

## APPROCHES PHYSIQUES DES AMBIANCES URBAINES CARACTERISATION ET CONCEPTION

Centre de Ressources >> Urbanisme > Approche thématique > Conforts et ambiances



Marjory Musy - CERMA – UMR CNRS



Marjorie Musy, Chercheur HDR, CERMA – UMR CNRS 1563- Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes – Rue Massenet – BP 81931 – 44319 Nantes cedex 3. [Marjorie.musy@cerma.archi.fr](mailto:Marjorie.musy@cerma.archi.fr)

Novembre 2008

---

CENTRE DE RESSOURCES « ENVIROBOITE »



## PREMIERE PARTIE

1.	LA NOTION D'AMBIANCE.....	3
2.	ASPECTS HISTORIQUES ET ENJEUX CONTEMPORAINS.....	3
3.	INTERACTIONS PHYSIQUES : DE LA PHYSIQUE AU DISPOSITIF....	4
3.1.	Ambiance et environnement .....	4
3.1.1.	L'ILET DE CHALEUR URBAIN, NOUVEAU CONTEXTE CLIMATIQUE URBAIN .....	4
3.1.2.	LES CAUSES DE L'ICU.....	4
3.1.3.	CONSEQUENCES SUR LA SANTE .....	5
3.1.4.	CONSEQUENCES SUR LES CONSOMMATIONS ENERGETIQUES .....	5
3.1.5.	LES LEVIERS D'ACTION .....	6
3.2.	Ambiance et confort.....	9
3.2.1.	L'ENSOLEILLEMENT .....	10
3.2.2.	LA LUMIERE .....	10
3.2.3.	LA NOTION DE CONFORT AERAULIQUE (VENT) .....	10
3.2.4.	LA NOTION DE CONFORT THERMIQUE (VENT, CHALEUR, HUMIDITE) .....	11
3.2.5.	CONSTITUTION D'UNE AMBIANCE - INTERACTIONS FORMES PHENOMENES.....	16
3.2.6.	NOTE SUR LES AMBIANCES OLFACTIVES .....	17
4.	BIBLIOGRAPHIE DE LA PREMIERE PARTIE.....	17

## PREMIERE PARTIE

### 1. LA NOTION D'AMBIANCE

Si la notion d'« Ambiances Architecturales et Urbaines » est le cœur de la recherche de plusieurs laboratoires français et internationaux, ceux-ci se refusent à donner à la notion d'ambiance (ou d'ambiances) une définition qui serait selon eux trop « rigoriste » (Tixier 2007). Sans vouloir cerner cette notion qu'ils veulent ouverte, comme l'intersection de différentes disciplines, ils en donnent des caractéristiques.

L'ambiance implique tout d'abord un rapport sensible : pas d'ambiance sans usager pour l'expérimenter.

Si on parle d'ambiances architecturales et urbaines, la notion d'ambiance elle-même ne se réfère pas à une échelle spatiale particulière. Elle s'applique à tous types d'espaces. Il en est de même pour les échelles temporelles, les ambiances s'appliquent à des situations datées comme à des périodes de temps. Aux croisées des échelles spatio-temporelles, l'ambiance concerne aussi des expériences sensibles qui ne sont pas uniquement statiques, mais également en mouvement. Sont également étudiés les influences des ambiances sur les cheminements des usagers.



Si la perception d'une ambiance est toujours un tout qui convoque tous les sens, en fonction de notre propre sensibilité sociale et culturelle, on ne sait l'étudier qu'en la décortiquant sens par sens, discipline par discipline. Son étude nécessite donc une approche pluridisciplinaire qui manie des dimensions physiques, construites, sensibles, sociales mais sait ensuite faire dialoguer ces disciplines. Associées à ces approches, les méthodes varient : enquêtes, mesures in situ, simulations numériques...

On tente aujourd'hui d'aborder l'ambiance de façon interdisciplinaire et de dépasser les notions de confort et de nuisance. Du point de vue de la conception, on tend à passer d'objectifs de contrôle des ambiances à ceux de conception d'espaces à partir d'intentions d'ambiances, tâche très particulière puisque l'ambiance est le résultat unique d'un contexte (climatique, social, culturel), d'un aménagement et d'usages.

### 2. ASPECTS HISTORIQUES ET ENJEUX CONTEMPORAINS

On retrouve dans l'histoire des références aux ambiances urbaines sous différentes formes : analyses littéraires de lieux, discours, théories, préconisations, réglementations... Ces références varient en fonction des préoccupations du moment : hygiénisme, symbolique... Elles sont maintenant généralement invoquées dans le cadre du développement durable (Monin, Descat et Siret, 2002). La planification urbaine tente, avec les moyens disponibles de répondre à ces préoccupations, avec comme constante à toutes les époques l'impératif de devoir gérer des contraintes de tous ordres : politiques, économiques, sociaux... Celles-ci ont dans un grand nombre de cas occulté les préoccupations ambiantales. Pourtant, d'un aménagement urbain, résulte toujours une ambiance particulière qui a une influence forte sur l'usage qui sera fait des lieux.

Les récentes approches de développement durable sont venues en réaction au constat alarmiste de la dégradation de l'environnement et plus particulièrement dans les villes, de l'apparition des phénomènes de brouillard, de pics de pollution et d'îlots de chaleur. Elles proposent de redéfinir des modalités de développement basées à la fois sur les critères de durabilité sociale, économique et environnementale. Ce faisant, appliquées à l'aménagement urbain, elles impliquent en principe

systématiquement les disciplines invoquées par les ambiances, dans une approche globale. La notion de durabilité et donc l'approche long terme ajoute une préoccupation supplémentaire qui pour le moment se décline essentiellement sur les thématiques environnementales (effet de serre, pénurie d'énergie fossile) pour lesquelles l'urgence du « facteur 4 » (division par quatre des émissions de gaz à effet de serre de la France à l'horizon 2050) constitue un levier qui devrait en faire une priorité dans presque tous les projets urbains.

### 3. INTERACTIONS PHYSIQUES : DE LA PHYSIQUE AU DISPOSITIF

Dans ce qui suit, nous réduirons notre approche à l'approche physique des ambiances, ce qui ne nous empêchera pas de marquer un certain nombre d'interactions avec les autres dimensions.

Cette approche physique est liée aux facteurs physiques qui ont un effet sur la perception des ambiances par les usagers : la lumière, l'humidité, les odeurs, le vent (ou les mouvements d'air), la chaleur et le son. Nous extrapolerons par ailleurs l'approche « ambiances » pour aborder des aspects d'efficacité énergétique. Nous ne développerons pas ici les aspects de la qualité de l'air et de l'environnement sonore qui méritent une approche complète spécifique.

#### 3.1. *Ambiance et environnement*

Nous centrons notre approche du lien ambiance et environnement sur les aspects énergétiques, c'est-à-dire l'impact des facteurs physiques d'ambiance sur la consommation énergétique des bâtiments. Un autre impact important est la pollution de l'air, sous forme gazeuse et particulaire.

##### 3.1.1. L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN, NOUVEAU CONTEXTE CLIMATIQUE URBAIN

On appelle phénomène d'îlot de chaleur urbain l'observation de fortes différences entre les températures mesurées en site urbain et celles des campagnes environnantes. Dans certaines agglomérations, l'évolution spatiale de la température se traduit en effet par un pic semblable à un îlot. La forme de l'évolution de température observée est fortement corrélée avec la variation de la densité urbaine.

