

Du bâtiment à la ville, du microclimat à la demande énergétique

Emmanuel Bozonnet, Francis Allard, M. Chazelas, G. Guarracino, Marjorie
Musy

► **To cite this version:**

Emmanuel Bozonnet, Francis Allard, M. Chazelas, G. Guarracino, Marjorie Musy. Du bâtiment à la ville, du microclimat à la demande énergétique. Jac Fol. Futur de l'habitat, Co-édition Jean-Michel Place / PUCA, pp.139-154, 2008. hal-00542415

HAL Id: hal-00542415

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00542415>

Submitted on 2 Feb 2011

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.

Concevoir et construire en milieu urbain

Du bâtiment à la ville,

du microclimat à la demande énergétique

E. Bozonnet¹, M. Musy², F. Allard¹, G. Guarracino³, M. Chazelas²

¹*LEPTAB, UPRES EA 2119, Université de La Rochelle*

²*CERMA, UMR CNRS 1563, ensa Nantes*

³*LASH, URA CNRS 1652, ENTPE*

En 2005, la consommation énergétique globale de l'Union Européenne était de 1725MTep et le seul secteur du bâtiment représentait 40,4% en 2002. Le conditionnement des espaces habités représente 57% de cette demande énergétique et est une des principales sources anthropiques responsable des phénomènes d'îlots de chaleur et de l'appauvrissement de la qualité environnementale des espaces habités urbains.

Le contrôle et l'amélioration de la qualité de ces espaces 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 supposent 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 (vents dominants, ensoleillement, îlot de chaleur) 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.

Le présent état de l'art a été établi sur la base des travaux conduits au niveau international dans tous les domaines identifiés comme nécessaires pour aborder la problématique. Cette analyse est présentée selon deux approches complémentaires :

- Une analyse des phénomènes de transfert entre environnement urbain et bâtiment afin de dégager l'interaction bâtiment/environnement, mais aussi les potentiels d'intervention qu'offrent les microclimats urbains pour réduire l'impact environnemental des bâtiments.

- Une analyse morphologique par une approche typologique des milieux urbains et de la relation entre le bâtiment et son environnement immédiat.

1. Îlot de chaleur urbain et demande énergétique

Outre des problèmes de santé publique liés aux microclimats urbains (canicules et surmortalité), des situations problématiques de demande énergétique sont observées. Les bâtiments et leurs usages représentent une part importante de la consommation d'énergie globale. Le cycle infernal actuel où le traitement de la demande de confort des usagers passe par un surdimensionnement des systèmes et conduit à un accroissement de la charge anthropique des villes ne fait qu'aggraver la situation. Le traitement du problème complet est étroitement lié à la conception des constructions et à leurs interactions avec l'environnement proche.

L'approche de cette étude consiste à isoler les flux de matière et d'énergie échangés entre un bâtiment et son environnement immédiat et à recenser les modèles qui permettent de les évaluer.

1.1 Impact de l'îlot de chaleur sur le bâti

On appelle îlot de chaleur l'observation de fortes différences entre les températures mesurées en site urbain et celles des campagnes environnantes. L'augmentation dans le temps des températures en milieu urbain concorde avec l'intensification de l'urbanisation. Des mesures réalisées au centre-ville de Los Angeles montrent une augmentation des températures maximales d'environ 2,5°C entre 1920 et 1997 (Akbari 2001). Les conditions avant urbanisation étant inconnues, le lien entre cet écart de température et l'urbanisation est difficilement paramétrable. De plus, les relevés météorologiques disponibles proviennent souvent de mesures extérieures aux centres urbains.

L'îlot de chaleur modifie les charges climatiques des bâtiments, donc le confort thermique intérieur et éventuellement la santé. Une analyse sur 20 ans à Londres (1976–1996) a démontré la corrélation linéaire entre surmortalité et température au-delà de 19°C en moyenne journalière (Hajat 2002).

L'îlot de chaleur a aussi des effets sur la demande d'énergie des bâtiments. En hiver, la charge de chauffage peut-être diminuée (30 à 50% pour le centre d'Athènes par rapport à la périphérie) alors qu'en été, les bâtiments ont une surconsommation énergétique d'autant plus grande qu'avec le développement de la climatisation, les exigences de confort d'été ont évolué. En centre urbain, les charges thermiques peuvent être doublées par l'îlot de chaleur, alors que le coefficient de performance des systèmes d'air conditionné est réduit (de l'ordre de 25% à Athènes, Santamouris 2001).

Les maxima de température en centre-ville ont aussi augmenté, entraînant l'augmentation des niveaux de puissance de crête (de l'ordre 2 à 4% pour 1°C supplémentaire, Akbari 2001).

Les dissipations thermiques des bâtiments participent fortement à l'amplification du réchauffement urbain, et les systèmes de climatisation peuvent en représenter une part d'autant plus significative que leur charge augmente avec le réchauffement, Figure 1.

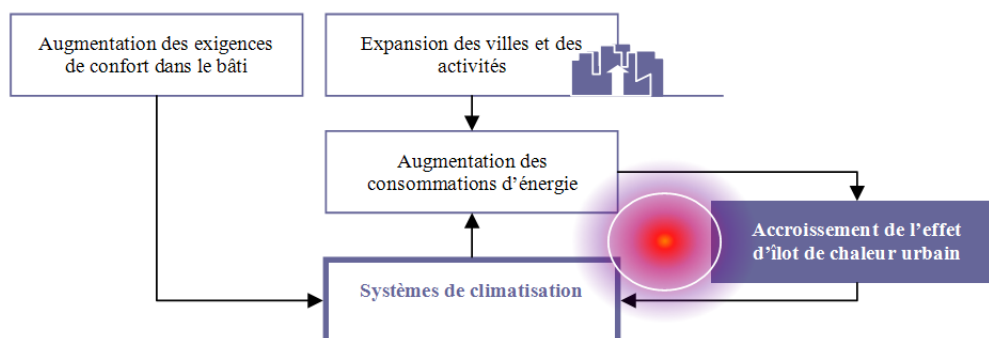


Figure 1 - Amplification de l'îlot de chaleur.

