HAL
open science

URBAT : Approche méthodologique de la construction durable en milieu urbain : le microclimat urbain et son impact environnemental sur les constructions

Emmanuel Bozonnet, Francis Allard, Marjorie Musy, Martine Chazelas, Gerard Guarracino

To cite this version:

Emmanuel Bozonnet, Francis Allard, Marjorie Musy, Martine Chazelas, Gerard Guarracino. URBAT : Approche méthodologique de la construction durable en milieu urbain : le microclimat urbain et son impact environnemental sur les constructions. F04.39 - CO 04 000058, Université de la Rochelle; LEPTAB; CERMA; ENTPE. 2006, pp.96. hal-00285957

HAL Id: hal-00285957

https://hal.science/hal-00285957

Submitted on 23 Feb 2023

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.

ResearchGate

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: https://www.researchgate.net/publication/281331283

URBAT : Approche méthodologique de la construction durable en milieu urbain : le microclimat urbain et son impact environnemental sur les constructions

Technical Report · January 2006

CITATIONS
4

READS
1,829

5 authors, including:

Emmanuel Bozonnet
La Rochelle Université
99 PUBLICATIONS **1,362** CITATIONS

SEE PROFILE

Francis Allard
La Rochelle Université
277 PUBLICATIONS **4,145** CITATIONS

SEE PROFILE

Marjorie Musy
Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'am…
158 PUBLICATIONS **2,046** CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:

Project Durability of construction View project

Project Évaluation des mesures d'adaptation de l'environnement urbain aux contraintes du réchauffement climatique View project

All content following this page was uploaded by Marjorie Musy on 16 May 2019.

The user has requested enhancement of the downloaded file.

DGCB CNRS D1652

URBAT

APPROCHE METHODOLOGIQUE DE LA CONSTRUCTION DURABLE EN MILIEU URBAIN : LE MICROCLIMAT URBAIN ET SON IMPACT ENVIRONNEMENTAL SUR LES CONSTRUCTIONS

Rapport Final

Réf. : F04.39 - CO 04 000058

E. BOZONNET (LEPTAB)
F. ALLARD (LEPTAB)
M. MUSY (CERMA)
M. CHAZELAS (CERMA)
G. GUARRACINO (DGCB-LASH)

Juin 2006

Liberté • Égalité • Fraternité

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

PARTICIPANTS :

- **LEPTAB**, UPRES EA 2119
  Pôle Sciences et Technologie
  Université de La Rochelle
  Avenue Michel Crépeau
  17042 La Rochelle Cedex 1
  Directeur : Francis ALLARD

- **CERMA**, UMR CNRS 1563
  Ecole d'Architecture de Nantes
  Rue Massenet, BP 81931
  44319 Nantes Cedex 3
  Directeur : Gérard HEGRON

- **DGCB,** URA CNRS 1652
  École Nationale des TPE
  Rue Audin
  69518 Vaulx en Velin Cedex
  Directeur : Gérard GUARRACINO

Responsable scientifique:

Francis ALLARD, Professeur, Directeur du LEPTAB
Tel : 05 46 45 82 04
Fax : 05 46 46 82 41
e-mail : francis.allard@univ-lr.fr

Table des matières

Table des matières 4
Introduction générale 6
1. Îlot de chaleur et environnement urbain 9
1.1 Impacts de l'effet d'îlot de chaleur urbain sur le bâti 9
1.1.1 Observations de l'effet d'îlot de chaleur urbain 9
1.1.2 Conséquences sur les ambiances et le confort intérieur 11
1.1.3 Impact sur la demande énergétique des bâtiments 13
1.2 Caractérisation des conditions extérieures en milieu urbain 15
2. Approche analytique des flux échangés à l'interface des bâtiments en milieu urbain 19
2.1 Transferts aérauliques et flux de matières 19
2.1.1 Vents dominants en site urbain 20
2.1.2 écoulements d'air à l'échelle d'une rue et d'un bâtiment 25
2.1.3 Transferts à l'interface bâtiment environnement proche et modélisation de type CFD (Code de Dynamique des Fluides) 29
2.2 Ensoleillement 31
2.2.1 Ensoleillement et piegeage radiatif à l'échelle urbaine 33
2.2.2 L'environnement proche du batiment 41
2.2.3 Transferts au niveau de l'enveloppe du bâtiment 45
2.2.4 La prise en compte de l'ensoleillement dans la conception 52
2.3 Environnement sonore urbain 57
2.3.1 Paramètres et indices caractérisant une situation 58
2.3.2 Échelle des niveaux de pression acoustique dans l'environnement 58
2.3.3 Sources de bruit 61
2.3.4 Puissance acoustique et niveau pour un véhicule isolé 62
2.3.5 Calcul du Leq pour un segment de chaussée rectiligne 63
2.3.6 Réglementation et perspectives d'insonorisation 65
2.4 Transfert des polluants 66
2.4.1 Modèles à un coefficient 66
2.4.2 Influence du débit d'air traversant par rapport au ratio entrée/sortie 66
2.4.3 Influence de la concentration extérieure d'ozone sur le ratio entrée/sortie I/O 68

2.4.4 Influence des sources intérieures d'ozone et des pertes sur le ratio d'ozone I/O 69
2.4.5 Modélisation type 70
3. Analyse morphologique du milieu urbain 71
3.1 Définitions 71
3.2 Paramètres morphologiques 72
3.3 Travaux et outils de caractérisation des tissus urbains 74
3.4 Nécessité d'une approche pluri-phénomènes 76
Conclusions générales 77
Références bibliographiques 79

Introduction générale

En 2005, la consommation énergétique globale de l'Union Européenne était de 1725MTep et le seul secteur du bâtiment représentait une part de 40,4% en 2002[1]. Le conditionnement des espaces habités représente à lui seul 57% de cette demande énergétique et outre la production de CO_2 (33 % pour le secteur du bâtiment[2]), il représente une des principales sources anthropiques responsable des phénomènes d'îlots de chaleur et de la qualité environnementale pauvre des espaces habités urbains.

Le contrôle et l'amélioration de la qualité des espaces habités vis-à-vis du confort des usagers, de la qualité de l'air, ou de la demande énergétique des bâtiments au sein d'une ville suppose une bonne connaissance du microclimat urbain et de son impact sur le secteur bâti.

Le microclimat résulte d'une interaction complexe entre les phénomènes physiques (vent, ensoleillement, etc.) et la nature de l'objet « ville » qui comprend le patrimoine bâti, les éléments naturels (végétation, eau, sol…), les aménagements urbains et l'activité humaine qui se développe en son sein.

L'analyse des paramètres physiques, urbains ou architecturaux qui jouent un rôle sur les facteurs d'ambiance nous amène ainsi, selon les problématiques (îlot de chaleur, pollution, ventilation, ambiance sonore, consommation énergétique, etc.) à traverser les échelles, de l'échelle urbaine, à l'échelle du quartier, de la rue, du bâtiment, du dispositif ou de l'élément d'enveloppe. Cette prise en compte des conditions de site et des impacts multi-échelles de mesures d'amélioration de la qualité des ambiances est un gage de la qualité environnementale ou de la durabilité des solutions retenues. Elle permettrait d'éviter l'apparition d'effets contradictoires comme c'est le cas par exemple du dimensionnement des installations de climatisation dans les villes de l'Europe du Sud où leur surdimensionnement systématique destiné à vaincre les augmentations continues des températures dues aux phénomènes d'îlots de chaleur n'a pour résultat que d'accroître leurs effets en provoquant une augmentation significative des dégagements anthropiques.

La gestion de cette interface entre les deux milieux est une clé indispensable à une gestion environnementale globale car la limitation des décharges anthropiques dues aux bâtiments ne peut passer que par une réduction des puissances énergétiques installées et donc par un traitement adéquat des espaces urbains pour limiter la demande. De plus, la prise en compte des contraintes locales des microclimats urbains locaux est une nécessité pour optimiser les solutions techniques et architecturales de gestion énergétique et environnementale applicables à un bâtiment.

La compréhension du microclimat urbain à différents niveaux d'échelle et son impact sur la consommation énergétique des bâtiments et la qualité des ambiances intérieures (conforts hygrothermique, acoustique, lumineux et qualité de l'air) reste ainsi un problème encore très ouvert, notamment à l'interface des différentes échelles spatiales (macro/micro, intérieur/extérieur). Sa maîtrise, couplée à une bonne connaissance du cadre législatif européen, permettra à moyen et long terme de fournir autant d'outils d'aide à la gestion ou à la

[1] Livre vert sur l'énergie

[2] L'énergie en France, repères, édition 2005, Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie

décision qui guideront les décideurs, concepteurs et constructeurs respectueux d'un développement urbain durable.

L'objectif général de ce projet a été de réaliser un état de l'art le plus exhaustif possible de façon à évaluer les travaux conduits au niveau international sur ce domaine et de dégager :

- des **connaissances** sur les phénomènes physiques aux différentes échelles,
- des éléments de **méthodologie** permettant d'analyser et de prédire les interactions entre le microclimat urbain et le bâtiment,
- l'identification des **paramètres** influant la relation microclimat urbain/ambiance intérieures des bâtiments,
- des outils de **conception** permettant d'évaluer la pertinence d'actions menées sur l'un ou l'autre de ces deux milieux en regard de la demande énergétique globale et de la qualité des ambiances habitées.

Pour atteindre cet objectif, nous avons réalisé une analyse bibliographique sur un large spectre de travaux scientifiques internationaux liés à l'interaction bâtiment/microclimat.

Cette lecture a été conduite suivant deux approches complémentaires :

- **Les aspects physiques :** par une analyse détaillée des phénomènes de transfert entre environnement urbain et bâtiment afin de dégager l'influence réciproque des bâtiments sur leur environnement, mais aussi les potentiels d'intervention qu'offrent les microclimats urbains pour réduire l'impact environnemental des bâtiments.
- **Les aspects urbanistiques ou architecturaux :** par une approche typologique des milieux urbains et de la relation entre le bâtiment et son environnement immédiat. En effet dans de nombreuses solutions d'intégration réelle des bâtiments dans leur environnement immédiat, la relation entre le microclimat extérieur et la qualité des ambiances intérieures est largement tributaire des typologies et de l'intégration architecturale des systèmes.

À l'issue de ce travail, ce document synthétise l'analyse bibliographique de 21 ouvrages, 24 thèses, 243 articles scientifiques et 15 rapports techniques publiés entre 1943 et 2006 par 239 premiers auteurs différents. Les articles scientifiques couvrent des revues internationales de différents domaines :

- l'énergie (*Applied Energy, Renewable Energy, Solar Energy*),
- l'atmosphère (*Atmospheric Environment, Boundary-layer meteorology*),
- la climatologie (*Bulletin of the american meterological society, Climate research, International Journal of Climatology, Theoretical and applied climatology*),
- le bâtiment (*Building and Environment, Building Services Engineering Research and Technology, Energy and Buildings, Indoor Air Journal*),
- la conception (*Automation in Construction, Environment and planning, Planning and design, Landscape and Urban Planning*),
- l'environnement (*Environment and planning, Environmental Science And Technology Journal*),
- l'informatique (*Computers*),

- les systèmes urbains (*Environment and Urban Systems*),
- les matériaux (*Cement and Concrete Research*),
- la médecine (*Epidemiological Reviews*),
- la télédétection (*Remote sensing of environment*),
- la mécanique des fluides et la thermique (*International Journal of Heat and Fluid Flow, International Journal of Thermal Sciences*),

La base de données bibliographique (références bibliographiques et résumés) exploitée est donnée en support numérique en annexe à ce document.

La problématique de l'effet d'îlot de chaleur urbain est tout d'abord exposée au travers d'une analyse bibliographique détaillée. Les différents flux à l'interface bâti-environnement extérieur sont identifiés : circulation d'air, flux solaires, bruits, et polluants. Ils sont ensuite analysés plus particulièrement et sont mis en évidence :

- les méthodes et outils qui permettent d'analyser, de simuler et de prévoir ces flux,
- les caractéristiques urbaines (matériaux, formes…) qui les modulent,
- les recommandations qui sont faites pour la conception urbaine et architecturale.

Enfin, l'impact des formes urbaines sur ces flux est présenté au travers d'une synthèse qui explore les références exploitées lors de l'analyse des flux. Sont également regroupés dans cette dernière partie du rapport les outils spécifiques à caractérisation morphologique des tissus urbains et des travaux qui abordent les problématiques urbaines environnementales sous l'angle de la morphologie.

1. Îlot de chaleur et environnement urbain

Des situations problématiques liées au climat sont constatées dans les grands centres urbains actuels, phénomène d'autant plus perceptible que des mesures de suivi et de contrôle sont mises en place avec de plus en plus de rigueur. Des situations très critiques liées à la chaleur, à la pollution ou aux nuisances sonores sont constatées avec parfois des conséquences dramatiques, comme par exemple lors de la canicule de l'été 2003 qui a entraîné un surcroît de mortalité estimé à 35 000 morts en Europe (Wright *et coll.* 2005), dont 14 800 en France.

Par ailleurs, les bâtiments et leurs usages représentent une part importante de la consommation énergétique globale et de la génération de déchets et donc de la puissance anthropique apportée à la ville. Le cycle infernal actuel où le seul traitement de la demande de confort des usagers passe par un surdimensionnement des systèmes liés au bâti conduit à un accroissement de la charge anthropique et ne fait donc qu'aggraver ce scénario. Le traitement du problème complet est nettement plus complexe, il est étroitement lié à la conception même des constructions et leurs interactions avec l'environnement proche.

Aussi l'objet de cette étude est d'analyser les phénomènes microclimatiques en milieu urbain et de mettre en évidence leur impact sur le confort dans les bâtiments et les consommations énergétiques. La méthode retenue consiste à isoler les flux de matière et d'énergie échangés entre un bâtiment et son environnement immédiat, à les identifier, et à recenser dans un premier temps les modèles qui permettent de les évaluer.

Le phénomène global résultant de ces interactions est l'îlot de chaleur. Étudié depuis plusieurs années, il correspond à une connaissance globale du phénomène, dans un premier temps nous nous proposons de décrire celui-ci et les principales approches qui permettent de l'évaluer. Par la suite nous proposerons une étude analytique plus détaillée des échanges de matière et d'énergie à l'interface entre un bâtiment urbain et son environnement.

1.1 Impacts de l'effet d'îlot de chaleur urbain sur le bâti

1.1.1 OBSERVATIONS DE L'EFFET D'ILOT DE CHALEUR URBAIN

La différence entre l'air des villes et de la campagne a été ressentie depuis l'Antiquité déjà, par l'odorat particulièrement sensible à la pollution atmosphérique[3]. Des accidents de pollution urbaine furent décelés dès le moyen-âge[4] comme à Londres où, en 1273, la combustion du charbon fût interdite. En 1952, un excès de 4000 morts dû à la pollution amena Londres et d'autres villes anglaises à légiférer pour définir des zones « sans fumées ».

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

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

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

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

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

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

On appelle phénomène d'îlot de chaleur urbain l'observation de fortes différences entre les températures mesurées en site urbain et les températures des campagnes environnantes. En effet, la représentation de l'évolution spatiale de la température révèle dans ces conditions un pic de température, semblable à un « îlot », au niveau des agglomérations, Figure 1.

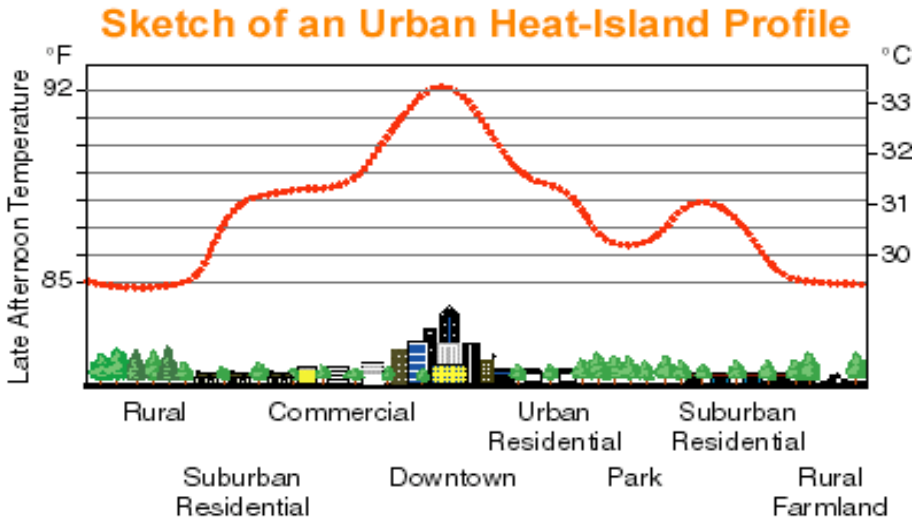


Figure 1- Exemple de variation de la température entre milieu urbain et rural pour une fin d'après-midi estivale, d'après « Heat Island Group » (http://eetd.lbl.gov/HeatIsland/)

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 maximum d'environ 2,5 °C entre 1920 et 1997 (Akbari *et coll.* 2001). Cette évolution a conduit à l'observation d'îlots de chaleur urbains. En Californie, des relevés sur une trentaine

de villes et des zones rurales environnantes (Akbari *et coll.* 2001) 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. Ce phénomène est aussi révélé par les vues satellites de températures de surfaces, Figure 2.

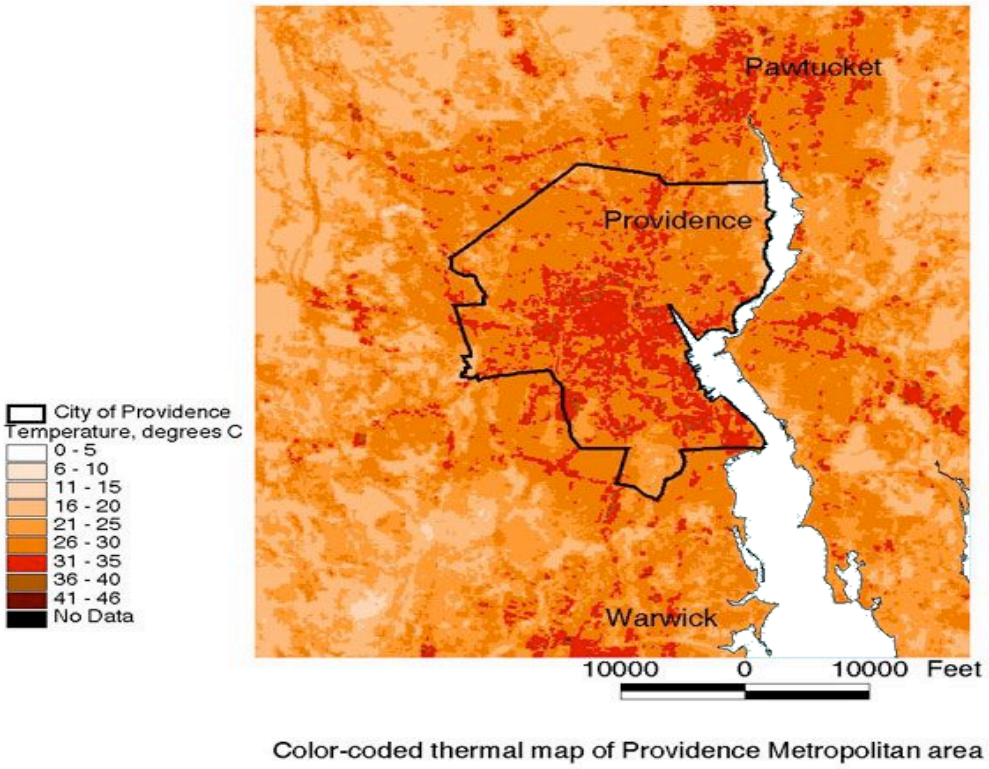


Figure 2- Température de surface pour la ville de Providence d'après une image du satellite Landsat 7 de juillet 2001, d'après le site de « Brown University » (http://envstudies.brown.edu).

On constate donc un effet d'îlot de chaleur urbain tant au niveau des températures de surface que de la température d'air. Cependant, il apparaît que cet écart de température dû à l'urbanisation est difficilement quantifiable. Ainsi, certains sites urbains étaient plus froids auparavant, et des phénomènes microclimatiques naturels rendent la comparaison difficile avec les différences de température actuelles. Ceci est dû aussi au fait que les centres urbains se sont souvent développés en fonction de configurations naturelles particulières, comme la présence de cours d'eau pour le transport par exemple, et donc dans des conditions climatiques singulières. Comment quantifier alors l'écart de température dû à l'effet de l'urbanisation sans connaître les conditions originales ? D'autre part, les relevés météorologiques disponibles proviennent principalement de stations de mesures situées en dehors des centres urbains, comme les zones aéroportuaires. Ces zones sont elles aussi choisies en fonction de caractéristiques naturelles particulières et donc de conditions météorologiques particulières.

1.1.2 CONSEQUENCES SUR LES AMBIANCES ET LE CONFORT INTERIEUR

Le phénomène d'îlot de chaleur a des conséquences directes sur les charges climatiques des bâtiments, donc sur le confort thermique à l'intérieur de ceux-ci. Ce confort thermique, ou

plutôt l'inconfort résultant de l'îlot de chaleur, a des conséquences directes sur la santé des personnes. Des études ont été menées pour montrer la corrélation entre la température moyenne journalière et la surmortalité due à cette chaleur excessive. Ainsi Hajat et *coll.* ont mené une analyse sur la ville de Londres (Hajat *et coll.* 2002) sur une période de 20 ans, de janvier 1976 à décembre 1996, et montré que la surmortalité liée à la chaleur augmentait linéairement avec la température au-delà de 19°C (température journalière moyenne). Leur analyse sur une valeur moyenne de température glissante sur 3 jours consécutifs a montré que pour une variation de 1°C au-delà de cette valeur moyenne, une surmortalité de 3,34% était constatée. De plus, l'effet de l'augmentation de la valeur minimale de température s'est révélé plus important que celui de la valeur maximale dans cette même étude.

Pour définir le confort thermique caractéristique des ambiances intérieures, différentes grandeurs peuvent être utilisées comme le PMV ou la température opérative[5]. Le modèle de de Dear (de Dear et Brager 2001) définit par exemple une température de confort optimale à partir de la moyenne mensuelle de température extérieure (tant que celle-ci se situe entre 5°C et 32°C), modèle qui traduit donc l'adaptation du confort en fonction d'un niveau de température moyen (ce qui correspond en particulier à l'adaptation de la vêture). D'après ce même modèle un écart de ±2,5°C autour de cette température est observé pour 90% des occupants dans le cas de locaux ventilés.

Peu de mesures sur site ont été réalisées pour estimer l'évolution de l'inconfort en conditions de canicule. Une étude a cependant été menée par Wright *et coll.* sur des habitations à Manchester et Londres à partir de mesures sur l'été 2003 (Wright *et coll.* 2005). Des mesures ont été réalisées dans des habitations de différents types de constructions ; ainsi les évolutions de températures dans les différentes pièces des logements comme dans l'exemple de la Figure 3.

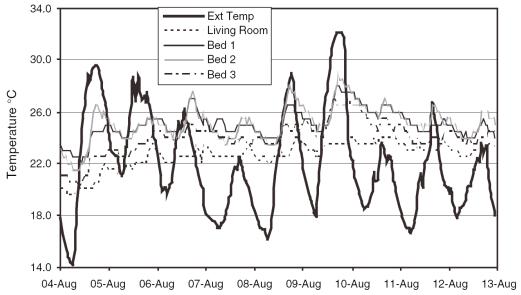


Figure 3 - Variation de la température extérieure et intérieure d'une maison d'habitation à Manchester, durant l'été 2003, d'après (Wright et coll. 2005).

Les variations de température observées, comme celles du cas de la Figure 3, montrent que la température intérieure diminue peu la nuit, contrairement à la température extérieure, ce qui justifierait le développement du rafraîchissement par ventilation nocturne. De plus, des écarts importants de température entre les différentes pièces des logements ont été observés, avec néanmoins des niveaux d'inconfort élevés la plupart du temps. D'après ces mesures, un modèle simplifié d'évolution de la moyenne journalière de température intérieure a été développé par Wright *et coll.* en corrélation avec l'évolution de température extérieure. Cette

[5] C'est la température qui correspond approximativement à la température ressentie par un être humain, elle traduit les échanges par rayonnement et par convection et correspond à peu près à la moyenne de la température radiante et de la température d'air.

approche doit être encore développée pour permettre d'envisager différents types de constructions et de climats. Cette modélisation simplifiée présente l'avantage de pouvoir estimer l'inconfort dans les logements à partir des conditions climatiques aux abords des habitations, et donc de quantifier l'impact de l'effet d'îlot de chaleur par exemple.

1.1.3 IMPACT SUR LA DEMANDE ENERGETIQUE DES BATIMENTS

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

Parallèlement à l'augmentation des températures moyennes, les maxima de température ont augmenté, entraînant une augmentation des niveaux de puissance de crête. La puissance crête des systèmes de climatisation peut être directement corrélée aux charges climatiques et donc à cette augmentation. Ainsi, une étude sur six villes américaines (Akbari *et coll.* 2001) a montré que le pic de puissance appelée augmente de 2 à 4% pour une augmentation de la température maximum de 1°C, au-delà d'un seuil de 15-20°C. Ces pics d'appel de puissance ont différentes conséquences négatives dont des baisses éventuelles de tension sur les réseaux électriques et surtout la nécessité de surdimensionner les systèmes de production par rapport aux consommations courantes.

Les dissipations thermiques des bâtiments participent alors de façon importante à l'amplification du réchauffement urbain. La densification des villes et l'augmentation générale des consommations énergétiques font augmenter l'énergie dissipée, et les systèmes de climatisation peuvent représenter une part significative d'autant plus que leur charge augmente avec le réchauffement, Figure 4.

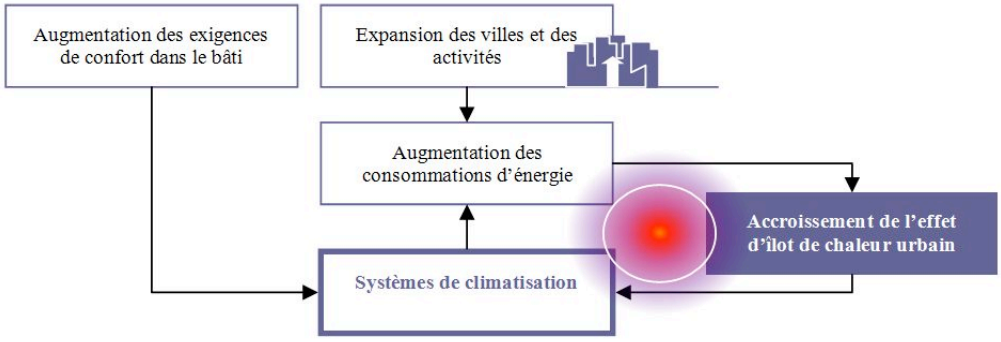


Figure 4 - Phénomène d'amplification de l'îlot de chaleur urbain et système de climatisation

De plus, la construction de bâtiments s'est accompagnée de la diminution de l'albédo des surfaces urbaines et de la disparition de la végétation. Plusieurs expériences et simulations en ont montré les conséquences (Akbari *et coll.* 2001), avec comme effet direct la corrélation entre les consommations d'énergie et les pics de puissance engendrés par la climatisation, et

comme effet indirect la réduction des îlots de chaleur. Ainsi, 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 appelée par la climatisation. Des simulations ont aussi montré que l'augmentation globale de l'albédo d'une ville pouvait entraîner une forte diminution des îlots de chaleur urbains, mais ce type de mesure est difficile à mettre en œuvre réellement, surtout qu'elles ne sont effectives que si respectées à grande échelle car l'effet est indirect. La végétation a aussi un impact important, notamment les arbres, de façon directe et indirecte. Les ombres portées sur les bâtiments et autres surfaces participent à la diminution des charges de climatisation. Le microclimat urbain peut aussi être amélioré par la présence d'arbres : l'évapotranspiration de la végétation rafraîchit l'air et la disposition des arbres modifie la circulation d'air en protégeant par exemple les bâtiments en hiver par rapport aux courants froids, ou inversement en favorisant un dispositif de ventilation naturelle en été.

Néanmoins, dans la pratique courante du génie climatique, le calcul des charges climatiques sur le bâti est mené à partir des données météorologiques de l'évolution de température, données par la station météorologique de référence située la plupart du temps en dehors des centres urbains en terrain homogène comme des zones aéroportuaires. Mais du fait de l'îlot de chaleur, la température extérieure et donc les charges climatiques peuvent être fortement différentes sur le site de la construction. Une étude et des simulations ont été réalisées pour estimer l'impact de l'interaction entre le microclimat et le bâti sur la demande énergétique (Bozonnet 2005), sur la base d'une approche zonale précédemment développée pour l'étude des ambiances habitées (Inard 1988; Wurtz 1995; Musy 1999). Des simulations ont été menées sur le cas d'une rue de type canyon dans le centre d'Athènes pour le mois d'août 2001 (Bozonnet 2005), période durant laquelle des mesures sur site ont été réalisées (Allard et Ghiaus 2004; Georgakis et Santamouris 2005a). Dans ce cas d'étude, le système de climatisation classique de climatiseur de fenêtre en façade de bâtiment, schématisé à la Figure 5-a), participe à la charge anthropique de la ville, et donc aux charges climatiques. L'impact sur la demande énergétique a été comparée par rapport aux méthodes de calcul classiques selon les 4 niveaux de précision suivants (résultats représentés Figure 5-b) :

- Cas 1 : la température extérieure des bâtiments est définie par la moyenne horaire mesurée à la station météorologique.
- Cas 2 : l'effet d'îlot de chaleur à l'échelle de la ville est pris en compte, et la température extérieure des bâtiments est définie par la température d'air en zone homogène au-dessus des bâtiments (toitures).
- Cas 3 : l'effet d'îlot de chaleur et l'impact des formes urbaines (canyon ombragé) sont pris en compte par une modélisation complète des transferts thermoaérauliques entre la rue et la canopée urbaine.
- Cas 4 : idem, mais en tenant compte en sus de la charge anthropique sur le microclimat du fait du fonctionnement couplé des climatiseurs de fenêtre sur l'espace confiné du canyon.

a). b).

Figure 5 – a) Maillage et positionnement des climatiseurs de fenêtre dans la zone étudiée. b) Comparaison, en pourcentage, de la demande énergétique calculée sur les 28 jours d'étude pour les différents niveaux de détermination des conditions extérieures par rapport au cas de référence.

Les résultats obtenus, (Figure 5-b), ont démontré l'importance de la forme de la rue (comparaison des cas 2 et 3) et de l'effet d'îlot de chaleur sur l'accroissement la demande énergétique (36 % pour la façade Sud Ouest). Cette simulation a aussi permis de quantifier l'impact relatif du fonctionnement de la climatisation, cas 4, sur les conditions de température extérieure, et donc la demande énergétique.

L'accroissement de la demande énergétique de climatisation due à l'îlot de chaleur et à la production anthropique peut être combattu par le développement de solutions alternatives de rafraîchissement des ambiances, permettant aussi de diminuer la production anthropique de la ville. La ventilation naturelle constitue l'alternative la plus répandue permettant d'atteindre de bons niveaux de confort thermique intérieur. Ainsi, Kolokotroni a montré (Kolokotroni *et coll.* 2006) que la ventilation nocturne par effet de cheminée combinée à une optimisation du bâti pouvait permettre de maintenir un niveau de température intérieure de moins de 24°C (à Londres pour une semaine chaude d'été) pour une consommation d'énergie de rafraîchissement réduite de 90% (par rapport au système non optimisé). Selon cette même étude, les éléments déterminants pour la diminution de la demande d'énergie de climatisation sont la protection solaire, le ratio de vitrage et les apports internes (occupation, etc.).

Néanmoins, en milieu urbain, le microclimat et les conditions climatiques aux abords des bâtiments sont fortement hétérogènes, et Mochida *et coll.* ont montré l'importance de la prise en compte de l'environnement sur le niveau de confort atteint par un système de ventilation traversante (Mochida *et coll.* 2006). Dans cette étude, une modélisation est développée pour permettre le couplage des modèles d'environnement extérieur avec ceux des ambiances et du système de ventilation naturelle. Plus que pour un système climatisé ou ventilé mécaniquement, ce type de modélisation apparaît ici nécessaire pour un système passif tel que la ventilation naturelle.

1.2 Caractérisation des conditions extérieures en milieu urbain

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

On peut alors définir l'effet d'îlot de chaleur urbain par l'écart de température maximum entre la ville et la campagne environnante ΔT_{urMAX} . Les variations de cet écart au cours de la journée montrent que le rafraîchissement nocturne en milieu urbain est atténué, l'écart de température peut alors être important la nuit. De même l'augmentation de température en début de journée est plus rapide en milieu rural et on peut même observer temporairement une température plus faible en ville. Cette inertie du milieu urbain est notamment due aux matériaux et revêtements des surfaces urbaines.

L'effet d'îlot de chaleur urbain est d'autant plus marqué que la ville est importante. Ainsi, des relevés expérimentaux ont révélé une corrélation entre les écarts observés ΔT_{urMAX} et la population des villes, et Oke (Oke 1987) propose une expression de ΔT_{urMAX} en fonction de la population et de la vitesse de vent de référence. Cependant cette relation est aussi fortement dépendante de la morphologie de la ville, ce qui conduit notamment Oke à distinguer les

villes européennes et américaines. Il propose donc une autre corrélation entre ΔT_{urMAX} et le rapport d'aspect H / W des rues, de type canyon, des centres urbains :

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

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

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

Oke exprime de façon plus générale ΔT_{urMAX} en fonction de ψ_{se}, quelle que soit la géométrie de la rue. Cette différence de température due à la géométrie peut s'expliquer notamment par le fait que la répartition géométrique des surfaces urbaines accentue les effets d'inter-réflexions et d'absorption.