L'écart observé entre le centre urbain et ses alentours est surtout sensible la nuit, il peut atteindre 10° dans certaine agglomération comme Paris (Escourrou, 1990 ; Choissnel et Vivier, 1994). L'évolution des températures en milieu urbain révèle une augmentation d'année en année qui coïncide avec l'intensification de l'urbanisation.

##### 3.1.2. LES CAUSES DE L'ICU

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) :

- les échanges radiatifs complexe entre les bâtiments et l'effet de fermeture de l'horizon (écran vis à vis de la voûte céleste) favorisé par les constructions réduisent le rayonnement grande longueur d'onde
- l'augmentation de la masse thermique des bâtiments qui stockent la chaleur sensible
- l'augmentation des sources de chaleur anthropogéniques (transport, climatisation, métabolisme animal, industrie et autres sources de combustion)
- l'effet de serre urbain associé à une atmosphère plus polluée et plus chaude
- la réduction de l'albédo global du fait de la géométrie des villes
- la diminution de l'évaporation du fait de la réduction des surfaces évaporatives (végétation, présence de plans d'eau.)
- la diminution des transferts convectifs entre les rues.

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<sup>2</sup> (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) ont 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 al., 2003), car l'ensoleillement est alors réduit. En été, la charge anthropique peut devenir négligeable par rapport à l'ensoleillement en journée qui est l'un des facteurs principaux sur l'îlot de chaleur.

### 3.1.3. CONSEQUENCES SUR LA SANTE

L'urbanisation conduit ainsi à des situations problématiques en terme de chaleur, de pollution ou de nuisances sonores, particulièrement dans les grands centres urbains. Ces conséquences sont parfois dramatiques, comme celles de la canicule de l'été 2003 qui a entraîné un surcroît de mortalité (estimé à 70 000 morts en Europe, dont 20 000 en France). La coexistence de ce phénomène et du réchauffement climatique pourrait conduire dans l'avenir à des situations de canicules urbaines de plus en plus fréquentes.

### 3.1.4. CONSEQUENCES SUR LES CONSOMMATIONS ENERGETIQUES

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. En hiver l'effet sur les consommations des systèmes de chauffage est positif, 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 al. 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 al. 2001) ont montré que les charges thermiques pouvaient être doublées par l'effet d'îlot de chaleur, alors que le coefficient de performance 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. Ainsi, une étude sur six villes américaines (Akbari et al., 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, sources anthropogéniques, participent 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 1)

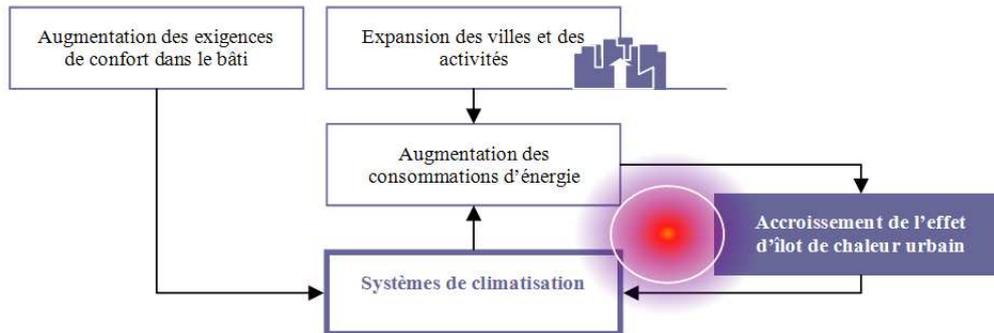


Figure 1 - Phénomène d'amplification de l'îlot de chaleur urbain et système de climatisation. (Bonzonnet, 2005)

### 3.1.5. LES LEVIERS D'ACTION

En étudiant les différents paramètres qui influencent les phénomènes mis en jeu dans le phénomène d'îlot de chaleur, on peut mettre en évidence des leviers d'action qui concernent l'aménagement : les matériaux, les formes urbaines, la végétation et l'eau. La charge anthropique peut également être liée à l'aménagement, mais d'une manière moins directe.

#### Les matériaux :

Deux caractéristiques des matériaux sont prioritairement à prendre en compte : les caractéristiques radiatives dans les grandes longueurs et dans les courtes longueurs d'onde. L'albédo (Courtes longueurs d'onde) des matériaux de surface régit la quantité d'énergie qui est réfléchiée par le matériau. Cependant, dans une surface urbaine, du fait de l'arrangement des surfaces, l'énergie réfléchiée par une surface n'est pas toujours renvoyée vers le ciel, mais peut être interceptée et en partie absorbée par une autre surface. On caractérise donc la surface urbaine par un albédo équivalent qui tient compte des inter-réflexions. Dans cet albédo équivalent, suivant leur position, les surfaces ne jouent pas le même rôle. Dans un tissu urbain dense, ce sont essentiellement les toitures qui participent à l'albédo et plus le tissu s'ouvre, plus les façades et les surfaces de sol prennent de l'importance.

L'émissivité des surfaces régit les échanges grandes longueurs d'onde (Infra rouge thermique) des surfaces urbaines entre elles ainsi qu'entre les surfaces et la voûte céleste. C'est ce phénomène qui permet aux surfaces de se refroidir en période nocturne. Ainsi, l'émissivité des matériaux est-elle également à prendre en compte en fonction de leur position, et plus précisément de leur facteur de vue du ciel (pourcentage de ciel visible depuis la surface).

Dans le tableau 1, nous donnons des valeurs d'émissivité et d'albédo de matériaux. Ces valeurs, relevées dans la bibliographie, sont relatives, en effet, suivant les sources des travaux de caractérisation, les compositions et modes d'obtention des matériaux peuvent différer de ceux pratiqués en France. Elles donnent cependant des ordres de grandeur.

	Albédo	Emissivité	Référence
<b>Matériaux de construction</b>			
<b>Pierre</b>	0.2-0.35	0.85-0.9	(Oke, 1987)
<b>Pierre</b> - Granite, Gneiss	0.44		(Mazria, 1979) (Lavigne, 1994)
<b>Gravier (vrac)</b>	0.08 -0.18	0.92	www.thermique55.com
<b>Calcaire</b> -clair - Sombre	0.75 0.50	0.36-0.9	(Mazria, 1979)
<b>Grés</b> - beige (quartzeux) - Gris clair - Rouge	0.44 0.38 0.27		(Lavigne, 1994) (Mazria, 1979)
<b>Asphalte foncé</b>	0.07	0.90	(Lavigne, 1994) (Mazria, 1979)
<b>Béton neuf</b>	0.45	0.90	(Lavigne, 1994)
<b>Béton vieilli</b>	0.1-0.35	0.71-0.9	(Lavigne, 1994), (Oke 1987), (Mazria, 1979)
<b>Bois</b>	0.40	0.95	(Lavigne, 1994)
<b>Brique</b>	0.05-0.2	0.9-0.92	(Oke 1987)
<b>Toitures</b>			
<b>Tuile en terre cuite</b>	0.1-0.35	0.90	(Lavigne, 1994) (Mazria, 1979), (Oke 1987)
<b>Feutre bitumé</b>	0.12		(Mazria, 1979)
<b>Feutre bitumé avec surface aluminisée</b>	0.60		(Mazria, 1979)
<b>Étanchéité en feuilles bitumées,</b> - Brun - vert	0.13 0.14		(Mazria, 1979)
<b>Papiers goudronné, noir</b>	0.07		(Mazria, 1979)
<b>Tuiles de béton :</b> - Rouge - Blanc - Beige claire - Marron claire - Mauve - Gris rose	0.18 0.73 0.63 0.42 0.41 0.53	0.91 0.9 0.9 0.9 0.9 0.9	(Parker, 1993) (Berdahl, 1997)
<b>Fibre de ciment :</b> - Marron - Gris étain	0.26 0.25	0.9 0.9	(Parker, 1993) (Berdahl, 1997)
<b>Bardeau d'asphalte</b> - Blanc - Argent - Marron foncé - Gris - Vert - Marron claire - Noir	0.21 0.20 0.08 0.08 0.19 0.19 0.05	0.91 0.91 0.91 0.91 0.91 0.91 0.91	(Berdhal, 1997)
<b>Soles</b>			
<b>Herbe haute et sèche</b>	0.31 à 0.33		(Mazria, 1979)