La densification des villes s'est accompagnée de la diminution de la végétation. Un choix orienté des matériaux utilisés et la re-végétalisation des centres urbains pourraient entraîner une forte diminution des îlots de chaleur urbains. Ces mesures, difficiles à mettre en œuvre, ne seraient efficaces qu'à grande échelle.

Par ailleurs, les charges sur le bâti sont couramment calculées à partir des données météorologiques de référence. Cependant la forme de la rue et de l'îlot de chaleur ont des conséquences non négligeables sur l'accroissement de la demande énergétique (Bozonnet 2005). Cette demande énergétique de climatisation due à l'îlot de chaleur et à la production anthropique peut être combattue par le

développement de solutions alternatives comme la ventilation naturelle et le contrôle et la maîtrise des apports internes.

Néanmoins, en milieu urbain, le microclimat et les conditions climatiques aux abords des bâtiments sont hétérogènes et seul le couplage de modèles d'environnement extérieur avec ceux des ambiances et du système de ventilation permet de prendre en compte les effets de cette hétérogénéité. Plus que pour un système climatisé ou ventilé mécaniquement, ce type de modélisation est nécessaire pour un système passif comme la ventilation naturelle.

1.2 Conditions extérieures en milieu urbain

L'étude de ΔT_{urMAX} , écart de température maximum entre la ville et la campagne environnante caractérisant l'îlot de chaleur montre que le rafraîchissement nocturne est atténué en milieu urbain du fait des matériaux et surfaces urbaines. L'augmentation de température en début de journée est plus rapide en milieu rural et une température plus faible en ville peut alors parfois être observée.

L'îlot de chaleur étant plus marqué pour les villes importantes, ΔT_{urMAX} peut s'estimer à partir de la population et de la vitesse de vent (Oke 1987). Cependant, la morphologie de la ville joue un rôle important (piégeage solaire et confinement par rapport au vent) qui peut être pris en compte en introduisant le rapport d'aspect H/W des rues canyon. Cette formulation ne doit pas être extrapolée sans précaution au cas de villes aux climats différents de ceux étudiés par Oke. (Montávez 2003) ajoute un terme tenant compte du potentiel de rafraîchissement du milieu rural. Ces approches de détermination de l'intensité de l'îlot de chaleur pour des conditions météorologiques types (vent faible, ciel clair) restent cependant difficiles à mettre en œuvre du fait du nombre de facteurs non pris en compte.

L'effet des sources anthropiques (production de chaleur des véhicules, des bâtiments et des industries...) est mal connu et difficile à évaluer. En moyenne sur une ville, elles sont généralement inférieures à 100 W/m^2 , mais elles peuvent varier en fonction de la densité urbaine et atteindre localement des valeurs beaucoup plus importantes (Sailor 2004). L'application de modèles simplifiés a démontré l'importance de ce paramètre, notamment en période nocturne ou hivernale, quand l'ensoleillement est réduit (Offerle 2003).

Finalement, interviennent de nombreux paramètres difficiles à établir que ce soit dans le cadre d'une étude d'aménagement urbain ou d'une situation existante. Le modèle utilisé doit permettre de définir la solution technique la plus performante en tenant compte principalement des effets de couplage entre bâti et environnement.

2. Phénomènes de transfert à l'interface des bâtiments en milieu urbain

2.1 Transferts aérauliques

Pour l'étude des mouvements d'air, trois échelles peuvent être définies : régionale (de l'ordre de la centaine de km), l'échelle meso (la dizaine de km), et l'échelle microclimatique (quelques centaines de m). Pour cette dernière échelle, l'écoulement d'air peut être modifié non seulement par la présence de petits obstacles, mais aussi par des phénomènes thermiques liés notamment à l'ensoleillement.

La couche limite atmosphérique se modifie aux abords des constructions, où se forme une nouvelle couche atmosphérique appelée couche limite urbaine, Figure 2.

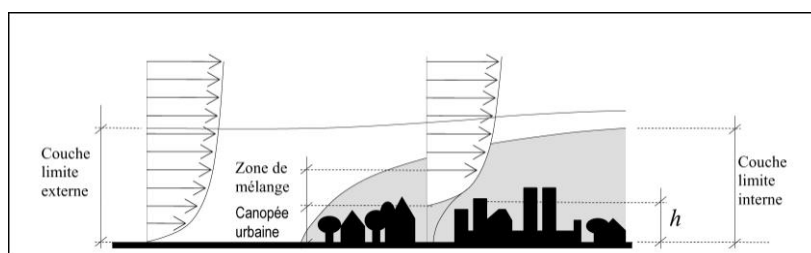


Figure 2 - Profil moyen de la vitesse horizontale du vent en site homogène et en site urbain (Plate 2001)

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 des axes dominants des rues canyon, même loin du sol.

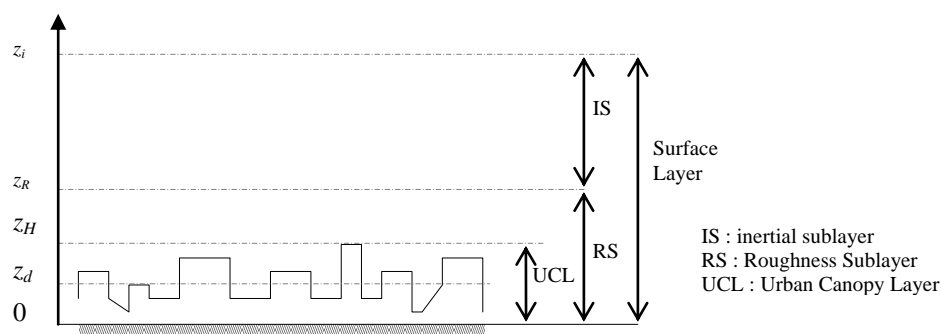


Figure 3 - Répartition verticale des couches de circulation d'air au-dessus d'une ville (Rotach 1999).

La zone d'écoulement perturbée (Figure 3), ou couche limite de surface, s'étend sur plusieurs dizaines de mètres au-dessus des bâtiments. Elle est divisée en trois sous-couches :

- en partie haute, la couche limite inertielle,
- dans la partie basse, la sous couche limite rugueuse où l'écoulement est perturbé et des écoulements secondaires verticaux ou transversaux sont observés,
- sous la « canopée urbaine », la vitesse moyenne de l'écoulement dominant diminue fortement.