Cependant, cette formulation semble être mal adaptée dans le cas de villes sous des climats différents de ceux étudiés par Oke (nord Américain et Européen principalement), comme l'a montré en particulier l'étude de villes coréennes et japonaises (Montávez *et coll.* 2003). En effet, pour être plus précis il faut tenir compte du potentiel de rafraîchissement du milieu rural au même titre que de celle de la géométrie urbaine. Montávez et González-Rouco (Montávez *et coll.* 2003) proposent donc une formulation où a_{MG} correspond au potentiel de rafraîchissement du milieu rural, et b_{MG} , c_{MG} et d_{MG} pour le milieu urbain où le rayonnement diffus $\Delta E_{dif,ur}$ de la voûte céleste est accentué par la pollution notamment :

$$\Delta T_{urMAX} = a_{MG} + b_{MG}\psi_S + \left(c_{MG} + d_{MG}\psi_S\right)\Delta E_{dif,ur}$$

Cette approche semble bien adaptée pour déterminer l'intensité de l'îlot de chaleur urbain au niveau des températures de surface et pour des conditions météorologiques idéales, c'est-à-dire dans des conditions de vent très faible et de ciel clair.

Mais en réalité, l'effet d'îlot de chaleur urbain est dû à une concordance de nombreux facteurs, et les phénomènes suivants sont recensés par Oke (Oke 1987) :

- absorption accrue du rayonnement de courte longueur d'onde due à la géométrie et à l'effet combiné de la surface accrue et des inter-réflexions,
- absorption accrue du rayonnement de grande longueur d'onde de la voûte céleste due à la pollution atmosphérique,
- pertes réduites par rayonnement grande longueur d'onde du fait du degré d'ouverture réduit par rapport à la voûte céleste,
- sources de chaleur anthropogéniques,
- augmentation du stockage de chaleur latente,
- diminution de l'évapotranspiration du fait des surfaces urbaines faiblement végétalisées,
- diminution des transferts thermiques par transport du fait de la diminution de la vitesse d'air.

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

Finalement les conditions microclimatiques auxquelles sont soumis les bâtiments peuvent être très variables par rapport aux conditions météorologiques données par une station de référence, et une étude tenant compte de l'ensemble de ces phénomènes est nécessaire. À partir de mesures sur 5 rues de type canyon à Athènes (Georgakis et Santamouris 2005b), une étude a été réalisée pour mettre en évidence cet écart de température ΔT_{ur} par rapport aux toitures de bâtiments (Bozonnet 2005). Ainsi, sur trois jours consécutifs de mesure tel que dans le cas de la rue Dervenion représenté Figure 6, la variation de l'écart de température par rapport aux données météorologiques apparaît comme très régulier. Ceci est aussi observé pour les autres mesures réalisées, tandis que l'évolution des températures mesurées en toiture est très variable pour les trois journées.

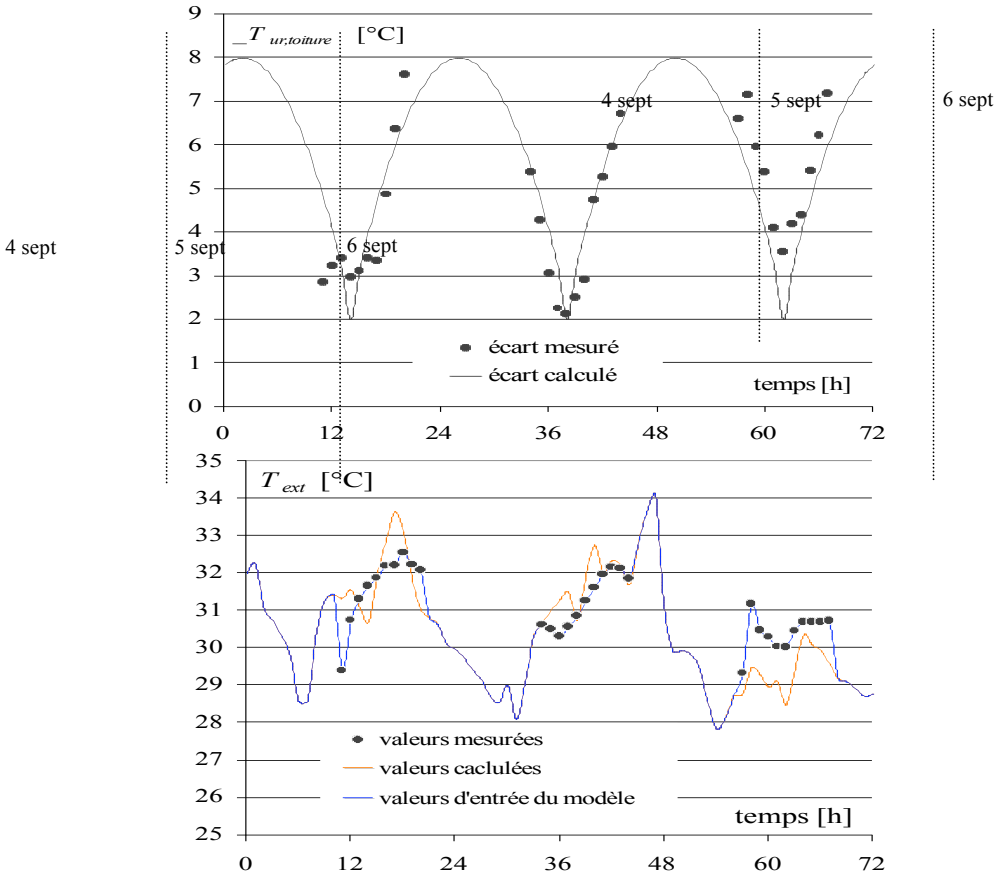


Figure 6 Évolution de l'écart de température, calculé et mesuré, entre le site de la rue Dervenion et la station météorologique. -b : Évolution de la température mesurée, calculée et d'entrée du modèle pour le site de la rue Dervenion.

Un profil empirique d'évolution diurne de l'écart de température a donc été établi. L'écart mesuré est approché par la variation périodique suivante, avec *t* l'heure du jour :

$$\Delta T_{ur,toiture} = 6\cos^{0,8}\left(\frac{t-2}{24}\pi\right) + 2$$

Ce calcul permet de reconstruire l'évolution estimée de température en dehors des périodes de mesure sur site, Figure 6. Les températures moyennes mesurées sont donc complétées par les valeurs calculées la nuit, ainsi que sur toute la période étudiée les jours précédents, Figure 7.

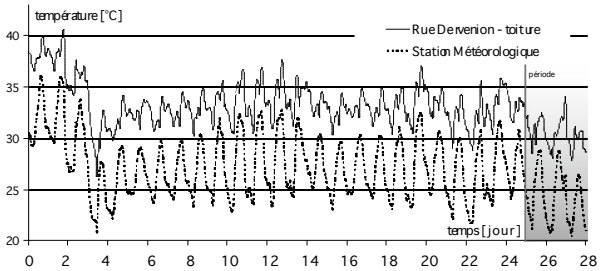


Figure 7- Évolution de la température extérieure relevée par la station météorologique et calculée pour le site de la rue Dervenion, du 10 août au 6 septembre 2001

L'évolution quotidienne de la température extérieure ainsi définie est en moyenne de 33°C, le minimum et le maximum moyen journalier sont respectivement de 30,8°C et 35,4°C. Cette évolution montre aussi l'atténuation forte de la variation diurne de la température en milieu urbain, définie ici au-dessus des toitures de bâtiments.

La loi de variation de l'écart de température ΔT_{ur} établie empiriquement est fortement variable d'un site à un autre avec cependant une forme de type généralement sinusoïdale, et un maxima la nuit quand l'effet d'îlot de chaleur est accentué du fait de la faible végétalisation urbaine. Néanmoins, de nombreux paramètres liés à l'activité humaine interviennent (Makar *et coll.* 2006), et une modélisation plus précise devrait tenir compte par exemple des horaires de travail et de l'occupation de l'espace urbain ainsi que des espaces intérieurs. Dans le cadre d'une étude d'avant-projet ou d'aménagement urbain, ce type d'information est souvent difficile à établir et même dans un cas réel, cette charge reste très difficile à estimer. Finalement, le modèle utilisé doit permettre par un calcul le plus complet possible de définir la solution technique la plus performante en tenant compte principalement des effets de couplage entre bâti et environnement extérieur, pour des scénarii d'activité humaine donnés.

2. Approche analytique des flux échangés à l'interface des bâtiments en milieu urbain

2.1 Transferts aérauliques et flux de matières

Les anticyclones et les dépressions sont à l'origine de mouvements d'air à l'échelle planétaire, notamment entre l'équateur plutôt chaud et les pôles plutôt froids. Les vents dominants sont des phénomènes observables sur plusieurs centaines de kilomètres et ils fluctuent sur des périodes de l'ordre de la journée ; ils sont considérés comme des phénomènes climatiques de grande échelle selon le classement représenté à la Figure 8. Mais, localement, des phénomènes spécifiques peuvent apparaître comme des brises de terre/mer ou de montagne/vallée. Ces brises sont dues à des écarts de température relativement importants sur de faibles distances, elles dépendent de la géographie locale.

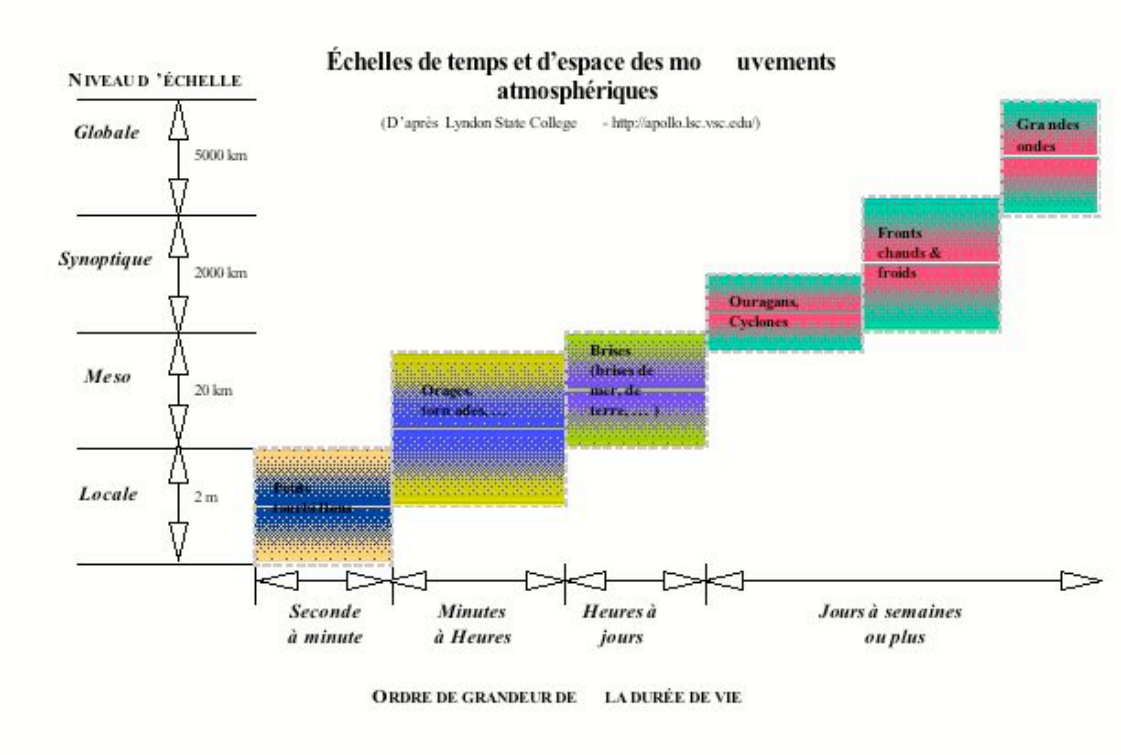


Figure 8 - Les différents niveaux d'échelle spatiotemporels des phénomènes climatiques, d'après Lyndon State College

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

l'écoulement d'air peut être modifié non seulement par la présence de petits obstacles, de la végétation, mais aussi par des phénomènes thermiques liés notamment à l'ensoleillement.

2.1.1 VENTS DOMINANTS EN SITE URBAIN

La couche limite atmosphérique en site homogène se modifie aux abords des constructions ainsi que le profil de vitesse moyenne, Figure 9.

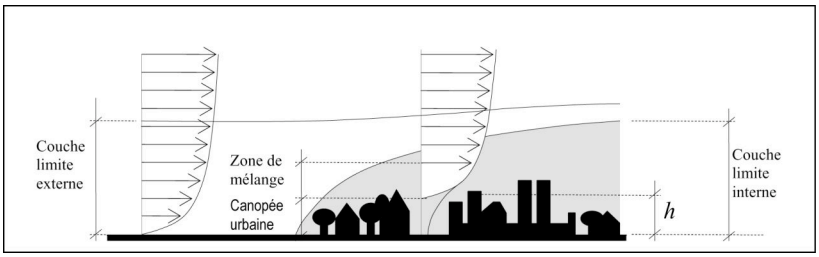


Figure 9 - Profil moyen de la vitesse horizontale du vent dominant en site homogène et en site urbain (Plate et Kiefer 2001)

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

Sous-couches atmosphériques en milieu urbain

En milieu urbain, le profil moyen de vitesse d'air dû au vent dominant est différent du profil logarithmique défini en site homogène. L'écoulement est ainsi fortement perturbé aux abords des bâtiments. En revanche, au-delà d'une zone appelée zone de mélange, le profil de l'écoulement redevient similaire à celui d'un site homogène. Des relations empiriques établissent le profil de vitesse en fonction de la rugosité du site, souvent sous forme logarithmique (Nicholson 1975). D'après (Rotach 1999), ce profil dépend beaucoup des axes dominants des rues canyon, même loin du sol.

À partir de cette zone de mélange, plusieurs sous-couches d'écoulement peuvent être définies, Figure 10, de la même façon que pour un écoulement de paroi.

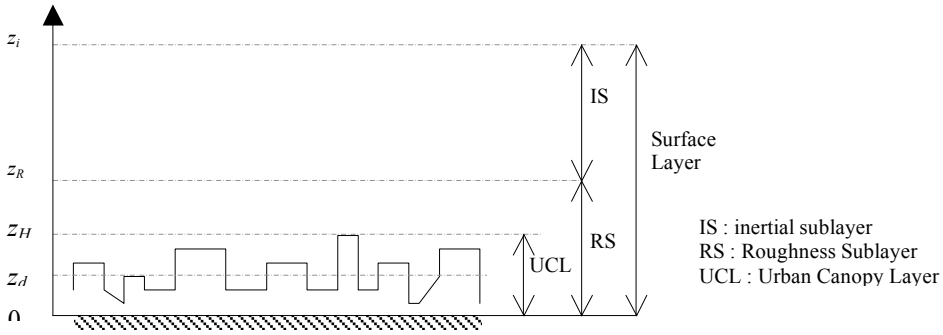


Figure 10 - Répartition verticale des différentes couches de circulation d'air au-dessus d'un milieu urbain, d'après (Rotach 1999).

La zone d'écoulement perturbée est aussi appelée couche limite de surface, ou « surface layer », Figure 10, et s'étend sur plusieurs dizaines de mètres au-dessus des bâtiments. En partie haute, la couche limite inertielle s'apparente à l'ensemble de la couche limite de surface pour les zones rurales (Rotach 1999). Dans la partie basse de la couche limite, $z < z_R$, l'écoulement est perturbé et des écoulements secondaires verticaux ou transversaux sont observés, cette zone est appelée sous couche limite rugueuse ou « Roughness Sublayer ». En pratique, l'écoulement tridimensionnel et fortement variable provoqué par la forte irrégularité de la

rugosité rend difficile la définition en échelle réelle de cette limite z_R en zone urbaine ou périurbaine.

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

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

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

Rugosité en site urbain

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

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

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

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

Deux types d'approches sont donc utilisées pour définir ces hauteurs (Grimmond et Oke 1999) : l'une en fonction de la morphologie de la surface, telle qu'au Tableau 1 de façon simplifiée, et l'autre par l'observation microclimatique et l'identification des paramètres avec les profils logarithmiques. La détermination de ces paramètres à partir de la morphologie de surface peut se formuler plus précisément à partir de la définition d'une texture moyenne d'une ville ou d'un quartier tel que schématisé à la Figure 11.

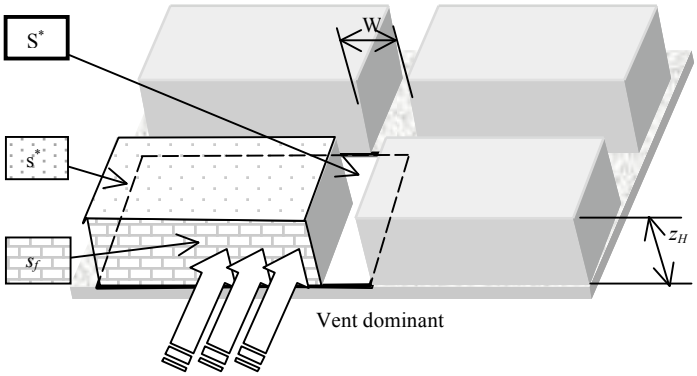


Figure 11 - Surfaces caractéristiques pour une morphologie urbaine régulière en blocs.

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

$$\begin{cases} z_d = f_d z_H \\ z_0 = f_0 z_H \end{cases}$$

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

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

z_d est alors estimé par (Nicholson 1975) :

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

La relation entre densité de bâti s_f / S^* et rugosité z_0 se retrouve à travers différentes études expérimentales sur site ou en soufflerie, résultats représentés Figure 12, avec s_f la surface de bâti en projection perpendiculaire au vent.

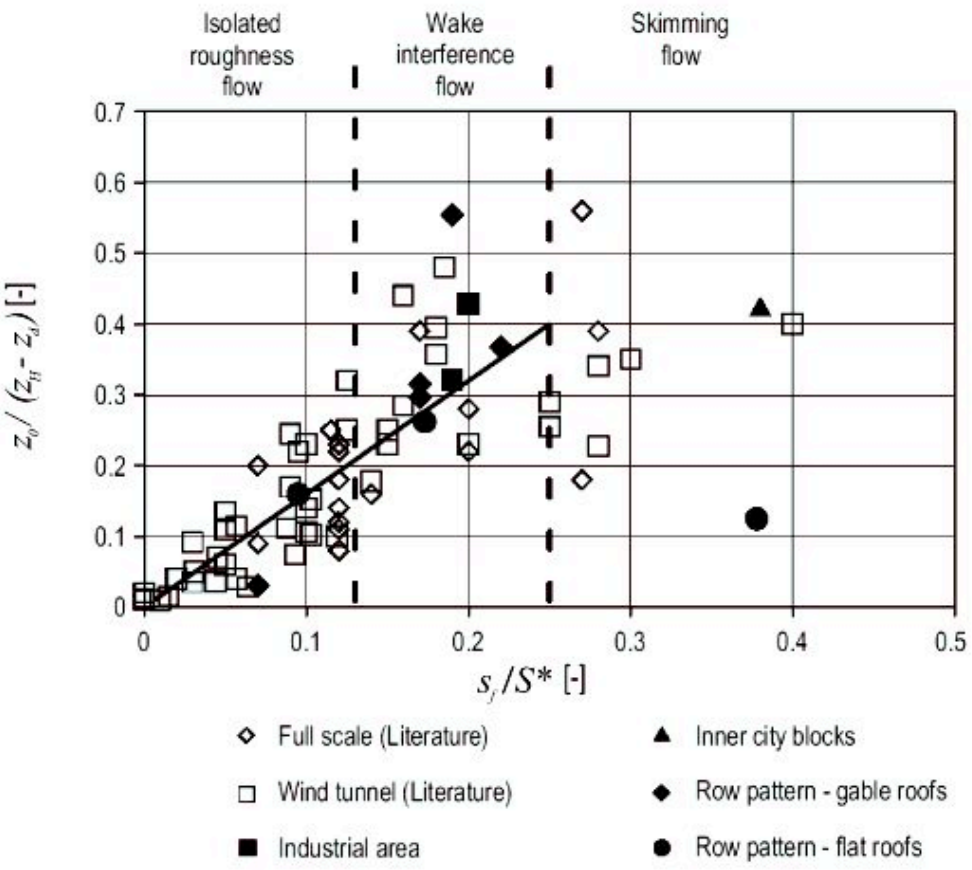


Figure 12 - Rugosité adimensionnelle en fonction de la densité de bâti s_f / S^*, d'après (Plate et Kiefer 2001)

En fonction de ce paramètre de densité, trois types d'écoulements ont été relevés (Figure 12) : l'écoulement à rugosité isolé, à interférence de sillage et rasant. Pour un écoulement rasant, la relation entre rugosité adimensionnelle et densité n'est pas établie, et une étude en fonction de la morphologie urbaine considérée doit être menée. Une classification des diverses formes d'urbanisme a été proposée par Theurer et appliqué sur trois villes en Allemagne. L'auteur a relevé les caractéristiques moyennes de chaque forme urbaine (Theurer 1999).

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

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

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

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

Pour la sous-couche obstruée en dessous du plan de déplacement nul, ou sous-canopée urbaine, l'écoulement moyen est beaucoup plus difficile à définir du fait des fortes irrégularités du milieu. Nicholson propose la définition d'un autre paramètre de rugosité Z_0,

dérivée d'études sur l'écoulement sous la canopée forestière (Nicholson 1975), en fonction de l'espacement moyen entre les obstacle D^* :

$$Z_0 = z_H \frac{D^*}{z_{0N}}$$

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

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

Profils de vitesse moyenne

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

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

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

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

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

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

où U_0 est déterminé par continuité des profils à la cote z_H , selon la représentation à la Figure 13.

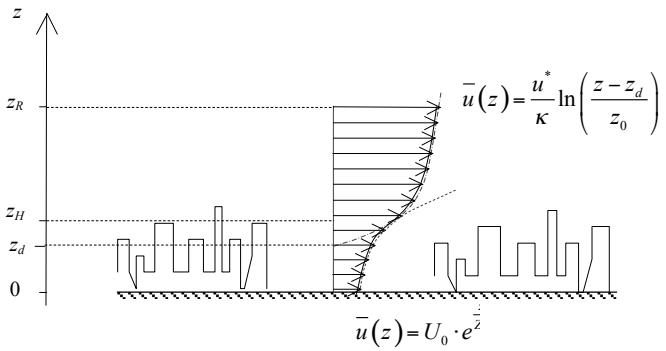


Figure 13 - Profil de la vitesse moyenne de vent ū(z) en site urbain, d'après (Nicholson 1975)

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

2.1.2 ECOULEMENTS D'AIR A L'ECHELLE D'UNE RUE ET D'UN BATIMENT

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

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

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

Description de l'écoulement autour de bâtiments

Lorsque le vent dominant s'écoule autour des bâtiments, perpendiculairement à une des façades, différentes zones perturbées peuvent être distinguées (Figure 14) : sur la façade au vent une zone de surpression, sur les côtés et la partie supérieure un décollement et une couche limite turbulente, sur la façade sous le vent une zone de dépression turbulente.

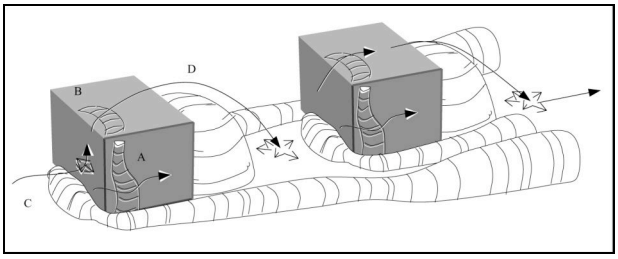


Figure 14 - Allure de la structure de l'écoulement autour de cubes dans un flux turbulent. A : recirculation latérale, B : recirculation de toiture, C : vortex en « fer à cheval », D : bulle de sillage. D'après (Meinders et coll. 1998)

À partir d'une description empirique de ces zones d'écoulement (Hosker 1984), des méthodes de prédiction du champ de vitesse moyen ont été développées par Rockle (Rockle 1990) et repris par d'autres équipes (Kaplan et Dinar 1996; Brown et Streit 1998). La démarche

consiste à définir les zones perturbées pour un obstacle, puis à les combiner pour un ensemble d'obstacle.

Pour un obstacle isolé en site homogène, Figure 15, trois zones principales d'écoulement perturbé sont définies : la zone de recirculation frontale, la zone morte ou bulle de sillage et la zone de sillage perturbée.

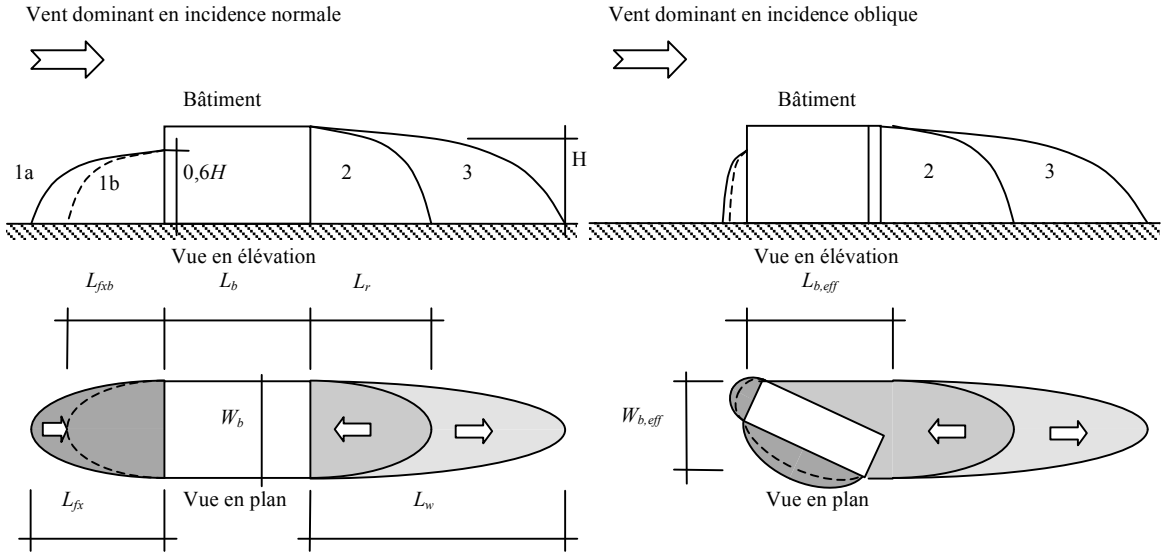


Figure 15 - Zones d'écoulement perturbé pour un bâtiment isolé : zone de déplacement 1a, zone de recirculation frontale 1b, zone morte 2 et zone de sillage 3.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$L_W = 3L_r$$

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

La détermination du champ de vitesse moyen est réalisée à partir du champ de vitesse empirique défini pour chaque zone perturbée. Dans la démarche présentée par Kaplan et Dinar (Kaplan et Dinar 1996), le profil de vitesse moyenne pour chaque zone est tout d'abord défini en fonction du profil moyen non perturbé $\bar{u}(z)$, lui-même défini par des lois empiriques présentées précédemment. Le champ de vitesse ainsi défini correspond donc à une modification de l'intensité du profil moyen non perturbé et/ou de sens, mais pas de direction, il ne respecte donc pas la loi de conservation de la masse. L'étape suivante consiste à « déformer » de façon itérative ce profil de vitesse pour respecter la loi de conservation de la masse pour obtenir le champ de vitesse estimé, Figure 16.

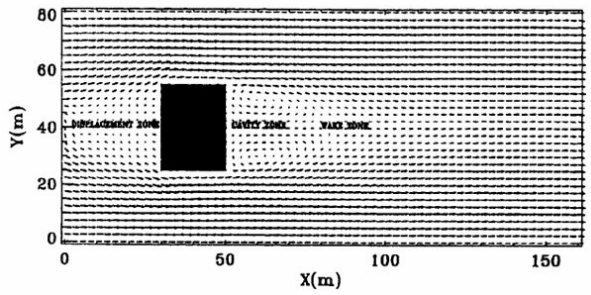


Figure 16 - Champ de vitesse autour d'un bâtiment isolé, d'après (Kaplan et Dinar 1996).

Description de l'écoulement dans une rue

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

À l'échelle de la rue, les trois types d'écoulements définis pour une ville, rasant, à interférence de sillage et à rugosité isolée, peuvent être aussi identifiés, Figure 17.

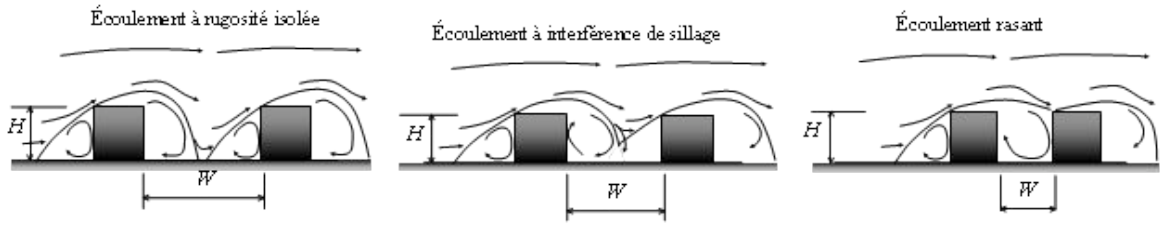


Figure 17 - Rue de type canyon avec un rapport d'aspect W / H supérieur à 2,5 (rugosité isolée), compris entre 1,54 et 2,5 (interférence de sillage), et inférieur à 1,54 (rasant), d'après (Oke 1987).

Pour des rues de type canyon de hauteur H et de largeur W Le rapport d'aspect W / H traduit la rugosité du site et permet de prévoir ces différents écoulements dans le cas d'un vent

transversal à la rue (Oke 1987). Des rapports d'aspect *W / H* moyens de l'ordre de 0,6 ont été relevés pour des centres urbains en Allemagne (Theurer 1999), et de l'ordre de 2 pour les autres zones urbaines.

Cette approche, valable pour des géométries de type canyon, ne permet pas de définir les écoulements pour les autres formes urbaines. Aussi, une approche empirique a été développée à partir de l'écoulement défini pour un bâtiment isolé (Hosker 1984) et reprise par la suite (Rockle 1990; Kaplan et Dinar 1996; Brown et Streit 1998; Pardijak *et coll.* 2004) pour permettre d'estimer les écoulements autour d'un ensemble quelconque de bâtiments, comme dans l'exemple de la Figure 18. (phrase déjà vue plus haut)

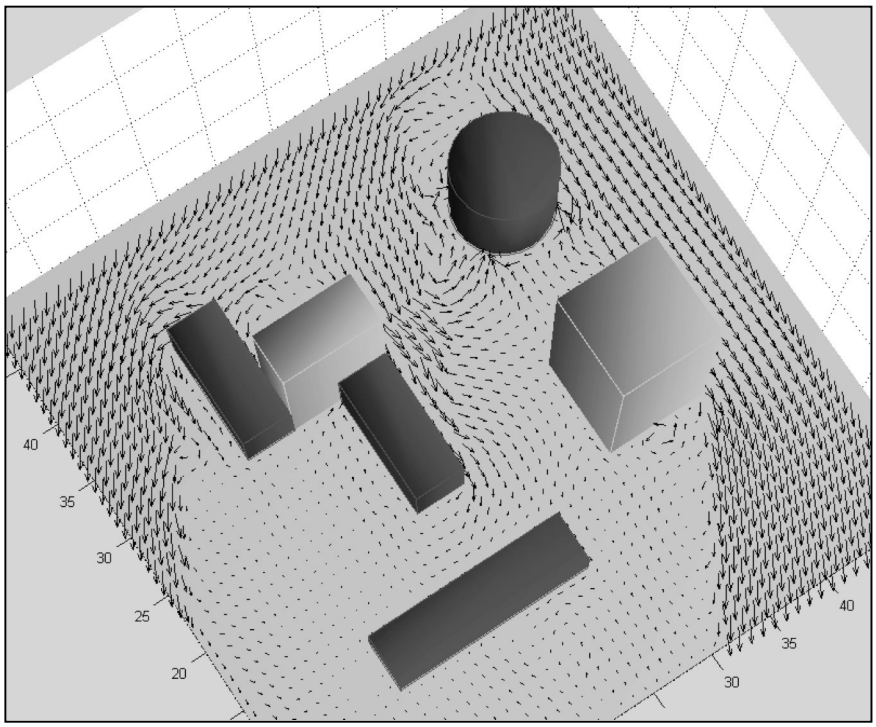


Figure 18 - Interférence d'un ensemble de bâtiments sur le champ de vitesse moyen – calculé avec QUIC-Urb (Pardijak et coll. 2004)

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

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

Des approches CFD sont aussi parfois utilisées bien que délicates à mettre en œuvre (Assimakopoulos *et coll.* 2006).

2.1.3 *TRANSFERTS A L'INTERFACE BATIMENT ENVIRONNEMENT PROCHE ET MODELISATION DE TYPE CFD (CODE DE DYNAMIQUE DES FLUIDES)*

Le développement de plateformes de simulation CFD, multi-échelles et intégrant l'étude de phénomènes couplés (Murakami 2004), permet d'envisager le dimensionnement de systèmes et la conception de bâtiments pour obtenir des conditions d'ambiance prédéfinies. Mais la modélisation fine par CFD des ambiances et du climat est confrontée à deux difficultés majeures : l'interaction de nombreux phénomènes physiques et les différences d'échelles spatiales et temporelles. Ces difficultés se répercutent sur la modélisation mais aussi sur les temps de calcul nécessaires. Étant donnée la forte turbulence et l'influence des effets dynamiques dans l'écoulement urbain, les codes de champ ont souvent été utilisés malgré les nombreuses difficultés propres aux simulations pour de « grands espaces » (Jiang et Chen 2002). Ils se basent sur les équations locales de bilan des écoulements.

