modélisation des sols . . . . .	114
2.5.1	Principe . . . . .	114
2.5.2	Modélisation thermoradiative des sols . . . . .	115
2.6	Modélisation des bâtiments . . . . .	124
2.6.1	Introduction . . . . .	124
2.6.2	Approche générale du comportement thermique du bâti . . . . .	125
2.6.3	Méthode de modélisation d'une paroi de bâtiment . . . . .	125

2.6.4	Modélisation des différents composants du bâtiment . . . . .	127
2.6.5	Modélisation hygrothermique globale d'un bâtiment . . . . .	130
2.7	Procédure de couplage entre simulation thermoradiative et simulation thermo- aéraulique . . . . .	137
2.7.1	La gestion de la géométrie et des maillages . . . . .	137
2.7.2	La méthode générale du couplage itératif . . . . .	138
2.7.3	La gestion du temps de calcul . . . . .	139
2.8	Conclusion . . . . .	140
<b>3</b>	<b>Etude multicritère du comportement énergétique d'un bâtiment de référence</b> . . . . .	<b>143</b>
3.1	Rappel des objectifs . . . . .	143
3.2	Détermination du bâtiment de référence . . . . .	145
3.2.1	Choix d'une typologie . . . . .	145
3.2.2	Élaboration du modèle et de ses propriétés constructives . . . . .	145
3.3	Construction de la méthode d'étude . . . . .	152
3.3.1	Méthodes d'étude paramétrique . . . . .	152
3.3.2	Formulation détaillée de la méthode RSA . . . . .	156
3.4	Choix des paramètres de l'étude de sensibilité . . . . .	161
3.4.1	Les paramètres d'entrée liés au bâtiment . . . . .	163
3.4.2	Les conditions météorologiques de référence . . . . .	168
3.4.3	Les paramètres climatiques liés à l'environnement proche . . . . .	172
3.4.4	Les paramètres de sortie . . . . .	174
3.5	Résultats de l'étude et analyse . . . . .	176
3.5.1	Échantillon d'entrée et de sortie des simulations . . . . .	176
3.5.2	Influence individuelle des paramètres d'entrée sur le comportement énergétique du bâtiment . . . . .	178
3.5.3	Influence cumulée des paramètres d'entrée sur le comportement énergétique du bâtiment . . . . .	186
3.6	Conclusion . . . . .	197
<b>4</b>	<b>Etude de l'impact de l'aménagement sur les consommations énergétiques des bâtiments</b> . . . . .	<b>201</b>
4.1	Introduction . . . . .	201
4.2	Choix du fragment urbain d'étude . . . . .	202
4.3	Choix des bâtiments correspondant aux classes énergétiques définies . . . . .	206
4.3.1	Les paramètres constructifs . . . . .	206
4.3.2	Les paramètres climatiques . . . . .	207
4.4	Les données météorologiques d'entrée . . . . .	211

---

4.4.1	Les scénarios de température, d'ensoleillement et d'humidité . . . . .	211
4.4.2	Le régime du vent . . . . .	211
4.5	Définition des scénarios d'aménagement urbain traités . . . . .	214
4.5.1	Scénario A . . . . .	214
4.5.2	Scénario B . . . . .	215
4.5.3	Les matériaux composant les parois des bâtiments . . . . .	217
4.5.4	Les données thermophysiques des matériaux . . . . .	218
4.5.5	Les données des modèles géométriques . . . . .	218
4.6	Analyse des résultats . . . . .	220
4.6.1	Analyse des cycles hebdomadaires des températures et des puissances . .	220
4.6.2	Analyse de l'impact de la prise en compte des interactions bâtiment- microclimat dans les simulations énergétiques . . . . .	242
4.6.3	Analyse de l'influence des variables associées au microclimat . . . . .	246
4.7	Conclusion . . . . .	258
<b>Conclusion générale</b>		<b>261</b>
<b>A Annexes</b>		<b>273</b>
A.1	Rappels théoriques sur les échelles climatiques . . . . .	274
A.1.1	Définir le climat . . . . .	274
A.1.2	Les échelles temporelles climatiques . . . . .	275
A.1.3	Les échelles spatiales climatiques . . . . .	275
A.2	Choix des bâtiments d'étude au sein du projet Lyon Confluence : les ajustements volumétriques . . . . .	284
<b>Références bibliographiques</b>		<b>287</b>
<b>Liste des figures</b>		<b>295</b>
<b>Liste des tableaux</b>		<b>301</b>
<b>Table des matières</b>		<b>303</b>