Comme pour un écoulement en site homogène, une longueur de rugosité z_0 est définie à partir de valeurs caractéristiques pour différents types de zones urbaines répertoriées par la littérature (Grimmond 1999). Ces zones sont caractérisées par le niveau moyen des bâtiments ainsi que par le type de construction, auquel une morphologie typique peut être associée. Les hauteurs des différentes couches sont calculées en relation avec z_0 .

Les modèles de couche limite atmosphérique permettent de définir qualitativement des écoulements moyens à l'échelle d'une ville mais sont insuffisants pour décrire précisément les mouvements d'air autour des bâtiments.

À partir d'une description empirique des zones d'écoulement (Hosker 1984), des méthodes de prédiction du champ de vitesse moyen ont été développées (Rockle 1990; Kaplan 1996; Brown 1998; Pardijak 2004). La démarche consiste à définir les

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

Pour la description des écoulements dans les rues, on distingue en général deux cas : longitudinal (la rue est dans la direction principale du vent) et transversal (l'axe de la rue est transverse à la direction du vent). Pour des rues canyon, le rapport $W(\text{largeur})/H(\text{hauteur})$ traduit la rugosité du site et permet de prévoir ces différents écoulements dans le cas transversal (*Figure 4*).

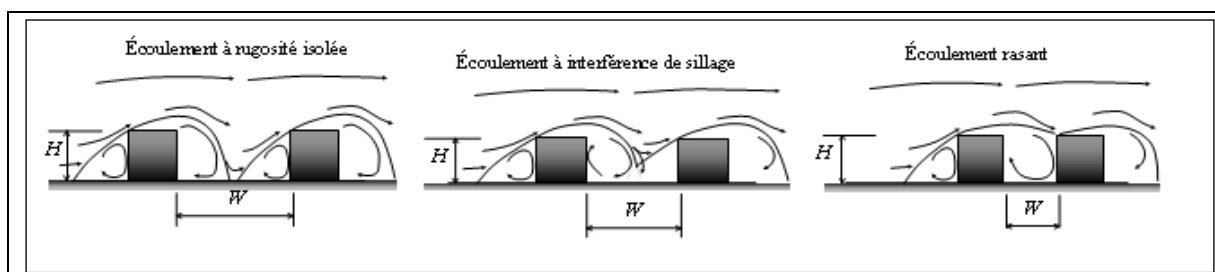


Figure 4 - Rue canyon de différents W/H : $>2,5$ (rugosité isolée), entre $1,54$ et $2,5$ (interférence de sillage), et $<1,54$ (rasant), (Oke 1987).

Les modèles décrits précédemment ne tiennent pas compte des perturbations thermiques, approximation trop forte pour une étude du microclimat, surtout dans le cadre de vents dominants faibles et de charges thermiques fortes.

L'utilisation de la CFD (Computational Fluids Dynamic) pour l'étude des ambiances et du climat (Assimakopoulos 2006) est confrontée à deux difficultés majeures qui se répercutent sur la modélisation et les temps de calcul : l'interaction de nombreux phénomènes physiques et les différences d'échelles spatiales et temporelles. La modélisation $k-\varepsilon$ est utilisée pour l'étude de rues canyon, en présence de polluants, ventilation naturelle ou transferts thermiques (Tsai 2004; Chen 2004). (Glockner 1999) compare différentes approches CFD pour le cas simple d'une marche descendante et démontre la difficulté de prédiction de l'écoulement.

Pour une prédiction réaliste, les temps de calcul peuvent devenir prohibitifs, en particulier dans le cas de couplages thermiques, mais utilisés avec des maillages adaptés et des conditions aux limites correctement définies, les outils CFD donnent une bonne estimation d'un écoulement. Des compromis sont donc à trouver entre temps de calcul, précision recherchée et domaine de validité des modèles.

2.2 Ensoleillement et transferts radiatifs

Dans le bilan énergétique d'une surface extérieure, le flux radiatif net représente une part importante des transferts de chaleur. Il dépend de différents paramètres dont l'albédo des surfaces (ratio entre le flux de courtes longueurs d'ondes global réfléchi et le flux incident).

2.2.1 Ensoleillement et piégeage radiatif à l'échelle urbaine

Le **bilan énergétique** est utile pour établir des politiques de réduction de l'îlot de chaleur. Il permet le calcul de la température de l'air et la comparaison des ordres de grandeur des différents flux mis en jeu. L'évaluation des flux radiatifs est un élément clé dans l'établissement de ce bilan. Les premiers modèles (Terjung 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, mais sans tenir compte des fluctuations de la température de l'air.

La prise en compte du stockage thermique a été introduite sur la base d'un modèle d'hystérésis (Grimmond 1991 ; Arnfield 1998 ; Grimmond 1999a) étendu à l'étude des rues canyon.

Un modèle de bilan surface-atmosphère à méso-échelle basé sur la généralisation de la géométrie canyon pour tous types de ville a été proposé par (Masson 2000). A cette même échelle (Kanda 2005) considère explicitement les aspects tridimensionnels de la géométrie et prédit le bilan énergétique de chaque face (toit, sol et murs verticaux).

L'Albédo équivalent d'une ville dépend des formes et des matériaux. Expérimentations et modélisations ont montré que l'albédo (Aida 1982 ; Kondo 2001 ; Pawlak, 2003) :

- diminue quand les irrégularités croissent,
- augmente avec l'angle solaire zénithal,
- varie en moyenne journalière de façon saisonnière,
- les propriétés de réflexion des toits sont les plus influents, surtout pour des hauteurs importantes de bâtiment.

La **température de surface** module la température de l'air dans les couches basses de l'atmosphère urbaine. Ces températures peuvent être obtenues par télédétection satellitaires ou aéroportées (Voogt 2003) ou par modélisation géométrique des villes et calcul des flux radiatifs en prenant en compte les masques et les inter-réflexions (Groleau 2003).

Par l'analyse de mesures de température de brillance, réalisées par une caméra infrarouge thermique embarquée (campagne de mesure ESCOMPTE 2001 sur Marseille), (Long 2003) 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.