Dans une étude réalisée par Jiang et Chen (Jiang et Chen 2002) la modélisation fine a portée sur un ensemble de bâtiments, Figure 19, dans l'objectif de prédire la ventilation d'un logement. Des mesures expérimentales ont été effectuées in situ sur les bâtiments A à D ainsi que pour un appartement dans le bâtiment A. Le modèle devait représenter correctement la circulation d'air autour de ces bâtiments, et plus particulièrement du bâtiment A. Le vent mesuré provient d'un site dégagé, homogène, et d'une direction nord à ouest. La zone étudiée a donc été limitée à l'ensemble des dix bâtiments représentés sur la Figure 19. Pour réduire le temps de calcul, l'étude a été faite uniquement sur les bâtiments A, B, E et F. La comparaison des résultats de cette simplification avec les résultats du calcul complet sur l'ensemble des 10 bâtiments a montré une différence de moins de 5 % sur la pression autour du bâtiment A.

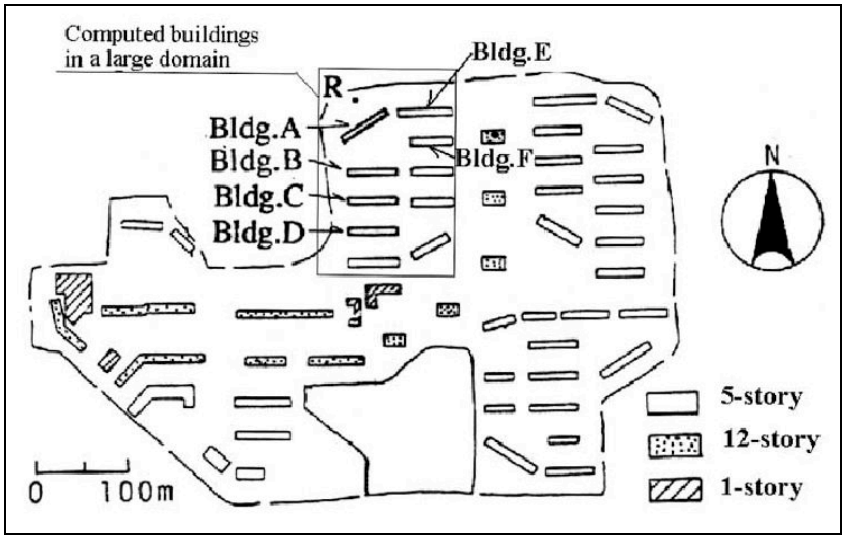


Figure 19 - Délimitation de la zone d'étude du groupe de bâtiments, d'après (Jiang et Chen 2002)

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

La modélisation LES retenue par Jiang et Chen (Jiang et Chen 2002) a montré, par une étude comparative, l'insuffisance de méthodes basées sur un écoulement moyen et donc l'importance des transferts turbulents. Cependant, les temps de calcul pour une telle approche

se sont révélés très importants, de l'ordre de trois mois, sans tenir compte des effets thermiques.

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

Ces modèles peuvent être utiles pour la modélisation des écoulements en milieu urbain, pour des rues de types canyon, et couplés avec la détermination de la dispersion de polluants (Tsai et Chen 2004), de l'étude de la ventilation naturelle (Chen 2004), ou des phénomènes de transfert thermoaérauliques (Tsai et Chen 2004).

Cependant, les simplifications du modèle de type *k-ε* peuvent entraîner de fortes imprécisions dans la prédiction des écoulements autour des bâtiments. Les modèles plus précis, comme les modèles LES, validés par des mesures précises en laboratoire peuvent alors être plus satisfaisants. Différentes approches CFD comparées par Stéphane Glockner pour un cas simple d'une marche descendante, comparatif représenté à la Figure 20 (Glockner *et coll.* 1999), démontrent la difficulté de prédiction de l'écoulement.

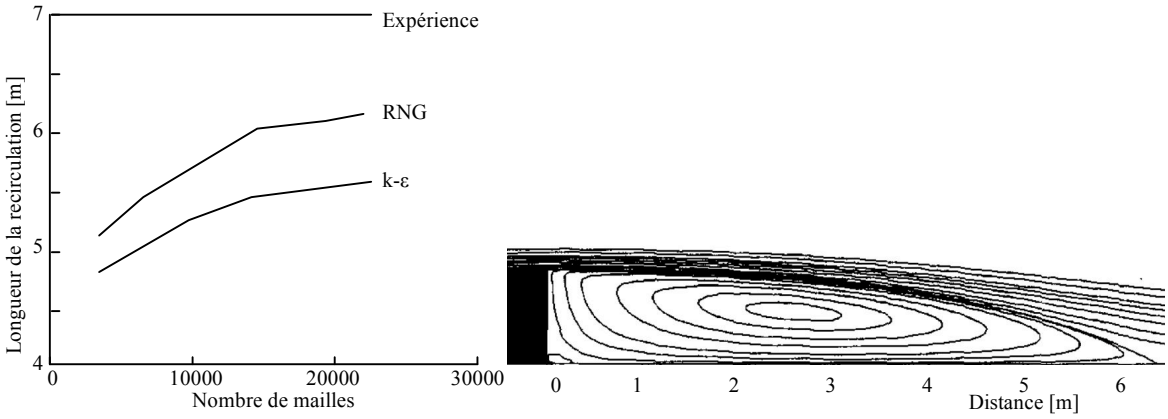


Figure 20- Longueur de la recirculation en fonction du nombre de mailles pour 3 modèles CFD, et représentation des lignes de courant, d'après (Glockner et coll. 1999).

En effet pour ce cas qui peut s'apparenter au cas d'un bâtiment exposé à un vent dominant, la forme de la recirculation est largement sous-évaluée, notamment avec le modèle *k-ε*. Le nombre de mailles apparaît aussi ici déterminant, et la précision n'augmente pas linéairement avec celui-ci, Figure 20.

Finalement, pour ces méthodes des compromis sont à faire entre le temps de calcul, la précision recherchée et le domaine de validité des modèles adoptés. Utilisés avec des maillages adaptés et des conditions aux limites correctement définies, cette famille d'outils CFD peut permettre de donner une bonne estimation d'un écoulement inconnu *a priori*, comme dans le cas d'un projet de construction ou d'urbanisme. Cependant, la nécessité d'un maillage suffisamment fin pour une prédiction réaliste entraîne des temps de calcul des mouvements aérauliques qui peuvent devenir prohibitifs, en particulier en raison des couplages thermoaérauliques parfois complexes. Ces temps de calcul nécessaires augmentent très fortement sur de longues périodes de simulation et pour des grands volumes. De plus, ces

modèles sont très sensibles aux conditions aux limites qui doivent donc être définies précisément, ce qui n'est pas toujours possible dans le cadre de l'étude des microclimats urbains où le milieu complexe des villes est souvent défini grossièrement.

2.2 Ensoleillement

Le soleil, corps chaud à une température de plus de 6000K, émet une énergie sous forme d'un rayonnement électromagnétique. En raison de la température élevée du soleil, les longueurs d'onde dans lesquelles le maximum d'énergie est émis comprennent le visible entre 0.4 à 0.75 microns et le proche Infrarouge (Figure 21-a et –b). Le rayonnement recouvre un spectre qui intéresse donc à la fois les problèmes lumineux (éclairement lumineux) et les problèmes énergétiques (rayonnement solaire).

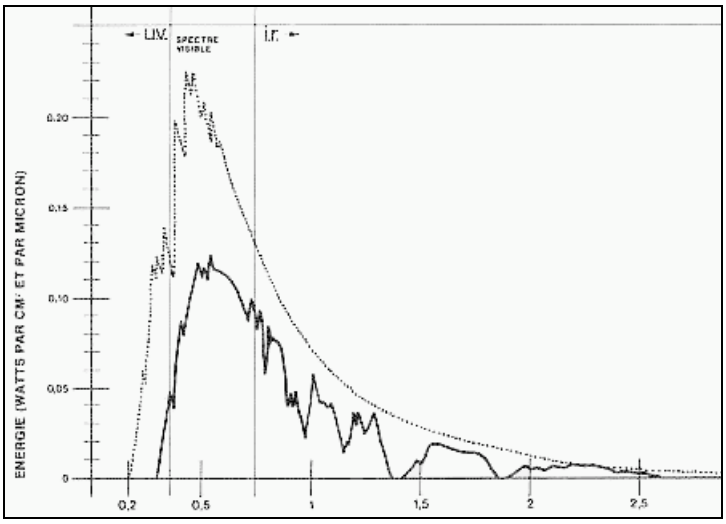
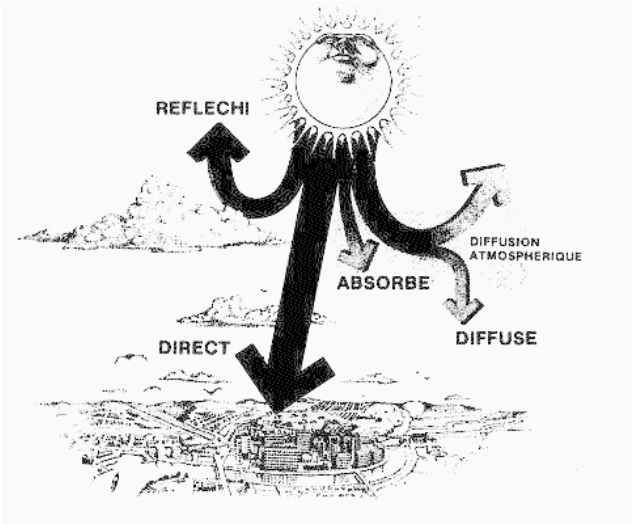


Figure 21-a La composition spectrale du rayonnement solaire (en pointillé, à la limite de l'atmosphère; en trait plein, à la surface de la terre) – (Mazria, 1981).



-b Ce que devient le rayonnement solaire intercepté par l'atmosphère terrestre – (Mazria, 1981)

Dans le bilan énergétique d'une surface extérieure, les échanges radiatifs représentent souvent la composante la plus importante en valeur absolue (Figure 22). Le flux radiatif net, R_n se décompose en trois composantes :

$$R_n = R_s\left(1-\alpha_s\right)+\varepsilon R_{ld} - R_{lu}$$

Avec R_s le rayonnement global de courte longueur d'onde,

α_s l'albédo de la surface

R_{ld} le rayonnement atmosphérique

ε_s l'émissivité de la surface

R_{lu} le flux radiatif de grande longueur d'onde émis pas la surface.

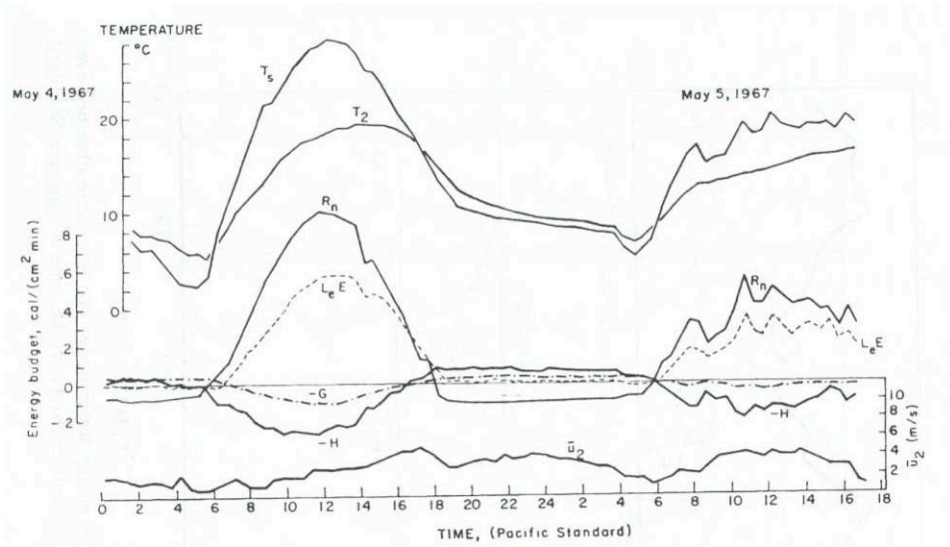


Figure 22- Exemple d'un bilan énergétique sur une journée rassemblant : température de surface, température, vitesse moyenne du vent à 2m pour une surface plantée (en Californie) (Brutsaert,1982)

Le rayonnement de courtes longueurs d'onde peut facilement être mesuré (Robinson, 1966), (Kondratyev, 1969), (Coulson, 1975) et des données sont déjà disponibles via la plupart des services météorologiques nationaux. Par ailleurs, ce flux peut être estimé en utilisant des modèles théoriques ou plus simplement une relation empirique à partir de données physiques telles que le rayonnement extra-terrestre, les propriétés optiques de l'air (Hanel *et coll.*, 1990), (Lukac, 1994), comme sa turbidité (Yamashita, 1974), (Karayel *et coll.*, 1984), (Navvab *et coll.*, 1984a), (Kittler, 1994), (Cucumo *et coll.*, 1999), Chaiwiwatworakul2004 *et coll.*), sa concentration en eau, les caractéristiques de la couverture nuageuse (Aida, 1975), (Aida, 1977), etc.

L'albédo d'une surface est le ratio entre le flux courtes longueurs d'onde global réfléchi et le flux incident correspondant. Il prend donc en compte les composantes diffuses de ces flux. En général, dans les calculs du bilan énergétique de surfaces, l'albédo réfère à une valeur intégrée sur l'ensemble des longueurs d'onde. Dans le cas d'une surface idéale rugueuse, l'albédo devrait être indépendant de la direction des rayons incidents. De la même manière que l'on définit l'albédo d'une surface homogène, comme nous le verrons dans ce qui suit, on peut définir et analyser l'albédo équivalent d'une surface urbaine à différentes échelles.

Pour la plupart des surfaces naturelles, la fraction du rayonnement réfléchi de manière spéculaire et diffuse dépend de la direction du rayon incident. C'est pourquoi, par des jours ensoleillés, l'albédo de la plupart des surfaces dépend de la hauteur du soleil, mais cette dépendance décroît avec la présence de nuages qui module la proportion de flux d'ensoleillement diffus et direct.

Le rayonnement de grandes longueurs d'onde est le flux résultant de l'émission des gaz atmosphériques et de la surface terrestre. Pour des raisons pratiques, on décompose ce flux en deux composantes : le rayonnement descendant (rayonnement de l'atmosphère vers les surfaces terrestres) et le rayonnement ascendant (rayonnement des surfaces terrestres vers l'atmosphère).

Il est à noter en outre que les surfaces urbaines restituent à l'air environnant par transfert convectif une partie de la chaleur issue du rayonnement.

2.2.1 ENSOLEILLEMENT ET PIEGEAGE RADIATIF A L'ECHELLE URBAINE

L'ensoleillement à l'échelle urbaine est abordé dans le cadre de problématiques liées à l'îlot de chaleur. Il s'agit alors d'exprimer les termes radiatifs du bilan énergétique, les températures de surfaces, ou l'albédo équivalent de la surface qui permet de caractériser son comportement radiatif. Selon les résultats attendus - flux du bilan énergétique, albédo équivalent, températures de surfaces - différentes approches sont mises en œuvre : mesures expérimentales ou modélisations physiques.

L'ensoleillement est également étudié dans le cadre de l'évaluation des potentiels énergétiques d'une ville. Dans ce cas, il s'agit d'évaluer les quantités d'énergies solaires arrivant sur les surfaces d'enveloppe des bâtiments.

L'ensoleillement doit aussi être pris en compte dans les problématiques liées au confort extérieur. La dimension humaine est alors ajoutée aux analyses géométriques et énergétiques.

Bilan énergétique

L'écriture du bilan énergétique à l'échelle urbaine consiste à équilibrer le flux radiatif net, R_n le flux sensible, le flux latent, le flux de conduction dans le sol et les parois et le flux anthropogénique. Ce bilan vise en général le calcul de la température de l'air pour l'évaluation de l'effet d'îlot de chaleur ou la comparaison des ordres de grandeur des différents flux mis en jeu afin d'établir les enseignements nécessaires à la mise en place de politiques de réduction du phénomène d'îlot de chaleur urbain. Compte tenu des ordres de grandeur des flux, le calcul des flux radiatifs est un enjeu important pour l'établissement du bilan énergétique.

Les premiers modèles (Terjung *et coll.*, 1974), (Arnfield, 1976) permettaient de simuler l'absorption des rayonnements de grandes et courtes longueurs d'onde par un tissu urbain et leur dissipation par convection, conduction, évaporation. Cette approche simplifiée et, entre autres, ne tenait pas compte des fluctuations de la température de l'air. Cependant les températures de surface obtenues dans des conditions climatiques calmes et sans nuage sont assez proches des résultats expérimentaux.

Les effets de stockages sont spécifiquement étudiés par l'approche proposée par (Grimmond *et coll.* 1991) qui formulent un modèle d'hystérésis (OMH, Objective Hysteresis Model) afin de prédire le flux de chaleur stocké par les surfaces urbaines. Ce modèle ne requiert comme entrées que la nature des sols, et le flux radiatif net (obtenus grâce au modèle proposé par (Arnfield, 1976)). Il est ensuite appliqué à l'échelle locale par (Arnfield,1998) par combinaison des équations empiriques pour des types de surfaces élémentaires en prenant en

compte leur proportion de présence dans la surface étudiée. L'utilisation d'OMH est également étendue à l'étude du stockage de chaleur dans des rues canyon. Les résultats obtenus sont sensibles aux variations du rapport d'aspect de la rue et aux propriétés thermiques des parois. L'influence de l'orientation de la rue et de la vitesse de l'air est moins significative. Ce modèle a été validé par (Grimmond *et coll.*, 1999) qui déterminent le flux de stockage thermique pour sept villes d'Amérique du Nord réparties dans un intervalle de latitude de 30°. Ces villes sont soumises à différents types de climats et sont différentes en termes d'occupation des sols et de morphologie. Dans tous les cas, le flux de stockage de chaleur est évalué comme le résidu de l'équilibre du flux radiatif net, du flux de chaleur sensible et du flux de chaleur latente observés. Les résultats indiquent que le stockage thermique est une composante importante du bilan de surface, pour tous les sites. Il est encore plus important dans les centres-villes et dans les sites industriels. L'effet d'hystérésis est présent dans toutes les observations, à divers degrés.

(Masson, 2000) propose un modèle de bilan urbain surface-atmosphère à méso-échelle (TEB) qui repose sur la généralisation de la géométrie de rue canyon, permettant d'affiner la formulation des flux radiatifs, sensibles et de conduction dans le sol. Cette approche tente d'être aussi générale que possible, afin de contenter tout type de configurations (tous types de villes, conditions météorologiques). Ainsi, le modèle considère trois types de surfaces, les toits, les routes et les murs. Les effets de l'orientation sont moyennés pour les routes et les murs. Des analyses de sensibilité ont été réalisées sur des périodes de simulation d'un an pour des climats océaniques et continentaux. Le schéma proposé permet de retrouver l'hystérésis journalière entre les flux turbulents et de conduction dans le sol.

L'approche de (Kanda *et coll.*, 2005a) mise en œuvre dans SUMM (Simple Urban Mesoscale Model) repose sur une représentation géométrique de la ville comme trame régulière et infinie de bâtiments identiques, composés de six faces (toit, sol et murs verticaux). SUMM considère explicitement les aspects tridimensionnels de la géométrie et prédit le bilan énergétique de chaque face.

Albédo équivalent

L'albédo d'une ville ou d'un quartier dépend de la forme du tissu urbain et de la nature des matériaux de revêtements utilisés. Afin d'étudier la contribution de la morphologie dans la diminution de l'albédo, deux approches complémentaires ont été menées : des mesures sur site ou sur des maquettes et la mise en place de modèles. Pour les mesures sur des maquettes et les approches modélisatrices, seules des géométries simples (trames régulières formées de bâtiments de section carrée ou rues canyons) ont été étudiées.

Ainsi, (Aida, 1982a) a mis en place des études expérimentales sur des maquettes en béton à échelle réduite pour mesurer l'effet des irrégularités des surfaces urbaines sur l'absorption du rayonnement solaire. Il étudie trois familles de formes urbaines simplifiées : une surface plane, des rues canyon longues de direction Est-Ouest et Sud-Nord et une trame régulière d'îlots cubiques (construite à partir de blocs cubiques de côtés 0,15 m, dimension également des intervalles). Associée à ces expérimentations, (Aida *et coll.*, 1982) proposent une approche de modélisation bidimensionnelle du rayonnement dans les rues canyon Sud-Nord, basée sur la méthode de Monte-Carlo qui leur permet de tester différentes fonctions pour les coefficients de réflexion et différentes proportions des flux diffus/direct ainsi que l'influence des dimensions (hauteur et largeur des bâtiment, largeur des rues). Cette approche de modélisation des rues canyon a également été entreprise par (Arnfield, 1976), (Arnfield, 1982), (Arnfield, 1988). (Kondo *et coll.*, 2001) proposent un modèle (ACM, Albedo Calculation Model) prenant en charge les trames régulières de bâtiments de différentes

hauteurs. (Pawlak *et coll.*, 2003) ont mis en place une expérimentation similaire à celle menée par Aida (maquette à échelle réduite de briquette rouge, rues canyon de hauteur 12cm et de rapport d'aspect 1 et 2, d'orientation Est-Ouest et Nord-Sud), associée à un modèle radiatif cette fois tridimensionnel appliquant la méthode de Monte-Carlo. (Chimklay *et coll.*, 2004) ont ré-exploité le modèle proposé par Kondo et réalisé plusieurs milliers de simulations à l'aide du logiciel issu de ce travail afin d'évaluer la contribution de la nature des revêtements des surfaces utilisés pour les sols, les façades et les toitures.

Les principaux résultats dégagés à partir des ces études expérimentales et modélisations sont :

- L'albédo diminue quand les irrégularités augmentent, cette diminution est plus fortement marquée en hiver (Aida, 1982a) (Aida *et coll.*, 1982) (Kondo *et coll.*, 2001), (Pawlak *et coll.*, 2003). L'hétérogénéité des hauteurs fait également diminuer l'albédo (Kondo *et coll.*, 2001);
- L'albédo augmente avec l'angle solaire zénithal (Aida, 1982a), (Kondo *et coll.*, 2001), (Pawlak *et coll.*, 2003);
- Il y a une variation saisonnière de l'albédo moyen calculé sur une journée (Aida, 1982a).
- Ce sont les caractéristiques de réflexion des toits qui ont le plus d'influence sur l'albédo équivalent de la surface urbaine. Quand la hauteur des bâtiments diminue, les caractéristiques de réflexion du sol et des murs reprennent de l'importance.

Typiquement, les albédos équivalents de surfaces urbaines sont compris entre 0,10 et 0,20 mais dans certaines villes, ces valeurs peuvent être dépassées (Taha, 1997). Les villes nord africaines en sont de bons exemples (albédos de 0.30 à 0.45) tandis que la plupart des villes des USA et européennes ont des albédos faibles (0.15 à 0.20). Taha constate des albédos plus faibles en périphérie des villes qu'il explique en partie par une végétation plus présente qu'en centre urbain dense. Le Tableau 2 liste les valeurs répertoriées par Taha pour différentes villes.

Tableau 2– Valeurs d'albédo équivalent (Taha, 1997)

Site	Albédo
Los Angeles (centre ville)	0.20
Madison, WI (urbain)	0.15-0.18
St. Louis, MI (urbain)	0.12-0.14
St. Louis, Ml (centre)	0.19-0.16
Hartford, CT (urbain)	0.09-0.14
Adelaïde, AUS (commercial)	0.27 (moyenne)
Hamilton, Ontario	0.12-0.13
Munich, Allemagne	0.16 (moyenne)
Vancouver, BC	0.13-0.15
Tokyo	0.10 (moyenne)
Ibadan, Nigeria	0.12 (moyenne)
Lagos, Nigeria	0.45

Température de surface

La connaissance de la température de surface est une clé de l'étude de la climatologie urbaine. En effet, elle module la température de l'air dans les couches basses de l'atmosphère urbaine. Elle est au centre de l'équation de bilan de surface et est nécessaire à la détermination des conditions thermiques à l'intérieur des bâtiments.

Les progrès de la télédétection ont rendu possible l'étude des îlots de chaleur par des mesures à partir de satellites ou d'avions. Les premières observations thermiques des surfaces urbaines (à partir de satellites) ont été conduites par (Rao, 1972). Depuis, un grand nombre de complexes de capteurs (portés par des satellites, avions ou au sol) ont été utilisés pour réaliser des observations à distance de la température des surfaces urbaines. L'objectif de ces études expérimentales est en général l'analyse de la distribution spatiale des températures des surfaces et leur relation aux caractéristiques physiques des surfaces. (Voogt *et coll.*, 2003) en font une synthèse bibliographique.

Les études basées sur les mesures satellitaires utilisent l'imagerie thermique AVHRR ou Landsat combinée avec une description de l'occupation des sols pour analyser la distribution spatiale de la température de brillance directionnelle[6] ou radiométrique (Balling *et coll.*,

[6] Le terme de température de brillance directionnelle est utilisé pour la température obtenue à partir de l'inversion de la loi de Planck pour un capteur thermique dans une bande de longueur d'onde.

1988), (Carnahan *et coll.*, 199), (Lougeay, *et coll.*, 1996). L'imagerie de haute résolution spatiale est utilisée pour déterminer le comportement thermique de surfaces urbaines en fonction de caractéristiques de ces surfaces telles que le facteur de vue du ciel, la densité bâtie ou l'occupation des sols (Dousset, 1992), (Eliasson, 1990-1991), (Nichol, 1996), (Long, 2003).

(Dousset, 1992) utilise ces techniques pour analyser le bassin de Los Angeles pour les mois d'Août 1984 et 1985. L'objectif est de quantifier la différence entre les températures de brillance dérivées des images satellites et les mesures de températures d'air faites in situ et d'étudier les microclimats urbains par analyse statistique des données de la couverture nuageuses, des températures de surface, et des informations relatives à l'occupation des sols.

(Long, 2003) développe une méthodologie pour caractériser des quartiers de Marseille (campagne de mesure ESCOMPTE 2001). La base de données de l'IGN BDTopo et un SIG qui décrit la morphologie des bâtiments et les modes d'occupation du sol sont utilisés dans cette étude pour décrire le tissu urbain marseillais. Plusieurs classifications de Marseille ont été réalisées découpant la zone d'étude en 8 types de quartiers urbains et en zones naturelles (végétation, eau). Les applications ont permis d'étudier les relations entre des caractéristiques des quartiers et des paramètres météorologiques. Par l'analyse de mesures de température de brillance, réalisées par une caméra infrarouge thermique embarquée, l'auteur montre que chaque type de quartier est caractérisé par une température de brillance moyenne et un écart-type révélant l'hétérogénéité et la combinaison des surfaces caractéristiques de ce quartier.

A une échelle d'analyse plus micro, (Chudnovsky *et coll.*, 2004) analysent 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.

Les mesures de température de surface dans l'infrarouge thermique dans le cas de surfaces rugueuses, comme les surfaces urbaines ont à surmonter plusieurs difficultés : l'anisotropie angulaire et les effets de « hot spot ». Ceux-ci dépendent de la structure de la surface (effet d'ombrage), de la distribution spatiale des facettes qui sont vues par le capteur ainsi que de la position du soleil. (Lagouarde *et coll.*, 2004) proposent un protocole de mesures aéroportées permettant de réduire ces effets. Le dispositif expérimental est basé sur l'utilisation d'une caméra IRT équipée d'un objectif grand angulaire et embarquée sur un petit avion. Le protocole permet de caractériser les effets angulaires pour des angles zénithaux de visée jusqu'à 60°, et pour toutes les directions azimutales. Pendant l'été 2001, dans le cadre du projet UBL-ESCOMPTE, cette méthode a été appliquée à deux quartiers de Marseille, le centre ville (dense) et un quartier périphérique composé de maisons individuelles et de végétation. Les résultats des mesures montrent l'importance des effets de « hot spot » et des différences de température de brillance des surfaces variant de -5 à 7 Kelvin entre les mesures verticales et obliques, en fonction des angles azimutaux de vue. Ces acquisitions permettent également d'illustrer l'impact de la structure de la surface et de la présence de végétation sur le phénomène de « hot spot ».

Une autre approche permettant d'obtenir les variations spatiales des températures de surfaces consiste à modéliser géométriquement les villes et à appliquer l'équation de bilan à chaque

élément de surface. Il s'agit alors, pour ces éléments de surface de calculer les flux radiatifs en prenant en compte les masques et les inter-réflexions.

Parallèlement aux travaux de Lagouarde, (Groleau *et coll.*, 2003) ont appliqué le modèle SOLENE au calcul des températures de surfaces d'un des quartiers étudiés. Basé sur une modélisation 3D des volumes bâtis, ce modèle intègre plusieurs modules de calcul qui permettent de prendre en compte les effets solaires, thermiques et lumineux de la forme urbaine sur les conditions de confort extérieures. Dans l'application de Marseille, des modules de SOLENE ont été utilisés pour comprendre le comportement thermique d'une forme urbaine soumise à des conditions climatiques données. Pour cela, les variations des températures des surfaces composant l'enveloppe des bâtiments ont été calculées, au cours du temps. L'algorithme de calcul de ces températures est basé sur le bilan thermique de nœuds de murs du modèle géométrique composé des faces polygonales planes qui composent la surface urbaine (toits, façades, cours, rues) auxquelles est appliqué un maillage triangulaire. Le modèle thermique est un modèle dynamique prenant en compte des données météorologiques variables (air extérieur, données solaires) et l'effet d'inertie des parois. Les modèles géométrique et thermique sont associés : à chaque facette du maillage correspond une définition spatiale, des propriétés physiques (albédo, émissivité...) et un modèle de paroi (différences finies). Les parois peuvent être composées d'une ou de deux couches.

La simulation thermo-radiative comporte 3 étapes :

- Les procédures géométriques permettant de calculer les facteurs de forme entre les éléments du maillage et les facteurs de vue du ciel ;
- Le calcul de flux solaires (visible et proche infra-rouge) reçus par chaque facette : composante directe, contribution du ciel (calculée avec un modèle de ciel réaliste, non isotropique en fonction du type de ciel et de la position du soleil à l'instant considéré) ;
- Le calcul des températures de surfaces pour lequel le terme de flux global reçu par chaque facette est utilisé. Cette étape est réalisée pour la période choisie en utilisant un pas de temps petit de manière à capter les variations locales de l'ensoleillement et de l'inertie. A chaque pas de temps, le flux radiatif net est évalué, prenant en compte par la méthode des radiosités les inter-réflexions entre les surfaces. Un calcul itératif permet de déterminer les températures des parois par l'application du bilan entre les flux convectif (calculé à l'aide d'un coefficient de convection attribué à chaque facette), radiatif et conductif au niveau des facettes.

Pour chaque pas de temps, les sorties sont : le flux solaire net, le flux convectif, le flux infra-rouge et les températures sur et dans les parois.

SOLENE a été appliqué sur une maquette numérique d'un quartier de centre ville de Marseille. Pour les quatre types de surfaces considérées : toits de tuiles, façades de briques enduites de ciment, cours intérieures en sol naturel et rue couvertes d'asphalte, des valeurs d'albédo (respectivement 23, 25, 15 et 8%), d'émissivité, de coefficient de convection (10 W/m2K) et les caractéristiques des parois ont été définies La végétation, rare dans ce quartier a été négligée. Les données météorologiques sont issues des mesures faites pendant la campagne Escompte 2001. Les calculs ont été menés pour trois journées ensoleillées consécutives (24 au 26 juin), pour lesquelles le taux d'humidité et la vitesse du vent étaient faibles. Une simulation sur 3 jours permet d'éliminer l'effet de l'initialisation et d'obtenir un état thermique de la structure réaliste. Les résultats ont été analysés pour la troisième journée. Le flux solaire global sur un plan horizontal atteint 900 W/m2 à midi, le flux atmosphérique est à peu près constant à 320 W/m2 et la température de l'air varie de 20 à 30°C. Dans les

bâtiments ainsi qu'à un mètre sous les surfaces de sol, les températures sont imposées à 25°C. Le pas de temps utilisé est de 15 minutes.

L'intégration des flux reçus et des flux absorbés par chaque facette permet de calculer l'albédo effectif de l'îlot qui a été obtenu presque constant, de valeur moyenne comprise entre 14 et 15%, avec des valeurs plus faibles autour de midi et plus grandes en tout début et fin de journée (24%). Elles sont comparables à celles mesurées par les capteurs qui sont légèrement supérieures (16% à 17%). Les valeurs d'albédo des toits et des façades étant très proches, il est difficile de distinguer un rôle spécifique de ces surfaces dans le phénomène de piégeage radiatif. Le flux sensible calculé est proche des valeurs mesurées et atteint 350 W/m2 vers midi, avec des valeurs très faibles la nuit, légèrement négatives. Les auteurs observent un cycle diurne de stockage de chaleur, avec des valeurs maximales relativement faibles (165 W/m2). Les valeurs de flux grandes longueurs d'onde calculées étaient similaires à celles mesurées, mais un peu supérieures.