**Titre :** Modélisation et simulation des microclimats urbains

Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments

**Résumé :** Les architectes, les urbanistes et les ingénieurs sont fortement sollicités pour élaborer des méthodes de conception permettant de limiter l'impact environnemental de l'urbanisation. De nombreux travaux montrent que des phénomènes climatiques comme l'îlot de chaleur urbain sont à la fois les causes et les conséquences de l'augmentation de la consommation énergétique à l'échelle de la ville. Par ailleurs, l'expertise énergétique des bâtiments est possible avec des outils opérationnels qui ne prennent pas correctement en compte les conditions climatiques à petite échelle spatiale alors qu'il est démontré que leurs effets sont avérés. Souvent négligé, l'impact direct et indirect de l'aménagement constitue pourtant une piste intéressante pour la régulation énergétique passive.

Pour étudier ces phénomènes, nous proposons dans cette thèse d'utiliser un outil de simulation microclimatique, reposant sur le couplage d'un modèle thermoradiatif et d'un code de mécanique des fluides numérique. Dans une première partie, nous développons un modèle de sol et un modèle thermique de bâtiment, ce dernier permettant le calcul des consommations énergétiques d'un bâtiment interagissant avec son environnement urbain. Nous les intégrons à l'outil de simulation thermoradiative (Solene), puis adaptons la procédure de couplage physique avec l'outil de simulation thermoaéraulique (Fluent).

Dans une deuxième partie, nous caractérisons le comportement d'un bâtiment de référence en site isolé et décrit par des paramètres variables, en établissant des classes de consommations énergétiques à partir d'une méthode statistique d'étude de sensibilité multicritères.

Enfin, nous réutilisons ces classes de bâtiments dans un contexte urbain réel, le projet Lyon Confluence, pour analyser l'impact de deux modes d'aménagement des îlots étudiés : un aménagement minéral et un aménagement végétal. Cette dernière partie fait ressortir deux résultats principaux à savoir l'écart important entre des consommations énergétiques simulées en contexte théorique isolé et simulées en site urbain, puis, l'économie potentielle d'énergie entre deux choix d'aménagement urbain pour un même projet.

**Mots-clés :** Microclimat urbain, Modélisation, Couplage thermo-aéraulique, Consommation d'énergie, Aménagement, Végétation

**Title :** Modelling and simulation of urban microclimates

Study of the urban planning impact on the buildings energy consumption

**Abstract :** Architects, urban designers and building engineers are more and more solicited to develop design methods that reduce the environmental impact of urbanization. Many studies show that climatic phenomena such as urban heat island are both the causes and the consequences of the energy demand increase at the whole urban scale. Furthermore, energetic expertise of the buildings is allowed by operational tools that presently do not properly take into account the climatic conditions at a small spatial scale, although their effects have been demonstrated. Usually neglected, the direct or indirect impact of the urban planning is however an interesting way for passive thermal control.

To study these phenomena, we propose in this work to use a microclimatic simulation tool, relying on the coupling of a thermoradiative model and a CFD computation tool. In a first part, we develop a soil model and a inner building thermal model, this last one allowing to compute the energy consumption of a building interacting with its urban environment. They are both integrated into the thermoradiative (Solene), then the coupling procedure with the CFD tool (Fluent) is adapted accordingly.

In the second part, we analyse the behaviour of a reference building, located in an isolated site and described by a set of variable parameters, and we establish classes of energy consumption using a statistical method for multicriteria sensitivity analysis.

Finally, we use these building classes in a real urban site, the Lyon Confluence project, to analyse the impact of two planning fixtures : a mineralized one and a vegetated one. This last part points out two main results, the significant difference between energy consumption simulated from the real microclimatic context and obtained from the theoretical case, and, the potential energy saving between two design strategies for a same project.

**Keywords :** Urban microclimate, Modelling, Thermo-aéraulic coupling, Energy consumption, Urban planning, Vegetation

**Discipline :** Sciences pour l'ingénieur

**Spécialité :** Ambiances Architecturales et Urbaines