Une ville est un assemblage de **matériaux** de nature différente et éventuellement changeante (végétation). Renseigner dans un modèle les caractéristiques des matériaux à grande échelle quand toutefois leur caractérisation est disponible est aujourd'hui délicat. De nombreuses études s'attachent à la caractérisation radiative des matériaux de construction et des surfaces urbaines (Berdahl 1997 ; Doulos 2004 ; Prado 2005 ; Synnefa 2005). Certaines s'intéressent à l'évolution dans le temps des caractéristiques des matériaux (Bretz 1997 ; Levinson 2005) conduisant à des variations des températures de surface et donc des effets sur l'îlot de chaleur. Les résultats de ces études constituent autant de sources pour la définition du traitement des surfaces urbaines. Cette démarche de caractérisation doit être systématisée pour tous les produits du marché, afin d'inciter fortement les aménageurs et concepteurs à utiliser des matériaux à haut pouvoir réfléchissant.

2.2.2 Transferts au niveau de l'enveloppe

L'enveloppe joue un rôle de filtre vis-à-vis des différents flux. Selon l'orientation, la localisation géographique, la saison, le rôle de chacun de ses composants prend plus ou moins d'importance.

Les matériaux des **toitures** par leur albédo ont un impact important sur l'îlot de chaleur (Simpson 1997 ; Abkari 2003). L'influence de leur forme, de leur orientation et de leur végétalisation ont été étudiées (Runsheng 2003 ; Tang 2006 ; Niachou 2001).

En ce qui concerne les **façades**, les études portent sur la couleur, la conductivité et l'ombrage (Givoni 1972 ; Bansal 1992 ; Belakehal 1996 ; Capeluto 2003).

Pour les **fenêtres**, les vitrages ou ouvrants traditionnels sont en général adaptés au climat. Cependant l'évolution des matériaux verriers a permis l'augmentation des surfaces vitrées. Des solutions techniques telles que des vitrages réversibles ont été imaginées (Feuermann 1998 ; Etzion 2000).

La conception des **brise-soleil** et des **masques** est facilitée par de nombreux modèles, outils graphiques ou logiciels (Jorge 1993 ; Kensek 1996 ; Houpert 2003 ; Siret 2004).

Les **arbres** agissent comme masque au soleil et au vent et la **végétation** influence la balance énergétique par l'apport de chaleur latente.

Si de nombreuses solutions ont été étudiées, il ne suffit pas d'en cumuler les effets. Une toiture réfléchive ou végétalisée n'a pas le même impact sur la consommation énergétique selon le niveau d'isolation. Il s'agit donc de composer avec ces dispositions une solution adaptée au contexte climatique, au type de bâtiment et à son usage.

2.2.3 Prise en compte de l'ensoleillement dans la conception

La prise en compte de l'ensoleillement dans la conception peut se faire à différentes échelles et avoir plusieurs objectifs :

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

Différents outils numériques ont été développés et sont accessibles comme :

- ArchiPack (Szokolay 1996)
- Cityshadow (Okeil 1993)
- Gosol (Littlefair 1998)
- MascaraW (Pereira 2001)
- Powershad (Ali-Toudert 2006)

- Sence (Kristl 2001)
- Shading (Yesioro 1994)
- Shading Mask (Kensek 1996)
- Solene (Miguet 2002)
- Sustarc, Iso Shadow (Capeluto 2003a)
- SVR (Houpert 2003)
- XSun (Grau 1995)

La connaissance du climat d'une région et de son potentiel énergétique est un préalable à toute action de développement durable en matière d'architecture et d'urbanisme. Une approche à partir des climatopes redéfinis par (Erell 2003) permet de prendre en compte une partie des impacts climatiques. Par ailleurs l'implantation ou l'existence de bâtiments dans un lieu modifie considérablement les conditions microclimatiques en particulier l'accès au soleil, qui peut être défini à partir de solutions logicielles (Compagnon 2004). Enfin on peut jouer sur l'albédo à l'échelle de la ville, du quartier (surfaces imperméabilisées, ouverture vers le ciel) ou du bâtiment (matériaux, couleur des murs et des toits).

Les études paramétriques menées par (Okeil 1993) rappellent que :

- 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).

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.

2.3 Environnement sonore urbain

Le bruit est une nuisance classée en tête par les individus notamment en milieu urbain. Près 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. Le trafic automobile, une des principales sources de pollution sonore, est également à l'origine de la pollution de l'air.

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 permettant de caractériser les bruits de crête, le bruit résiduel d'un site soumis à un bruit industriel, le bruit de fond permanent d'un site, le niveau énergétique équivalent, sur une période (jour, nuit). 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 un seuil de gêne.

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, le profil de la chaussée, la nature du sol et les conditions météorologiques influent fortement sur l'environnement sonore. Les conditions de trafic, le type de circulation ou type de voie, complètent la liste des facteurs acoustiques.

Le développement de modèles de propagation du son adaptés à la complexité des formes urbaines (densité du tissu, effets des réflexions diffuses sur les façades), associé à une approche plus fine des sources sonores permettra la caractérisation des ambiances sonores urbaines.

Par ailleurs, le classement au bruit des façades précisé par la réglementation thermique RT2005, favorise l'usage des techniques passives pour le traitement des bâtiments en conditions estivales.

2.4 Transfert des polluants

La pollution de l'air dans les bâtiments est un facteur important de risque pour la santé humaine : en moyenne, la population passe 90% du temps à l'intérieur des

bâtiments. Elle résulte de l'émission de polluants à l'intérieur du bâti et des transferts des polluants extérieurs. Pour le bâtiment, la relation entre pollution intérieure et extérieure est étudiée par l'expérimentation et la modélisation. Les modèles empiriques disponibles déterminent généralement le ratio de concentration intérieur/extérieur (ratio I/O) qui dépend de nombreux paramètres dont :

- la ventilation (traversante (Saberski 1973; Hales 1974; Hayes 1991; Zhang 1994) ou naturelle avec conduits de recirculation (Saberski 1973 ; Davies 1984)),
- la perméabilité des fenêtres (Romieu 1998; Salmon 2000; Kirchner 2001) et des façades,
- le pourcentage d'air neuf (Saberski 1973 ; Davies 1984),
- les phénomènes physico-chimiques intérieurs (Yocom 1982).