<b>Gazon vert</b>	0.33	0.49	(Lavigne, 1994) (Mazria, 1979)
<b>Sol nu sans végétation</b>	0.25		(Mazria, 1979)
<b>Sable humide</b>	0.09		(Lavigne, 1994)
<b>Sable sec</b>	0.18		(Lavigne, 1994)
<b>Marbre - blanc</b>	0.66	0.931	(Mazria, 1979) (Lavigne, 1994)
<b>- sombre</b>	0.44	0.931	(Mazria, 1979) (Lavigne, 1994)
<b>Toitures et façades</b>			
<b>Aluminium</b>	0.6-0.85	0.12-0.25	(Parker, 1993), (Mazria, 1979)
<b>Fer</b>	0.10-0.12	0.13-0.28	(Oke 1987)
<b>Acier galvanisé oxydé</b>	0.38	0.28	(Lavigne, 1994) (Mazria, 1979)
<b>Argent</b>	0.93	0.02	(Mazria, 1979)
<b>Cuivre</b>	0.82	0.072	(Mazria, 1979)
<b>Zinc galvanisé</b>		0.23	(Mazria, 1979)
<b>Laiton</b>		0.05	(Mazria, 1979)
<b>Peintures</b>			
<b>Peintures cellulosique</b>			
- blanc	0.82	0.91	(Berdahl, 1997) (Mazria, 1979) (Synnefa et al 2007)
- jaune	0.77	0.91	
- Orange	0.63	0.91	
- Rouge vif	0.66	0.91	
- Rouge sombre	0.47	0.91	
- Gris	0.25	0.91	
- Vert brillant	0.21	0.91	
- Vert claire	0.50	0.91	
- Vert sombre	0.12	0.91	
- Bleu	0.18	0.91	
- Bleu foncé	0.09	0.91	
- Marron	0.23	0.91	
- Marron clair	0.22	0.91	
- Noir	0.05	0.91	
<b>Verre transparent :</b>			
angle zénithal <40°	0.08	0.87 à 0.94	(Oke, 1987)
angle zénithal 40° < α < 80°	0.09 à 0.52	0.87 à 0.92	

Tableau 1 : données radiatives de matériaux, d'après (Athamena, 2008)

### La Forme urbaine :

Dans les phénomènes de rayonnement, nous venons de voir que la forme urbaine, associée aux matériaux de surfaces, conditionne les quantités d'énergie échangées entre la surface urbaine et le ciel.

La forme urbaine modifie également les écoulements du vent et donc, les échanges convectifs qui se produisent au niveau des surfaces.

Une forme moins dense et ouverte au vent favorise les échanges convectifs.

Du point de vue de la forme urbaine, nous tombons donc face à des contradictions : il faudrait une forme qui en été, de jour se ferme au rayonnement solaire, de nuit, s'ouvre pour perdre l'énergie stockée dans les matériaux et qui agisse inversement en hiver. Certaines de ces contradictions peuvent être résolues en partie par l'orientation. Cependant, les orientations, même si elles peuvent être imposées, ne le seront que dans une certaine mesure car elles doivent également répondre à des contraintes de trame urbaine. Le parti pris peut également être de concevoir à l'échelle urbaine pour des apports solaires optimisés en hiver, et à l'échelle du bâtiment, pour une protection des bâtiments à l'aide de dispositifs architecturaux. Enfin, le choix des matériaux en fonction des priorité hiver/été, de l'accès au soleil des surfaces, peuvent aussi conduire à des compromis intéressants.

### La végétation et l'eau :

Arbres, arbustes et aménagements de plantes grimpantes offrent une résistance au déplacement de l'air, réduisant ainsi la vitesse du vent. Ils sont utilisés pour canaliser les écoulements, créer des zones d'accalmie, et sous certains climats pour bloquer les vents chauds et chargés de poussières.

La présence de végétation modifie aussi l'impact du rayonnement solaire, la température et l'humidité de l'air. Les feuilles absorbent une grande quantité du rayonnement solaire incident. Elles en utilisent une petite partie pour la réaction chimique de photosynthèse, et la plus grande part pour l'évaporation de l'eau des feuilles exposées au soleil. L'évaporation refroidit les feuilles et aussi l'air qui est en contact avec ces feuilles. La température de la surface végétale dépend de la quantité d'énergie incidente absorbée, de l'espèce, de la disponibilité en eau des feuilles. De nombreuses études par imagerie infrarouge ont été réalisées pour évaluer ces températures. Les auteurs s'accordent à donner des écarts de température entre l'air et le feuillage variant entre  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  et  $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Lehtihet, 2003).

La présence de végétation a des incidences sur la consommation énergétique des bâtiments. Par la protection contre le vent, les arbres réduisent la vitesse de déplacement de l'air sur l'enveloppe du bâtiment, ce qui réduit les échanges de chaleur au niveau des surfaces extérieures. Ce phénomène, qui est positif en hiver (moindre refroidissement des surfaces ensoleillées) mais négatif en été, n'est significatif que pour les bâtiments non isolés thermiquement. La protection contre le vent entraîne aussi une réduction des infiltrations d'air dans les bâtiments.

De nombreuses études ont démontré que l'augmentation de la densité des arbres dans les rues pouvait induire une réduction des charges de chauffage et de climatisation allant de 12 à 80 %. Il est cependant difficile de généraliser les valeurs données dans ces études. En effet, les résultats dépendent du climat considéré, des modes constructifs et des usages des bâtiments. Le choix du type d'arbre est primordial : les arbres aux feuillages caducs permettent par exemple de répondre aux besoins de refroidissement en été sans augmenter ceux de chauffage en hiver.

La végétation peut aussi avoir des effets négatifs sur les économies d'énergie : augmentation de la charge latente de climatisation du fait de l'augmentation de l'humidité de l'air, réduction du rayonnement de grande longueur d'onde émis, réduction du potentiel de la ventilation naturelle, etc.

### 3.2. *Ambiance et confort*

L'aménagement urbain durable doit également répondre à des qualités d'usage parmi lesquelles le confort des usagers. La notion de confort est en général définie par la négative, c'est-à-dire l'absence d'inconfort. Si pour les ambiances intérieures, le confort, pour différents paramètres pris uns à uns fait l'objet de normes (Bernard, 2003), pour les ambiances extérieures, on raisonne jusqu'à maintenant beaucoup plus souvent en termes de risque que de confort.

