



HAL
open science

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

Jérôme Vinet

► To cite this version:

Jérôme Vinet. 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. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Nantes, 2000. Français. NNT : . tel-00490049

HAL Id: tel-00490049

<https://theses.hal.science/tel-00490049v1>

Submitted on 7 Jun 2010

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.

Remerciements

Avant de commencer la présentation de ce travail de thèse, je veux remercier les nombreuses personnes qui m'ont permis d'accomplir cet exercice délicat et parfois douloureux. Avec un peu de recul - la soutenance étant passée, le cœur étant plus léger ! – je souhaite être reconnaissant vis-à-vis de ceux qui, à un moment ou un autre, m'ont apporté des conseils, leur soutien, voire leur aide. Ainsi, c'est avec une vive émotion que je m'adresse aux personnes que je vais mentionner ci-dessous.

En tout premier lieu, je tiens à remercier très chaleureusement Christian Inard, qui en tant que directeur de thèse a su m'encadrer admirablement et me redonner confiance lorsque je doutais. Je lui en suis sincèrement très reconnaissant.

Je souhaite remercier Patrick Depecker et Servando Alvarez Dominguez pour avoir accepté de rapporter mon travail de thèse et me donner leurs analyses sur le travail que j'ai été amené à effectuer. Leurs avis étant importants à mes yeux, je tiens à leur rendre hommage.

Jean Pierre Péneau et Pierre Yves Nizou ont non seulement accepté de participer à mon jury de thèse, mais ont permis qu'elle se déroule. En effet, en instaurant la filière "Ambiances Architecturales et Urbaines" qui m'a accueilli en DEA et en thèse, ils m'ont offert l'opportunité d'intégrer le monde de la recherche. Pour toutes ces raisons je les en remercie vivement.

Je tiens à remercier également Albert Dupagne, qui même s'il n'a pu être présent lors de la soutenance, à mon grand regret je dois l'avouer, a eu l'amabilité d'envoyer les questions qu'il avait souhaité me présenter.

Je profite de l'occasion qui m'est ici offerte pour associer à mon travail les personnes qui ont, au cours de ces trois années, contribué directement ou indirectement à la réalisation de ce projet. Ainsi, je veux remercier l'ensemble du laboratoire CERMA, pour m'avoir non seulement permis de travailler dans des conditions très favorables et de participer à des congrès internationaux, mais également pour m'avoir supporter dans les bons et les moins bons moments ! Je pense tout particulièrement au personnel administratif de choc et de charme (Janick, Sandrine, Martine), aux thésards à qui je souhaite beaucoup de courage (la liste est longue et a beaucoup fluctué durant ces années) et aux chercheurs avec qui j'ai pris beaucoup de plaisir à travailler (Marie Joëlle, Franck, Dominique, Christian, Fernand, ...)

Je tiens à saluer amicalement les chercheurs qui ont participé au projet européen GreenCode (les laboratoires de l'Université de Séville, d'Athènes et de La Rochelle) pour m'avoir fourni des conseils et des informations précieuses.

Les personnes qui m'ont côtoyé durant ces quelques années m'ont certainement entendu me plaindre sur le sentiment d'isolement face à un sujet que me laissait douter quant à son intérêt. En rédigeant ce court texte et après le plaisir partagé lors de la soutenance, je me rends compte qu'il n'en est rien ! Il me semble important de remettre les pendules à l'heure et de remercier celles et ceux qui de près ou de loin m'ont aidé à avancer dans mes recherches.

En dernier lieu, je tiens à remercier ma famille et mes amis proches pour avoir cru en moi et pour m'avoir soutenu au cours de ces années.

Résumé

Les grandes villes, en période estivale, développent de plus en plus fréquemment certains problèmes liés au phénomène d'« îlot de chaleur urbain », comme les pics de pollution et la surconsommation énergétique due à la climatisation. La minéralisation des villes, en remplaçant la végétation et les zones humides par du béton et de l'asphalte contribue à ces nuisances.

Notre objectif est alors de déterminer l'impact de la végétation et des bassins ou jets d'eau sur le microclimat urbain et sur les situations de confort thermique ressenties par un individu. Cette étude fait appel aux techniques de modélisation numérique.

Dans la première partie, une importante synthèse bibliographique permet de faire le point sur des domaines aussi variés que la microclimatologie urbaine, la simulation, l'urbanisme, l'arboriculture et le confort thermique en espace extérieur. Ces informations sont utiles lors de la mise en œuvre et de l'interprétation des simulations envisagées.