Ces phénomènes peuvent être divisés en 2 groupes :

- les phénomènes intérieurs permanents liés à l'absorption et la résorption variable des matériaux de surface (Barguil 1993 ; Klenø 2001) et (Romieu 1998). Le ratio entre surface totale et volume habitable (S/V) est donc un paramètre important (Cano-Ruiz 1993; Nazaroff 1993; Weschler 2000 ; Kirchner 2001).
- les phénomènes temporaires liés aux activités humaines (photocopieurs et imprimantes laser, etc.). Lors d'activité intensive, la concentration intérieure d'ozone peut atteindre 50 à 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Huré 1999 ; Wolkoff 1999 ; Koene 1992). Les réactions chimiques entre les polluants intérieurs font aussi partie de cette catégorie ; la concentration en polluants d'une certaine espèce augmente tandis que celle d'autres espèces diminue (Blondeau 1996 ; Weschler 2000 ; Kirchner 2001).

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. Ce dernier facteur, difficile à appréhender, n'est en général pas modélisé. Il s'exprime en fonction du débit d'air traversant la façade et de la concentration extérieure en ozone (Iordache 2003).

3. Analyse morphologique du milieu urbain

Beaucoup d'études dans différentes disciplines ont été consacrées à l'évolution spatiale des villes. Ces recherches portent en particulier sur les plans réguliers et négligent le phénomène d'irrégularité des plans urbains. L'étude de formes urbaines réelles nécessite la mise en place de mesures quantitatives et :

- « 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 » (Frankhauser 1994).

Des outils mathématiques d'analyse des formes urbaines permettent de satisfaire aux deux premiers points, la mise en regard des mesures morphologiques et de phénomènes physiques complexes est beaucoup moins évidente.

Des paramètres morphologiques permettant de caractériser les formes urbaines sont récapitulés ici et corrélés aux flux étudiés précédemment.

Tableau 1- Paramètres morphologiques

Paramètre	Ensoleillement	Vent	Température	Acoustique
Densité	X	X		
Rugosité		X		
Sinuosité		X		
Ratio d'enveloppe	X			
Rapport d'aspect de la rue (H/W)	X	X	X	X
Ratio d'espacement (Distance entre bâtiments / largeur bâtiments)	X			
Orientation	X		X	
Facteur de vue du ciel (SVF)	X			
Pourcentage de sol couvert par les bâtiments	X			
Rose des orientations (Surface des bâtiments pondérée du SVF)	X			

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 entre forme urbaine et climat n'a été analysé que récemment par différents auteurs :

- (Bardet 1943) pour l'ensoleillement,
- (Golany 1996) rappelle des règles simples de conception,
- (Baker 1995) propose une caractérisation assimilant la ville à un milieu poreux,
- (Groleau 1995) caractérise la morphologie de quartiers par un coefficient de réduction de durée d'ensoleillement,
- (Adolphe 2001) propose l'utilisation d'un SIG pour l'analyse des caractéristiques morphologiques urbaines en lien avec des phénomènes environnementaux.

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

L'analyse des flux développée précédemment a montré que les facteurs physiques d'ambiance dans l'environnement proche d'un bâtiment résultent d'une interaction complexe entre les phénomènes physiques et la nature de l'objet « ville ». Un ajustement soigneux et raisonné des formes urbaines pourrait améliorer le confort dans les espaces urbains comme dans les bâtiments, ainsi que la consommation énergétique. Cependant, si quelques grandes tendances sont données, les relations qui s'établissent entre une disposition urbaine et les paramètres physiques d'ambiance ne sont pas clairement établies pour l'ensemble des flux. Les progrès des connaissances microclimatiques et des techniques de simulation aidant, cette clarification doit se faire de manière pluridisciplinaire, afin de fournir aux concepteurs les outils nécessaires d'analyse du problème. 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 en prenant en compte les interactions entre les 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 des études et 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.

Nous avons recensé de nombreuses études récentes sur le microclimat urbain et l'îlot de chaleur. Toutes ces recherches montrent que la caractérisation climatique du milieu urbain est très complexe du fait de l'interdépendance des 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 et environnement extérieur est importante en zone urbaine, notamment du point de vue de la demande énergétique et du confort thermique, acoustique ou encore du risque par rapport aux polluants dans les bâtiments.

Par l'analyse des flux d'énergie et de matière, des recherches approfondies ont été menées pour l'étude des phénomènes de transfert en milieu urbain selon différents niveaux d'échelle. Les outils et modèles présentés ont été développés en cohérence avec ces échelles, de la ville au quartier jusqu'au bâtiment.

Lors de l'étude des flux, nous avons identifié les principaux paramètres morphologiques qui interviennent. Certains sont communs à plusieurs flux, ce qui démontre la nécessité d'une étude pluri-phénomènes notamment dans le cadre de la conception.

Finalement, ce travail a permis de regrouper des études réalisées dans de nombreux domaines de recherche pour lesquels des outils et modèles ont été développés, permettant 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 doivent être étudiés de façon globale en tenant compte du bâti et de son interaction avec son environnement proche, le milieu urbain.

Les nombreuses références et la compréhension des phénomènes développée dans ce travail bibliographique constituent un outil valorisable pour des études nécessitant une approche globale, que ce soit à l'échelle de l'urbanisme, de l'architecture ou au niveau de l'étude des ambiances intérieures.

Références bibliographiques

Adolphe, L. 2001. A simplified model of urban morphology: application to an analysis of the environmental performance of cities. *Environ. Plann. B.* vol. 28, n° 2. p. 183-200.

Aida, M. & Gotoh, K. 1982. Urban albedo as a function of the urban structure : a two dimensional numerical simulation (part II). *Boundary-Layer Meteorol.* n° 23. p. 415-424.

Akbari, H; Pomerantz, M. & Taha, H. 2001. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Sol. Energy.* vol. 70, n° 3. p. 295-310.

Akbari, H; Shea Rose, L. & Taha, H. 2003. Analyzing the land cover of an urban environment using high-resolution orthophotos. *Landscape Urban Plann.* vol. 63, n° 1. p. 1-14.