Les domaines de la qualité de l'air et de l'environnement sonore, associés à des sources anthropiques, sont en général des sujets sensibles et abordés lors des projets, soit par une action sur la source soit sur leur milieu de propagation afin d'atténuer la gêne ou le risque qu'ils occasionnent. Des exigences en termes d'ensoleillement ou d'ombrage, d'éclairement lumineux, d'intensité des écoulements d'air sont moins courantes. Cependant, si ces phénomènes naturels ne sont pas complètement maîtrisables, il est possible de définir des qualités d'ambiance en fonction des usages et de concevoir un projet de manière à les obtenir.

Par ailleurs, plusieurs études (Boussoulim et al, 2002; Nikolopoulou, 2004) montrent que l'usage des espaces publics et le comportement des individus sont fonction des conditions climatiques. D'après Nikolopoulou (2004), la fréquence d'occupation des espaces publics durant la saison hivernale est fonction de la température globale (rayonnante et ambiante). Les résultats de cette recherche démontrent une corrélation directe et forte entre la température globale et le nombre d'usagers dans les espaces publics extérieurs. Cette relation entre les deux variables affirme que la qualité de l'environnement thermique est impérative pour l'usage et l'appropriation des espaces publics extérieurs.

### 3.2.1. L'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. Le rayonnement recouvre un spectre qui intéresse donc à la fois les problèmes lumineux (éclairage lumineux) et les problèmes énergétiques (rayonnement solaire).

Dans le bilan énergétique d'une surface extérieure, exposée au soleil, les échanges radiatifs représentent souvent la composante la plus importante en valeur.

Le rayonnement de courtes longueurs d'onde peut facilement être mesuré et des données sont déjà disponibles via la plupart des services météorologiques nationaux, pour un grand nombre de sites (<http://www.satel-light.com>). 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, comme sa turbidité, sa concentration en eau, les caractéristiques de la couverture nuageuse, etc.

En terme de confort extérieur, on peut raisonner en durée d'ensoleillement, en fonction des périodes de l'année, en visant éventuellement des moments de la journée. On peut également travailler à partir des flux énergétiques, cependant, cela n'a réellement de sens que dans des objectifs de récupération d'énergie ou dans des approches complètes de confort thermique que nous aborderons dans la partie « confort thermique ».

### 3.2.2. LA LUMIÈRE

L'éclairage contribue au bien-être en assurant des conditions optimales pour les yeux en termes de quantité et de répartition de la lumière, en évitant tant les éblouissements que les coins sombres. La lumière est un élément à part entière de notre environnement quotidien qui a deux dimensions. Elle peut être source de plaisir pour l'utilisateur, de confort, de rêve et d'émotions, en révélant l'espace par ses couleurs. Elle peut également être source de gêne, d'inconfort en perturbant le champ visuel ou l'esthétique urbaine.

Elle se compose à l'interaction des sources (naturelles ou artificielles) et des surfaces, en fonction du temps, du moment de la journée, de l'année.

Du point de vue de la lumière naturelle, dans les espaces urbains, une part de l'éclairage lumineux provient directement du ciel, il est alors relié à la fraction de ciel visible par la surface réceptrice. Une autre part provient des réflexions des surfaces environnantes, cette part dépend du rayonnement lumineux incident sur ces surfaces et de leur nature.

### 3.2.3. LA NOTION DE CONFORT AÉRAULIQUE (VENT)

Le vent est un phénomène variable : d'un point à un autre, dans le temps (notion de turbulence). L'échelle de Beaufort (tableau 2) donne quelques manifestations du vent en fonction de sa vitesse et des sensations ressenties.

La qualité des ambiances relativement aux mouvements d'air peut être envisagée selon deux angles : le confort dynamique (interaction avec les mouvements, la stabilité des usagers) et le confort thermique (contribution des échanges convectifs au bilan thermique du corps). Ces deux notions sont en outre pondérées par l'état subjectif de l'individu.

Il n'existe pas de critère de confort qui appréhende ces deux aspects simultanément. Ils sont en général traités séparément : d'un côté la gêne dynamique, que nous évoquerons ici, d'un autre la notion de confort thermique que nous verrons dans un autre paragraphe.

Le vent exerce une force proportionnelle au carré de sa vitesse sur le piéton qui doit la compenser dans son déplacement.

Force	Vitesse du vent (m/s) à H=2m	Caractéristiques du vent
2	1,5 à 3	Les visages ressentent la sensation du vent. Les feuilles bruissent.
3	3 à 4,5	Les feuilles et les petits rameaux sont en mouvement permanent. Le vent déploie pleinement les drapeaux.
4	4,5 à 7	La poussière et les papiers se soulèvent. Les branches s'agitent. Les cheveux sont décoiffés.
5	7 à 9	Les arbres avec des feuilles oscillent. La marche est légèrement perturbée.
6	9 à 11	Les grosses branches se mettent en mouvement. Le vent siffle dans les fils téléphoniques. Les parapluies sont utilisés avec peine. La marche devient très instable.
7	11 à 14	Les arbres sont totalement en mouvement. On éprouve de grosses difficultés à marcher contre le vent.
8	14 à 17	Les branches d'arbres se cassent. D'une façon générale, progression pedestre très difficile et dangereuse.
9	17 à 20	Risque d'être violemment projeté à terre sous l'effet des bourrasques.

Tableau 2 : Echelle de Beaufort rapportée aux effets sur le piéton (Gandemer, 1981)

Les conditions de confort peuvent alors être représentées par seuil de gêne auquel on associe une fréquence d'inconfort, c'est-à-dire le pourcentage du temps pendant lequel le seuil est atteint et dépassé. Suivant les types d'activités, l'acceptabilité pour une fréquence donnée diffère. (Gandemer, 1976) propose alors des limites de fréquences au delà desquelles, selon l'activité, les conditions de vent deviennent inconfortables (cf tableau 3).

Activités	Limite supérieure de la gêne pour un confort convenable (en pourcentage du temps annuel)
Station immobile prolongée (terrasse de café, théâtre en plein air, piscine, etc.)	5 %
Station immobile de courte durée (jardin public, aire de jeux, rue commerçante, galerie, etc.)	10 %
Marche normale (promenade pedestre, passage piétonnier, entrée d'immeuble, etc.)	15 %
Marche rapide (parc auto, trottoir des avenues, belvédère, etc.)	25 %

Tableau 3 : Fréquence de nuisance liée à l'activité [Gandemer et al 1976].

Il n'en reste pas moins que déterminer les conditions de vent dans une situation urbaine est une tâche difficile que nous aborderons dans la deuxième partie de l'article.

#### 3.2.4. LA NOTION DE CONFORT THERMIQUE (VENT, CHALEUR, HUMIDITE)

##### Approches du confort thermique

Le confort thermique pour un être humain est défini par Fanger (1970) comme « l'état de l'esprit qui exprime la satisfaction avec l'environnement thermique ». Givoni (1976) définit le confort thermique comme l'absence de l'irritation et de l'inconfort dus à la chaleur ou au froid, et comme un état impliquant l'agrément.