Le choix des valeurs d'albédo pour les différentes surfaces est très important car pour des journées ensoleillées, elles ont une influence forte sur les valeurs des flux radiatifs réfléchis et absorbés par les murs et les toits, et de ce fait, sur les températures de surface. Les albédos choisis pour la simulation sont certainement un peu faibles. Ceci expliquerait les valeurs plus faibles ou plus grandes obtenues par le modèle pour les réflexions solaires et les échanges IR avec le ciel. D'où la nécessité d'attribuer un albédo approprié aux surfaces de la scène.

Dans le cadre d'ESCOMPTE, d'autres applications de SOLENE ont permis d'étudier les aspects directionnels des températures radiantes, comparés aux mesures de (Lagouarde *et coll.*, 2004).

La connaissance des températures des surfaces permet ensuite d'accéder aux différents flux, et notamment, le flux sensible (Voogt *et coll.*, 2000). Elle permet également de procéder à l'analyse thermique des bâtiments.

Les matériaux

Nous l'avons vu, les matériaux jouent un rôle important dans le comportement radiatif d'un tissu urbain. Une ville est un assemblage de matériaux de nature différente et éventuellement changeante (végétation). 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.

(Berdahl *et coll.*, 1997) s'emploient à 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.

93 matériaux utilisés pour les sols ont été étudiés par (Doulos *et coll.*, 2004) qui les ont exposés à l'ensoleillement et dont ils ont mesuré la température par thermographie infrarouge. Ils se sont intéressés plus particulièrement à la couleur, la rugosité et les dimensions des matériaux. Leurs conclusions sont basées sur la comparaison des différences entre la

température de surface du matériau et l'air. Pour les matériaux clairs, ils relèvent un écart maximal de 6.9°C tandis que pour les matériaux foncés cet écart varie entre 10.2 et 15.5°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 auteurs notent également que sur les matériaux hétérogènes, la distribution de la température n'est pas uniforme du fait de l'hétérogénéité de la couleur et de la rugosité. En conclusion, ils conseillent l'utilisation de matériaux de construction tels que le marbre, la mosaïque et la pierre qui atteignent des températures de surfaces moindres et de ce fait, participent moins à l'effet d'îlot de chaleur.

(Prado *et coll.*, 2005) ont réalisé des mesures d'albédo de matériaux utilisés pour les toits des bâtiments au Brésil, 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 (sans amiante), l'aluminium nu ou laqué, l'acier inoxydable nu ou laqué, l'aluminium et zinc nu ou laqué, 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. Ils produisent par ailleurs un tableau synthétisant les albédos et températures pour un grand nombre de matériaux et couleurs de revêtement.

(Synnefa *et coll.*, 2005) ont procédé à l'étude comparative de l'effet de 14 types de revêtements réflectifs et soulignent 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 réflectifs 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.

Il est cependant difficile d'utiliser directement des valeurs données dans des tables. En effet, en étudiant la variation de la réflectivité solaire des bétons (Levinson *et coll.*, 2002) ont montré que leur composition, leur vieillissement et leur exposition climatique modifient significativement leur albédo. Les albédos des bétons lisses étudiés variaient entre 0.41 et 0.77. Ceux des bétons blancs lisses les plus réflectifs 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 (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 (pluie) diminue les albédos d'environ 0.23.

Cependant, le vieillissement des matériaux à fort pouvoir réfléchissant ne doit pas constituer une barrière à leur utilisation (Bretz *et coll.*, 1997). 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 poussière et de débris à proximité. Les mesures réalisées par (Bretz *et coll.*, 1997) sur des toits leur permettent d'estimer une diminution moyenne de l'albédo de 0.15 la première année et plus faible les années suivantes. 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. Dans cet esprit, (Levinson *et coll.*, 2005b) étudient les effets du vieillissement et du nettoyage de membranes de couleurs claires utilisées pour les toits.

Les techniques nécessaires à la connaissance 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. Le comportement du matériau vis-à-vis de la rétention de l'eau peut également être examiné comme le fait (Tanaka *et coll.*, 2004) 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.

2.2.2 L'ENVIRONNEMENT PROCHE DU BATIMENT

Les flux radiatifs de courtes longueurs d'onde induisent des apports énergétiques significatifs dans les bâtiments et de ce fait influencent fortement l'ambiance intérieure. Ces apports proviennent de l'ensoleillement direct ou sont dus aux réflexions issues de l'environnement. Pour les évaluer, 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 calculer la participation des inter-réflexions, il faut au préalable faire une analyse d'intervisibilité entre l'ensemble des surfaces de la scène urbaine (calcul de facteurs de forme).

Ces apports énergétiques sont ensuite soit transmis aux surfaces internes du bâtiment à travers les composantes transparentes de l'enveloppe ou par le biais des transferts conductifs par les parois opaques. Dans le premier cas, la forme interne du bâtiment (partitionnement, profondeur des pièces...) détermine les surfaces réceptrices des flux.

Une part des flux d'ensoleillement (spectre visible) participe à la qualité lumineuse des ambiances intérieures. Interviennent uniquement les flux transmis par les parties transparentes de l'enveloppe. Les inter-réflexions jouent un rôle très important dans la répartition des flux lumineux dans les espaces intérieurs d'où l'importance de la forme des pièces et la nature des matériaux de surface.

Le traitement de ces flux est d'autant plus délicat qu'alors que l'on veut minimiser les apports solaires en été, afin de limiter les surchauffes des espaces intérieurs, on cherche par ailleurs, dans les climats tempérés, à en profiter en période hivernale pour réduire les consommations énergétiques de chauffage. En outre, on recherche également à bénéficier d'un éclairage naturel suffisant et bien réparti dans les espaces intérieurs de manière à limiter le recours à l'éclairage artificiel. Ce challenge est relevé au prix d'une conception soigneuse des bâtiments, tant du point de leur positionnement relatif dans la forme urbaine que des différents dispositifs qui peuvent moduler en fonction des saisons la pénétration des flux de courtes longueurs d'onde par les surfaces transparentes.

Concernant les flux de grandes longueurs d'onde et de courtes longueurs d'onde qui atteignent des éléments opaques de l'enveloppe dont ils participent au réchauffement, ceux-ci sont en partie transmis à l'ambiance intérieure par conduction à travers les parois. Les stratégies de conception au niveau de l'environnement visent à éviter un échauffement trop important de l'enveloppe en la protégeant par des masques ou en lui attribuant des valeurs de réflectivité et d'émissivité telles qu'elle s'échauffe le moins possible sous l'effet du soleil pendant la journée et restitue un maximum de chaleur par rayonnement de grandes longueurs d'onde avec le ciel pendant la nuit. Une bonne isolation thermique permet également de limiter la transmission de ces apports vers les ambiances intérieures.

Les recherches concernant l'environnement proche des bâtiments ont en grande partie traité l'analyse des phénomènes physiques d'ambiance dans des typologies urbaines de géométrie

simple : rues canyon et formes tramées qui permettent de simplifier les calculs géométriques (prise en compte des symétries, calcul rapide des facteurs de forme analyse 2D…). Les études appliquées à des formes quelconques mettent en œuvre des modélisations complexes qui doivent intégrer des méthodes de calcul géométrique généralistes et robustes.

Rues canyon

La « rue canyon », pour sa simplicité et sa représentativité dans les tissus urbains tant modernes qu'ancien à été l'objet d'un grand nombre de développements de modèles, d'études et de recommandations.

Les premiers modèles radiatifs (Terjung et al, 1973), (Arnfield, 1976), (Arnfield, 1982), (Aida, 1982a) (Sievers *et coll.*, 1985), associés à des études expérimentales sur des maquettes (Aida *et coll.*, 1982) (Voogt1989) s'appliquaient aux rues canyons qui permettaient des études bidimensionnelles. Par la suite, cette forme urbaine a continué à représenter un objet privilégié d'expérimentation et de modélisation. Ces études s'intéressent au rayonnement de courtes (Aida *et coll.*,1982) (Aida, 1982a) (Sievers *et coll.*, 1985) et grandes longueurs d'onde (Arnfield, 1976) (Arnfield, 1982) (Voogt, 1989) et à l'influence du rapport d'aspect et de l'orientation des rues sur le comportement radiatif de la forme urbaine.

Le modèle CTTC (Cluster Thermal Time Constant) est une méthode de prédiction, sous des conditions climatiques de vent faible et de ciel clair, des variations de la température de l'air dans les rues canyons (Swaid *et coll.*, 1990) dont les hauteurs des bâtiments de part et d'autre de la rue peuvent être différentes et pour des orientations au choix. La température de l'air est calculée à partir de deux contributions correspondant aux rayonnements de courtes et de grandes longueurs d'onde. La première est la somme pondérée des flux de courtes longueurs d'onde des instants précédents, pondération qui inclut le pourcentage d'ombrage du canyon à l'instant antérieur considéré et un terme exponentiel du laps de temps passé depuis cet instant, rapporté à la constante de temps de la surface. Ce calcul est basé sur des paramètres de constantes de temps attribués aux surfaces de sols et de murs, fonctions des matériaux utilisés. La contribution du rayonnement de grandes longueurs d'onde utilise la loi de Stefan-Boltzmann et le paramètre de facteur de vue du ciel (SVF). Ce modèle a été amélioré par (Elnahas *et coll.*, 1997) notamment par l'intégration des rayonnements de courtes longueurs d'onde diffus et réfléchis, la prise en compte de la couverture nuageuse pour le calcul du flux de grandes longueurs d'onde.

De nombreuses études s'intéressent au bilan énergétique de ces rues (Todhunter *et coll.*, 1990), Sakakibara, 1996), (Elnahas *et coll.* 1997), (Herbert, 1998), etc.

(Sakakibara, 1996) étudie l'effet de la géométrie de canyons urbains sur l'environnement thermique en comparant des simulations réalisées pour une surface plane (modèle de parking) et pour une rue canyon. Le modèle de rue canyon se compose de 2 bâtiments de part et d'autre de la rue, représentés par leur enveloppe (pas de fenêtres et pas de charges internes) et une rue infiniment longue orientée Est-Ouest. Les transferts latents sont supposés nuls. Le bilan thermique est réalisé à la surface (imaginaire) supérieure de la rue. Comme attendu, le canyon absorbe plus de chaleur dans la journée et en restitue plus pendant la nuit que le parking. Les variables thermiques dépendent de la géométrie de la rue. Plus H/W est grand, plus le phénomène de stockage de chaleur est marqué. L'auteur obtient par exemple entre un canyon H/W=2.04 et un canyon H/W=0,71 une différence de quantité de chaleur restituée de $50Wm^{-2}$.

Par l'application du modèle OMH à l'étude d'une rue canyon, (Arnfield *et coll.*, 1998) concluent que plus le rapport d'aspect est grand, plus le phénomène d'hystérésis est important. Ce phénomène est absent pour H/W=0.5. L'orientation de la rue joue un rôle moins significatif.

Ces modèles rendent bien compte de tendances, cependant pour des calculs précis, une prise en compte complète et rigoureuse des termes radiatifs dans les bilans est nécessaire. A cet effet, (Harman *et coll.* 2004) présentent, dans le cas des rues canyon, une méthode permettant un calcul exact de l'ensemble des flux radiatifs. Les résultats sont comparés à deux approximations communément utilisées et qui ne prennent en compte qu'une (Masson, 2000), voire pas de réflexion (Sakakibara, 1996). Les résultats montrent des différences significatives si l'albédo des surfaces est supérieur à 0,2 (brique ≈ 0.2–0.4) ou si l'émissivité est inférieure à 0.8 (béton, ≈ 0.7–0.9). La nécessité d'une approche complète s'avère d'autant plus nécessaire que le rapport d'aspect du canyon est grand. Par exemple, pour les flux radiatifs de grandes longueurs d'onde, l'erreur relative induite par la non prise en compte des réflexions est trouvée égale à 20% dans le cas d'un canyon H/W = 1. Par ailleurs, les auteurs notent qu'une incertitude sur la valeur de l'émissivité conduit à une erreur de 10–30%.

(Tsangrassoulis *et coll.*, 2003) proposent, pour le calcul de l'albédo de rues canyons, d'affiner la prise en compte des propriétés optiques des matériaux dans le cas de façades vitrées. Un outil simple permet d'obtenir cet albédo en fonction de la géométrie de la rue et du pourcentage de vitrage des façades.

Ces études qui s'intéressent particulièrement aux rues canyons ont permis de paramétrer les flux utilisés dans les modèles de bilan à l'échelle de la ville en fonction des caractéristiques géométriques des rues qui composent le tissu urbain (Masson, 2000). Avec l'utilisation de la dynamique des fluides numérique, de nouvelles recherches tentent d'expliciter le couplage des phénomènes radiatifs, thermiques et aérauliques (Herbert, 1998) (Papadopoulos, 2001), (Kovar-Panskus *et coll.*, 2002), (Bozonnet, 2005). Ces approches mettent en oeuvre le couplage de plusieurs modèles (modèle de circulation de l'air, modèle radiatif, modèle de bilan énergétique) avec pour le modèle radiatif et la dynamique des fluides différents niveaux d'approximation dans l'appréhension des phénomènes.

Afin d'évaluer l'impact de l'émission de chaleur des groupes de climatisation dans les rues sur la consommation énergétique des bâtiments, (Papadopoulos, 2001) propose une approche numérique basée sur une modélisation fine de l'écoulement de l'air et du transport et de la diffusion de la chaleur dans les rues (CFD). Cette approche est basée sur l'utilisation couplée de deux outils : SUNCODE PC et CFX-TASCFlow. SUNCODE PC permet le bilan thermique d'un bâtiment et le calcul de ses températures de surface en prenant en compte les aspects radiatifs. Ces températures sont alors utilisées dans CFX-TASCFlow qui permet l'analyse des écoulements d'air dans la rue à l'aide d'un modèle k-ε. (Sanchez, 2004) couple un modèle zonal pour les écoulements et les relations proposées par (Elnahas *et coll.*, 1997) pour le calcul des flux CLO. La modélisation du rayonnement intégrée par (Bozonnet, 2005) dans le canyon utilise une méthode simplifiée de calcul des inter-réflexions, appelée «méthode des enceintes fictives» adaptée pour une utilisation dans un environnement ouvert. Elle a été choisie afin de conserver un niveau de précision et des temps de calcul cohérents avec l'approche des modèles zonaux retenue pour les écoulements d'air. Les résultats de cette méthode simplifiée ont été confrontés à ceux obtenus par la méthode précise des radiosités et se sont révélés suffisamment précis par rapport à l'énergie globale absorbée par les parois du canyon, bien que les variations de l'effet du confinement observé par le calcul précis ne soient pas précisément décrites sur chaque façade.

Ces études plus détaillées du contexte de la rue canyon intéressent en général deux objectifs : Une meilleure connaissance des transferts dans les rues afin de mieux renseigner les modèles de bilan énergétique à l'échelle urbaine et l'accès à la connaissance des flux radiatifs à attribuer aux bâtiments de la rue.

Les outils et méthodes décrits précédemment (ainsi qu'un grand nombre d'autres contributions) ont été mis à profit pour tirer des enseignements sur les phénomènes physiques en lien avec la composition des rues (géométrie, matériaux) ou des règles d'aide à la conception.

Ainsi, (Bourbia *et coll.*, 2004a), pour mettre en évidence les interactions entre la géométrie de la rue canyon et les flux solaires incidents réalisent des simulations pour une année entière, dans le cas de latitudes 26–32°N, à l'aide du logiciel Shadowpack développé par (Beckham, 1980). Les paramètres auwquels ils s'intéressent sont la hauteur des bâtiments, la largeur et l'orientation de la rue. (Eliasson, 1996) étudie sur une période de 3 ans la distribution de la température nocturne dans des rues de Göteborg, en Suède, en relation avec les différences de géométrie des rues et d'occupation des sols. La température de l'air mesurée dans des rues canyon est comparée à celle mesurée dans un espace ouvert proche. Des relevés de températures sont également réalisés sur les parois ainsi que dans des sections de certaines rues. L'auteur aboutit à une mise en relation de la température de surface et du SVF.

Formes tramées

Après les rues canyon, les formes tramées sont les géométries les plus abordées, bien qu'elles ne soient représentatives que de tissus urbains bien particuliers : les bastides, les villes nouvelles américaines, les villes coloniales (Figure 23), etc. Cette forme urbaine particulière est surtout utilisée pour analyser sur un cas simple l'effet de groupement de bâtiment.

Figure 23- Photo aérienne de la zone nord du centre historique et littoral de Cayenne (Bonneaud, 2004)

Afin d'étudier l'effet de groupement de bâtiments sur le contrôle des consommations pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments (Mills *et coll.*,1993) étudient un bâtiment placé au centre d'une trame régulière de neuf bâtiments isolés. Pour ce bâtiment, ils proposent d'évaluer le flux solaire directement intercepté pendant la journée (grandeur représentative de la capacité à profiter des apports solaires) et le facteur de vue du ciel (capacité à échanger avec le ciel la nuit de manière à diminuer la température de l'enveloppe). Il s'agit d'un calcul analytique qui ne prend en compte que les flux de courtes longueurs d'onde directs. Les paramètres morphologiques étudiés sont : la hauteur, la profondeur et la longueur des bâtiments, les largeurs des rues dans les 2 directions (en fait égales). La situation géographique et la date (géométrie solaire) sont variables. L'orientation de la trame est fixée.

De ces calculs, les auteurs produisent des courbes d'ensoleillement et les SVF pour différents H*Lbâtiments et H/Wrues, ainsi que des recommandations en fonction des latitudes.

(Ratti *et coll.*, 2003) mettent en oeuvre le calcul des SVF, des surfaces d'enveloppe rapportées aux volumes bâtis sur des formes urbaines tramées pavillonnaires et îlots avec cours. Les différentes typologies sont ensuite comparées au regard de ces indicateurs morphologiques qui sont reliés à des qualités environnementales attendues.

(Okeil, 2004) recherche une forme d'îlot urbain (Residential Solar Block) qui maximise les apports solaires en hiver et les minimise en été, à partir d'une forme urbaine tramée.

2.2.3 TRANSFERTS AU NIVEAU DE L'ENVELOPPE DU BATIMENT

La connaissance du climat à l'échelle urbaine est une donnée d'entrée pour aborder l'étude du microclimat, condition environnementale qui influence directement les ambiances à l'intérieur des bâtiments. L'enveloppe du bâtiment joue alors un rôle de filtre vis-à-vis des différents flux et suivant l'orientation du bâtiment, sa localisation géographique, la saison, le rôle de chacun de ses composants va prendre plus ou moins d'importance. La principale difficulté que l'on rencontre alors est que l'incidence sur la consommation énergétique des bâtiments de dispositions de contrôle solaire dépend du comportement thermique global du bâtiment.

Les toitures

L'utilisation de matériaux de toiture de 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'îlot de chaleur et ainsi à une température d'air extérieure moindre à laquelle est soumis le bâtiment (convection, ventilation).

(Simpson *et coll.*, 1997) et (Abkari *et coll.*, 2003) relatent un grand nombre d'études expérimentales et numériques américaines qui ont montré l'efficacité de l'utilisation de matériaux réflectifs pour les toitures. Ces études portent sur des bâtiments de type commercial 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%.

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'îlot de chaleur par utilisation de toitures de fort albédo.

(Abkari *et coll.*,2003) notent que dans le cas de bâtiments soumis à des apports internes importants, le bénéfice relatif des toits réflectifs et d'une forte isolation des parois n'est pas évident. Ces bâtiments ayant recours au conditionnement d'air un très grand nombre de jours par an, l'isolation réduit ce recours 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 et de ce fait a un impact négatif sur la consommation d'énergie. Cet effet est moins prononcé pour des toits sombres. (Akbari *et coll.*, 2005a) proposent des tableaux (classés par degré-jours de rafraîchissement ou de chauffage) pour estimer le potentiel de réduction de l'îlot de chaleur urbain offert par différentes stratégies visant à réduire l'énergie nécessaire au rafraîchissement des bâtiments (toits à forte réflectivité solaire, ombrage par des arbres, revêtements de sol réflectifs, végétation urbaine). Ces tableaux fournissent des estimations des économies induites directement (traitement de l'enveloppe) et indirectement (réduction de l'îlot de chaleur urbain). 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 simulée 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 coll.*, 2005), (Abkari *et coll.*, 2003) qui viennent corroborer les résultats.

Toutes ces études montrent l'efficacité des mesures visant à réduire les apports radiatifs sur les surfaces des bâtiments, à la fois sur l'intensité de l'îlot de chaleur, mais aussi sur les consommations d'énergie nécessaire au rafraîchissement des bâtiments. Essentiellement réalisées dans des conditions contextuelles nord américaines, (il existe un site spécifique http://www.roof.org recensant les études et la liste de matériaux avec leurs caractéristiques techniques actuellement disponibles sur le marché nord américain) elles nécessitent cependant d'être adaptées pour une utilisation dans d'autres contextes : bâtiments différents de par leur type constructif, usage, villes de structure différente, climats différents…

(Garde *et coll.*, 2001) ont mené une étude sur les différents paramètres influençant le confort des habitations en climat tropical humide. Partant du constat que la montée de la température intérieure des logements dans ces climats est produite à 80% par rayonnement solaire, ils préconisent une protection solaire de la totalité de l'enveloppe des bâtiments. Pour les toits, les solutions les plus économiques proposées sont données dans le Tableau 3.

Tableau 3- épaisseur des isolants préconisés en fonction du coefficient d'absorption du matériau de couverture et de la nature de l'isolant choisi (Garde, 2001)

Couleur du toit	**Isolant de type polystyrène λ=0.041W/mK**	**Isolant de type polyuréthane λ=0.029W/mK**
Toit simple		
Couleur claire α=0.4	5cm	4 cm
Couleur moyenne α=0.6	8 cm	6 cm
Couleur foncée α=0.8	10 cm	8 cm
Toit bien ventilé		
Couleur claire α=0.4	Pas d'isolant	
Couleur moyenne ou foncée α=0.6	2cm	1cm

La forme des toits et leur orientation influencent également la quantité de rayonnement absorbée par le bâtiment. (Runsheng *et coll.*, 2003) et (Tang *et coll.*, 2006) comparent l'ensoleillement absorbé par les toits en forme de dôme ou voûtés, très utilisés au Moyen-Orient et dans les régions chaudes et arides à celui absorbé par des toits plats. Ils montrent que les toits voûtés ou en forme de dôme absorbent d'avantage de rayonnement solaire que les toits plats. Cependant, une orientation Nord-Sud de ces toits annule cette différence.

Afin de réduire l'effet des apports solaires en toiture, des dispositifs plus complexes peuvent être utilisés, tels que les toitures végétales, les bassins d'eau ou la vaporisation d'eau sur les toitures.

Les toitures végétales ont un effet positif tant sur le phénomène d'îlot de chaleur que sur la consommation énergétique des bâtiments qu'elles protègent du rayonnement solaire. En réduisant les fluctuations des températures de surface du toit et en en augmentant la capacité thermique, elles contribuent au rafraîchissement des espaces intérieurs en été et à la réduction de l'énergie nécessaire à leur chauffage en hiver. (Niachou *et coll.*, 2001) analysent les propriétés thermiques d'un tel toit qu'ils expérimentent (mesure de températures de surface et d'air à l'intérieur et à l'extérieur d'un bâtiment à proximité d'Athènes) et simulent. Ils montrent que les performances des toitures dépendent du type de végétation utilisé, notamment de sa couleur et de sa densité (des résultats meilleurs ont été obtenus pour des plantes denses et de couleur vert foncé) et du type de construction : les températures de surfaces calculées les plus faibles ont été obtenues pour les bâtiments anciens peu ou pas isolés. Ils montrent par ailleurs que 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 *et coll.*, 2005a), n'inclut que les économies directement induites par le dispositif et pas celles liées à la réduction du phénomène d'îlot de chaleur urbain.

Les bassins d'eau en toiture comme moyen de réduction des apports thermiques en été font l'objet d'études depuis 1920 (Cook, 1985). (Tang, 2003), (Tang *et coll.*, 2004) proposent un dispositif de bassin utilisant des sacs de toile en surface, appelé RPWG (roof pond with gunny bags) et un modèle numérique permettant d'en analyser les performances. Le bassin est constitué de sacs de toile sur une grille de polystyrène qui flotte sur l'eau. Les sacs interceptent les apports solaires qu'ils dissipent, ainsi que les flux provenant du bâtiment, en chaleur latente due à l'évaporation de l'eau, convection et rayonnement infrarouge. Les résultats expérimentaux montrent que ce système est plus performant qu'un bassin avec une isolation amovible, du fait de la stratification thermique qui se produit dans l'eau. Le modèle proposé par les auteurs est couplé à un modèle de thermique de bâtiment qui leur permet d'évaluer l'impact de la solution proposée sur les ambiances intérieures. Pour les bâtiments étudiés, les auteurs trouvent une épaisseur d'eau optimale de 20cm quand le toit est constitué de béton et de 5cm pour les toitures terrasse métalliques. Les simulations indiquent également que le dispositif permet d'améliorer la stabilité des températures intérieures.

(Zhou *et coll.*, 2004) 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.

Les façades

La couleur des façades d'un bâtiment influe également sur ses performances thermiques. ((Givoni *et coll.*, 1968), (Givoni *et coll.*, 1972), cités par (Bansal *et coll.*, 1992)). (Bansal *et coll.*, 1992) testent deux couleurs : le blanc et le gris. Des différences de température de l'air dans le bâtiment de 3°C (mesure à 0.1m du plafond) et de 1°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 U et une forte conductivité thermique, la couleur des murs extérieurs est moins importante que dans le cas contraire). Les auteurs ont également montré que l'effet de la couleur des parois extérieures s'estompe si le local était ventilé et /ou s'il y avait des apports solaires directs. En effet, dans ces cas, le poids relatif des apports par les parois opaques par rapport aux autres apports est moindre. (Cheng et al ; 2005) par une expérimentation à Hong-Kong confirment ces résultats. La couleur de la façade n'influe sur la température intérieure que si la résistance thermique est faible. Dans ce cas, la couleur blanche est préférable car la température intérieure reste inférieure de 1 à 2° à la température extérieure (pour une orientation favorable) et la nuit, le rafraîchissement est plus efficace. 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.

Dans les pays où l'ensoleillement est très fort, l'ombrage des façades est une réelle nécessité. La forme de la façade peut être étudiée de manière à ce que le bâtiment s'auto-protége du soleil. C'est ce que (Belakehal *et coll.*, 1996), (Capeluto, 2003), (Capeluto, 1999) étudient en jouant soit sur l'épaisseur de la façade, soit sur la forme générale du bâtiment (pyramide inversée). L'usage de logiciels de CAO permettant de prédire l'impact solaire dès la phase de conception facilite ce type de conception (voir Tableau 4-).

Les vitrages

Le rôle de la fenêtre est de permettre un éclairage naturel, une vue sur l'extérieur, une ventilation possible si celle-ci est ouvrable. Dans l'architecture traditionnelle, les fenêtres sont adaptées au climat. Dans les régions tempérées, les ciels sont souvent couverts et il est donc nécessaire d'avoir de larges ouvertures pour laisser pénétrer la lumière, ce qui en hiver est source de pertes thermiques. Il s'agit donc de trouver un compromis entre éclairage et confort thermique. Dans les régions tropicales, les ouvertures doivent en outre laisser passer des courants d'air afin d'améliorer les conditions de confort thermique en été. Dans les pays chauds et secs, l'usage des vélums, avancées de toit, vérandas est très répandu et les fenêtres sont petites mais peuvent être ouvertes en été et fermées pendant la saison froide. Dans les climats chauds et humides, comme pour les pays chauds, la protection solaire des ouvertures est nécessaire, mais il faut également favoriser la ventilation et les fenêtres sont larges et la plupart du temps ouvertes. Dans les régions désertiques, les constructions traditionnelles sont massives et les ouvertures sont petites, ombragées, ouvertes le jour et fermées la nuit.

Les qualités des matériaux verriers et des techniques d'isolation ont fait que le pourcentage de surfaces vitrées a pu être considérablement augmenté, favorisant ainsi l'éclairage naturel. Les innovations en matière de verre ont permis d'offrir sur le marché des verres à haut pouvoir isolant ayant des revêtements à bas coefficient d'émissivité (pouvant atteindre 0.05 et moins). Ces produits sont bien adaptés aux climats tempérés. Pour les climats chauds, il s'agit d'avoir des verres ne laissant passer que la composante visible de la lumière à savoir les longueurs d'ondes entre 0.39 et 0.74m. Un indicateur les caractérise ; le K_c « glazing luminous efficacity » ou « coolness index ». Les verres électrochromiques (Meunier, 2003) ont la particularité d'avoir des propriétés optiques dynamiques, ce qui permet une adaptation en fonction de l'évolution des conditions environnantes. D'autres systèmes peuvent également être imaginés comme ceux proposés par (Feuermann *et coll.*, 1998) ou (Etzion *et coll.*, 2000) présentant des vitrages réversibles selon la saison, la couche réfléchissant les IR étant soit extérieure en été soit intérieure en hiver.

Les brise-soleil et masques

La protection solaire des baies peut être fixe, mobile ou réglable, extérieure ou intérieure, structurelle ou non structurelle, végétale, etc. Le concepteur a la liberté de choisir la combinaison de ces différents types pour chercher une efficacité maximale selon les contraintes spécifiques du projet. Afin de choisir les dispositifs de contrôle solaire adaptés à un projet donné, il doit prendre en compte différents critères tels que :

- le constructif, dispositifs structuraux, non structuraux ou mixtes ;
- la nature du matériau constitutif, c'est-à-dire ses caractéristiques physiques d'absorption, de réflexion et d'émissivité ;
- l'orientation du dispositif, en fonction de la hauteur de référence du soleil (détermine le choix de la forme et de ses dimensions) ;
- l'emplacement : intérieur ou extérieur ;
- la disposition, si les dispositifs sont fixes, mobiles, réglables.

(Belakehal et al, 2004) passent en revue différents dispositifs vernaculaires utilisés par l'architecture des pays chauds pour maîtriser la lumière et la chaleur au niveau de la rue ou de l'aménagement intérieur des bâtiments. Ces principes ont été réinvestis dans l'architecture contemporaine par des concepteurs qui tirent profit d'avancées technologiques (nouveaux matériaux, automatisation…). (Edmonds *et coll.*, 2002), (Greenup et al, 2004) présentent des brises soleil constitués de réseaux de lames de verre permettant de réfléchir les rayonnements vers l'extérieur tout en admettant, à l'intérieur par diffusion une fraction de la lumière. (Vallejo, 2006) propose une typologie des brise-soleil.

Ces dispositifs répondent plus ou moins efficacement à leur fonction. Cette "efficacité" (notion qui doit être appréciée en fonction du climat local et des exigences des usagers), dépend à la fois de la géométrie de la forme en question, mais aussi de l'orientation de la façade et de la latitude sous laquelle le bâtiment se trouve. Ces trois types de données (géométrie, orientation, latitude) sont prédominantes dans la détermination de la performance d'un système de protection solaire, ce qui fait qu'il est difficile, voire imprudent, de procéder à des généralisations associant directement forme et performance.

Du point de vue de l'emplacement, les protections extérieures par rapport aux protections intérieures sont de loin plus efficaces, car elles évitent l'effet de serre derrière le vitrage. Fixes ou mobiles, elles doivent être bien ventilées pour éviter un effet de radiateur nuisible au confort intérieur. Les protections intérieures type stores ou rideaux même opaques sont assez peu efficaces sur le plan thermique. En effet, lorsque le rayonnement solaire a traversé le vitrage, il se trouve partiellement piégé et échauffe l'air entre la vitre et la protection (effet de serre). Ces protections intérieures sont surtout utiles pour lutter contre l'éblouissement. Elles doivent être associées à des protections extérieures.

Du point de vue de la disposition, les protections fixes sont généralement moins efficaces que les mobiles ou réglables, car elles ne peuvent pas répondre aux exigences de confort d'été et d'hiver (en hautes latitudes) à la fois avec une efficacité maximale.

On peut caractériser l'efficacité d'un masque par le calcul du « coefficient de transmission », T (Saint Lazar Trujillo, 1998), qui correspond à la part du rayonnement solaire incident qui parvient réellement à atteindre la surface de la fenêtre ou la façade. Ce coefficient est relativement facile à déterminer pour le rayonnement direct, mais cela devient plus compliqué pour la prise en compte du rayonnement diffus et réfléchi.

Des outils graphiques (Jorge *et coll.*, 1993), des expérimentations sur maquettes (Cheng et al, 2006) ou des outils informatiques comme WinShade (Kabre, 1999) permettent de concevoir

ces dispositifs en tenant compte des contradictions qu'ils doivent gérer (éviter la surchauffe tout en laissant passer la lumière et de manière différenciée selon les saisons). Winshade ne prend pas en compte pour l'instant les paramètres lumineux mais il présente l'intérêt d'un interfaçage avec Autocad.

Cheng met en évidence trois stratifications verticales de la lumière dans une pièce : une zone près du plafond recevant le rayonnement direct,une zone centrale recevant une lumière composite (directe, réfléchie et diffuse), et une zone près du plancher recevant une lumière réfléchie. Cela lui permet de montrer l'intérêt des brises soleils verticaux comme étant capables d'augmenter l'éclairement des pièces par rediffusion des rayonnements directs

L'outil SVR (Houpert, 2003), (Siret *et coll.*, 2004) permet à partir des intentions du concepteur (en terme d'ombrage et/ ou de visibilité) de construire le ou les volumes respectant les contraintes choisies puis de travailler à l'intérieur de ce volume pour définir le ou les masques respectant les intentions initiales.