Ali-Toudert, F. & Mayer, H. 2006. Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Build. Environ.* vol. 41, n° 2. p. 94-108.

Arnfield, A.J. 1976. Numerical modelling of urban surface radiative parameters. *in* : Davies J. A (ed.) *Papers in climatology : the Cam Allen Memorial volume.* McMaster University : Department of Geography

Arnfield, A.J. & Grimmond, C.S.B. 1998. An urban canyon energy budget model and its application to urban storage heat flux modeling. *Energy Build.* vol. 27, n° 1. p. 61-68.

Assimakopoulos, V ; Georgakis, C. & Santamouris, M. 2006. Experimental validation of a computational fluid dynamics code to predict the wind speed in street canyons for passive cooling purposes. *Sol. Energy.* vol. 80, n° 4. p. 423-434.

Baker, N.V; Steemers, K; Crowther, D. et al. 1995. Can simplified urban parameters indicate environmental performance ? *in* : Bernard Lachal; Franco Romerio; Jacques Royer & Willi Weber, (ed.) *Energie et climat urbain, actes de la journée du CUEPE, Conches-1 déc.* CUEPE. p. 85-90

Bansal, N.K ; Garg, S.N. & Kothari, S. 1992. Effect of exterior surface colour on the thermal performance of buildings. *Build. Environ.* vol. 27, n° 1. p. 31-37.

Bardet, G. 1943. Le facteur soleil en urbanisme. *Technique et Architecture* n° 7-8. p. 200-206.

Barguil, S. 1993. *Contribution à l'évaluation de l'exposition du citoyen aux polluants atmosphériques.* Thèse de doct. Univ. René Descartes - Paris 5. 255p.

Belakehal, A. & Tabet Aoul, K. 1996. Shading and shadowing : Concepts for an interactive strategy between solar control and aesthetics in the design of the facade. Reference to arid zones. *Renew. Energy.* vol. 8, n° 1-4. p. 323-326.

Berdahl, P. & Bretz, S.E. 1997. Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing

materials. *Energy Build.* vol. 25, n° 2. p. 149-158.

Blondeau, P. 1996. *Contribution à l'amélioration de la qualité globale des ambiances habitées - rôle de la ventilation en période estivale.* Thèse de doct. Univ. La Rochelle

Bozonnet, E. 2005. *Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments : Cas de la rue canyon.* Thèse de doct. Univ. La Rochelle

Bretz, S.E. & Akbari, H. 1997. Long-term performance of high-albedo roof coatings. *Energy Build.* vol. 25, n° 2. p. 159-167.

Brown, M. J. & Streit G. E. 1998. Emergency Responders' "Rules-of-Thumb" for air Toxics Releases in Urban Env. Report LA-UR-98-4539, Los Alamos National Laboratory, US.

Cano-Ruiz, J.A; Kong, D; Balas, R.B. et al. 1993. Removal of reactive gases at indoor surfaces : Combining mass transport and surface kinetics. *Atmos. Environ. A.* vol. 27, n° 13. p. 2039-2050.

Capeluto, I.G. 2003. Energy performance of the self-shading building envelope. *Energy Build.* vol. 35, n° 3. p. 327-336.

Capeluto, I.G; Yezioro, A. & Shaviv, E. 2003a. Climatic aspects in urban design - a case study. *Build. Environ.* vol. 38, n° 6. p. 827-835.

Chen, Q. 2004. Using computational tools to factor wind into architectural environment design. *Energy Build.* vol. 36, n° 12. p. 1197-1209.

Compagnon, R. 2004. Solar and daylight availability in the urban fabric. *Energy Build.* vol. 36, n° 4. p. 321-328.

Davies, T; Ramer, B ; Kaspyzok, G. et al. 1984. Indoor/Outdoor Ozone Concentrations at a Contemporary Art Gallery. *JAPCA Int J Air Pollut. Contr.* vol. 31, n° 2. p. 135-137.

Doulos, L; Santamouris, M. & Livada, I. 2004. Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials. *Sol. Energy.* vol. 77, n° 2. p. 231-249.

Erell, E A; Portnov, B. & Etzion, Y. 2003. Mapping the potential for climate-conscious design of buildings. *Build. Environ.* vol. 38, n° 2. p. 271-281.

Etzion, Y. & Erell, E. 2000. Controlling the transmission of radiant energy through windows: a novel ventilated reversible glazing system. *Build. Environ.* vol. 35, n° 5. p. 433-444.

Feuermann, D. & Novoplansky, A. 1998. Reversible low solar heat gain windows for energy savings. *Sol. Energy.* vol. 62, n° 3. p. 169-175.

Frankhauser, P. 1994. *La fractalité des structures urbaines.* Anthropos. 291p. (Villes)

Gadsden, S ; Rylatt, M. & Lomas, K. 2003. Putting solar energy on the urban map: a new GIS-based approach for dwellings. *Sol. Energy.* vol. 74, n° 5. p. 397-407.

Ghattas, G. 1999. Prévisions des pics d'ozone par arbre de régression, simple et agrégés par bootstrap. *Revue de Stat. appliquée.* vol. 47, n° 2. p. 61-80.

Givoni, B. & Hoffman, M.E. 1972. *Prediction of the thermal behavior of full scale buildings : first research report to the US National Bureau of Standards.* . rapport de recherche, Technion Haifa : Buildings research stations.

Glockner, S; Caltagirone, J. & Morel, P. 1999. Modélisation d'écoulements dans des espaces urbains. *Int. J. Therm. Sci.* vol. 38, n° 8. p. 703-711.