La sensation de confort thermique est liée à l'effort que l'organisme doit fournir pour maintenir sa température interne constante (Hoffmann, 1994). Une ambiance confortable est une ambiance pour laquelle l'organisme humain maintient sa température corporelle constante (homéothermie) sans mettre en jeu d'une manière perceptible ses mécanismes instinctifs thermorégulateurs de lutte contre

le chaud et le froid. Cet état est appelé neutralité thermique. Les conditions de confort sont obtenues à partir d'un processus cognitif qui implique plusieurs phénomènes relevant de différentes disciplines. Les travaux fondateurs de la recherche sur le confort thermique sont relatifs aux ambiances intérieures. Le confort thermique est abordé selon trois types d'approches : les approches physique, thermo-physiologique et psycho-sociologique.

Dans l'approche physique, le corps est considéré comme un système thermique et les échanges thermiques entre le corps et l'environnement se produisent par la peau et par les vêtements. Ce modèle est basé sur l'analyse du bilan thermique du corps humain et prend en compte les transferts de chaleur et de masse ainsi que la façon dont la thermorégulation intervient dans la modulation de ces échanges (Thellier et al., 2003). On arrive ainsi à différents modèles de confort qui transcrivent ces échanges l'équilibre thermique corporel.

Le modèle physiologique étudie les réponses subjectives à l'environnement thermique ainsi que les actions involontaires, qui se produisent quand le corps n'est pas en état de neutralité, comme la transpiration et le frisson.

L'approche psycho-sociologique appréhende l'évaluation du climat par l'être humain, grâce à l'interprétation en terme de confort qui est la composante subjective.

Des échelles de confort ont été établies expérimentalement à partir des réponses de panels d'individus soumis à des ambiances thermiques contrôlées. Cependant, la sensation du confort thermique est une notion subjective, individuelle et des travaux récents sur le confort adaptatif mettent en avant ces variations qui peuvent être d'ordre physiologique, psychologique, social, culturel ou comportemental (de Dear et al., 1997; Brager and de Dear, 1998; de Dear and Pickup, 1999; Nikolopoulou and Steemers, 2003).

### Paramètres du confort thermique

Le corps humain est un système thermique qui doit maintenir sa température interne autour de 37°C malgré des variations de la température extérieure. Cet équilibre met en jeu une production de chaleur (thermogenèse) et des pertes (thermolyse). Il est influencé par des paramètres de l'environnement : la température de l'air, la température radiante moyenne (incluant les températures des parois environnantes mais aussi la voûte céleste), la vitesse de l'air et l'humidité relative, les apports solaires et d'autres phénomènes tels que le ruissellement de la pluie. Par ailleurs, le bilan thermique est influencé par des paramètres relatifs à l'individu : niveau d'activité ou taux métabolique et résistance thermique des vêtements (Jendritzky et al., 2000).

### Échanges thermiques

Quel que soit le climat, le bilan thermique doit rester proche de zéro, on écrit donc l'équilibre entre d'une part :

- le métabolisme,  $M$ , (production de l'énergie dont le taux dépend de l'activité et de l'exercice musculaire (ASHRAE, 1993)),

d'autre part les échanges avec le milieu extérieur par l'intermédiaire de la peau et des voies respiratoires par

- rayonnement,
- conduction,
- convection
- et par l'évaporation des fluides du corps.

Ces échanges thermiques sont définis dans de nombreux ouvrages (Fanger, 1972; Givoni, 1976; Depecker and al., 1989; ASHRAE, 1993; Hoffmann, 1994).

Généralement, les transferts par conduction sont négligés dans la mesure où les écarts de température d'une part et les surfaces d'échanges d'autre part sont très faibles.

Pour l'application des modèles physiologiques dans un environnement extérieur, la plus grande difficulté réside dans la prise en compte des conditions de rayonnement. Les flux radiants changent considérablement dans l'espace et dans le temps et traduisent les caractéristiques météorologiques aussi bien que des différences dans les propriétés radiatives des surfaces environnantes. Le rayonnement, particulièrement le rayonnement solaire direct, peut être une source d'énergie importante.

### Indices de confort thermique en extérieur

Pour évaluer le confort thermique en extérieur, des indices spécifiques ont été définis. Ils intègrent les facteurs qui définissent l'environnement thermique humain et prévoient la réponse des individus. Nous présentons dans la suite un nombre non exhaustif des indices définis dans la littérature.

#### L'indice PT - Température Perçue

La Température Perçue (en °C) est définie pour évaluer le stress et le confort thermique du corps humain (Staiger et al., 1997). C'est la température de l'air dans un environnement de référence dans lequel la perception de la chaleur et/ou du froid serait la même que dans les conditions réelles (Jendritzky and Nuebler, 1981). Le modèle repose sur le bilan d'énergie du corps humain, basé sur l'équation de confort de Fanger couplé avec les flux solaires (Staiger et al., 1997). Dans l'environnement de référence, la vitesse de vent est réduite à un courant d'air, et la température radiante moyenne est égale à la température de l'air. La pression de vapeur d'eau est identique à celle de l'environnement réel.

L'évaluation thermo-physiologique est réalisée pour un homme « standard » dont le taux métabolique est 2,3 Met. L'homme standard utilisé peut adapter ses vêtements entre vêtements d'été (0,50 clo) et d'hiver (1,75 clo).

Le rayonnement, particulièrement le rayonnement solaire direct, peut être une source importante d'énergie. L'influence du rayonnement solaire direct varie avec la superficie du corps exposé au soleil. La température perçue augmente plus rapidement que la température de l'air et, pour des conditions chaudes d'été, elle se trouve dans la plupart des cas au-dessus de la température de l'air, pour les cas extrêmes autour de 15 K.

Température perçue (°C)	Perception thermique	Stress physiologique
< -39	très froid	extrêmement froid
-39 à -26	froid	froid
-26 à -13	froid	froid modéré
-13 à 0	légèrement froid	froid faible
0 à +20	confortable	confort possible
+20 à +26	chaud	légèrement chaud
+26 à +32	chaud	chaud modéré
+32 à +38	chaud	chaud
> +38	très chaud	extrêmement chaud

Tableau 4 : Température perçue et stress thermique (Staiger et al., 1997)

#### L'indice PET - Température Physiologique Équivalente

L'indice PET est défini comme la température de l'air (intérieur ou extérieur) à laquelle, dans un local typique intérieur, sans vent et rayonnement solaire, le bilan d'énergie du corps humain est équilibré avec les mêmes températures interne et de peau que celles obtenues dans les conditions à évaluer (Höppe, 1999).

Cet indice permet de comparer les effets d'un environnement thermique extérieur par rapport à une expérience en intérieur. Il est basé sur le modèle de bilan d'énergie MEMI (Munich Energy balance Model for Individuals). Le climat intérieur de référence est défini par :

- la température radiante moyenne est égale à la température de l'air, ( $T_{mrt} = T_a$ ),
- la vitesse de l'air égale à 0,1 ms<sup>-1</sup>,
- la pression de vapeur d'eau est fixée au 12 hPa (environ une humidité relative de 50% à  $T_a = 20^\circ\text{C}$ ).

Dans le cas d'une journée d'été, chaude et ensoleillée, le PET peut valoir 43°C. Cela signifie qu'un individu dans une pièce avec une température d'air de 43°C atteint le même état thermique que dans les mêmes conditions en extérieur.