Différents outils ont été développés pour prendre en compte les différents masques solaires dans les projets (Kensek *et coll.* 1996). Les plus aboutis utilisent la notion d'enveloppe solaire permettant de définir les volumes dans lesquels l'architecte peut implanter le bâtiment, le brise soleil, le mobilier urbain et respectant le droit au soleil pour les espaces environnants pour certaines périodes temporelles définies (Knowles, 1981), (Knowles, 1975), (Cotton, 1996), (Siret, 1997), (Capeluto *et coll.*, 2001). (Knowles, 1999) utilise cette enveloppe solaire pour construire différents îlots avec des axes de rues orientés différemment. Il montre alors que le volume de l'enveloppe solaire dépend de l'orientation des rues. Les volumes solaires sont plus grands dans un plan quadrillé N/S ou E/O que dans le vieux quadrillage espagnol (décalé de 26° par rapport aux points cardinaux).

La végétation

En plus de leur valeur esthétique, l'utilisation des arbres permet de modifier le climat urbain et d'en améliorer les conditions de confort. Individuellement, les arbres agissent comme masque au soleil et au vent, modifiant les conditions climatiques autour des bâtiments. Par effet cumulatif, la végétation permet la réduction de l'îlot de chaleur par l'absorption du rayonnement par la masse végétale qui est dissipé en chaleur latente. Outre cet effet sur l'îlot de chaleur, les arbres ont un effet direct sur la consommation énergétique des bâtiments par l'écran qu'ils constituent au rayonnement solaire et au vent, quand ils sont placés devant. Dans certains cas, ils augmentent par ailleurs la charge latente des systèmes d'air conditionné par leur production d'humidité par évapotranspiration (Huang *et coll.*, 1987). La fonction d'écran végétal peut également être réalisée par des arbustes grimpant sur des structures placées de manière à protéger les façades (Figure 24).

Figure 24- Écran végétal le long des façades : Ambassade de Finlande, Washington, USA (Mikko Heikkinen, Markku Komonen),Entreprise Ricola, Laufen, Suisse (Herzog et De Meuron), Immeuble de bureaux, Santiago, Chili, (Enrique Browne, Borja Huidobro).

La fonction d'écran dépend du type de végétation et du cycle annuel du feuillage. (Canton, 1994) a étudié la perméabilité au rayonnement global, diffus et direct de quatre espèces d'arbres présents dans la ville de Mendoza en Argentine. 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.

(Ip *et coll.*, 2004) décrivent le fonctionnement d'un écran végétal associé à une façade légère. 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. L'expérimentation a été menée avec une Virginia Creeper (Parthenocissus Quinquefolia). La modélisation et les expérimentations initiales (les travaux sont en cours) ont mis en évidence une baisse de température intérieure de 4 à 6° aux plus fort de l'été avec une légère augmentation de l'humidité dans la pièce.

(Akbari *et coll.*, 2005a) modélisent dans DOE-2 les masques dus aux arbres par des volumes de coefficient de solaire variable au fil des saisons. En résultat, ils donnent des tableaux et 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 d'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.

(Robitu *et coll.*, 2005) représentent explicitement les phénomènes de rayonnement, convection, d'évapotranspiration et de porosité au vent d'arbres qui sont modélisés par leur volume du point de vue des phénomènes thermo-hygro-aérauliques et par leur surface du point de vue radiatif. Les auteurs abordent ainsi les effets locaux de la végétation sur les variables environnementales auxquelles sont soumis les bâtiments. Cette approche est rendue possible par le couplage du modèle thermo-radiatif SOLENE à la simulation thermo-hygro-aéraulique de l'environnement, prenant en compte deux types d'aménagements : les arbres et les bassins d'eau. Ce modèle permet une connaissance complète des conditions thermiques, hydriques et aérauliques à proximité d'un bâtiment dans des conditions météorologiques données. Une application est faite par l'auteur à l'analyse de l'impact de ces aménagements sur le confort dans une place de la ville de Nantes modélisée géométriquement de manière réaliste.

Il ressort de ces études que l'effet sur la consommation énergétique d'un bâtiment et les conditions de confort de toutes les mesures prises sur l'enveloppe du bâtiment et sur son environnement proche n'est pas l'adition des effets de ces mesures prises individuellement. Une toiture réflective ou une toiture végétalisée n'ont pas le même impact sur la consommation énergétique d'un bâtiment fortement isolé que sur un bâtiment non isolé. Il s'agit donc de composer avec ces dispositions une solution adaptée au contexte climatique, au type de bâtiment et à son usage.

2.2.4 LA PRISE EN COMPTE DE L'ENSOLEILLEMENT DANS LA CONCEPTION

La prise en compte de l'ensoleillement dans la conception architecturale ou urbaine est très ancienne. Vitruve en parle déjà (Péneau1986), (Knowles, 1975). L'approche non empirique de cette prise en compte se situe au XIXe siècle (Harzallah, en cours) et aujourd'hui les architectes et urbanistes ont à leur disposition une somme de connaissances et une quantité d'outils leur permettant à la fois de travailler sur des tissus existants (bilans, projets de rénovation) ou sur des projets entièrement nouveaux. Un certain nombre d'ouvrages de vulgarisation les rappellent. Par exemple (Olgyay,1973), dans son livre « Design with climate » fournit quantité d'outils sous forme de diagrammes ou d'abaques, de valeurs seuils… permettant de visualiser ou d'évaluer l'impact solaire sur l'aménagement. (Bitan *et coll.*,1990-1991) montrent lors de l'analyse de la ville historique de Bet She'an en Israël que l'on n'a pas su intégrer les connaissances des anciens. Alors que le « droit au soleil » (Charte d'Athènes) est entré dans la législation de différents pays pour garantir le droit au soleil sur une période de l'année ou pour permettre une meilleure prise en compte de l'énergie solaire (Evans *et coll.*, 1990-1991), (Golany, 1996), (Eliasson, 2000) déplorent le peu d'usage de ces connaissances dans la pratique quotidienne des aménageurs, même si ces connaissances font partie du programme d'enseignement des architectes (King *et coll.*, 1995), (Schiller *et coll.*, 1996), (Kensek *et coll.*, 1996), (Liebard et al, 2006). De plus, « le droit au soleil » est entré dans la jurisprudence pour régler les différents conflits liés à des aménagements malheureux en la matière (Thomas, 1976), (Teller *et coll.*, 2001), (Koike, 1984).

Cette prise en compte peut avoir plusieurs objectifs :

- l'intégration de l'énergie solaire dans le projet urbain
- la réduction de l'effet d'îlot de chaleur urbain,
- le confort des espaces extérieurs et la jouissance de l'ensoleillement,
- le confort dans les bâtiments.

Différents outils de calcul ou de simulation se sont ainsi développés car le cadre d'application de ces connaissances s'est complexifié avec l'évolution de la forme des villes, de la densification, des contraintes économiques et réglementaires. Au départ apanage de la recherche, ils sont de plus en plus faciles à utiliser et peuvent être mis en œuvre au sein d'un cabinet d'architecte, d'un bureau d'études ou d'une agence d'urbanisme. Ces outils abordent soit les aspects qualitatifs de l'ensoleillement (dessin des ombrages) soit les aspects quantitatifs (éclairement, température de surface, quantité d'énergie). Ils peuvent être utilisés dès la conception du projet ou au contraire une fois le projet terminé. Ils permettent de calculer et/ou de visualiser les ombrages (projet déjà existant) ou de construire les enveloppes solaires[7], les pyramides d'ensoleillement (projet existant ou projet en devenir).

On peut citer (Tableau 4), sans être exhaustif, un certain nombre de logiciels, tous ne prennent pas en compte le rayonnement diffus et les réflexions. Certains sont couplés à des modules permettant de faire des calculs énergétiques (Littlefair, 1998).

Tableau 4- Liste non exhaustive de logiciels prenant en compte l'ensoleillement

[7] Une enveloppe solaire est le volume englobant dans lequel toutes les contraintes d'ensoleillement imposées par le concepteur pourront être respectées (Knowles, Siret)

ArchiPack	(Szokolay, 1996)
Cityshadow	(Littlefair, 1998)(Okeil1993)
Gosol	(Littlefair, 1998)
MascaraW	(Pereira *et coll.*, 2001)
Powershad	(Ali-Toudert *et coll.*, 2006)
Sence	(Kristl *et coll.*, 2001)
Shading	(Yesioro *et coll.*, 1994)
Shading Mask	(Kensek *et coll.* 1996)
Solene	(Miguet *et coll.*, 2002)
Sustarc, Iso Shadow	(Capeluto *et coll.*, 2001) (Capeluto *et coll.*, 2003b)
SVR	(Houpert, 2003), (Siret *et coll.*, 2004)
XSun	(Grau et Johnsen, 1995)

Intégration de l'énergie solaire dès le projet urbain

La connaissance du climat d'une région et de son potentiel énergétique est un préalable nécessaire à toute action de développement durable en matière d'architecture et d'urbanisme. Dans les années 80, le bureau d'études allemand SPACETEC a développé avec l'institut météorologique la notion de c(K)limatop(e). Il s'agit d'une cartographie quantitative et objective du comportement microclimatique de surfaces dans des conditions climatiques comportant peu de vent. Un Klimatop sera une zone délimitée ayant un comportement de température de surface caractéristique dans des conditions climatiques déterminées. (Spacetec, 1982), (Paszynski, 1991) proposent une cartographie pour la Pologne des principales valeurs des facteurs intervenant dans le bilan de chaleur terre/atmosphère, (Lazar *et coll.*, 1999) décrit ainsi la région de Graz en Autriche. (Scherer *et coll.*, 1999) reviennent sur la notion de climatop qui n'a pas été reconnue par les climatologistes de langue anglaise. Sa principale difficulté est la réutilisation des climatopes constitutes. Ils proposent une nouvelle définition des climatopes : "Climatopes are areas of characteristic combinations of climatic factors and of similar relative significance for their surroundings, operating on a spatial scale of several tenths to hundredths of meters" et 3 classes climatiques à usage des planificateurs : ventilation, qualité de l'air, situation thermique. Ces trois classes permettent de prendre en compte la majeure partie des impacts climatiques. (Erell *et coll.*, 2003) mettent en application une méthode statistique (l'analyse de classification hiérarchique) pour mettre en évidence les zones géographiques ayant des potentiels énergétiques similaires et l'appliquent à la région d'Israël.

L'implantation ou l'existence de bâtiments dans un lieu modifie considérablement les conditions microclimatiques et en particulier l'accès au soleil. (Compagnon, 2002), (Compagnon, 2004) a montré comment le logiciel Radiance pouvait quantifier l'énergie globale atteignant l'enveloppe d'un bâtiment (façade + toiture). A partir de l'étude de 61

bâtiments sur une surface de 11.7ha, il a mis en évidence l'effet de la géométrie du bâtiment, de son orientation, de l'aménagement urbain sur le potentiel énergétique et a développé un index constitué de la surface du bâtiment selon une orientation donnée pondérée de son facteur de vue du ciel (SVF). Il a créé ainsi des roses des orientations (Figure 25) facilitant l'analyse de tissu urbain d'un point de vue potentiel énergétique. Des valeurs seuils pour le rayonnement solaire reçu par façade (et toit) sont données en fonction de l'usage énergétique envisagé.

Urban area	View	Plan	Orientation rose	Facades annual irradiation per square meter floor area (kWh m^{-2})	Potential for passive solar heating techniques (%)	Potential for photovoltaic systems (%)	Potential for daylighting systems (%)	Potential for solar thermal collectors (%)
Whole area (present situation);plot ratio = 1.2				224	32	6.5	54	50
Stripes (10 storeys) plot ratio = 2.0				309	52	21	82	70

Figure 25- Roses des orientations (Compagnon, 2004)

Par une autre approche, (Rylatt *et coll.*, 2001), (Rylatt *et coll.*, 2003), (Gasden2003a), (Gasden2003) ont développé, à partir des méthodes de calcul des performances thermiques des chauffe-eaux solaires proposées par la norme anglaise BS5918, un logiciel SEP couplé à un SIG pour repérer, dans un tissu urbain, les toitures les plus appropriées à recevoir des panneaux solaires (angle, énergie reçue...). (Mardaljevic, 2004a) a développé un indicateur le TAI (Total Annual Irradiation) permettant de connaître la quantité totale d'énergie provenant à la fois du soleil et du ciel et atteignant une surface donnée pour une année entière. Un logiciel ICUE (Irradiation Mapping for Complex Urban Environment) a ensuite été développé pour visualiser en chaque point de la scène représentée (3D) cet indicateur. Cet outil peut aussi bien être utilisé pour l'analyse d'un fragment urbain que pour l'analyse d'un seul bâtiment dans un environnement complexe (Mardaljevic *et coll.*, 2003).

Réduction de l'effet d'îlot de chaleur

Une conception intelligente des bâtiments et des espaces publics participe de la réduction de l'îlot de chaleur. On peut jouer sur l'albédo à l'échelle de la ville mais aussi à l'échelle du fragment urbain (surfaces imperméabilisées, ouverture vers le ciel) ou du bâtiment (matériaux, couleur des murs et des toits). (Adnot *et coll.*, 2004) rappellent l'ensemble des résultats obtenus par le programme de recherche URBACOOL qui avait pour objet la réduction de la demande d'énergie liée au phénomène d'îlot de chaleur dans les villes.

Il est important d'avoir des villes dont l'albédo est le plus haut. 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. On peut facilement favoriser l'augmentation de l'albédo d'une ville en choisissant des couleurs claires pour les murs et les toits (surfaces entretenues tous les 15-20 ans) ainsi que pour les surfaces imperméabilisées. Une étude sur la ville de Sacramento a mis en évidence la quantité de surfaces influant sur l'albédo de la ville et l'auteur estime qu'un travail sur ces surfaces pourrait amener une augmentation de l'albédo de la ville de Sacramento de 18% (Bretz *et coll.*, 1998). Cependant, il reste à élargir la gamme des produits à haut pouvoir réfléchissant (Akbari *et coll.*, 2001), à veiller aux effets indésirables des matériaux à albédo élevés comme les phénomènes d'éblouissement (Littlefair, 1987), et anticiper les évolutions de l'albédo au cours du temps (salissure). Les surcoûts de ces

matériaux à l'investissement disparaissent au regard de leur durée de vie et des économies d'énergie.

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 (Adnot *et coll.*, 2004), (Akbari *et coll.*, 2001), (Givoni, 1991a) 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 surfaces. La végétation absorbe une part d'énergie solaire (1 à 2% converti 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% (Taha *et coll.*, 1988), (Rosenfeld *et coll.*, 1995), (Akbari *et coll.*, 2001), (Adnot *et coll.*, 2004) et l'on offre ainsi à l'habitant des conditions de confort intérieur plus satisfaisantes (Hoppe, 1991).

Les villes sont de plus en plus denses. Comment dans ce cas améliorer la consommation énergétique des bâtiments ? (Hui, 2001) passe en revue les avantages et les inconvénients d'une ville dense. Parmi les avantages, il cite la minimisation des transports, la réduction de la longueur des rues, le nombre plus faible de bâtiments (plus hauts) dont les enveloppes peuvent être plus performantes en matière thermique et les ombrages plus importants. Des courants d'air peuvent par ailleurs être créés par l'implantation judicieux de grands bâtiments. Les effets indésirables cités sont la circulation automobile difficile et le rendement des moteurs diminué, une consommation d'électricité des bâtiments (ascenseurs, air conditionné, éclairage artificiel) plus importantes les bâtiments du fait de leur hauteur, une ventilation plus difficile lorsqu'il y a une concentration de bâtiments très hauts. L'éclairage naturel est réduit, les surfaces permettant l'implantation de capteurs solaires diminuent.

(Luxmoore *et coll.*, 2005) rappellent qu'il faudra certainement, compte tenu de l'évolution du climat, faire face à des augmentations de température pouvant aller jusqu'à 4°C. La densification des villes avec les modes d'urbanisation actuels ne pourra qu'augmenter les problèmes d'îlot de chaleur. Leurs études montrent que pour un climat subtropical, les orientations des rues N/S sont préférables, que l'utilisation de matériaux à albédo élevé est nécessaire, que la végétation doit être utilisée pour favoriser les ombrages et réduire le phénomène d'îlot de chaleur.

Confort dans les espaces extérieurs

Des index d'inconforts ont été développés dans les années 1950 prenant en compte les facteurs climatiques. Ils sont cités par (Bitan1974) qui les utilise pour choisir des emplacements de nouvelles colonies dans la vallée du Jourdain ou par (Gomez *et coll.*, 2004) qui cherche à évaluer l'impact des espaces verts sur le confort extérieur de la ville de Valence (Espagne). La forme urbaine et l'orientation des rues sont des paramètres importants de la qualité d'une ville. (Oke, 1988) tente d'étudier la relation entre la forme urbaine et l'adaptation au climat. Les paramètres étudiés sont le ratio Hauteur/largeur des rues aussi bien d'un point de vue de la ventilation que de l'accès au soleil. Ses conclusions sont que la forme urbaine européenne compacte est la mieux adaptée au climat. Quelques valeurs seuils sont données : Pour H/W=0.4 (limite basse) la rue est protectrice et retient bien une partie de la chaleur ; pour H/W de 0.60 à 0.65 il y a une bonne dispersion atmosphérique et un accès solaire acceptable. Les villes européennes ont un H/W allant de 0.75 à 1.7 alors que les villes nord américaines ont un H/W compris entre 1.15 et 3.3. (Bourbia *et coll.*, 2004) affirment après un

état de l'art que la forme urbaine à l'échelle du quartier joue un rôle plus grand sur le microclimat que l'albédo des surfaces. (Bourbia *et coll.* , 2004) à l'aide de l'outil POWER SHAD, (Ali-Toudert *et coll.*, 2006) avec le logiciel ENVImet recherchent les formes et les orientations optimales. (Knowles, 1999), signale que les rues de Los Angeles orientées E/W sont trop ombragées en hiver et trop ensoleillées en été alors que les rues orientées N/S sont plus agréables. Il note cependant que les quartiers construits selon l'ancien plan espagnol (en décalage de 26° par rapport aux points cardinaux pour recevoir les brises de mer) sont plus agréables encore. (Swaid *et coll.*, 1993). (Bourbia *et coll.* , 2004) comme (Ali-Toudert *et coll.*, 2006) privilégient l'orientation (été comme hiver) N/S (avec H/W=1, 2 ou 3 et un angle de 15° à partir du nord vers l'est pour Bourbia) avec deux variantes possibles NE/SW et NW/SE. (Ali-Toudert *et coll.*, 2006) montrent également que la température de l'air diminue lentement avec l'augmentation du rapport H/W de la rue canyon. (Luxmoore *et coll.*, 2005) confirment pour les climats (sub)tropicaux l'avantage procuré par les rues orientées N/S en particulier pour les zones à forte densité. Cependant (Swaid *et coll.*, 1993) prenant en compte également le profile de vent montrent que la géométrie de la rue joue un rôle plus important que son orientation, l'étude ayant été faite en été à Tel-Aviv. Des dispositifs architecturaux comme par exemple les colonnades (diminuant la température de l'air extérieur) peuvent améliorer dans certains cas le confort des usagers de la rue.

Les études paramétriques menées par (Okeil1993) avec le logiciel CITYSHADOWS confirment certaines connaissances :

- Une ville dense laisse peu pénétrer les rayonnements solaires. Pour une même densité, la forme urbaine est un paramètre non négligeable ;
- L'orientation des rues n'est importante que pour les bâtiments en bandes ;
- Les façades Sud reçoivent la plus grande partie de rayonnement solaire, mais la distribution sur les planchers est faible ;
- La distribution du rayonnement solaire est meilleure sur les façades Est et Ouest (celles-ci ne reçoivent que 40% de ce que reçoit une façade Sud) ;
- Faire pivoter la façade Sud vers l'Est ou l'Ouest d'un angle donné ne fait pas décroître l'énergie solaire proportionnellement à cet angle.

(Okeil, 2004) poursuit son raisonnement en faisant remarquer que l'énergie reçue par les façades S, SE, SW des bâtiments est la seule énergie facilement utilisable au moment où l'on en a le plus besoin car les pics annuels de réception correspondent aux pics annuels de demande de chauffage. Il propose, pour une latitude de 48° une forme urbaine optimisant les apports solaires qui présente également des avantages fonctionnels, spatiaux, sociaux et visuels.

(Givoni, 1994), (Givoni, 1992), (Masmoudi *et coll.*, 2004) tentent de montrer que les températures de surfaces d'une place urbaine en climat chaud et sec sont principalement dues à l'orientation de la place et à la présence ou non de végétation (Oke, 1984), (Rohinton, 1997).

(Swaid, 1992) imagine un dispositif mobile pouvant équiper les rues canyons pour moduler la forme de la rue en fonction des besoins

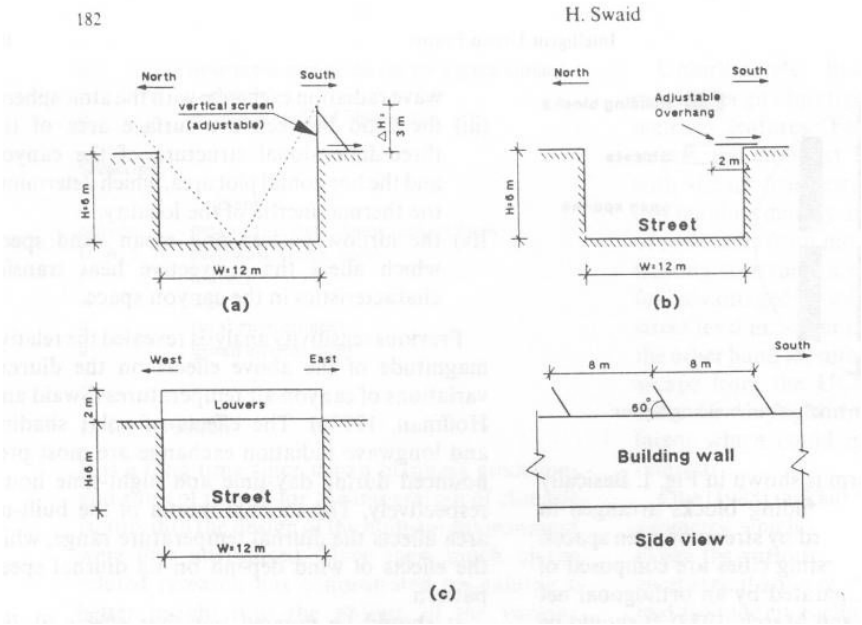


Figure 26- coupe transversale et détails de la rue selon différentes orientations (Swaid, 1992)

Le PET (Physiological Equivalent Temperature) est un indice de confort thermique prenant en compte non seulement la température, l'humidité et le vent mais aussi la température radiante moyenne. La configuration urbaine est un des paramètres qui influe sur le confort thermique du piéton. (Katzschner, 2000) cartographie ainsi des parties de la ville de Kassel (Allemagne) en mettant en avant les zones d'îlot de chaleur, les quartiers mal ventilés en y associant à chaque fois la description de l'îlot et l'indice PET associé.

Confort dans les bâtiments

L'éclairage naturel des bâtiments peut être assuré par le respect de certaines règles définies par des normes ou des règles de bonne pratique. Quel que soit le climat, il est préférable d'orienter les façades principales vers le nord et le sud. En effet, à l'est et à l'ouest, il est difficile de mettre en place des protections solaires efficaces lorsque le soleil est bas sur l'horizon. Cependant, ce sont les obstructions qui jouent le plus grand rôle sur la qualité de l'éclairage naturel des bâtiments. (Littlefair, 2001) rappelle les différentes règles de prospects à respecter pour assurer à un bâtiment neuf ou à un bâtiment en rénovation un minimum d'éclairage naturel agréable. Deux angles permettent d'évaluer rapidement le facteur moyen de lumière du jour, l'angle de visibilité du ciel (mesuré dans le plan vertical perpendiculaire à la fenêtre) et l'angle d'obstruction (mesuré dans le plan horizontal et à 2m du sol). Les valeurs conseillées de ces angles sont données pour différentes latitudes.

2.3 Environnement sonore urbain

Le bruit est en général une nuisance classée en tête des nuisances ressenties par les individus notamment en milieu urbain pour lequel une des sources principales de pollution sonore, le trafic automobile, est également à l'origine de la pollution de l'air. Ce phénomène n'est pas récent et dès la Rome antique jusqu'à la l'ère industrielle y compris la période du moyen âge, le paysage sonore urbain a eu des conséquences sur l'évolution de la conception des villes ainsi que sur la réglementation afin de répondre aux attentes des riverains. Depuis la loi cadre sur le bruit du 31 décembre 1992 et la loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie du 30

décembre 1996, diverses procédures sont adaptées à l'évaluation, à la prévision et au traitement de cette nuisance. Sur le plan économique, le coût social du bruit s'élève à plusieurs millions d'euro par an.
Prés de 20 % de la population européenne est exposée à des niveaux dépassant 65 dB(A) le jour et plus de 30 % à des niveaux dépassant 55 dB(A) la nuit.

2.3.1 PARAMETRES ET INDICES CARACTERISANT UNE SITUATION

L'évaluation de l'exposition d'un individu à des niveaux de pression acoustique fluctuants nécessite l'usage d'indices construits à partir des divers paramètres suivants :

- Niveaux statistiques : les niveaux dépassés pendant 1 %, 10 %, 50 %, 90 %, 95 % du temps d'observation, notés L_1, L_{10}, L_{50}, L_{90}, L_{95}.

Les deux premiers sont utilisés pour caractériser les bruits de crête. Le L_{50} est utilisé pour mesurer le bruit résiduel d'un site soumis à un bruit industriel si $(L_{Aeq}-L_{50})>5$ dB. Enfin les niveaux L_{90} ou L_{95} sont choisis pour quantifier le bruit de fond permanent d'un site.

- Niveau énergétique équivalent, sur une période T donnée, L_{Aeq} (jour), L_{Aeq} (nuit).

- Indice $L_{NP} = Leq + k\sigma$, où σ est l'écart-type.

Les indices doivent caractériser l'effet subjectif ou la nuisance sonore, ils sont utilisés notamment pour la réglementation. Les indices sont construits avec des paramètres mesurés sur des périodes bien déterminées. Aussi on utilise en France pour le bruit de trafic routier le Leq exprimé en dB(A) de jour de 6 à 22 h et de nuit, de 22 à 6 h.

La commission européenne a adopté récemment une directive pour la gestion du bruit ambiant en imposant l'utilisation des descripteurs énergétiques L_{den} et L_{night}. Ces descripteurs ne permettent pas de caractériser globalement les ambiances sonores en milieu urbain, milieu sonore complexe par la nature du tissu et la diversité des sources.

2.3.2 ÉCHELLE DES NIVEAUX DE PRESSION ACOUSTIQUE DANS L'ENVIRONNEMENT

Les niveaux Leq généralement rencontrés en zone urbaine sont situés dans la plage de 50 à 75 dB(A), le niveau de 60 dB(A) en façade étant considéré comme une limite de non gêne.

Les tableaux ci-après comportent une échelle de niveaux de crêtes rencontrées dans l'environnement avec une appréciation sommaire des effets correspondants et une échelle des niveaux Leq.

Sources	Niveau de crête dB(A)	Effets
Biréacteur au décollage à 300 m	110	Détérioration de l'ouïe.
Motocyclette mal insonorisée Marteau pneumatique à 10 m	100	Perte d'acuité auditive temporaire (définitive pour exposition constante). Réactions végétatives.
Poids lourds à 7,5 m Métro à 7,5 m	90	Interruption de la conversation à voix forte à 2 m.
Passage d'autobus Voiture mal insonorisée ou en accélération à 7,5 m	80	Interruption de la conversation à voix forte à 2 m.
Voiture bien insonorisée ou en croisière lente Chasse WC. Machine à laver	75	Interruption de la conversation normale.
Conversation forte à 2 m	70	
Conversation normale à 1 m	65	
Trafic automobile peu important	60 en façade	Perturbation du sommeil chez une importante fraction d'individus si fenêtre ouverte.

Tableau 5- *Quantification en niveaux de crête de divers environnements acoustiques.*

Sources	Niveau Leq_A	Effets
Intérieur de cabine de Métro	95 85	Fatigue auditive.
Intérieur d'un autobus, d'une voiture rapide	80	Conversation très difficile.
Rue à fort trafic Intérieur voiture	75	Conversation difficile sauf : - face à face - voix forte.
Rue animée ou étroite Zone de 30 à 50 m du bord d'une autoroute	70	Gène générale.
Rue moyenne 100 m d'une autoroute 4 000 véh/h	65	Inconfort.
Rue assez calme	60	Limite de gène pour bruit extérieur en façade de logement de jour.
Bruit de fond urbain de jour	55	Travail de bureau.
Rue calme sans trafic	40 - 45 35	Salle de classe. Confort de jour en habitation.
Journée calme - Campagne Nuit calme à la campagne	30 - 35 25	

Tableau 6- *Quantification en L_{Aeq} de divers environnements acoustiques et leurs effets.*

La caractérisation de la seule source sonore ne permet pas d'appréhender globalement l'ambiance sonore. L'environnement modifie la propagation et la perception du bruit. Les formes urbaines approchées par le type de rue, en U ou tissu ouvert, le profil de la chaussée, la nature du sol et les conditions météorologiques ont une influence forte sur l'environnement sonore. Les conditions de trafic, type de circulation ou type de voie, complètent la liste des facteurs acoustiques.

L_{eq} dB(A)	Interférence avec le sommeil	Interférence avec la parole	Gêne	Réaction de la collectivité	Qualité de l'environne-ment
<40, ΔL<10	Non	Non	Non	Non	Excellente
40 <L<50 ΔL<10	Exceptionnelle	À l'intérieur, conversations privées	Non	Non	Bonne
40 <L<50 ΔL>10	Oui	A l'intérieur, conversations privées	Non	Non	Assez bonne
50<L<55	Oui	A l'intérieur, conversations privées	20 % très gênés	Non à plaintes occasionnelles	Passable
55<L<60	Oui (fenêtres ouvertes) Non (fenêtres fermées)	A l'extérieur, conversations privées	25 % très gênés	Non à plaintes occasionnelles	Moyenne
60<L<65	Oui avec fenêtres ouvertes, (parfois même avec fenêtres fermées)	A l'extérieur, conversations privées	35 % de gênés	Non à plaintes occasionnelles	Moyenne
65<L<70	Oui (avec fenêtres ouvertes ou fermées)	Toutes conversations, fenêtres ouvertes et fermées, à l'intérieur et à l'extérieur	40 % de gênés	Plaintes générales	Médiocre
70<L	Oui	Oui	50 % de gênés	Menace d'actions en justice	Mauvaise

Tableau 7 - *Niveaux de bruit ambiant recommandés*

2.3.3 SOURCES DE BRUIT

Les caractéristiques acoustiques des véhicules routiers sont très dispersées, dépendant notamment de la puissance du moteur et du poids total maximum en charge.

- Voitures particulières et, par extension, tous les véhicules dont le Poids Total en Charge n'excède pas 3,5 T : ces véhicules dits légers ont des caractéristiques acoustiques générales comparables si ce n'est qu'on doit distinguer les véhicules animés de moteur à allumage commandé et les véhicules qui sont équipés de moteur Diesel à injection indirecte.
- Poids lourds, soit les véhicules dont le PTC est supérieur à 3,5 T : cette catégorie englobe des véhicules d'une grande diversité, le PTC peut atteindre 38 T, les moteurs sont en général des Diesel à injection directe.
- Autobus
- Deux roues dont les moteurs ont une cylindrée comprise entre 49cm^3 à plus de 1 000 cm^3 et sont en général à allumage commandé et 2 temps, seules les motos de forte cylindrée ont généralement des moteurs 4 temps.

Le bruit émis par un véhicule peut provenir d'une multiplicité de sources dont l'importance relative dépend de l'allure du véhicule :

a - roulement

b - admission, échappement (bouches)

c - rayonnement tubulures

d - bloc moteur

e - transmission, pont

f – ventilation

Pour les allures rapides, le bruit dû au roulement du pneumatique sur la chaussée devient dominant. La réduction des niveaux sonores dus au bruit du groupe moto propulseur met en évidence les sources de bruit dû au contact pneumatique chaussée, notamment pour les vitesses supérieures à 60 km/h pour les véhicules légers et 80 km/h pour les poids lourds.

L'analyse montre que le bruit émis par un véhicule résulte de la superposition d'émissions de sources dont la puissance dépend essentiellement du régime du moteur N et du bruit de roulement qui dépend de la vitesse V. La relation entre V et N est déterminée par le rapport de boîte de vitesse. Pour les poids lourds, la boîte de vitesse comporte de nombreux rapports afin de maintenir le fonctionnement du moteur dans la zone de consommation minimale, le niveau de bruit ne dépendant peu du rapport de boîte engagé.

Les émissions de bruit par les véhicules automobiles, les poids lourds et les deux roues présentent une atténuation rapide vers les fréquences supérieures à 2 KHz, le bruit de roulement émergeant plutôt dans l'octave 1à 2 kHz. Les basses fréquences sont émises avec une intensité acoustique considérable pour les moteurs de PL. La figure suivante représente le spectre retenu pour les études d'isolement de façade.