- Golany, G.S.** 1996. Urban design morphology and thermal performance. *Atmos. Environ.* vol. 30, n° 3. p. 455-465.
- Grau, K. & Johnsen, K.** 1995. General shading model for solar building design. *Ashrae Trans.* vol. 101, n° 2. p. 13.
- Grimmond, C.S.B. & Oke, T.** 1999. Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *J. Appl. Meteo.* vol. 38, n° 9. p. 1262-1292.
- Grimmond, C.S.B. & Oke, T.R.** 1999a. Heat storage in urban areas : Local-scale observations and evaluation of a simple model. *J. Appl. Meteo.* vol. 38, n° 7. p. 922-940.
- Grimmond, C.S.B; Cleugh, H.A. & Oke, T.R.** 1991. An objective urban heat storage model and its comparison with other schemes. *Atmos. Environ. B.* vol. 25, n° 3. p. 311-326.
- Groleau, D; Fragnaud, F. & Rosant, J.** 2003. Simulation of the radiative behavior of an urban quarter of Marseille with the Solene model. in : *ICUC-5, Lodz 1-5 september 2003.* University of Lodz : Faculty of geographical sciences : Dep. of meteo. and Clim.
- Groleau, D. & Marenne, C.** 1995. Environmental specificities of the urban built forms. in : *Rebuilt-rebuilding in the European City-Integration, Corfou, 29-30 juin, 1 juillet 1995.* p. 8
- Hajat, S; Kovats, R; Atkinson, R. & A. H.** 2002. Relation between elevated ambient temperature and mortality: A review of the epidemiological evidence. *Epidemiol. Rev.* n° 24. p. 190-202.
- Hales, C; Rollinson, A. & Shair, F.** 1974. Experimental Verification of Linear Combination Model for Relating Indoor-Outdoor Pollutant Concentrations. *Environ. Sci. Technol.* vol. 8, n° 5. p. 452-453.
- Hayes, S.** 1991. Use of an Indoor Air Quality Model (IAQM) to Estimate Indoor Ozone Levels. *JAPCA J Air Waste Ma.* vol. 41, n° 2. p. 161-170.
- Hosker, R.J.** 1984. Flow and Diffusion Near Obstacles. Atmospheric Science and Power Production - DOE/TIC-27601, U.S. Dept. Of Energy
- Houpert, S.** 2003. *Approche inverse pour la résolution de contraintes solaires et visuelles dans le projet architectural et urbain.* Thèse de doct. Univ. Nantes. 352p.
- Huré, P. & Rousselin, X.** 1999. *L'émission d'ozone par les photocopieurs et les imprimantes laser.* INRS. ED1422.
- Jorge, J; Puigdomenech, J. & Cusido, J.A.** 1993. A practical tool for sizing optimal shading devices. *Build. Environ.* vol. 28, n° 1. p. 69-72.
- Kanda, M; Kawai, T; Kanega, M. et al.** 2005. A Simple Energy Balance Model for Regular Building Arrays. *Boundary-Layer Meteorol.* vol. 116, n° 3. p. 423-443.
- Kaplan, H. & Dinar, N.** 1996. A lagrangian dispersion model for calculating concentration distribution within a built-up domain. *Atmos. Environ.* vol. 30, n° 24. p. 4197-4207.
- Kensek, K; Noble, D; Schiler, M. et al.** 1996. Shading Mask: a teaching tool for sun shading devices. *Autom. Constr.* vol. 5, n° 3. p. 219-231.
- Kirchner, S; Bailloit, O; Collignan, B. et al.** 2001. *Experimental study on the transfert conditions of local atmospheric pollution to indoor dwelling environment.* ADEME.
- Klenø, J; Clausen, P; Weschler, C. et al.** 2001. Determination of ozone removal rates by selected building products using the FLEC emission cell. *Environ. Sci. Technol.* vol. 36, n° 12. p. 2548-2553.

- Koene, M.** 1992. Les émissions d'ozone à l'origine de problèmes climatiques. *Janus*. vol. 10. p. 264.
- Kondo, A; Ueno, M; Kaga, A. et al.** 2001. The influence of urban canopy configuration on urban albedo. *Boundary-Layer Meteorol.* vol. 100, n° 2. p. 225-242.
- Kondratyev, K.Y.** 1969. *Radiation in the Atmosphere*. Academic Press
- Kristl, Z. & Krainer, A.** 2001. Energy evaluation of urban structure and dimensioning of building site using iso-shadow method. *Sol. Energy*. vol. 70, n° 1. p. 23-34.
- Levinson, R; Berdahl, P; Asefaw Berhe et al.** 2005. Effects of soiling and cleaning on the reflectance and solar heat gain of a light-colored roofing membrane. *Atmos. Environ.* vol. 39, n° 40. p. 7807-7824.
- Littlefair, P.** 1998. Passive solar urban design : ensuring the penetration of solar energy into the city. *Renew. Sust. Energy Rev.* vol. 2, n° 3. p. 303-326.
- Long, N.** 2003. *Analyses morphologiques et aérodynamiques du tissu urbain : application à la micro-climatologie de Marseille pendant la campagne ESCOMPTE*. Thèse de doct. Univ. Sciences et Techniques de Lille. 297p.
- 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*. Thèse de doct. Univ. La Rochelle
- Masson, V.** 2000. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorol.* vol. 94, n° 3. p. 357-397.
- Miguet, F. & Groleau, D.** 2002. A daylight simulation tool for urban and architectural spaces : Application to transmitted direct and diffuse light through glazing. *Build. Environ.* vol. 37, n° 8-9. p. 833-843.
- Montávez, J.P; González-Rouco, J.F. & Valero, F.V.** 2003. A set of equations for determining the maximum intensity of nocturnal urban heat island. *in : ICUC-5*. University of Lodz : Faculty of geographical sciences : Dep. of meteo. and Clim.
- Nazaroff, W; Gadgil, A. & Weschler, C.** 1993. Critique of the use of deposition velocity in modelling indoor air quality. *in : N.L. Nagda (ed.) Modeling of indoor air quality and exposure*. American Society for Testing and Materials. p. 81-104
- Niachou, A ; Papakonstantinou, K ; Santamouris, M. et al.** 2001. Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy Build.* vol. 33, n° 7. p. 719-729.
- Nicholson, S.E.** 1975. A pollution model for street-level air. *Atmos. Environ. (1967)*. vol. 9, n° 1. p. 19-31.
- Offerle, B; Grimmond, C; Fortuniak, K. et al.** 2003. Temporal variability in heat fluxes over a northern european downtown. *in : ICUC-5, Lodz 1-5 september 2003*. University of Lodz : Faculty of geographical sciences : Dep. of meteo. and Clim.
- Oke, T.R.** 1987. *Boundary layer climates*. 2nd ed. University Press
- Okeil, A.** 1993. urban form and solar energy utilization. *in : Norman Foster & Hermann Scheer, (ed.). Solar energy in architecture and urban planning : Third european conference on architecture. Florence, It 17-21 may 1993*. H.S. Stephens and Associates. p. 497-500
- Papadopoulos, A.M.** 2001. The influence of street canyons on the cooling loads of buildings and the performance of air conditioning systems. *Energy Build.* vol. 33, n° 6. p. 601-607.