	$T_{air}$ (°C)	$T_{mrt}$ (°C)	$U$ (m s <sup>-1</sup> )	$P$ (hPa)	$PET$ (°C)
Pièce typique	21	21	0,1	12	21
Hiver, au soleil	-5	40	0,5	2	10
Hiver, à l'ombre	-5	-5	5,0	2	-13
Été, au soleil	30	60	1,0	21	43
Été, à l'ombre	30	30	1,0	21	29

*Exemples de valeurs de l'indice PET (Matzarakis and Mayer, 1996)*

### L'indice de température standard effective en espaces extérieurs (OUT\_SET\*)

L'indice OUT\_SET\* de Dear et Pickup (1999), basé sur l'indice de température standard effective (SET\*) de Gagge et al. (1971) peut donner des représentations physiologiquement valides du stress et du confort thermique en extérieur à travers des combinaisons infinies de la température de l'air, la température radiante moyenne, l'humidité, la vitesse de l'air, l'isolation thermique de vêtements et le taux métabolique. Le modèle OUT\_MRT calcule la température de surface d'une zone hypothétique autour d'un sujet debout qui échangerait le même rayonnement infrarouge avec le sujet que le rayonnement dans toutes les longueurs d'ondes dans l'environnement solaire et infrarouge réel.

L'indice SET\* définit ainsi la température d'un environnement de référence isotherme ( $T_a = T_{mrt}$ , HR=50 %,  $u = 0,15 \text{ m.s}^{-1}$ ) telle qu'une personne dans cet environnement ayant une isolation de vêtement standard (0,6clo et 1,2met) ait la même température moyenne de peau ( $T_p$ ) et la même moiteur ( $w$ ) que dans l'environnement réel complexe.

### Indice de contrainte thermique

L'indice de contrainte thermique, modèle biophysique, décrit les mécanismes d'échange de chaleur entre le corps et l'environnement, à partir desquels la contrainte thermique totale s'exerçant sur le corps (effets du métabolisme et de l'ambiance) peut être calculée (Fanger, 1972). Cet indice repose sur l'hypothèse que, dans des conditions d'équilibre thermique, le refroidissement par évaporation du à la transpiration permet de compenser la production de chaleur métabolique et l'échange de chaleur avec l'environnement. La relation entre la sécrétion de la sueur et l'évaporation mise en jeu dépend de l'efficacité de refroidissement de la sueur. Quand cette efficacité diminue, le corps doit sécréter de la sueur selon un taux plus élevé. Cet indice, initialement développé pour des situations en intérieur a ensuite été revu pour un usage à l'extérieur par l'introduction du rayonnement solaire et l'utilisation de différents types de vêtements.

### L'indice PMV\*

L'indice PMV\* (Gagge, 1986) est obtenu par une adaptation du PMV (ISO 7730, 1994) dans lequel la température opérative (fonction de la température de l'air et la température radiante moyenne) est remplacée par la température effective, ET\*. Ceci confère au PMV\* une sensibilité bien plus importante à l'humidité dans la zone chaude, tout en lui laissant la même valeur dans la zone de neutralité et au-dessous.

L'indice PMV\* est donné par l'équation :

$$PMV^* = (0,303 e^{-0,036 M} - 0,028) *$$

}	$(M - W)$	production de chaleur métabolique
	$-(h_r - h_c)(T_p - ET^*)$	perte de chaleur sensible à travers la peau
	$-3,05 \cdot 10^{-3} (5733 - 6,99(M - W) - p_a)$	perte par diffusion à travers la peau
	$-0,42((M - W) - 58,15)$	perte de chaleur par sudation
	$-0,0014 M(34 - T_a)$	perte de chaleur sensible par respiration
	$-1,7 \cdot 10^{-5} M(5867 - p_a)$	perte de chaleur sensible par respiration

avec : M : métabolisme (Wm-2 ou met), W : travail (Wm-2), hr : coefficient de transfert surfacique de chaleur par rayonnement (Wm-2K-1), hc : coefficient d'échange surfacique par convection (Wm-2K-1), Tp : température cutanée pour l'homme nu ou des vêtements pour l'homme vêtu (°C), ET\* : température effective (°C), pa : pression de l'air (Pa), Ta : température de l'air (°C).

La température effective (ET\*) est définie comme la température d'un environnement fictif isotherme, à 50% d'humidité relative, dans lequel un sujet humain aurait la même mouillure cutanée ( $\omega$ ) et le même échange de chaleur au niveau de la peau que dans l'environnement réel, décrit par la température T et la pression de vapeur ambiante pa :

$$ET^* = \frac{h_r + T_{mrt} + h_c T_a}{h_r + h_c} + \omega i_m LR(p_a - 0,5 p_{sat} ET^*)$$

avec : Tmrt : température radiante moyenne (°C),  $\omega$  : mouillure cutanée (-), im : Efficacité totale d'infiltration de vapeur (-), LR : Rapport de Lewis (-), psat : humidité spécifique saturante (kg.kg-1).

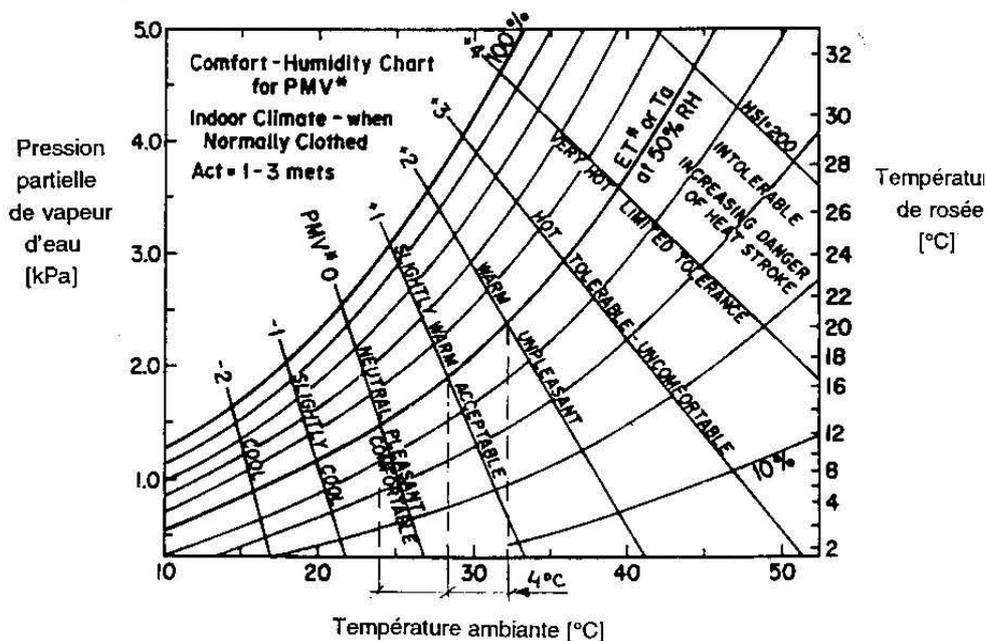


Figure 2 : iso PMV\* et iso ET\* (Hoffmann, 1994)

### Approche adaptative

L'approche adaptative part du principe qu'en cas d'inconfort, l'homme réagit de façon à rétablir le confort : il met en place des réactions comportementales adaptées selon la situation et les moyens dont il dispose.

En extérieur, les gens s'attendent à des variations et ont plus de comportements adaptatifs qu'à

l'intérieur. De ce fait, combiner les effets des facteurs environnementaux pour prévoir les conditions de confort thermique en employant des modèles d'équilibre peut ne pas être approprié à l'environnement thermique extérieur. (Nikolopoulou et Steemers, 2003) suggèrent qu'une approche adaptative puisse produire des résultats plus proches de conditions environnementales thermiques réelles et serait appropriée.