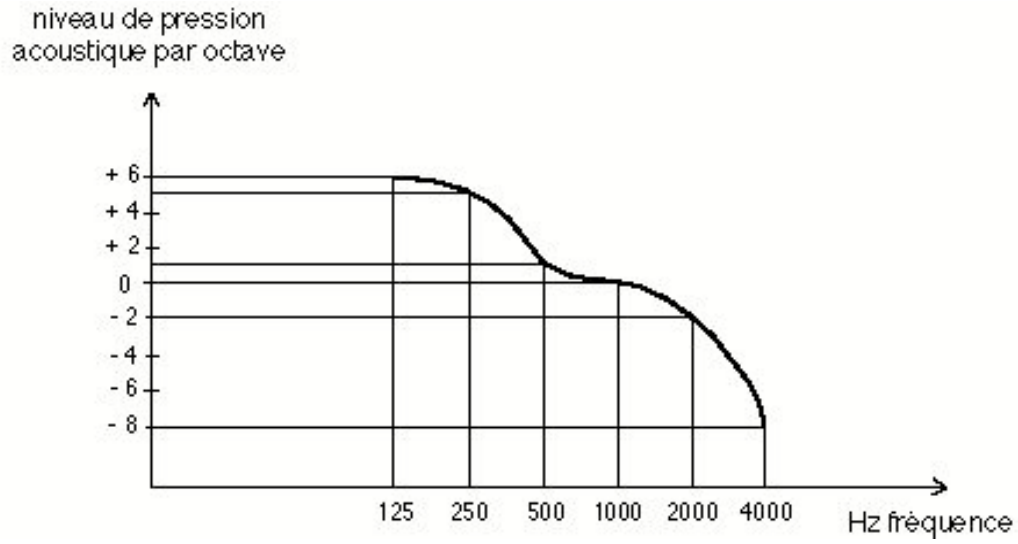


Figure 27- Spectre type de trafic routier

2.3.4 PUISSANCE ACOUSTIQUE ET NIVEAU POUR UN VEHICULE ISOLE

Pour une source ponctuelle omnidirectionnelle, si on néglige l'atténuation du son par absorption par l'air, on a :

$$L_p = L_w - 10\log\ 4\pi r^2$$

L_p niveau de pression acoustique à la distance r de la source.

L_w niveau de puissance acoustique de la source.

Si la source est proche d'un sol réfléchissant, elle peut être considéré comme omnidirectionnelle et seulement dans l'hémisphère supérieur on a :

$$L_p = L_w - 10\log\ 2\pi r^2$$

Avec L_p le niveau maximum enregistré au passage d'un véhicule. En pratique on mesure $L_{p\ 7,5}$ exprimé en dB(A) à une distance de la trajectoire de 7,5 m (distance pour la réglementation des véhicules) et à 1,2 m. de hauteur,

$$L_{p\ 7,5} = L_w - 10\log\left[2\pi\ (7,5)^2\right]$$

Soit $$L_{p\ 7,5} = L_w - 25,5$$

Si L_0 est le niveau de pression acoustique à la distance d_0,

$$L_p = Lo\ + 20\ \log\frac{do}{d}$$

Des exemples de niveaux de puissance et de pression acoustique (les pondérations utilisées ne changent pas les ordres de grandeur) sont indiqués dans le tableau ci-dessous.

Véhicule	**Puissance en watt acoustique**	L_w **en dB(A)**	L_p *à* 7,5 *m*
Poids lourds	0,3	115	90
Voiture	0,03	105	80
Voiture silencieuse	0,01	100	75
Voix normale	10^{-5}	70	45

Considérons cependant les moyennes énergétiques,

$$L_{\overline{w}.} = 10\log\sum_i \frac{W_i}{N}\ ,$$

W_i étant la puissance du véhicule i et N le nombre total de véhicules.

Soit la forme générale de la loi reliant $L_{\overline{w}}$ à la vitesse du véhicule lors de son passage au droit du microphone, a et b étant des paramètres précisés pour les différentes conditions de circulation et pour PL et VL :

$$L_{\overline{w}} = a + b\log V$$

2.3.5 CALCUL DU LEQ POUR UN SEGMENT DE CHAUSSEE RECTILIGNE

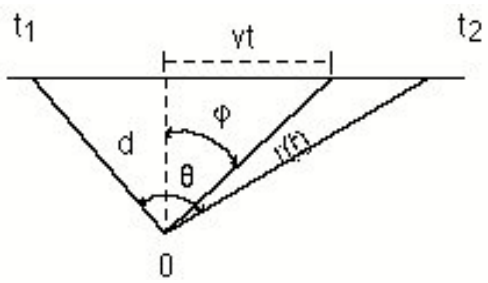
Le Leq produit pendant le temps T en bordure de chaussée par le passage d'un véhicule isolé, dépend du niveau de bruit maximum Lmax, de la vitesse du véhicule et notamment pour les PL, de la répartition et de la directivité des sources composant le véhicule.

Nous supposerons que le véhicule peut être considéré comme une source ponctuelle omnidirectionnelle de puissance acoustique

constante se déplaçant à la vitesse également constante sur une trajectoire rectiligne.

Le Leq entre les instants t1 et t2 est égal à :

$$10\log\frac{1}{t_2-t_1}\int_{t_1}^{t_2}\frac{p^2(t)}{p^2{}_o}\,dt$$



p_o étant la pression acoustique de référence,

p^2 pression acoustique quadratique instantanée.

On a : $p^2(t)=\dfrac{W}{2\pi}\dfrac{\rho_o C}{r^2(t)}$

Avec W puissance acoustique du véhicule,

ρ_o densité de l'air,

r(t) distance du véhicule à l'observateur O à l'instant t.

Soit pour la moyenne arithmétique de p^2 entre les instants t_1 et t_2 :

$$\left[p^2\right]_{t_1}^{t_2}=\frac{1}{t_2-t_1}\,\frac{W\rho_o C}{2\pi}\int_{t_1}^{t_2}\frac{dt}{r^2(t)}$$

Avec $r^2(t)=d^2+v^2t^2=d^2(1+tg^2\varphi)$ où $tg\ \varphi=\dfrac{vt}{d}$

$$\frac{dt}{r^2(t)}=\frac{1}{vd}\,\frac{dtg\ \varphi}{1+tg^2\varphi}=\frac{d\varphi}{vd}$$

Si θ est l'angle sous lequel le tronçon parcouru de l'instant t_1 à t_2 est vu de O :

$$\int_{t_1}^{t_2}\frac{dt}{r^2(t)}=\frac{\theta}{dv}$$

$$\left[p^2\right]_{t_1}^{t_2}=\frac{1}{t_2-t_1}\cdot\frac{W\rho_o C}{2\pi}\cdot\frac{\theta}{dv}$$

$$\underset{t_1t_2}{Leq}=L_w-10\log\,(t_2-t_1)-10\log dv+10\log\frac{\theta}{2\pi}$$

Si on fait référence au niveau de pression maximum observé à la distance do :

$$\underset{t_1\to t_2}{Leq}=Lpo+10\log\,\frac{\theta do}{(t_2-t_1)v}+10\log\frac{do}{d}$$

Connaissant le niveau de pression sonore maximum reçu du véhicule, ou connaissant le niveau de puissance acoustique, il est possible de calculer le niveau Leq.

- Leq croît en 10 $\log\theta$, θ étant l'angle sous lequel le tronçon de voie est vu de l'observateur.

- Leq décroît en 10 log $\dfrac{1}{d}$, d étant la distance à la voie, les phénomènes d'absorption étant négligés. Si on double la distance à la voie, Leq diminuera de 3 dB.

Pour une source sonore qui aurait le même niveau de bruit quelle que soit sa vitesse (Lmax = constante), l'énergie acoustique reçue décroît en v^{-1}. Ceci traduit le fait que "plus la source sonore défile rapidement, moins l'observateur y est exposé". Cependant, le niveau de puissance acoustique Lw ou le niveau de pression sonore maximum Lpmax varie également avec la vitesse.

2.3.6 REGLEMENTATION ET PERSPECTIVES D'INSONORISATION

Les indices adoptés pour le bruit routier sont les niveaux équivalents $L_A eq$ de 6 h à 22 h et $L_A eq$ de 22 h à 6 h, à 2 m en avant des façades.

L'indice Leq (horaire ou sur pas de temps de15 mn) entre 8 h et 18 h est peu variable, n'étant pratiquement pas affecté par l'accroissement du trafic à l'heure de pointe. Le Leq diurne de 8 h à 18 h est très voisin à moins de 1 dB près du Leq de 11 h à 12 h.
Le niveau de bruit décroît le soir de 20 h à 24 h, beaucoup plus lentement près des grandes artères surtout lorsqu'un trafic de poids lourds se développe le soir. Le silence nocturne est très court, de l'ordre de 4 - 5 heures près des mêmes axes qui supportent un trafic lourd, le Leq n'est pas toujours inférieur à 10 dB(A) au Leq diurne alors qu'il peut lui être inférieur de 20 dB(A) dans les voies calmes. La remontée du niveau de bruit le matin est plus brutale que sa baisse en soirée.

L'énergie acoustique émise par le trafic dépend des paramètres suivants:

- Débit de véhicules,
- Vitesse des véhicules,
- Pourcentage de poids lourds,
- Pente de la voie,
- Nature du revêtement de chaussée.

De plus, les niveaux à la réception dépendent des conditions de propagation du son à partir de la voie.
Le développement de modèles de propagation du son adaptés à la complexité des formes du milieu urbain, densité du tissu et effets des réflexions diffuses sur les façades des bâtiments, et associés à une approche plus fine des sources sonores, permettra la caractérisation des ambiances sonores urbaines.
La directive européenne sur le bruit ambiant a mis en évidence la cartographie du bruit ou cartographie de variation des niveaux sonores, dressée en général par tranche de 5 à 5 dB(A). Cette caractérisation permet ensuite d'être reproduite pour chaque scénario d'aménagement. Par comparaison avec une situation de référence, la cartographie aide au choix de scénario et de localiser les secteurs où les changements d'ambiance seront notables.

Il faut également mentionner le classement au bruit des façades précisé par la réglementation thermique RT2005, décret et arrêté du 24 mai 2006, afin de favoriser l'usage des techniques passives pour le traitement des bâtiments en conditions estivales.

2.4 Transfert des polluants

La pollution atmosphérique est un facteur important de risque pour la santé humaine. En moyenne, la population passe 90% du temps à l'intérieur des bâtiments (ASHRAE 1993; Simoni *et coll.* 1998) ce qui rend la pollution intérieure responsable d'un accroissement de 2,7% des affections (Murray et Lopez 2002). La plupart de ces problèmes de santé sont liés aux émissions de polluants à l'intérieur du bâti, en particulier dans les pays développés. Cependant les transferts de polluants extérieurs peuvent constituer des sources non négligeables, en particulier dans les pays industrialisés.

L'un des polluants caractéristique en milieu urbain provient de la zone près du sol et se forme par réaction photochimique d'oxyde de nitrogène et des composés organiques volatiles. En Europe, la concentration d'ozone a augmenté annuellement de 1% ce qui a entraîné une exposition moyenne de 3,1h à des concentrations supérieures à 180µg/m^3 (niveau d'alerte à la population) d'après (de Leeuw et de Paus 2001). Si cette concentration d'ozone près du sol atteint des valeurs dangereusement élevées, il est utile de connaître le ratio entre sa concentration intérieure et extérieure. Bien que cette relation soit établie en fonction de la ventilation des bâtiments, les modèles existants classiques ne prennent pas en compte des facteurs importants tels que la perméabilité du bâti et le niveau de concentration extérieure. Cette relation entre niveau de pollution intérieur et extérieur a été étudiée expérimentalement ; cette étude a fait l'objet du développement d'un modèle de logique floue (Iordache 2003).

Le transfert intérieur/extérieur d'ozone est un phénomène complexe partiellement expliqué. Dans l'état de l'art actuel, les modèles empiriques prévalent. La plupart du temps, le modèle fournit le ratio de concentration intérieur par rapport à l'extérieur (ratio entrée/sortie), ce qui représente une fonction de transfert. La concentration extérieure est une donnée importante, ainsi que le taux de renouvellement d'air.

2.4.1 MODELES A UN COEFFICIENT

Les modèles les plus simples consistent à donner une simple valeur du ratio entrée/sortie de polluant. Ainsi, la mesure simultanée des concentrations d'ozone extérieure et intérieure dans une expérience menée par Lee a donné des ratios de 0,88 et 0,98 pour deux bâtiments différents (Lee 1997), Chao a trouvé des valeurs de 0,72 et 0,15 pour deux sites de même niveau extérieur (Chao 2001), et Lepelley a déterminé 3 ratios (0,18 ; 0,32 et 0,24) différents pour un même bâtiment et au cours de 3 campagnes de mesure (Lepelley 1998). Ces modèles obtenus par la mesure pour des bâtiments spécifiques ont donc une validité limitée, et peuvent être utilisés pour des estimations dans le cas de bâtiments similaires.

2.4.2 INFLUENCE DU DEBIT D'AIR TRAVERSANT PAR RAPPORT AU RATIO ENTREE/SORTIE

Différents auteurs ont étudié l'influence de la ventilation traversante par rapport au ratio entrée/sortie de polluants. Les données de Hayes (Hayes 1991) obtenues à partir de mesures (Saberski *et coll.* 1973; Hales *et coll.* 1974; Zhang et Lioy 1994) présentent une première comparaison entre les résultats obtenus avec différentes stratégies de ventilation (fenêtres ouvertes ou fermées et climatisation). D'autre études (Romieu *et coll.* 1998; Salmon *et coll.* 2000; Kirchner *et coll.* 2001) ont aussi montré que ce ratio dépend aussi de la perméabilité des fenêtres.

Pour des bâtiments équipés d'un système de ventilation naturelle avec des conduits de recirculation, le pourcentage d'air entrant dans la pièce représente un des paramètres importants. Ainsi, un cas d'étude (Saberski *et coll.* 1973) a montré que pour un taux de 100% d'air neuf le ratio entrée/sortie d'ozone atteignait 0,8 tandis qu'il diminuait à 0,6 pour un taux de 70% de renouvellement d'air. Dans une étude similaire (Davies *et coll.* 1984), ce ratio tombe 0,4 pour 0% d'air neuf extérieur dans le système de ventilation.

Les données de Hayes et les mesures de Weshler *et coll.* (Weschler *et coll.* 1989; Hayes 1991) donnent une expression exponentielle de la variation du rapport entrée/sortie noté I/O :

$$I/O = 1 - \exp(-a \times ach^{b})$$

Avec $a = 0{,}28$ et $b = 0{,}7$ les coefficients du modèle, et *ach* le taux de renouvellement d'air. Cette variation est représentée Figure 28. Les points carrés correspondent aux périodes où les fenêtres sont fermées et la pression extérieure plus grande que la pression intérieure. Cette expression a été retrouvée par Ekberg qui a montré que la variation du ratio dépendait de la durée du pic de pollution extérieur (Ekberg 2000), menant aux différentes courbes, les hautes amplitudes correspondant aux sollicitations de plus longue durée.

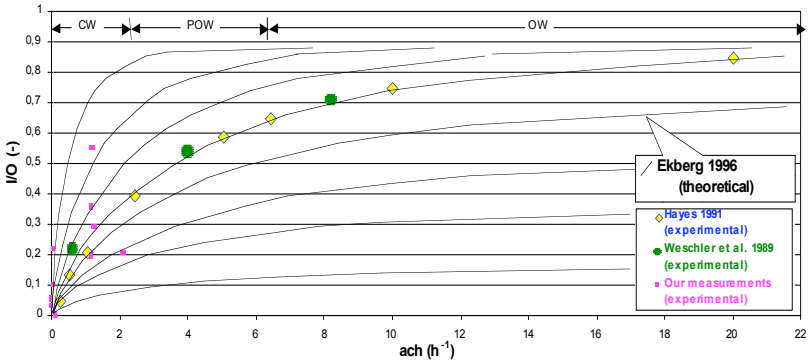


Figure 28- évolution du ratio entrée/sortie d'ozone par rapport au taux de renouvellement d'air horaire (CW – fenêtre fermée; POW – fenêtre partiellement ouverte; OW – fenêtre ouverte)

(Salmon *et coll.* 2000) ont trouvé des ratios différents (0,17 et 0,42) pour deux bâtiments avec système de ventilation naturelle. Cette différence s'explique par le fait que les deux bâtiments sont caractérisés par des perméabilités de façade différentes, qui dépendent principalement de la répartition des ouvrants. Ainsi, la variation du ratio I/O dépend de l'indice de fermeture des fenêtres ($CW_{I/O}$), représenté Figure 29. Cet indice $CW_{I/O}$ varie à l'inverse de la perméabilité des ouvrants (en bois par exemple).

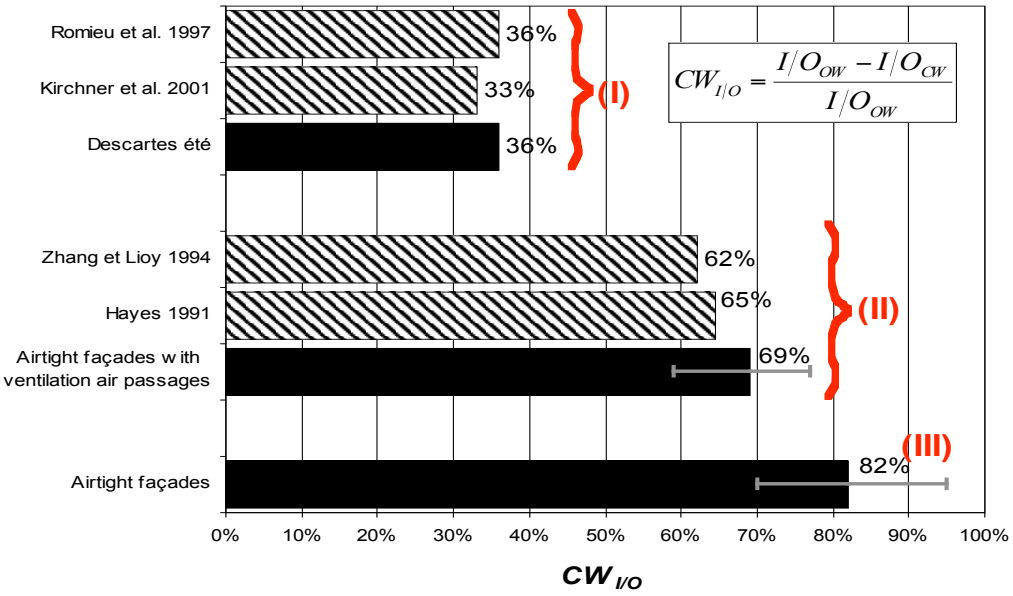


Figure 29 - The reduction of the I/O ratio as a function of the window closing $\Delta I / O_{CW}$.

Les valeurs de $CW_{I/O}$ définies dans la littérature varient de 0,3 à 0,6. Ainsi des auteurs ont trouvé des valeurs de $CW_{I/O}$ de 0,36 et 0,33 (Romieu *et coll.* 1998; Kirchner *et coll.* 2001), tandis que d'autres mesures ont déterminé des valeurs de 0,62 et 0,65 (Hayes 1991; Zhang et Lioy 1994). Des mesures plus récentes (Iordache 2003) ont mis en évidence une classe de valeurs plus hautes lorsque les fenêtres sont partiellement ouvertes (Figure 29). Finalement, la variabilité du ratio I/O vient de la perméabilité des façades de bâtiment, ce qui modifie le taux de renouvellement d'air dans les bâtiments ventilés naturellement avec fenêtres fermées. Les bâtiments peuvent être groupés en 3 classes selon la Figure 29 : étanches, perméables et très perméables.

2.4.3 INFLUENCE DE LA CONCENTRATION EXTERIEURE D'OZONE SUR LE RATIO ENTREE/SORTIE I/O

L'évolution des valeurs expérimentales de la concentration intérieure et extérieure d'ozone, obtenue pour le taux de renouvellement d'air maximum, varie de façon exponentielle d'après la Figure 30 (Shair et Heitner 1974). Le modèle théorique de Ekberg démontre lui aussi la relation entre le ratio I/O et la concentration extérieure (Ekberg 2000).

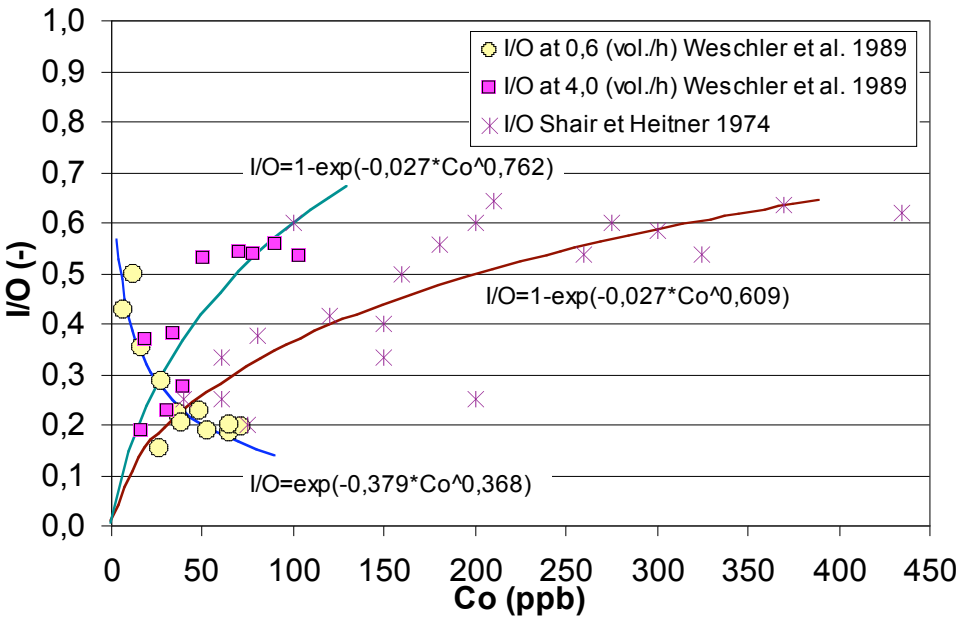


Figure 30 - Variation du ratio d'ozone I/O en fonction de la concentration extérieure Co

Les mesures de Weschler pour des taux de renouvellement d'air de 0,6 et 0,4vol/h ont été représentés aussi pour le même type de variation (Weschler *et coll.* 1989). Les points obtenus pour 0,4vol/h suivent une courbe croissante similaire aux points obtenus par Shair et Heitner tandis qu'au contraire pour 0,6vol/h la variation suit une courbe décroissante. Le ratio I/O est donc dépendant de la concentration extérieure, conclusion obtenue aussi de façon théorique par Ekberg (Ekberg 2000). Cependant, ce ratio ne peut pas être déterminé expérimentalement pour un domaine de concentration extérieur puis extrapolé à un autre domaine. Enfin, le taux de renouvellement d'air peut modifier significativement la forme de l'évolution du ratio I/O.

2.4.4 INFLUENCE DES SOURCES INTERIEURES D'OZONE ET DES PERTES SUR LE RATIO D'OZONE I/O

En plus de la concentration extérieure et du taux de renouvellement d'air, les phénomènes physico-chimiques intérieurs peuvent modifier la concentration intérieure d'ozone et donc le ratio I/O. Si ces phénomènes sont importants, alors le ratio I/O devient peu représentatif du transport de polluants de l'extérieur vers l'intérieur (Yocom 1982). Ces phénomènes peuvent être divisés en 2 groupes : permanents et temporaires.

Les phénomènes intérieurs permanents sont principalement liés à l'absorption et la résorption des matériaux de surface, et donc liés aux caractéristiques intrinsèques du bâtiment. Le ratio entre surface totale et volume habitable (*S*/*V*) est alors un paramètre important pour le ratio d'ozone I/O (Cano-Ruiz *et coll.* 1993; Nazaroff *et coll.* 1993; Weschler 2000). Les mesures de Kirchner ont montré une variation linéaire entre I/O et *S*/*V* (Kirchner *et coll.* 2001). Barguil a montré que l'ozone réagissait plus avec les matériaux plastiques (Barguil 1993) qu'avec le bois, l'acier ou le verre, tandis que les expériences de Kleno ont montré que le linoleum et les tapis sont les plus absorbants vis-à-vis de l'ozone (Klenø *et coll.* 2001). Ainsi, en présence de tapis le ratio I/O peut diminuer de 43% (Romieu *et coll.* 1998).

Les phénomènes temporaires qui influencent le rapport I/O d'ozone sont principalement liés aux activités humaines. Certains appareils peuvent aussi constituer des sources temporaires entraînant parfois même un dépassement de la concentration extérieure. Les photocopieurs et imprimantes laser constituent des sources de production d'ozone (Huré et Rousselin 1999; Wolkoft 1999), et des concentration de 50 à 100µg/m^3 peuvent être observées lors

d'utilisation intensive (Koene 1992). Les réactions chimiques entre différents polluants intérieurs peuvent être aussi incluses dans cette catégorie ; la concentration en polluants d'une certaine espèce augmente tandis que celle d'autres espèces diminue (Blondeau 1996; Weschler 2000; Kirchner *et coll.* 2001).

2.4.5 MODELISATION TYPE

Le ratio d'ozone I/O dépend finalement de trois facteurs : la concentration extérieure, le taux de renouvellement d'air et des sources intérieures de polluants. Le premier facteur peut être obtenu en utilisant des modèles de concentration d'ozone extérieur (Bel *et coll.* 1999; Ghattas 1999; Ghiaus *et coll.* 2000). Le second facteur, le taux de renouvellement d'air, dépend des effets du vent et de la turbulence ainsi que de la perméabilité de façade. La pression due au vent en façade est difficile à estimer, principalement dans le cas de l'environnement urbain. Les forces de poussée thermique dépendent des différences de température entre l'intérieur et l'extérieur, ce qui peut être aussi difficile à estimer. La perméabilité de la façade est une caractéristique intrinsèque de la façade qui peut être mesurée (Ribéron 1991; ISO 1996; ASTM 1999). Le troisième facteur, les sources intérieures de polluants, dépend du facteur humain ce qui rend la prédiction plus difficile sur l'amplitude et les moments d'apparition de ces sources. Dans une approche simplifiée pour une large gamme de bâtiments et de niveaux de concentration, ce dernier facteur n'est pas modélisé. Ainsi le ratio d'ozone s'exprime de façon générale par la formule suivante :

$$I/O = f(Co, Q_{4Pa})$$

Avec Q_{4Pa} le débit d'air traversant la façade sous une différence de pression de 4Pa, correspondant à la perméabilité de la façade, et Co la concentration extérieure en ozone. Cette modélisation est empirique, et déterminée expérimentalement à partir des mesures (Iordache 2003).

3. Analyse morphologique du milieu urbain

L'étude des formes urbaines couvre un domaine de recherche vaste que (Panerai, 2001) regroupe en trois axes :

- « l'approfondissement d'une connaissance historique qui fasse place aux données morphologiques pour expliquer l'histoire des villes,
- l'articulation avec le social qui met en évidence le rôle de la forme dans la gestion économique et sociale,
- l'expérience du projet urbain et la recherche des références et des outils qui permettent de le conduire ».

Beaucoup d'études ont été consacrées l'évolution spatiale des villes. Conduites dans des disciplines différentes (archéologie, géographie, histoire, histoire de l'art, histoire économique, ethnologie, sociologie, économie, architecture, urbanisme, micro-climatologie…), selon leurs points de vue, elles ont tenté de classer les plans des villes selon des catégories différentes.

Grand nombre de ces recherches se sont particulièrement intéressées aux plans réguliers et ont plutôt négligé le phénomène de l'irrégularité dans les plans urbains. Comme le propose (Frankhauser, 1994), ceci peut s'expliquer par le fait que « l'irrégularité ne se prête pas autant à une classification qualitative ». L'étude de formes urbaines réelles, dans leur complexité morphologique nécessite la mise en place de mesures quantitatives qui représentent des filtres permettant d'extraire une propriété caractéristique de la structure étudiée. Cette réduction de l'information permet de faire apparaître une propriété de l'objet d'étude qui n'est pas évidente *a priori*. Cependant, la mise en place de telles mesures quantitatives (ou indicateurs) nécessite selon (Frankhauser , 1994) :

- « de définir la variable en question et de préciser à quelle propriété de la structure elle se réfère ;
- d'indiquer la méthode de mesure qui sert à déterminer cette variable ;
- enfin, d'interpréter les résultats ».

Si comme nous allons le voir, les deux premières étapes révèlent assez simples, pourvu qu'on se dote des outils mathématiques d'analyse des formes urbaines, la troisième, qui consiste en la mise en regard des mesures morphologiques et de phénomènes (physiques, dans notre contexte) complexes est beaucoup moins évidente.

3.1 Définitions

Tissu urbain

(Panerai2001) : « La notion de tissu, doublement marquée par les métaphores textile et biologique évoque à la fois l'idée d'une imbrication, d'une solidarité entre les parties et celle d'une capacité d'adaptation. Elle s'oppose à l'œuvre achevée ou à l'objet figé, elle suppose une transformation possible... »

« Superposition de plusieurs structures qui agissent à des niveaux différents, mais viennent s'articuler dans chaque partie de la ville, le tissu urbain peut être défini comme la rencontre de trois logiques :

- celle des voies dans leur double rôle de conduire et de distribuer,
- celle des découpages parcellaires où se nouent les enjeux fonciers, et où se manifestent les initiatives privées et publiques,
- celles des bâtiments qui abritent les différentes activités. »

Morphologie urbaine

(Aymonimo1970) : « étude (description ou classification) des causes qui contribuent à la formation et à la modification de la structure physique de la ville ».

(Gauthiez, 2003) : « C'est l'étude de la forme physique de l'espace urbain, de son évolution en relation avec les changements sociaux, économiques et démographiques, les acteurs et le processus à l'œuvre dans cette évolution. Par extension configuration formelle et structure de l'espace urbain, ensemble de liens spatiaux et fonctionnels organisant entre eux les édifices, aménagements urbains. »

(Leyrit *et coll.* 1999) : « Formes et structures des espaces bâtis et non bâtis d'une ville ».

3.2 Paramètres morphologiques

Les formes urbaines résultent d'une composition complexe et toujours différente de bâtiments, voies et éléments d'aménagement. Des paramètres morphologiques permettant de la caractériser, afin de les comparer ont été proposés. Cette étude bibliographique nous a permis d'en dégager un certain nombre qui ont été corrélés aux flux étudiés. Ceux-ci sont récapitulés dans le Tableau 8.

Tableau 8- Récapitulatif des paramètres morphologiques rencontrés.

Paramètre morphologique	**Flux concerné**	**Auteurs**
Densité	Ensoleillement	(Baker *et coll.*, 1995), (Benzerzour, 2004), (Capeluto *et coll.*, 2001), (Luxmoore *et coll.*, 2005),
	Vent	(Adolphe, 2001), (Péneau, 1995)
Rugosité	Vent	(Adolphe, 2001), (Atkinson, 2003), (Giridharan *et coll.*, 2004), (Péneau, 1995), (Grimmond *et coll.*, 1999), (Lettau, 1969), (Plate *et coll.*, 2001), (Bottema, 1996), (Bottema, 1997), (Bottema *et coll.*, 1998)
Sinuosité	Vent	(Adolphe, 2001)
Ratio d'enveloppe	Ensoleillement	(Shashua-Bar *et coll.*, 2006)
Rapport d'aspect de la rue (H/W)	Vent	(Fleurence, 2004) (Oke, 1988)
	Ensoleillement	(Ratti *et coll.*, 2004), (Bourbia *et coll.*, 2004a), (Mills, 1997), (Gupta, 1984) , (Shashua-Bar *et coll.*, 2003), (Oke, 1988)
	Température	(Ali-Toudert *et coll.*, 2006), (Shashua-Bar *et coll.*, 2006), (Meir *et coll.*, 1995), (Oke, 1987)
	Acoustique	(Fleurence, 2004)
Ratio d'espacement (Distance entre bâtiments / largeur bâtiments)	Ensoleillement	(Shashua-Bar *et coll.*, 2006)
Orientation	Ensoleillement	(Gupta, 1984) (Bourbia *et coll.*, 2004a), (Bourbia *et coll.*, 2004), (Shashua-Bar *et coll.*, 2003)
	Température	(Ali-Toudert *et coll.* , 2006), (Masmoudi *et coll.*, 2004) (Luxmoore *et coll.*, 2005), (Meir *et coll.*, 1995)
Facteur de vue du ciel (SVF)	Ensoleillement	(Shashua-Bar *et coll.*, 2006), (Mills, 1997), (Ratti *et coll.*, 2003), (Chimklay *et coll.*, 2004), (Kondo *et coll.*, 2001), (Chudnovsky *et coll.*, 2004), (Bourbia, 2004), (Atkinson, 2003), (Giridharan *et coll.*, 2004), (Kikegawa, sous press), , (Oke, 1987)
Pourcentage de sol couvert par les bâtiments	Ensoleillement	(Chimklay *et coll.*, 2004), (Kondo *et coll.*, 2001)
Rose des orientations (Surface des bâtiments pondérée du SVF)	Ensoleillement	(Compagnon, 2002) (Compagnon, 2004)

3.3 Travaux et outils de caractérisation des tissus urbains

Les recherches historiques ont mis en évidence que la forme urbaine répondait à des partis pris symboliques, d'esthétique, de stratégie militaire, d'hygiène, de circulation... le lien forme urbaine et climat ne semble pas évident. Bardet en 1943 (Bardet, 1943) tente d'analyser différents tissus urbains d'un point de vue de l'ensoleillement sans aboutir à une théorie générale. (Golany1996) récapitule l'ensemble des connaissances qu'il a accumulé tout au long de ses travaux concernant la relation forme urbaine et climat. Il identifie six types de climats (chaud/sec, humide ; froid/sec, humide ; déserts côtiers ; flans montagneux) et trois formes urbaines principales (compacte, dispersée, et en amas). Pour chacune de ces formes, il en souligne l'intérêt ou l'inconvénient en fonction des paramètres suivants : la température, le vent, la poussière, l'orientation, la forme des toits. Cela lui permet de récapituler les règles simples de conception urbaine qu'il a tirées des analyses historiques menées depuis plusieurs années.