- Pardijak, E.R; Brown, M.J. & Bagal, N.** 2004. Improved Velocity Deficit Parameterizations for a Fast Response Urban Wind Model. *in : 84th American Meteorological Society Annual Meeting*
- Pawlak, W. & Fortuniak, K.** 2003. Application of physical model to study effective albedo of the urban canyon. *in : ICUC'5, Lodz, 1-5 septembre.* University of Lodz : Faculty of geographical sciences : Dep. of, meteo. and Clim. p. 233-236
- Pereira, F.O.R; Silva, C.A.N. & Turkienikz, B.** 2001. A methodology for sunlight urban planning : a computer-based solar and sky vault obstruction analysis. *Sol. Energy.* vol. 70, n° 3. p. 217-226.
- Plate, E.J. & Kiefer, H.** 2001. Wind loads in urban areas. *J Wind Eng. Ind. Aerod.* vol. 89, n° 14-15. p. 1233-1256.
- Prado, R.T.A. & Ferreira, F.L.** 2005. Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials. *Energy Build.* vol. 37, n° 4. p. 295-300.
- Robitu, M.** 2005. *Etude de l'interaction entre le bâtiment et son environnement urbain : influence sur les conditions de confort en espaces extérieurs.* Thèse de doct. Univ. Nantes. 249p.
- Rockle, R.** 1990. *Bestimmung der Stomungsverhältnisse im Bereich komplexer Bauungsstrukturen.* Thèse de doct. Vom Fachbereich Mechanik, der Technischen Hochschule Darmstadt
- Romieu, I ; Lugo, M ; Colome, S. et al.** 1998. Evaluation of Indoor Ozone Concentration and Predictors of Indoor-Outdoor Ratio in Mexico City. *JAPCA J Air Waste Ma.* vol. 48. p. 327-336.
- Rotach, M.W.** 1999. On the influence of the urban roughness sublayer on turbulence and dispersion. *Atmos. Environ.* vol. 33, n° 24-25. p. 4001-4008.
- Runsheng, T; Meir, I.A. & Etzion, Y.** 2003. An analysis of absorbed radiation by domed and vaulted roofs as compared with flat roofs. *Energy Build.* vol. 35, n° 6. p. 539-548.
- Saberski, R; Simena, D. & Shair, F.** 1973. Concentrations, Decay Rates and Removal of Ozone and Their Relation to Establishing Clean Indoor Air. *Environ. Sci. Technol.* vol. 7, n° 4. p. 157-166.
- Sailor, D.J. & Lu, L.** 2004. A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas. *Atmos. Environ.* vol. 38, n° 17. p. 2737-2748.
- Salmon, L; Cass, G; Bruckman, K. & Haber, J.** 2000. Ozone exposure inside museums in the historis central district of Krakow, Poland. *Atmos. Environ.* vol. 34. p. 3823-3832.
- Sanchez de la Flor, F. & Dominguez, S.A.** 2004. Modelling microclimate in urban environments and assessing its influence on the performance of surrounding buildings. *Energy Build.* vol. 36, n° 5. p. 403-413.
- Santamouris, M ; Papanikolaou, N ; Livada, I. et al.** 2001. On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings. *Sol. Energy.* vol. 70, n° 3. p. 201-216.
- Simpson, J.R. & McPherson, E.G.** 1997. The effects of roof albedo modification on cooling loads of scale model residences in Tucson, Arizona. *Energy Build.* vol. 25, n° 2. p. 127-137.
- Siret, D. & Houpert, S.** 2004. A geometrical framework for solving sunlighting problems within CAD systems. *Energy Build.* vol. 36, n° 4. p. 343-351.
- Synnefa, A; Santamouris, M. & Livada, I.** A study of the thermal performance of reflective

coatings for the urban environment. *Sol. Energy*. vol. In Press.

Szokolay, S.V. 1996. Thermal Design of Houses for warm-humid climates. *in : Building & Urban Renewal. PLEA. Louvain-la-Neuve*. p. 337-342

Tang, R ; Meir, I.A. & Wu, T. 2006. Thermal performance of non air-conditioned buildings with vaulted roofs in comparison with flat roofs. *Build. Environ.* vol. 41, n° 3. p. 268-276.

Terjung, W.H. & Louie-Stella, S.F. 1974. A climatic model of urban energy budgets. *Geogr. Anal.* vol. 6. p. 341-367.

Tsai, M. & Chen, K. 2004. Measurements and three-dimensional modeling of air pollutant dispersion in an Urban Street Canyon. *Atmos. Environ.* vol. 38, n° 35. p. 5911-5924.

Vinet, J. 2000. *Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain. Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs.* Thèse de doct. Univ. Nantes. 245p.

Voogt, J.A. & Oke, T.R. 2003. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sens. Environ.* vol. 86, n° 3. p. 370-384.

Weschler, C. 2000. Ozone in Indoor Environments : Concentration and Chemistry. *Indoor Air*. vol. 10. p. 269-288.

Wolkoff, P. 1999. Photocopiers and indoor air pollution. *Atmos. Environ.* vol. 33, n° 13. p. 2129-2130.

Yezioro, A. & Shaviv, E. 1994. SHADING : a design tool for analyzing mutual shading between buildings. *Sol. Energy*. vol. 52, n° 1. p. 27-37.

Yocom, J. 1982. Indoor-outdoor air quality relationship. A critical review. *JAPCA Int J Air Pollut. Contr.* vol. 32, n° 500-520.

Zhang, J. & Liou, P. 1994. Ozone in Residential Air: Concentrations, I/O Ratios, Indoor Chemistry, and Exposures. *Indoor Air*. vol. 4, p. 95-105.