### 3.2.5. CONSTITUTION D'UNE AMBIANCE - INTERACTIONS FORMES PHENOMENES

Nous avons vu dans ce qui précède qu'un des éléments majeur du confort thermique en extérieur est la part radiative des flux échangés (par le biais de la température moyenne radiante dans les modèles). En effet, ces flux varient beaucoup plus qu'en intérieur. Cette part comporte l'énergie reçue par courtes longueurs d'onde, directement du soleil, ou après réflexions sur les surfaces environnantes, et la part grandes longueurs d'onde issue de la voûte céleste ou des surfaces. L'environnement thermique a donc une grande importance, et nombre des dispositifs, comme la présence des surfaces de matériaux clairs, de végétation, d'eau, auront un effet plus lié à leur température de surface faible, impliquant donc des échanges radiatifs plus faibles qu'à l'influence sur la température de l'air.

#### **Les arbres urbains : une stratégie pour le confort des usagers**

L'utilisation de la végétation permet de modifier le climat urbain et d'en améliorer les conditions de confort. Les arbres agissent comme masque au soleil, au vent, au son, comme source d'humidité et régulateur de la température de l'air et des surfaces environnantes. Par effet cumulatif, la végétation permet la réduction de l'îlot de chaleur par l'absorption du rayonnement solaire.

Une conséquence directe de la présence des arbres est la diminution de la température de l'air et des surfaces proches. De nombreuses études mesurent cet écart dans des parcs urbains et le comparent à celui relevé dans les zones construites environnantes. Elles relèvent toutes une réduction de la température de l'air qui peut aller jusqu'à 6°C. Les résultats varient en fonction des conditions climatiques, de la taille des parcs et de la nature de la végétation.

Dans le cas de petites zones de végétation, l'effet de refroidissement est obtenu principalement par l'effet d'ombrage. Des études menées à Marseille par le laboratoire ABC ont montré que les espaces urbains végétalisés sont plus chauds que la station météo de 0,3 °C et les espaces minéraux de 0,8 °C. A l'ombre, une pelouse et une surface minérale ont presque la même température de surface à 1 °C près, alors qu'au soleil l'écart peut atteindre 11 °C. Selon une étude menée sur la ville de Barcelone, l'écart entre la température de l'air et celle de la surface d'une pelouse ensoleillée peut atteindre 14 °C, alors qu'il serait de plus de 25 °C pour les surfaces minérales (sols et murs ensoleillés). Des écarts de température entre des rues avec et sans arbres sont également mis en évidence.

Récemment, des études démontrent que la végétation a un effet significatif sur le microclimat urbain. Pour mettre en évidence l'effet bioclimatique la végétation en milieu urbain, (Dimoudi, 2003) ont mené une étude paramétrique au centre ville d'Athènes (Grèce). L'objectif consistait à développer des paramètres simples qui peuvent décrire le microclimat et la performance environnementale dans différentes textures urbaines, mais aussi de déterminer des indications pour l'utilisation de la végétation dans un contexte urbain.

Les résultats de cette recherche démontrent l'effet bioclimatique de la végétation en milieu urbain.

#### **Surfaces d'eau**

Outre différentes valeurs symboliques, sociétales, esthétiques, thérapeutiques, etc. que l'on peut attribuer à la présence de l'eau dans l'aménagement, l'objectif de la présence d'eau peut être de refroidir l'atmosphère par évaporation. Des dispositifs favorisant l'évaporation de l'eau sont alors mis en place (Ken-Ichi, 1991; Nishimura et al., 1998; Givoni and La Roche, 2000) comme les jets d'eau, les brumisateurs et les tours de refroidissement qui constituent des solutions au contrôle thermique de l'espace dans les climats chauds.

Utilisés depuis l'antiquité, ces dispositifs ont été mis en œuvre et instrumentés plus récemment durant l'Exposition Universelle de Séville en 1992 (Alvarez et al., 1992).

L'utilisation de bassins d'eau en toiture comme moyen de réduction des apports thermiques en été a fait l'objet d'études depuis 1920 (Cook, 1985). Cependant, la simple présence d'eau n'est pas suffisante. En effet, l'eau est transparente et une grande partie du rayonnement parvient à la surface de la toiture. C'est pourquoi (Tang, 2003), (Tang et al., 2004) ont proposé un dispositif de bassin utilisant des sacs de toile en surface, portés par 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.

L'effet de la vaporisation d'eau sur les toitures de bâtiments a été étudié par (Zhou et al., 2004). Ils concluent que cette technique n'a pas grand intérêt du fait de la quantité d'eau qui doit être vaporisée.

### 3.2.6. NOTE SUR LES AMBIANCES OLFACTIVES

Peu de travaux traitent de la part olfactive des ambiances. On peut cependant relever les travaux de (Balez, 1996), (Balez, 2001) qui s'appliquent à comprendre les modes d'apparition, de transition ou de disparition de l'odeur dans l'espace, si possible dans leurs rapports à des dispositifs techniques et/ ou spatiaux.

Notons que la végétation joue un rôle important dans les ambiances olfactives, rôle qui varie en fonction des saisons, de la température et de l'humidité ambiantes.

## 4. BIBLIOGRAPHIE DE LA PREMIERE PARTIE

**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.

**Alvarez, D. S., Cejudo, L. J. M., Guerra, et al.**, 1992 : « Control climático en espacios abiertos », El Proyecto Expo'92. **In:** Proc. of Expo'92, Sevilla, pp. 4-49.

**ASHRAE**. 1993 : « Physiological principles and thermal comfort. **In:** ASHRAE Handbook of Fundamentals », SI Edition, Atlanta, GA: ASHRAE, pp. 8.1-8.29.

**Athamena K.**, 2008, « Indicateurs pour l'analyse de la contribution d'un projet urbain à l'îlot de chaleur », Mémoire de Master II, ensa Nantes, 127p.

**Balez S.**, 1996 : « Ambiances (Les) olfactives dans l'environnement construit : Validité de la notion d'effet odorant. Ecole polytechnique de l'université de Nantes : Grenoble : CRESSON, 1996 . - 114-102 p.

**Balez S.**, 2001 : « Ambiances olfactives dans l'espace construit : perception des usagers et dispositifs techniques et architecturaux pour la maîtrise des ambiances olfactives dans des espaces de type tertiaire ». Thèse de doctorat, Ecole polytechnique de l'université de Nantes, Grenoble : CRESSON, 2001 . - 188 p.

**Berdahl P. and Bretz s.E.**, 1997 : "Preliminary Survey of the Solar Reflectance of Cool Roofing Materials," *Energy and Buildings*, Vol. 25, 149-158 (1997).

**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.

**Bernard A-M**, 2003 : « Les normes existantes en tertiaire : Confort et qualité d'air : Climat des lieux de travail = Comfort and I.A.Q. existing standards in C.I. buildings », Chauffage, ventilation, conditionnement d'air ISSN 1292-3397 Chauffage, ventilation, conditionnement d'air ISSN 1292-3397, 2003, no822, pp. 28-30 [3 page(s) (article)]

**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.

**Boussoulim, A.**, 2002. « Contribution à la caractérisation de l'impact et de l'incidence du microclimat sur l'usage et les activités en espaces public extérieur », Thèse de Doctorat École Polytechnique de Nantes, 2002.