(Baker1995) propose la caractérisation morphologique des tissus urbains avec des indicateurs tels que la compacité, l'occlusivité (variation de la section construite en fonction de l'altitude), la directionnalité, en lien avec les potentiels thermiques, de ventilation naturelle, de rayonnement solaire et lumineux de la ville. Pour le calcul de ces indicateurs, il assimile la ville à un milieu poreux. L'auteur donne les principes et limites de chaque indicateur, les applique à un quartier de Londres et à des tissus génériques (Pavillonnaire, cours). (Groleau *et coll.*, 1995), par l'analyse de l'ensoleillement de trois tissus urbains (une ville bastide, un vieux quartier de Nantes et un quartier d'une ville issue du mouvement moderne), tentent de caractériser leur morphologie en calculant un coefficient de réduction de durée d'ensoleillement.

(Adolphe2001) propose l'utilisation d'un Système d'information géographique (SIG) pour l'analyse des caractéristiques morphologiques urbaines en lien avec phénomènes environnementaux. Ce système d'information géographique repose sur une cartographie de l'emprise des bâtiments (dont la hauteur est contenue dans la base de données) et des rues. Assimilant la ville à un milieu poreux, il permet le calcul d'indicateurs de densité, de facteur de forme des rues, de rugosité (absolue et relative à une direction), porosité, sinuosité relative à une direction, occlusivité, compacité, contiguïté, accès au soleil. Ces paramètres pourraient selon l'auteur permettre de caractériser les comportements des tissus urbains relativement au vent, au rayonnement solaire et lumineux, à l'humidité, et par conséquence au phénomène d'îlot de chaleur.

L'intérêt de cet outil est qu'il permet de traiter des tissus urbains réels à partir de leur cartographie, de comparer différents tissus, et par exemple d'évaluer l'incidence de modification de la forme urbaine sur les différents indicateurs.

Il manque cependant dans ces travaux la mise en relation des indicateurs morphologiques avec les flux. Cela passerait par l'étude environnement d'un grand nombre de tissus urbains et la formulation d'une typologie.

C'est cette approche qu'entame (Benzerzour, 2004) dont la recherche porte sur l'analyse diachronique des interactions entre les paramètres physiques du microclimat et les transformations urbaines. L'auteur cherche à quantifier les effets microclimatiques des transformations urbaines dans le cas du centre ancien de Nantes. Des reconstitutions ont ainsi été effectuées sur la base des sources historiques et cinq états représentatifs ont été définis allant de la fin du XVIIe siècle à la moitié du XXe. Des simulations numériques ont alors été réalisées à l'aide du modèle climatologique TEB (Masson2000), simulations qui ont permis de

constater une augmentation considérable des flux de chaleur, une croissance progressive de la température de l'air et des surfaces, une augmentation de la vitesse du vent, ainsi qu'une déshumidification importante des espaces de ce centre. Cette efficience des transformations urbaines sur le microclimat permet à l'auteur d'établir des corrélations entre les principaux paramètres d'intervention sur la ville (ouverture des vides urbains et minéralisation) et les phénomènes microclimatiques urbains. Ces corrélations ont ensuite été exploitées pour construire un indicateur morphologique permettant la caractérisation du microclimat urbain dans un projet de transformation urbaine. La définition de cet indicateur s'appuie sur deux objectifs : (1) dépasser une limite du modèle TEB constatée lors des modélisations, (2) la prise en compte de la corrélation entre les transformations urbaines et le microclimat. L'utilisation du modèle climatologique TEB, qui repose sur le concept de "rue canyon" pour modéliser la troisième dimension des zones bâties, opère en effet une réduction importante de la complexité de la forme urbaine. Pour dépasser cette limite, qui n'est pas propre à ce modèle, l'indicateur proposé reprend la notion de gabarit liée au canyon et l'étend par une analyse multidirectionnelle à l'évaluation de l'ouverture du vide urbain. L'indicateur proposé, appelé "ouverture directionnelle" est applicable à plusieurs échelles spatiales et permet une caractérisation synthétique de l'espace (rue, place, cours, quartier, ensemble bâti) et du microclimat urbain. Une comparaison avec quelques résultats de simulations effectuées avec SOLENE (Groleau2003) a permis de constater une bonne caractérisation de l'ensoleillement et de la vue du ciel des simulations aérodynamiques ont permis par ailleurs d'observer des résultats intéressants quant à la caractérisation du vent. En conséquence, "l'ouverture directionnelle" qui devra être complétée par la définition des états de surface, s'avère un indicateur prometteur pour rendre compte des interactions entre les paramètres physiques et morphologiques qui spécifient les environnements urbains.

La recherche mise en œuvre par (Fleurence, 2004), qui porte sur les potentialités des formes urbaines à favoriser la ventilation naturelle, a pris appui sur la caractérisation de cinq tissus urbains existants caractéristiques des Antilles Françaises (centre ville, labyrinthe, barres et tours, pavillonnaire en bandes et pavillonnaire isolé) en regard des phénomènes sonores se propageant à l'extérieur et des écoulements du vent. Pour l'analyse des phénomènes de propagation du son et du vent, des simulations numériques ont été employées. Les résultats sont comparés aux valeurs de la densité, de la hauteur des bâtiments, de la taille des espaces ouverts et de l'orientation de la trame.

Les calculs des paramètres morphologiques sont en général réalisés dans des outils qui intègrent des modeleurs 3D et des fonctions géométriques comme SOLENE ou comme le propose (Adolphe, 2001) dans des SIG. Ces outils géographiques, outre leurs possibilités cartographiques, présentent l'intérêt de pouvoir intégrer des modélisations physiques utilisant des données géométriques et géographiques, comme le propose (Bradley, 2002) qui intègre à un SIG un modèle 1D de bilan énergétique de surface routière. Les fonctionnalités de cartographie peuvent également être mises à profit pour tenter de rapprocher distributions spatiales des paramètres morphologiques et physiques en les superposant.

Les SIG pourront être plus largement mis à profit pour la gestion énergétique des villes (Gadsden, 2003a), la maîtrise des phénomènes d'îlot de chaleur dès lors que des relations entre les caractéristiques physiques de tissus (morphologie, matériaux…) auront été établies.

Ils peuvent cependant, avec les connaissances actuelles, permettre de suivre l'évolution de ces caractéristiques physiques en fonction de l'évolution de la ville (Etzion, 2001 ou Mardaljevic, 2003) pour visualiser les quantités d'énergie solaire atteignant les façades d'un environnement urbain complexe, aider à la comparaison multicritère de projets urbains et à la sensibilisation tant des acteurs que des citoyens (exemple de la cartographie infrarouge de Dunkerque dans le cadre de la communication de l'OPATB).

3.4 Nécessité d'une approche pluri-phénomènes

L'analyse des flux développée précédemment a montré que les facteurs physiques d'ambiance dans l'environnement proche d'un bâtiment en site urbain résultent d'une interaction complexe entre les phénomènes physiques et la nature de l'objet « ville » qui comprend le patrimoine bâti, les éléments naturels (végétation, eau, sol…), les aménagements urbains et l'activité humaine qui se développe en son sein. Nous avons montré qu'il est manifeste que les formes urbaines interagissent fortement avec les flux analysés. Il n'y a qu'un pas à franchir pour en conclure qu'au prix d'un ajustement soigneux et raisonné des formes urbaines, le confort dans les espaces urbains, comme dans les bâtiments, pourrait être notoirement amélioré ainsi que la consommation énergétique nécessaire à l'obtention d'une ambiance intérieure confortable. Pour cela, il reste cependant que, si quelques grandes tendances sont données, les relations qui s'établissent entre une disposition urbaine donnée et les paramètres physiques d'ambiance ne sont pas clairement établies pour l'ensemble des flux. Certes, la complexité des phénomènes et la variabilité extrêmes des morphologies des sites et des situations expliquent cet état de fait. Il n'empêche que, progrès des connaissances microclimatiques et des techniques de simulation aidant, cette clarification est rendue possible. Elle doit cependant se faire de manière pluridisciplinaire, afin de fournir aux concepteurs les outils nécessaires à une appréhension d'un problème aussi complète que possible.

Bien que cela reste encore du domaine de la recherche, les illustrations de la possibilité de combiner ou de coupler les différents outils (solaire, vent, humidité, végétation...) et donc d'agir sur plusieurs paramètres tout en prenant en compte les interactions entre ces phénomènes sont de plus en plus nombreuses (Vinet, 2000), (Papadopoulos, 2001), (Capeluto, 2003), (Sanchez, 2004), (Robitu, 2005), (Bozonnet, 2005).

Conclusions générales

L'objet de travail était d'établir un état de l'art exhaustif des études et des outils développés pour une meilleure compréhension de l'interaction des ambiances intérieures avec l'environnement urbain de nature complexe et a priori difficile à caractériser.

Ce travail nous a tout d'abord conduits à définir le milieu urbain, en particulier par rapport à son interaction avec le bâti et les ambiances intérieures du fait de l'îlot de chaleur urbain. Bien que le caractère particulier du milieu urbain ait été pressenti depuis l'antiquité, la caractérisation des paramètres tels que l'élévation de température n'a été étudiée que très récemment. Nous avons ainsi pu identifier de nombreuses études récentes sur le microclimat urbain et l'effet d'îlot de chaleur. Toutes ces recherches montrent que la caractérisation du milieu urbain, comme par exemple de l'élévation de température, est très complexe du fait de son interdépendance de nombreux flux : ensoleillement, vents dominants, convection naturelle, polluants, et production anthropique. Outre la difficulté à caractériser les conditions extérieures en zone urbanisée, il apparaît aussi que l'interaction entre ambiance intérieure habitée et environnement extérieure est importante en zone urbaine, notamment du point de vue de la demande énergétique et du confort intérieur thermique, acoustique ou encore du risque par rapport aux polluants.

La prise en compte de ces différents phénomènes a été menée ici selon deux approches complémentaires :

- L'analyse des flux d'énergie, de matière ainsi que les bruits transmis en milieu urbain et l'interaction de ces flux avec le bâti, et les ambiances intérieures.
- L'analyse morphologique de la ville : impact des aspects architecturaux et urbanistiques, ainsi que du traitement des surfaces urbaines sur les phénomènes microclimatiques et les transferts entre bâti et milieu urbain.

Dans la première approche nous avons vu que des recherches approfondies avaient été menées pour l'étude des différents phénomènes de transfert en milieu urbain selon différents niveaux d'échelle pour le milieu urbain. En effet, étant donnée la complexité du milieu urbain, une approche multi-échelle, classique en météorologie, peut être envisagée pour quasiment l'ensemble des différents flux abordés. Ainsi, pour l'étude des vents dominants ont été retenues les échelles des différentes sous-couches atmosphériques avec la définition de nouvelles échelles propres au milieu urbain. Les outils et modèles présentés ont été développés en cohérence avec ces différentes échelles, de la ville au quartier jusqu'au bâtiment. Nous avons retenu quatre flux prépondérants dans l'étude des ambiances habitées en zone urbaine : la circulation d'air avec les vents dominants, l'ensoleillement, l'environnement sonore, et les transferts de polluants. La production anthropique est aussi un paramètre important mais n'a pas été identifiée comme un flux à part entière car elle apparaît dans l'étude de chacun des flux séparément.

Dans la seconde approche nous avons défini le tissu urbain et les formes architecturales qui sont le support de ces différents flux et qui définissent les interfaces entre espaces intérieurs et extérieurs. À partir de l'étude des différents flux nous avons retenu les principaux paramètres morphologiques, paramètres qui peuvent être communs, ce qui démontre l'interdépendance

des flux avec les formes urbaines ainsi que la nécessité d'une étude pluri-phénomènes pour répondre à des critères multiples.

Finalement, ce travail a permis d'agréger des études réalisées dans de nombreux domaines de recherche (bâtiment et ambiances habitées, polluants atmosphériques, flux solaires, architecture, urbanisme, météorologie, etc.) pour lesquels des outils et modèles ont été développés et qui peuvent permettre une approche globale de l'interface bâtiment/environnement urbain dans une démarche de développement durable. Ainsi, les objectifs de réduction de la demande d'énergie, de l'amélioration des ambiances habitées et de la santé des occupants notamment, doivent être étudiés de façon globale en tenant compte de la construction et de son interaction avec son environnement proche, le milieu urbain. Les nombreuses références et la compréhension des phénomènes et de leur interaction développée dans ce rapport constituent un outil valorisable pour des études nécessitant une approche globale, que ce soit à l'échelle de l'urbaniste, de l'architecte ou au niveau de l'étude des ambiances intérieures.

Références bibliographiques

(2003). Espace urbain : Vocabulaire et morphologie, Paris, Edited by B. Gauthiez. Centre des monuments nationaux; Monum; Editions du Patrimoine.

Adnot, J., S. Alvarez, N. Klitsikas, M. Orphelin, C. Lopes et F. Sanchez (2004). Cooling the cities : Rafraîchir les villes, Paris, Edited by M. Santamouris. Ecole des Mines de Paris.

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(2), pp. 183-200.

Aida, M. (1975). "A statistical method to estimate the vertical transmission through horizontally non-homogeneous media." Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 15(6), pp. 503--511.

Aida, M. (1977). "Scattering of solar radiation as a function of cloud dimensions and orientation." Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 17(3), pp. 303--310.

Aida, M. (1982). "Urban albedo as a function of the urban structure : a model experiment (part I)." Boundary-layer meteorology(23), pp. 405-413.

Aida, M. et K. Gotoh (1982). "Urban albedo as a function of the urban structure : a two dimensional numerical simulation (part II)." Boundary-layer meteorology(23), pp. 415-424.

Akbari, H. et S. Konopacki (2004). "Energy effects of heat-island reduction strategies in Toronto, Canada." Energy 29(2), pp. 191--210.

Akbari, H. et S. Konopacki (2005). "Calculating energy-saving potentials of heat-island reduction strategies." Energy Policy 33(6), pp. 721--756.

Akbari, H., L. Shea Rose et H. Taha (2003). "Analyzing the land cover of an urban environment using high-resolution orthophotos." Landscape and Urban Planning 63(1), pp. 1--14.

Akbari, H., M. Pomerantz et H. Taha (2001). "Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas." Solar Energy 70(3), pp. 295-310.

Ali-Toudert, F. et H. Mayer (2006). "Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate." Building and Environment 41(2), pp. 94--108.

Allard, F. (Ed.) (1998). Natural ventilation in buildings: a design handbook. Ltd. Altener DG XVII. Published by James&James, London, ISBN 1 873936 72 9.

Allard, F. et C. Ghiaus (2004). Final Report of the URBVENT project. Brussels, European Commission Directorate General For Research, June 2004.

Arnfield, A. J. (1976). numerical modelling of urban surface radiatiive parameters. Papers in climatology : the Cam Allen Memorial volume. numerical modelling of urban surface

radiatiive parameters. D. J. A, McMaster University : Department of Geography. Discussion paper.

Arnfield, A. J. (1982). "An approach to the estimation of the surface radiative properties and radiation budget of cities." Physical Geography(3), pp. 97-122.

Arnfield, A. J. (1988). "Validation of an estimation model for urban surface albedo." Physical Geography 9(4), pp. 361-372.

Arnfield, A. J. et C. S. B. Grimmond (1998). "An urban canyon energy budget model and its application to urban storage heat flux modeling." Energy and Buildings 27(1), pp. 61--68.

ASHRAE (1993). Air contaminants. Handbook Fundamantals. Air contaminants, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

Assimakopoulos, V. D., C. Georgakis et M. Santamouris (2006). "Experimental validation of a computational fluid dynamics code to predict the wind speed in street canyons for passive cooling purposes." Solar Energy

ASTM, E.-. (1999). Standard Test Method for Determining Air Leakage Rate by Fan Pressurization. West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.

Atkinson, B. W. (2003). "Numerical Modelling of Urban Heat-Island Intensity." Boundary-Layer Meteorology 109(3), pp. 285-310.

Aymonino, C. (1970). La citta di Padova, (a cura di), Padova. MArsilio.

Baker, N. V., K. Steemers, D. Crowther et M. Nikolopolou (1995). Can simplified urban parameters indicate environmental performance ? Energie et climat urbain, actes de la journée du CUEPE, Conches-1 décembre 1995, Genève, pp. 85-90.

Balling, R. C. et S. W. Brazel (1988). "High-resolution surface-temperature patterns in a complex urban terrain." Photographic Engineering Remote Sensing 54, pp. 1289–1293.

Bansal, N. K., S. N. Garg et S. Kothari (1992). "effect of exterior surface colour on the thermal performance of buildings." Building and Environment Vol. 27(n°1), pp. 31-37.

Bardet, G. (1943). "Le facteur soleil en urbanisme." Technique et architecture(n°7-8), pp. 200-206.

Barguil, S. (1993). Contribution à l'évaluation de l'exposition du citadin aux polluant atmosphérique. Paris, Rné Descartes, 247 pp.

Beckham, R. J. (1980). 'Shadowpack’'PC version 2. Ispra (VA), Commission European Communities, Joint Research Centr I-21020.

Bel, L., L. Bellanger, V. Bonneau, G. Ciuperca, D. D. Castelle, C. Deniau, B. Ghattas, Y. Misiti, G. Oppenheim, J. M. Poggi et R. Tamassone (1999). Eléments de comparaison de prévisions statistiques des pics d'ozone. Paris, Société de statistique de France.

Belakehal, A. et K. Tabet Aoul (1996). "Shading and shadowing: Concepts for an interactive strategy between solar control and aesthetics in the design of the facade. Reference to arid zones." Renewable Energy 8(1-4), pp. 323--326.

Belakehal, A., K. Tabet Aoul et A. Bennadji (2004). "Sunlighting and daylighting strategies in the traditional urban spaces and buildings of the hot arid regions." Renewable Energy 29(5), pp. 687--702.

Benzerzour, M. (2004). Transformations urbaines et variations du microclimat : application au centre ancien de Nantes et proposition d'un indicateur "morpho-climatique". Nantes, Université de Nantes, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes.

Berdahl, P. et S. E. Bretz (1997). "Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing materials." Energy and Buildings 25(2), pp. 149--158.

Bitan, A. (1974). "Climatological aspects in locating settlements in arid regions." Geoforum 20, pp. 39--48.

Bitan, A. et A. Rehamimoff (1990). "Bet She'an master plan -- Climatic rehabilitation of an ancient historic city." Energy and Buildings 15, pp. 23--33.

Blondeau, P. (1996). Contribution à l'amélioration de la qualaité globale des ambiances habitées - role de la vnetilation en période estivale. LEPTAB. La Rochelle, Université de La Rochelle, 281 pp.

Bonneaud, F. (2004). Ventilation naturelle de l'habitat dans les villes tropicales Contribution à l'élaboration d'outils d'aide à la conception, Université de Nantes ; Ecole polytechnique de Nantes.

Bottema, M. (1996). "Roughness parameters over regular rough surfaces: Experimental requirements and model validation." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 64(2-3), pp. 249-265.

Bottema, M. (1997). "Urban roughness modelling in relation to pollutant dispersion." Atmospheric Environment 31(18), pp. 3059-3075.

Bottema, M. et P. G. Mestayer (1998). "Urban roughness mapping - validation techniques and some first results." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 74-76, pp. 163-173.

Bottyan, Z. et J. Unger (2003). "A multiple linear statistical model for estimating the mean maximum urban heat island." Theoretical-and-applied-climatology 75(3-4), pp. 233-243.

Bourbia, F. et H. B. Awbi (2004). "Building cluster and shading in urban canyon for hot dry climate: Part 1: Air and surface temperature measurements." Renewable Energy 29(2), pp. 249--262.

Bourbia, F. et H. B. Awbi (2004). "Building cluster and shading in urban canyon for hot dry climate: Part 2: Shading simulations." Renewable Energy 29(2), pp. 291--301.

Bourbia, F. et H.-B. Awbi (2000). Urban canyon shading design in hot dry climate (low latitudes). Renewable energy : the energy for the 21st century : Brighton, 1-7 July 2000, Brighton United Kingdom, World renewable energy congress, pp. 1850-1853.

Bozonnet, E. (2005). Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments : Cas de la rue canyon. La Rochelle, Université de La Rochelle.

Bozonnet, E. (2005). Impacts des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments - Cas de la rue canyon. Thèse de doctorat. laboratoire d'étude des phénomènes de transfert appliqués au bâtiment. La Rochelle, Université de La Rochelle, 176 pp.

Bradley, A. V., J. E. Thornes et L. Chapman (2001). "A method to assess the variation of urban canyon geometry from sky view factor transects." Atmospheric Science Letters 2(1-4), pp. 155--165.

Bradley, A. V., J. E. Thornes, L. Chapman, D. Unwin et M. Roy (2002). "Modelling spatial and temporal road thermal climatology in rural and urban areas using a GIS." Climate-research 22(1), pp. 41-55.

Bretz, S. E. et H. Akbari (1997). "Long-term performance of high-albedo roof coatings." Energy and Buildings 25(2), pp. 159--167.

Bretz, S., H. Akbari et A. Rosenfeld (1998). "Practical issues for using solar-reflective materials to mitigate urban heat islands." Atmospheric Environment 32(1), pp. 95--101.

Brown, M. J. et G. E. Streit (1998). Emergency Responders' "Rules-of-Thumb" for Air Toxics Releases in Urban Environments, Report LA-UR-98-4539, Los Alamos National Laboratory, University of California, United States.

Brutsaert, W. (1982). Evaporation into the atmosphere :theory, history and applications, Dordrecht. D. Reidel Publishing company.

Cano-Ruiz, J. A., D. Kong, R. B. Balas et W. W. Nazzaroff (1993). "Removal of reactive gases at indoor surfaces: combining mass transport and surfaces kinetics." Atmospheric Environment 27(13), pp. 135-152.

Canton, M. A., J. L. Cortegoso et C. de Rosa (1994). "Solar permeability of urban trees in cities of western Argentina." Energy and Buildings 20(3), pp. 219--230.

Capeluto, I. G. (1999). On the use of the solar collection envelope for determining the building shape. Solar World Congress 1999, Jerusalem, 1999, pp. 5p.

Capeluto, I. G. (2003). "Energy performance of the self-shading building envelope." Energy and Buildings 35(3), pp. 327--336.

Capeluto, I. G. et E. Shaviv (1994). ""MULRES-ENERGY" -- A CAD tool for determining the optimum configuration of multifamily residential buildings." Renewable Energy 5(5-8), pp. 1159--1166.

Capeluto, I. G. et E. Shaviv (2001). "On the use of "solar volume" for determining the urban fabric." Solar Energy 70(3), pp. 275--280.

Capeluto, I. G., A. Yezioro et E. Shaviv (2003). "Climatic aspects in urban design--a case study." Building and Environment 38(6), pp. 827--835.

Carnahan, W. H. et R. C. Larson (1990). "An analysis of an urban heat sink." Remote sensing of environment 33, pp. 65-71.

Carrilho da Graca, G., Q. Chen, L. R. Glicksman et L. K. Norford (2002). "Simulation of wind-driven ventilative cooling systems for an apartment building in Beijing and Shanghai." Energy and Buildings 34(1), pp. 1-11.

Chaiwiwatworakul, P. et S. Chirarattananon (2004). "An investigation of atmospheric turbidity of Thai sky." Energy and Buildings 36(7), pp. 650-659.

Chao, C. Y. H. (2001). "Comparison between indoor and outdoor air contaminant levels in residential buildings from passive sampler study." Building and Environment 36(9), pp. 999-1007.

Chapman, L., J. E. Thornes et A. V. Bradley (2001). "Rapid determination of canyon geometry parameters for use in surface radiation budgets." Theoretical and applied climatology 69(1-2), pp. 81-89.

Chen, Q. Y. (2004). "Using computational tools to factor wind into architectural environment design." Energy and Buildings 36(12), pp. 1197-1209.

Cheng, C. L., C. L. Chen, C. P. Chou et C. Y. Chan "A mini-scale modeling approach to natural daylight utilization in building design." Building and Environment In Press, Corrected Proof, pp. --.

Cheng, V., E. Ng et B. Givoni (2005). "Effect of envelope colour and thermal mass on indoor temperatures in hot humid climate." Solar Energy 78(4), pp. 528--534.

Chimklai, P., A. Hagishima et J. Tanimoto (2004). "A computer system to support Albedo calculation in urban areas." Building and Environment 39(10), pp. 1213-1221.

Chudnovsky, A., E. Ben-Dor et H. Saaroni (2004). "Diurnal thermal behavior of selected urban objects using remote sensing measurements." Energy and Buildings 36(11), pp. 1063--1074.

CITEPA (2001). Le CITEPA a 40 ans. CITEPA, Centre Interprofessionnel Technique d'étude de la Pollution Atmosphérique.

Compagnon, R. (2002). Assessment of the potential for solar energy applications in urban sites. Eurosun 2002, pp. 7p.

Compagnon, R. (2004). "Solar and daylight availability in the urban fabric." Energy and Buildings 36(4), pp. 321--328.

Cook, J. (1985). Passive cooling, UK, Cambridge, MA, London. MITPress.

Cotton, J. F. (1996). "Solid modeling as a tool for constructing solar envelopes." Automation in Construction 5(3), pp. 185--192.

Coulson, K. L. (1975). Solar and terrestrial radiation, New-York. Academic Press.

Cucumo, M., V. Marinelli et G. Oliveti (1999). "Data bank Experimental data of the Linke Turbidity factor and estimates of the Angstrom turbidity coefficient for two Italian localities." Renewable Energy 17(3), pp. 397--410.

Davies, T. D., B. Ramer, G. Kaspyzok et A. C. Delany (1984). "Indoor/Outdoor Ozone Concentrations at a Contemporary Art Gallery." Air Pollution Control Association 31(2), pp. 135-137.

de Dear, R. et G. Brager (2001). "The adaptive model of thermal comfort and energy conservation in the built environment." Int. J. Biometeorogology(45), pp. 100-108.

de Leeuw, F. et T. A. de Paus (2001). "Exeedance of ozone threshold values in Europe in 1997." Water, Air, and Soil Pollution 128, pp. 255-281.

Doulos, L., M. Santamouris et I. Livada (2004). "Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials." Solar Energy 77(2), pp. 231--249.

Dousset, B. M. (1992). Remote sensing of urban microclimates and their relationship to land use: A case study of the Los Angeles Basin, UNIVERSITY OF CALIFORNIA, LOS ANGELES.

Edmonds, I. R. et P. J. Greenup (2002). "Daylighting in the tropics." Solar Energy 73(2), pp. 111--121.

Ekberg, L. E. (2000). "Outdoor air contaminants and indoor air quality under transient conditions." Indoor Air Journal 4(189-196).

Eliasson, I. (1990). "Urban Geometry, surface temperature and air temperature." Energy and Buildings 15, pp. 141--145.

Eliasson, I. (1996). "Urban nocturnal temperatures, street geometry and land use." Atmospheric Environment 30(3), pp. 379--392.

Eliasson, I. (2000). "The use of climate knowledge in urban planning." Landscape and Urban Planning 48(1-2), pp. 31--44.

Ellefsen, R. (1991). "Mapping and measuring buildings in the canopy boundary layer in ten U.S. cities." Energy and Buildings 16(3-4), pp. 1025--1049.

Elnahas, M. M. et T. J. Williamson (1997). "An improvement of the CTTC model for predicting urban air temperatures." Energy and Buildings 25(1), pp. 41--49.

Erell, E., B. A. Portnov et Y. Etzion (2003). "Mapping the potential for climate-conscious design of buildings." Building and Environment 38(2), pp. 271--281.

Etzion, Y. et E. Erell (2000). "Controlling the transmission of radiant energy through windows: a novel ventilated reversible glazing system." Building and Environment 35(5), pp. 433--444.

Etzion, Y., B. A. Portnov, E. Erell, I. Meir et D. Pearlmutter (2001). "An open GIS framework for recording and analysing post-occupancy changes in residential buildings -- a climate-related case study." Building and Environment 36(10), pp. 1075--1090.

Evans, J. M. et S. de Schiller (1990). "Climate and urban planning: The example of the planning code for Vicente Lopez, Buenos Aires." Energy and Buildings 15, pp. 35--41.

Fan, H. et D. J. Sailor (2005). "Modeling the impacts of anthropogenic heating on the urban climate of Philadelphia: a comparison of implementations in two PBL schemes." Atmospheric Environment 39(1), pp. 73-84.

Feuermann, D. et A. Novoplansky (1998). "Reversible low solar heat gain windows for energy savings." Solar Energy 62(3), pp. 169--175.

Fezer, F. (1982). "The influence of building and location on the climate of settlements." Energy and Buildings 4(2), pp. 91--97.

Fezer, F. (1990). "Climatic change after regeneration in the oldest quarter of Heidelberg." Landscape and Urban Planning 19(1), pp. 47--54.

Fleurence, I. (2004). Etude conjointe des facteurs aérauliques et acoustiques en milieu tropical humide. Nantes, Université de Nantes, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes.

Frankhauser, P. (1994). La fractalité des structures urbaines. Villes, Paris. Anthropos.

Gadsden, S., M. Rylatt et K. Lomas (2003). "Putting solar energy on the urban map: a new GIS-based approach for dwellings." Solar Energy 74(5), pp. 397--407.

Gadsden, S., M. Rylatt, K. Lomas et D. Robinson (2003). "Predicting the urban solar fraction: a methodology for energy advisers and planners based on GIS." Energy and Buildings 35(1), pp. 37--48.

Garde, F., T. Mara, A. P. Lauret, H. Boyer et R. Celaire (2001). "Bringing simulation to implementation: presentation of a global approach in the design of passive solar buildings under humid tropical climates." Solar Energy 71(2), pp. 109--120.

Georgakis, C. et M. Santamouris (2005a). Canyon effects: Calculation of wind speed in an urban street canyon with the aid of a semi-empirical model based on experimental data. Internationnal Conference "Passive and Low Energy Cooling for the Buil Environment", Santorini, Greece, May 2005.

Georgakis, C. et M. Santamouris (2005b). Wind and Temperature in the Urban Environment. Natural ventilation in the urban environment - assessment and design. Wind and Temperature in the Urban Environment. C. Ghiaus et F. Allard, James and James, pp. 81-102.

Ghattas, G. (1999). Prévisions des pics d'ozone par arbre de régression, simple et agrégés par bootstrap. Paris, Société de statistique de France.

Ghiaus, C., F. Allard, F. Caini et A. Gazeau (2000). La prévision des pics d'ozone en régime de brise à l'aide de la modélisation neuro-floue. Journées thématiques Automatique et Environnement, Nancy, France.

Giridharan, R., S. Ganesan et S. S. Y. Lau (2004). "Daytime urban heat island effect in high-rise and high-density residential developments in Hong Kong." Energy and Buildings 36(6), pp. 525--534.

Giridharan, R., S. S. Y. Lau et S. Ganesan (2005). "Nocturnal heat island effect in urban residential developments of Hong Kong." Energy and Buildings 37(9), pp. 964--971.

Givoni, B. (1991). "Impact of planted areas on urban environmental quality: A review." Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere 25(3), pp. 289--299.

Givoni, B. (1992). "Climatic aspects of urban design in tropical regions." Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere 26(3), pp. 397--406.

Givoni, B. (1994). "Building design principles for hot humid regions." Renewable Energy 5(5-8), pp. 908--916.

Givoni, B. (1994). "Urban design for hot humid regions." Renewable Energy 5(5-8), pp. 1047--1053.

Givoni, B. et M. E. Hoffman (1968). Effect of building materials on internal temperatures. Research report. Technion Haifa, Buildings research stations, avril.

Givoni, B. et M. E. Hoffman (1972). Prediction of the thermal bahavior of full scale buildings : first research report to the US National Bureau of Standards. Technion Haifa, Buildings research stations, février.

Glockner, S., J.-P. Caltagirone et P. Morel (1999). "Modélisation d'écoulements dans des espaces urbains." International Journal of Thermal Sciences 38(8), pp. 703-711.

Golany, G. S. (1996). "Urban design morphology and thermal performance." Atmospheric Environment 30(3), pp. 455--465.

Gomez, F., L. Gil et J. Jabaloyes (2004). "Experimental investigation on the thermal comfort in the city: relationship with the green areas, interaction with the urban microclimate." Building and Environment 39(9), pp. 1077--1086.

Goodridge, J. D. (1992). "Urban bias influences on long-term California air temperature trends." Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere 26(1), pp. 1-7.

Grau, K. et K. Johnsen (1995). "General shading model for solar building design." Ashrae Transactions 101(2), pp. 13p.

Greenup, P. J. et I. R. Edmonds (2004). "Test room measurements and computer simulations of the micro-light guiding shade daylight redirecting device." Solar Energy 76(1-3), pp. 99--109.

Grimmond, C. S. B. et T. R. Oke (1999). "Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form." Journal of Applied Meteorology 38(9), pp. 1262-1292.

Grimmond, C. S. B. et T. R. Oke (1999). "Heat storage in urban areas : Local-scale observations and evaluation of a simple model." Journal-of-applied-meteorology 38(7), pp. 922-940.

Grimmond, C. S. B., H. A. Cleugh et T. R. Oke (1991). "An objective urban heat storage model and its comparison with other schemes." Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere 25(3), pp. 311--326.

Grimmond, C. S. B., S. K. Potter, H. N. Zutter et Souch-C (2001). "Rapid methods to estimate sky-view factors applied to urban areas." International Journal of Climatology 21(7), pp. 903-913.

Groleau, D. et C. Marenne (1995). Environmental specificities of the urban built forms. Rebuilt-rebuilding in the European City-Integration, Corfou, 29-30 juin, 1 juillet 1995, pp. 8.

Groleau, D., F. Fragnaud et J.-M. Rosant (2003). Simulation of the radiative behavior of an urban quarter of Marseille with the Solene model. Fifth international conference on urban climate, Lodz.

Gupta, V. K. (1984). "Solar radiation and urban design for hot climates." Planning and design : Environment and planning B 11, pp. 435-454.

Hajat, S., R. Kovats, R. Atkinson et H. A. (2002). "Relation between elevated ambient temperature and mortality: A review of the epidemiological evidence." Epidemiological Reviews(24), pp. 190-202.

Hales, C. H., A. M. Rollinson et F. H. Shair (1974). "Experimental Verification of Linear Combination Model for Relating Indoor-Outdoor Pollutant Concentrations." Environment Science and Technology Journal 8(5), pp. 452-453.

Hanel, G., D. Weidert et R. Busen (1990). "Absorption of solar radiation in an urban atmosphere." Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere 24(2), pp. 283--292.

Harman, I. N., M. J. Best et S. E. Belcher (2004). "Radiative Exchange in an Urban Street Canyon." Boundary-Layer Meteorology 110(2), pp. 301-316.

Harzallah, A. Instrumentation des phénomènes d'ambiance dans les théories architecturales de la modernité (fin 19e-début 20e siècle). Nantes, Université de Nantes Ecole Polytechnique de L'université de Nantes.

Hayes, S. R. (1991). "Use of an Indoor Air Quality Model (IAQM) to Estimate Indoor Ozone Levels." Journal Air & Waste Management Association 41(2), pp. 161-170.

Heino, R. (1999). "Homogeneity of the long-term urban data records." Atmospheric Environment 33(24-25), pp. 3879-3883.

Herbert, J. M., G. T. Johnson et A. J. Arnfield (1998). "Modelling the thermal climate in city canyons." Environmental Modelling and Software 13(3-4), pp. 267--277.

Holmer, B. (1992). "A simple operative method for determination of sky view factors in complex urban canyons from fisheye photographs." Meteorologische-Zeitschrift 1(5), pp. 236-239.

Hoppe, P. (1991). "Improving indoor thermal comfort by changing outdoor conditions." Energy and Buildings 16(1-2), pp. 743--747.

Horbert, M. et A. Kirchgeorg (1982). "Climatic and air-hygienic aspects in the planning of inner-city open spaces: Berlin grosser tiergarten." Energy and Buildings 5(1), pp. 11--22.

Hosker, R. P. J. (1984). Flow and Diffusion Near Obstacles, Atmospheric Science and Power Production - DOE/TIC-27601, U.S. Dept. Of Energy, Wash., DC.

Hotchkiss, R. S. et F. H. Harlow (1973). Air pollution transport in street canyons, Technical Report EPA-R4-73-029, NTIS PB-233 252, Prepared by Los Alamos National Laboratory for U.S. Environmental Protection Agency.

Houpert, S. (2003). Approche inverse pour la résolution de contraintes solaires et visuelles dans le projet architectural et urbain. Nantes, Université de Nantes, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes.

Huang, Y. J. A. H. T. H. R. A. (1987). "he potential of vegetation in reducing summer cooling loads in residential buildings." Climate and Applied Meteorology 26(9), pp. 1103–1116.

Hui, S. C. M. (2001). "Low energy building design in high density urban cities." Renewable Energy 24(3-4), pp. 627--640.

Huré, P. et X. Rousselin (1999). L'émission d'ozone par les photocopieurs et les imprimantes laser, ED1422. France, INRS.

Inard, C. (1988). Contribution à l'étude du couplage thermique entre une source de chaleur et un local. Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, INSA de Lyon.

Iordache, V. (2003). Etude de l'impact de la pollution atmosphérique sur l'exposition des enfants en milieu scolaire - Recherche de moyens de prédiction et de protection. LEPTAB. La Rochelle, Université de La Rochelle.

Ip, K., M. Lam et A. miller (2004). Bioshaders for sustainable buildings. CIB World building Congress,Building for the future : the 5th international conference on indoor air quality, ventilation and energy conservation in buildings proceedings, Toronto Canada, 1-7 mai.

ISO (1996). Isolation thermique - Détermination de l'étanchéité à l'air des bâtiments - Méthode de pressurisation par ventilateur, Norme Internationale.

Jiang, Y. et Q. Chen (2002). "Effect of fluctuating wind direction on cross natural ventilation in buildings from large eddy simulation." Building and Environment 37(4), pp. 379-386.

Jorge, J., J. Puigdomenech et J. A. Cusido (1993). "A practical tool for sizing optimal shading devices." Building and Environment 28(1), pp. 69--72.

Kabre, C. (1999). "WINSHADE A computer design tool for solar control." Building and Environment 34(2), pp. 263-274.

Kanda, M., T. Kawai, M. Kanega, R. Moriwaki, K. Narita et A. Hagishima (2005). "A Simple Energy Balance Model for Regular Building Arrays." Boundary-Layer Meteorology 116(3), pp. 423 - 443.

Kaplan, H. et N. Dinar (1996). "A lagrangian dispersion model for calculating concentration distribution within a built-up domain." Atmospheric Environment 30(24), pp. 4197-4207.

Karayel, M., M. Navvab, E. Ne'eman et S. Selkowitz (1984). "Zenith luminance and sky luminance distributions for daylighting calculations." Energy and Buildings 6(3), pp. 283--291.

Karl, T. R. et P. D. Jones (1989). "Urban bias in area-averaged surface air temperature trends." Bulletin - American Meteorological Society 70(3), pp. 265-270.

Katzschner, L. (2000). Urban climate maps - a tool for calculations of thermal conditions in outdoor spaces. Architecture, city environment, Proceedings of PLEA, Cambridge july 2000, London, James \& JAmes, pp. pp. 453-458.

Kensek, K., D. Noble, M. Schiler et E. Setiadarma (1996). "Shading Mask: a teaching tool for sun shading devices." Automation in Construction 5(3), pp. 219--231.

Kikegawa, Y., Y. Genchi, H. Kondo et K. Hanaki "Impacts of city-block-scale countermeasures against urban heat-island phenomena upon a building's energy-consumption for air-conditioning." Applied Energy In Press, Corrected Proof, pp. --.

Kirchner, S., O. Bailloit, B. Collignan, J.-P. Flori, O. Garret, A.-M. Laurent, Y. L. Moullec, P. O'Kelly, O. Ramalho, M. Sauvaget, J. G. Villenave et C. Vedel (2001). Experimental study on the transfert conditions of local atmospheric pollution to indoor dwelling environnement. Final Report, Convention Recherche n° 98.04.051, ADEME, France, pp. 147-148.

Kittler, R. (1994). "Some qualities of scattering functions defining sky radiance distributions." Solar Energy 53(6), pp. 511--516.

Klenø, J. G., P. A. Clausen, C. J. Weschler et P. Wolkoff (2001). "Determination of ozone removal rates by selected building products using the FLEC emission cell,." Environmental Science and Technology 36(12), pp. 2548-2553.

Knowles, R. L. (1975). Energy and form, an ecological approach to urban growth, Cambridge, Mass. M.I.T. Press.

Knowles, R. L. (1981). Sun rythm form, Cambridge (MA). MIT Press.

Knowles, R. L. (1999). The solar envelope, http://www-rcf.usc.edu/~rknowles/sol_env/sol_env.html.

Koene, M. (1992). "Les émissions d'ozone à l'origine de problèmes climatiques." JANUS 10, pp. 264.

Koike, S. (1984). Public choice of property rights to sunlight: a study of japanese sunshine rights, University Of Oregon.

Kolokotroni, M., I. Giannitsaris et R. Watkins (2006). "The effect of the London urban heat island on building summer cooling demand and night ventilation strategies." Solar Energy

Kondo, A., M. Ueno, A. Kaga et K. Yamaguchi (2001). "The influence of urban canopy configuration on urban albedo." Boundary-layer-meteorology 100(2), pp. 225-242.

Kondratyev, K. Y. (1969). Radiation in the Atmosphere, New-York. Academic Press.

Kovar-Panskus, A., L. Moulinneuf, E. Savory, A. Abdelqari, J. F. Sini, J. M. Rosant, A. Robins et N. Toy (2002). "A Wind Tunnel Investigation of the Influence of Solar-Induced Wall- Heating on the Flow Regime within a Simulated Urban Street Canyon." Water Air \& Soil Pollution Focus 2(5-6), pp. 555-571.

Kristl, Z. et A. Krainer (2001). "Energy evaluation of urban structure and dimensioning of building site using iso-shadow method." Solar Energy 70(1), pp. 23--34.

Lagouarde, J.-P., P. Moreau, M. Irvine, J.-M. Bonnefond, J. A. Voogt et F. Solliec (2004). "Airborne experimental measurements of the angular variations in surface temperature over urban areas: case study of Marseille (France)." Remote Sensing of Environment 93(4), pp. 443--462.

Landsberg, H. E. (1979). "Atmospheric changes in a growing community (the Columbia, Maryland experience)." Urban Ecology 4(1), pp. 53-81.

Landsberg, H. E. (1981). The urban climate, Academic Press. International geophysics series, ISSN 0074-6142, 28, New-York, Edited by J. Van Mieghem, H. L. Hales et W. L. Donn. 275 pp. A Subsidiary of Harcourt Brace Jovanovich, Publishers, ISBN 0-12-435960-4.

Lazar, R. et A. Podesser (1999). "An urban climate analysis of Graz and its significance for urban planning in the tributary valleys east of Graz (Austria)." Atmospheric Environment 33(24-25), pp. 4195--4209.

Lee, S.-C. (1997). "Comparison of indoor and outdoor air quality at two staff quarters in Hong Kong." Environment International 23(6), pp. 791-797.

Lepelley, N. (1998). Modèle d'exposition quotidienne de la population harvraise à la pollution atmospherique. Rapport Primequal-Predit, Air Normand, Rouen, France.

Lettau, H. H. (1969). "Note on aerodynamic roughness-parameter estimation on the basis of roughness-element description." Journal of Applied Meteorology(8), pp. 828-832.

Levinson, R. et H. Akbari (2002). "Effects of composition and exposure on the solar reflectance of portland cement concrete." Cement and Concrete Research 32(11), pp. 1679--1698.

Levinson, R., P. Berdahl, A. Asefaw Berhe et H. Akbari (2005). "Effects of soiling and cleaning on the reflectance and solar heat gain of a light-colored roofing membrane." Atmospheric Environment 39(40), pp. 7807--7824.

Leyrit, C. et J.-C. Poutchy-Tixier (1999). Glossaire des concepts de développement et de transports durables, Association Mondiale de la Route, Groupe Transport Durable, Février.

Liébard, A. et A. Herde (2006). Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques : Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable. Le Moniteur.

Littlefair, P. (1998). "Passive solar urban design : ensuring the penetration of solar energy into the city." Renewable and Sustainable Energy Reviews 2(3), pp. 303--326.

Littlefair, P. (2001). "Daylight, sunlight and solar gain in the urban environment." Solar Energy 70(3), pp. 177--185.

Littlefair, P. J. (1987). "Prediction of reflected solar dazzle from sloping facades." Building and Environment 22(4), pp. 285--291.

Long, N. (2003). Analyses morphologiques et aérodynamiques du tissu urbain : application à la micro-climatologie de Marseille pendant la campagne ESCOMPTE, Université des Sciences et Techniques de Lille.

Lougeay, R., A. Brazel et M. Hubble (1996). "Monitoring intra-urban temperature patterns and associated land cover in Phoenix, Arizona using Landsat thermal data." Geocarto International 11, pp. 79-89.

Lukac, J. (1994). "Trend of solar radiation attenuation by atmospheric aerosols." Atmospheric Environment 28(5), pp. 961--962.

Luxmoore, D. A., M. T. R. Jayasinghe et M. Mahendran (2005). "Mitigating temperature increases in high lot density sub-tropical residential developments." Energy and Buildings 37(12), pp. 1212--1224.

Makar, P. A., S. Gravel, V. Chirkov, K. B. Strawbridge, F. Froude, J. Arnold et J. Brook (2006). "Heat flux, urban properties, and regional weather." Atmospheric Environment

Mardaljevic, J. (2004). The quantification of solar access in dense urban environments, diaporama.

Mardaljevic, J. et M. Rylatt (2003). "Irradiation mapping of complex urban environments: an image-based approach." Energy and Buildings 35(1), pp. 27--35.

Masmoudi, S. et S. Mazouz (2004). "Relation of geometry, vegetation and thermal comfort around buildings in urban settings, the case of hot arid regions." Energy and Buildings 36(7), pp. 710-719.

Masson, V. (2000). "A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models." Boundary-layer meteorology 94(3), pp. 357-397.

Mazria, E. (1981). Le guide de l'énergie passive, paris. Parenthèses.

Meinders, E. R., K. Hanjalic et T. H. Van Der Meer (1998). Similarity and dissimilarity between the surface heat transfer and the flow structure in turbulent flows over surface-mounted cubes. Heat Transfer, proceedings of 11th IHTC.

Meir, I. A., D. Pearlmutter et Y. Etzion (1995). "On the microclimatic behavior of two semi-enclosed attached courtyards in a hot dry region." Building and Environment 30(4), pp. 563--572.

Meunier, V. (2003). De l'esquisse à l'optimisation d'un élément de paroi multicritère : Proposition d'une méthodologie, Université de Nantes; Ecole Polytechnique de L'université de Nantes.

Miguet, F. et D. Groleau (2002). "A daylight simulation tool for urban and architectural spaces : Application to transmitted direct and diffuse light through glazing." Building and Environment 37(8-9), pp. 833-843.

Mills, G. (1997). "The radiative effects of building groups on single structures." Energy and Buildings 25(1), pp. 51-61.

Mills, G. M. et A. J. Arnfield (1993). "Simulation of the energy budget of an urban canyon--II. Comparison of model results with measurements." Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere 27(2), pp. 171--181.

Mochida, A., H. Yoshino, S. Miyauchi et T. Mitamura (2006). "Total analysis of cooling effects of cross-ventilation affected by microclimate around a building." Solar Energy

Montávez, J. P., J. F. González-Rouco et F. V. Valero (2003). A set of equations for determining the maximum intensity of nocturnal urban heat island. Fifth International Conference on Urban Climate, ICUC-5, Todz, 1-5 september 2003.

Murakami, S. (2004). "Indoor/outdoor climate design by CFD based on the Software Platform." International Journal of Heat and Fluid Flow 25(5), pp. 849-863.

Murray, C. et A. Lopez Eds. (2002). World Health Report 2002, Geneva. 230 pp. World Health Organization.

Musy, M. (1999). Génération automatique de modèles zonaux pour l'étude du comportement thermo-aéraulique des bâtiments. Thèse de Doctorat, Université de La Rochelle.

Nakagawa, K. (1988). "Estimation of the sky view-factor from a fish-eye lens image, considering the anisotropy of the downward longwave radiation." Journal-of-the-meteorological-Society-of-Japan 66(6), pp. 903-912.

Navvab, M., M. Karayel, E. Ne'eman et S. Selkowitz (1984). "Analysis of atmospheric turbidity for daylight calculations." Energy and Buildings 6(3), pp. 293--303.

Nazaroff, W. W., A. J. Gadgil et C. J. Weschler (1993). Critique of the use of deposition velocity in modelling indoor air quality. Modeling of indoor air quality and exposure. Critique of the use of deposition velocity in modelling indoor air quality. N. L. Nagda. Philadelphia, American Society for Testing and Materials, pp. 81-104.

Niachou, A., K. Papakonstantinou, M. Santamouris, A. Tsangrassoulis et G. Mihalakakou (2001). "Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance." Energy and Buildings 33(7), pp. 719--729.

Nichol, J. E. (1996). "High-resolution surface temperature patterns related to urban morphology in a tropical city : a satellite-based study." Journal-of-applied-meteorology-1988 35(1), pp. 135-146.

Nicholson, S. E. (1975). "A pollution model for street-level air." Atmospheric Environment (1967) 9(1), pp. 19-31.

Niu, J. (2004). "Some significant environmental issues in high-rise residential building design in urban areas." Energy and Buildings 36(12), pp. 1259--1263.

Nunez, M., I. Eliasson et J. Lindgren (2000). "Spatial variations of incoming longwave radiation in Goteborg, Sweden." Theoretical-and-applied-climatology. 67(3-4), pp. 181-192.

Offerle, B., C. S. B. Grimmond, K. Fortuniak, T. R. Oke et K. Klysik (2003). Temporal variability in heat fluxes over a northern european downtown. Fifth International Conference on Urban Climate, ICUC-5, Todz, 1-5 september 2003.

Oke, T. R. (1984). "Towards a prescription for the greater use of climatic principles in settlement planning." Energy and Buildings 7(1), pp. 1--10.

Oke, T. R. (1987). Boundary layer climates, Second Edition. 435 pp. University press, Cambridge, ISBN 0 415 04319 0.

Oke, T. R. (1988). "Street design and urban canopy layer climate." Energy and Buildings 11(1-3), pp. 103--113.

Oke, T. R., G. Zeuner et E. Jauregui (1992). "The surface energy balance in Mexico City." Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere 26(4), pp. 433--444.

Okeil, A. (1993). urban form and solar energy utilization. Solar energy in architecture and urban planning : Third european conference on architecture. Florence,It 17-21 may 1993, Bedford (UK), H.S. Stephens and Associates, pp. pp. 497-500.

Okeil, A. (2004). In search for energy efficient urban forms : the residential solar block. CIB World building Congress,Building for the future : the 5th international conference on indoor air quality, ventilation and energy conservation in buildings proceedings, Toronto Canada, 1-7 mai.

Olgyay, V. (1973). Design with climate, 4ed. Princeton University Press.

Panerai, P. et J. Langé (2001). Formes urbaines tissus urbains : essai de bibliographie raisonnée 1940-2000. Paris.

Panskus, K. (2002).

Papadopoulos, A. M. (2001). "The influence of street canyons on the cooling loads of buildings and the performance of air conditioning systems." Energy and Buildings 33(Issue 6), pp. 601-607.

Pardijak, E. R., M. J. Brown et N. Bagal (2004). Improved Velocity Deficit Parameterizations for a Fast Response Urban Wind Model. 84th American Meteorological Society Annual Meeting, Seattle, WA, January 13, 2004.

Paszynski, J. (1991). "Mapping urban topoclimates." Energy and Buildings 16(3-4), pp. 1059--1062.

Pawlak, W. et K. Fortuniak (2003). Application of physical model to study effective albedo of the urban canyon. Fifth international conference on urban climate, Lodz Pl 1-5 septembre 2003, pp. 233-236.

Pearlmutter, D., A. Bitan et P. Berliner (1999). "Microclimatic analysis of "compact" urban canyons in an arid zone." Atmospheric Environment 33(24-25), pp. 4143--4150.

Peneau, J.-P. (1995). "Des densités aux rugosités : les modalités instrumentales d'une transposition." Annales de la recherche urbaine, pp. 128-134.

Peneau, J.-P. (1998). Quelques éléments sur l'aérisme et l'ajustement climatique de la ville au siècle des Lumières. Nantes, Université de Nantes.

Pereira, F. O. R., C. A. N. Silva et B. Turkienikz (2001). "A methodology for sunlight urban planning: a computer-based solar and sky vault obstruction analysis." Solar Energy 70(3), pp. 217--226.

Plate, E. J. et H. Kiefer (2001). "Wind loads in urban areas." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 89(14-15), pp. 1233-1256.

Prado, R. T. A. et F. L. Ferreira (2005). "Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials." Energy and Buildings 37(Issue 4), pp. 295-300.

Rao, P. K. (1972). "Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite." Bulletin of the american meterological society 53, pp. 647-648.

Ratti, C. et P. Richens (2004). "Raster analysis of urban form." Planning and design : Environment and planning B 31(2), pp. 297-309.

Ratti, C., D. Raydan et K. Steemers (2003). "Building form and environmental performance: archetypes, analysis and an arid climate." Energy and Buildings 35(1), pp. 49--59.

Ribéron, J. (1991). Guide méthodologique pour la mesure de la perméabilité à l'air des enveloppes de bâtiments. Cahiers du CSTB n° 2493. Paris, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, pp. 21.

Richards, K. et T. R. Oke (2002). "Validation and results of a scale model of dew deposition in urban environments." International-journal-of-climatology 22(15), pp. 1915-1933.

Robinson, N. (1966). Solar Radiation. New-York.

Robitu, M. (2005). Etude de l'interaction entre le bâtiment et son environnement urbain : influence sur les conditions de confort en espaces extérieurs. Nantes, Université de Nantes, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes.

Robitu, M., M. Musy, C. Inard et D. Groleau (2006). "Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate." Solar Energy 80(4), pp. 435-447.

Rockle, R. (1990). Bestimmung der Stomungsverhaltnisse im Bereich komplexer Bebauungsstrukturen. Ph.D. thesis, Vom Fachbereich Mechanik, der Technischen Hochschule Darmstadt, Germany.

Rohinton, E. M. d. P. (1997). Summertime heat island effects of urban design parameters, University of Michigan.

Romieu, I., M. C. Lugo, S. Colome, A. M. Garcia, M. A. Hernandez, A. Geyh, S. V. Ruiz et E. R. Palazuelos (1998). "Evaluation of Indoor Ozone Concentration and Predictors of Indoor-Outdoor Ratio in Mexico City." International Journal Air & Waste Management Association 48, pp. 327-336.

Rosenfeld, A. H., H. Akbari, S. Bretz, B. L. Fishman, D. M. Kurn, D. Sailor et H. Taha (1995). "Mitigation of urban heat islands: materials, utility programs, updates." Energy and Buildings 22(3), pp. 255--265.

Rotach, M. W. (1999). "On the influence of the urban roughness sublayer on turbulence and dispersion." Atmospheric Environment 33(24-25), pp. 4001-4008.

Runsheng, T., I. A. Meir et Y. Etzion (2003). "An analysis of absorbed radiation by domed and vaulted roofs as compared with flat roofs." Energy and Buildings 35(6), pp. 539--548.

Rylatt, M., S. Gadsden et K. Lomas (2001). "GIS-based decision support for solar energy planning in urban environments." Computers,Environment and Urban Systems 25(6), pp. 579--603.

Rylatt, M., S. Gadsden et K. Lomas (2003). "Using GIS to estimate the replacement potential of solar energy for urban dwellings." Environment and planning. B, Planning and design(30, Part 1), pp. 51-68.

Saberski, R. H., D. A. Simena et F. H. Shair (1973). "Concentrations, Decay Rates and Removal of Ozone and Their Relation to Establishing Clean Indoor Air." Environmental Science And Technology Journal 7(4), pp. 157-166.

Sailor, D. J. et L. Lu (2004). "A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas." Atmospheric Environment 38(17), pp. 2737-2748.

Sakakibara, Y. (1996). "A numerical study of the effect of urban geometry upon the surface energy budget." Atmospheric Environment 30(3), pp. 487--496.

Salazar Trujillo, J. H. (1998). "Solar performance and shadow behaviour in buildings. Case study with computer modelling of a building in Loranca, Spain." Building and Environment 33(2-3), pp. 117--130.

Salmon, L. G., G. R. Cass, K. Bruckman et J. Haber (2000). "Ozone exposure inside museums in the historis central district of Krakow, Poland." Atmospheric Environment 34, pp. 3823-3832.

Sanchez de la Flor, F. et S. A. Dominguez (2004). "Modelling microclimate in urban environments and assessing its influence on the performance of surrounding buildings." Energy and Buildings 36(5), pp. 403--413.

Santamouris, M., N. Papanikolaou, I. Livada, I. Koronakis, C. Georgakis, A. Argiriou et D. N. Assimakopoulos (2001). "On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings." Solar Energy 70(3), pp. 201-216.

Scherer, D., U. Fehrenbach, H. D. Beha et E. Parlow (1999). "Improved concepts and methods in analysis and evaluation of the urban climate for optimizing urban planning processes." Atmospheric Environment 33(24-25), pp. 4185--4193.

Schiller, S. et J. M. Evans (1996). "Training architects and planners to design with urban microclimates." Atmospheric Environment 30(3), pp. 449--454.

Schilling, D. (1984). "Formes urbaines et consommation d'énergie." METROPOLIS Urbanisme/ Planification régioale/ Environnement, pp. 88-96.

Shabbir, K. A. (1993). the bio-climatic potentials of the streets in the urban areas of the tropics. Solar energy in architecture and urban planning : Third european conference on architecture. Florence,It 17-21 may 1993, Bedford (UK), H.S. Stephens and Associates, pp. pp. 492-494.

Shair, F. H. et K. L. Heitner (1974). "Theoretical model for relating indoor pollutant concentrations to those outside." Environmental Science And Technology Journal 8(5), pp. 444-451.

Shashua-Bar, L. et M. E. Hoffman (2003). "Geometry and orientation aspects in passive cooling of canyon streets with trees." Energy and Buildings 35(1), pp. 61-68.

Shashua-Bar, L., M. E. Hoffman et Y. Tzamir (2006). "Integrated thermal effects of generic built forms and vegetation on the UCL microclimate." Building and Environment 41(3), pp. 343--354.

Shaviv, E. (1984). "Climate and building design - tradition, research and design tools." Energy and Buildings 7(1), pp. 55--69.

Sievers, U. et W. Zdunkowski (1985). "A numerical simulation scheme for the albedo of city street canyons." Boundary-layer meteorology 33, pp. 245-257.

Simoni, M., P. Biavati, L. Carrozzi, G. Viegi, P. Paoletti, G. Matteucci, G. L. Ziliani, E. Ioannilli et T. Sapigni (1998). "The Po river delta (North Italy) indoor epidemiological study: home characteristics, indoor pollutants ans subjects' daily activity pattern." Indoor Air 8, pp. 70-79.

Simpson, J. R. et E. G. McPherson (1997). "The effects of roof albedo modification on cooling loads of scale model residences in Tucson, Arizona." Energy and Buildings 25(2), pp. 127-137.

Siret, D. (1997). Propositions pour une approche déclarative des ambiances dans le projet architectural. Nantes, Université de Nantes (I.S.I.T.E.M.)Institut des Sciences de l'Ingénieur en Thermique Energétique des Matériaux.

Siret, D. et S. Houpert (2004). "A geometrical framework for solving sunlighting problems within CAD systems." Energy and Buildings 36(4), pp. 343--351.

Spacetec (1982). Die Anwendung der Spacetec KlimatopKarte in der Bauleitplanung. Freiburg, SPACETEC.

Svensson, M. K. (2004). "Sky view factor analysis - implications for urban air temperature differences." Meteorological-applications 11(3), pp. 201-211.

Swaid, H. (1992). "Intelligent urban forms (IUF) a new climate-concerned, urban planning strategy." Theoretical-and-applied-climatology. 46(2-3), pp. 179-191.

Swaid, H. (1993). "Urban climate effects of artificial heat sources and ground shadowing by buildings." International journal of climatology 13, pp. 797-812.

Swaid, H. et M. E. Hoffman (1990). "Thermal effects of artificial heat sources and shaded ground areas in the urban canopy layer." Energy and Buildings 15, pp. 253-261.

Swaid, H., M. Bar-El et M. E. Hoffman (1993). "A bioclimatic design methodology for urban outdoor spaces." Theoretical and applied climatology 48, pp. 49-61.

Synnefa, A., M. Santamouris et I. Livada "A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment." Solar Energy In Press, Corrected Proof, pp. --.

Szokolay, S. V. (1996). Thermal Design of Houses for warm-humid climates. Building \& Urban Renewal. Proceedings. Louvain-la-Neuve, pp. 337-342.

Taha, H. (1997). "Modeling the impacts of large-scale albedo changes on ozone air quality in the South Coast Air Basin." Atmospheric Environment 31(11), pp. 1667--1676.

Taha, H., H. Akbari, A. Rosenfeld et J. Huang (1988). "Residential cooling loads and the urban heat island--the effects of albedo." Building and Environment 23(4), pp. 271--283.

Tanaka, I., M. Okazaki et T. Horikoshi (2004). Evaporative cooling effect of the pavement covered with reused Sanshu roofing tiles. CIB World building Congress,Building for the future : the 5th international conference on indoor air quality, ventilation and energy conservation in buildings proceedings, Toronto Canada, 1-7 mai.

Tang R, E. Y. E. E. (2003). "Experimental studies on a novel roof pond configuration for the cooling of buildings." Renewable Energy 28(10), pp. 1513-1522.

Tang, R. et Y. Etzion (2004). "On thermal performance of an improved roof pond for cooling buildings." Building and Environment 39(2), pp. 201--209.

Tang, R., I. A. Meir et T. Wu (2006). "Thermal performance of non air-conditioned buildings with vaulted roofs in comparison with flat roofs." Building and Environment 41(3), pp. 268--276.

Teller, J. et S. Azar (2001). "Townscope II--A computer system to support solar access decision-making." Solar Energy 70(3), pp. 187--200.

Terjung, W. H. et S. F. Louie-Stella (1973). "Solar radiation and urban heat islands." Annals of the association of American Geographers 63(n°2), pp. 181-207.

Terjung, W. H. et S. F. Louie-Stella (1974). "A climatic model of urban energy budgets." Geographical analysis 6, pp. 341-367.

The Pacific 2001 Air Quality Study II 40(15), pp. 2750-2766.

Theurer, W. (1999). "Typical building arrangements for urban air pollution modelling." Atmospheric Environment 33(24-25), pp. 4057-4066.

Todhunter, P. E. et W. H. Terjung (1990). "The response of urban canyon energy budgets to variable synoptic weather types-- A simulation approach." Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere 24(1), pp. 35--42.

Tsai, M. Y. et K. S. Chen (2004). "Measurements and three-dimensional modeling of air pollutant dispersion in an Urban Street Canyon." Atmospheric Environment 38(35), pp. 5911-5924.

Tsangrassoulis, A. et M. Santamouris (2003). "Numerical estimation of street canyon albedo consisting of vertical coated glazed facades." Energy and Buildings 35(5), pp. 527--531.

Upmanis, H. et D. L. Chen (1999). "Influence of geographical factors and meteorological variables on nocturnal urban-park temperature differences - a case study of summer 1995 in Goteborg, Sweden." Climate research 13(2), pp. 125-139.

Urban Ventilation 80(4), pp. 371-382.

Urban Ventilation 80(4), pp. 383-392.

Urban Ventilation 80(4), pp. 423-434.

Valejo, C. (2006). Techniques passives de rafraîchissement en climat tropical d'altitude, Université de Nantes; Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes.

Vinet, J. (2000). Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain. Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs, Université de Nantes Ecole Polytchnique de l'Univeristé de Nantes.

Voogt, J. A. (1989). Validation of an urban canyon radiation model for nocturnal long-wave radiative fluxes and the effect of surface geometry on cooling in urban canyons, University of British Columbia.

Voogt, J. A. et C. S. B. Grimmond (2000). "Modeling surface sensible heat flux using surface radiative temperatures in a simple urban area." Journal of applied meteorology 39, pp. 1679-1699.

Voogt, J. A. et T. R. Oke (2003). "Thermal remote sensing of urban climates." Remote Sensing of Environment 86(3), pp. 370--384.

Weschler, C. J. (2000). "Ozone in Indoor Environments: Concentration and Chemistry." Indoor Air Journal, 10, pp. 269-288.

Weschler, C. J., H. C. Shields et D. V. Naik (1989). "Indoor Ozone Exposures." J Air Pollut Control Assoc 39, pp. 1562-1568.

Wolkoft, P. (1999). "Photocopies and indoor air pollution." Atmospheric Environment 33, pp. 2129-2130.

Wright, A. J., A. N. Young et S. Natarajan (2005). "Dwelling temperatures and comfort during the August 2003 heat wave." Building Services Engineering Research and Technology 26(4), pp. 285-300.

Wurtz, E. (1995). Modélisation tridimensionnelle des transferts thermiques et aérauliques dans le bâtiment en environnement orienté objet. Thèse de Doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France.

Yamashita, S. (1974). "A comparative study of turbidity in an urban and a rural environment at Toronto." Atmospheric Environment (1967) 8(5), pp. 507--518.

Yamashita, S. et K. Sekine (1990). "Some studies on the earth's surface conditions relating to the urban heat island." Energy and Buildings 15, pp. 279--288.

Yamashita, S., K. Sekine, M. Shoda, K. Yamashita et Y. Hara (1986). "On relationships between heat island and sky view factor in the cities of Tama River basin, Japan." Atmospheric Environment (1967) 20(4), pp. 681--686.

Yezioro, A. et E. Shaviv (1994). "SHADING: a design tool for analyzing mutual shading between buildings." Solar Energy 52(n°1), pp. 27-37.

Yezioro, A., I. G. Capeluto et E. Shaviv (2006). "Design guidelines for appropriate insolation of urban squares." Renewable Energy 31(7), pp. 1011--1023.

Yocom, J. E. (1982). "Indoor-outdoor air quality relationship. A critical review." JAPCA 32(500-520).

Zhang, J. et P. J. Lioy (1994). "Ozone in Residential Air: Concentrations, I/O Ratios, Indoor Chemistry, and Exposures." Indoor Air Journal 4(95-105).

Zhou, N., W. Gao, M. Nishida, H. Kitayama et T. Ojima (2004). "Field study on the thermal environment of passive cooling system in RC building." Energy and Buildings 36(12), pp. 1265--1272.

View publication stats