**Brager, G. S., de Dear, R. J.**, 1998 : « Thermal adaptation in the built environment: a literature review. » Energy and Buildings, vol. 27, n°1, pp. 83-96.

**Choisnel E., Vivier J.F.**, 1994 : « Les saisons météorologiques : le climat urbain les a-t'il masquées ? », Les annales de la recherche urbaine, n°61, p. 54-74

**Cook, J.**, 1985 : "Passive cooling", UK, Cambridge, MA, London. MITPress.

**de Dear, R., Brager, G., Cooper, D.**, 1997 : « Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference ». Sydney, Australia, Berkeley, CA, USA: Macquarie Research Ltd., Macquarie University, Sydney, NSW 2109 AUSTRALIA, Center for Environmental Design Research, University of California, Berkeley, CA 94720 USA, p. 312.

**de Dear, R., Pickup, J.** 1999 : « An outdoor thermal environment index (OUT\_SET\*) –A ». In: Proc. of ICB.

**Depecker, P., al.**, 1989 : « Qualité thermique des ambiances ». Collection cahiers pédagogiques Thermique et Architecture, p. 67.

**Dimoudi, A., Nikolopoulou, M.** 2003 : « Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits ». Energy and Buildings, vol. 35, n°1, pp. 69-76.

**Escourou G.**, 1990 : « La spécificité du climat de l'agglomération parisienne », Revue de Géographie de Lyon, volume 65, n°2, p. 85-89

**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.

**Fanger, P. O.**, 1972 : « Thermal Comfort ». New York : Mc Graw Hill

**Fanger, P. O.**, 1970 : « Thermal comfort ». Copenhagen, Denmark: Danish Technical Press, 244 p.

**Gagge, A. P., Stolwijk, J. A. J., Nishi, Y.**, 1971. : « An Effective Temperature Scale Based on a Simple Model of Human Physiological Regulatory Response ». ASHRAE Trans., vol. 77, pp. 247-257.

**Gagge, A. P., Fobelets, A. P., Berglund, L. G.**, 1986 : « A standard predictive index of human response to the thermal environment ». ASHRAE Transactions, vol. 92, p. 709 – 731.

**Gandemer, J. et Guyot, A.**, 1976 : « Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti, Guide méthodologique et conseils pratiques ». Paris : Ministère Équipement, 130p.

**Gandemer, J et Guyot, A.**, 1981 : « La protection contre le vent ». Paris : CSTB, 132 p.

**Givoni, B.**, 1976 : « Man Climate and Architecture ». London : Applied Science Publishers, second edition.

**Givoni, B., La Roche, P.**, 2000 : « Indirect evaporative cooling with an outdoor pond ». In: James&James (Ed.). Proc. of Architecture, city, environment, PLEA 2000, Cambridge, UK, pp. 310-311.

**Hofmann, J. B.**, 1994 : « Ambiances climatisées et confort thermique ». COSTIC, 120 p.

**Höppe, P.**; 1999 : « An universal index for the assessment of the thermal environment – the Physiological Equivalent Temperature PET ». In : Proceedings of the 15th International Congress of

Biometeorology & International Conference on Urban Climatology, November 8-12. Sydney, Australia : Macquarie University, 6 p. [CD-ROM].

**ISO 7730:1994** : « Ambiances thermiques modérées -- Détermination des indices PMV et PPD et spécifications des conditions de confort thermique »

**Jendritzky, G., Nuebler, W.**, 1981 : « A model analysing the urban thermal environment in physiologically significant terms ». Arch. Met. Geoph. Biokl. Ser.B., vol. 29, pp. 313-326.

**Jendritzky, G., Staiger, H., Bucher, K., Graetz, A., Laschewski, G.**, 2000 : « The Perceived Temperature -The Method of the Deutscher Wetterdienst for the Assessment of Cold Stress and Heat Load for the Human Body ». In: Proc. of Internet Workshop on Windchill.

**Ken-Ichi, K.**, 1991 : « Evaporative cooling effects in hot and humid urban spaces ». In: Proc. of Architecture and Urban Space, Ninth International PLEA Conference, Seville, Spain, pp. 631- 636.

**Lavigne P. et al.**, 1994 : « Architecture Climatique, une contribution au développement durable » (Tome 1 : bases physiques), Edisud, 1994, p 183-188.

**Lehtihet Krofa**, 2003 : «Analyse microclimatique d'espaces urbains méditerranéens: cas de la ville de Marseille», Thèse de doctorat, Laboratoire ABC, Marseille, 2003.

**Matzarakis, A., Mayer, H.**, 1996 : « Another kind of environmental stress: thermal stress ». WHO-Newsletter, vol. 18, pp. 7-10.

**Mazria E.**, 1979 : « Le guide de l'énergie solaire passive », Parenthèses, 1979. P 272-277

**Monin, E., Descat, S., Siret, D.**, 2002 : « Le développement durable et l'histoire urbaine » Les annales de la Recherche Urbaine, n°92 Ce qui demeure, PUCA, sept 2002, pp. 7-16.

**Musy, M.**, 2007 : « Le rôle climatique de la végétation urbaine », Culture et Recherche n°113 – automne 2007, pp. 15-17.

**Nikolopoulou, M, Baker, N et Steemers, K.**, 2004 : « Thermal comfort in outdoor urban spaces: understanding the human parameter », Solar Energy, Vol. 70, N° 3, pp. 227-235.

**Nikolopoulou, M., Steemers, K.**, 2003 : « Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces ». Energy and Buildings, vol. 35, n°1, pp. 95-101.

**Nishimura, N., Nomura, T., Iyota, H., Kimoto, S.**, 1998 : « Novel water facilities for creation of comfortable urban micrometeorology ». Solar Energy, vol. 64, n°4-6, pp. 197-207.

**Offerle, B., C. S. B. Grimmond, K. Fortuniak, T. R. Oke et K. Klysiak** , 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.**, 1987 : "Boundary layer climates", Second Edition. 435 pp. University press, Cambridge, ISBN 0 415 04319 0.

**D. S. Parker, J. E. R. McIlvaine, S. F. Barkaszi, and D. J. Beal**, 1993 : "Laboratory Testing of Reflectance Properties of Roofing Materials", Report No. FSEC-CR-670-93 (1993), Florida Solar Energy Center, 300 State Rd. 401, Cape Canaveral, FL 32920.

**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.

**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.

**Thellier, F., Monchoux, F., Serin, G.**, 2003 : « Les outils d'évaluation du confort thermique. In: A., D., Ttombe, A., Nantes, C. C. (Eds.). Proc. of Confort thermique : Aspects psychologiques et physiologiques , outils de diagnostics, Nantes, p. 10.

**Tixier, N.**, 2007 : « L'usage des ambiances », Culture et Recherche n°113 – automne 2007, pp. 10-11.

**Staiger, H., Bucher, K., Jendritzky, G.**, 1997 : « Gefühlte Temperatur. Die physiologisch gerechte Bewertung von Wärmebelastung und Kältestress beim Aufenthalt im Freien in der Maßzahl Grad Celsius ». Annalen der Meteorologie, vol. 33, pp. 100-107.

**Synnefa, A.; Santamouris, M. & Apostolakis, K.**, 2007 : "On the development, optical properties and thermal performance of cool colored coatings for the urban environment", Solar Energy 81(4), 488-497, 2007.

**Tang R, et Y. Etzion**, 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.

**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.