Dans la deuxième partie, nous détaillons la réalisation d'un couplage thermo-aéraulique, basé sur deux outils numériques, SOLENE (logiciel d'enseillement et de thermique développé par le CERMA) et N3S (code de mécanique des fluides, développé par EDF). Ce couplage nécessite le développement de programmes spécifiques et de procédures d'interfaçage. Des éléments de validation sur des études de cas référencées, ainsi qu'une comparaison avec des mesures in-situ sont présentés.

L'application de cette démarche à une étude de cas urbaine, la Place du Millénaire du quartier Antigone à Montpellier, permet d'analyser l'impact de la végétation sur le microclimat urbain et les conditions de confort en espace extérieur. La comparaison de trois situations, l'une sans végétation, l'autre avec la végétation actuelle et la dernière avec une végétation à taille adulte, démontre une évolution notable au cours des années des conditions microclimatiques et une amélioration sensible des situations de confort.

Mots-clés :

Microclimat urbain, végétation, modélisation numérique, couplage thermo-aéraulique, confort thermique.

Abstract

In summer, temperatures in cities may rise, thereby inducing the so-called « urban heat island » and tremendous consequences on outdoor comfort, health risks, pollutant emission and energy consumption. Replacing vegetation and moist surfaces by concrete or asphalt may enhance these problems

Therefore, the aim of this thesis is to quantify the impact of vegetation and water on urban microclimate and comfort through numerical modelling

In the first part, a scientific literature review considers various topics applied to our problem such as urban microclimate, simulations, urbanism, urban forestry and outdoor thermal comfort. This information is relevant to define and interpret further numerical modelling.

Numerical simulations based on the coupling of the SOLENE thermal program and the N3S CFD code are proposed to model wind flow, air and surface temperatures. The theoretical principles, hypothesis and coupling methodology are presented here. This set of numerical tools is combined in order to help urban or landscape planners, architects and engineers, to analyse the impacts of different projects on microclimate and on outdoor thermal comfort, under hot summer conditions.

To illustrate this approach, an open space in Montpellier (southern France) called the "Place du Millenaire" and designed by Ricardo Bofill is studied, considering various cases (no vegetation, actual vegetation and vegetation in 30 years). The comparative results demonstrate improvements of urban form, microclimate and outdoor thermal comfort.

Key-words :

Urban microclimate, vegetation, numerical modelling, outdoor comfort.

Sommaire

Introduction générale 17

Première partie : Impact de l'eau et de la végétation sur le microclimat urbain

1	Introduction.....	23
2	La microclimatologie urbaine.....	25
2.1	Introduction.....	25
2.2	Les différents types de transfert de chaleur et de masse	25
2.2.1	Les échanges radiatifs.....	26
2.2.2	Les échanges convectifs	29
2.2.3	Les échanges conductifs	35
2.2.4	Le bilan hydrique et la diffusion de la vapeur	37
2.2.5	Bilan énergétique total.....	39
2.3	Les études menées dans le domaine de la microclimatologie urbaine.....	39
2.3.1	Comportement thermique des rues	39
2.3.2	Relations entre géométrie du canyon et microclimat.....	40
2.3.3	Ilot de chaleur urbain.....	40
2.4	Spécificité du microclimat urbain	41
2.4.1	L'ilot de chaleur urbain	42
2.4.2	Chaleur urbaine et géométrie.....	43
2.4.3	Température et population.....	43
2.4.4	Urbanisation et précipitation	43
2.5	Les outils de simulation appliqués à la microclimatologie urbaine.....	44
2.5.1	Simulations d'ensoleillement et énergétique.....	44
2.5.2	Simulations aérauliques	45
2.5.3	Simulations thermo-aérauliques	45
2.6	Conclusion	47
2.7	Références bibliographiques.....	48
3	L'eau et la végétation en milieu urbain.....	53
3.1	Introduction.....	53
3.2	L'eau et la végétation en tant qu'éléments urbains	53
3.2.1	L'eau et la ville	53
3.2.2	La végétation et la ville	56
3.3	L'eau et la végétation en tant qu'éléments de régulation du microclimat.....	64
3.3.1	L'eau comme solution microclimatique	64
3.3.2	La végétation comme solution microclimatique.....	68
3.4	Conclusion	88
3.5	Références bibliographiques.....	88

4	<i>Le confort thermique en extérieur</i>	95
4.1	Introduction	95
4.2	Les paramètres du confort thermique	96
4.2.1	Paramètres relatifs à l'environnement	96
4.2.2	Paramètres relatifs à l'individu.....	96
4.2.3	Confort en régime transitoire, acclimatation et inertie thermique du corps	100
4.3	Les échanges thermiques	101
4.3.1	Les échanges radiatifs.....	101
4.3.2	Les échanges convectifs	102
4.3.3	Pertes par respiration	103
4.3.4	Pertes par diffusion d'humidité à travers la peau	103
4.3.5	Pertes thermiques par sudation	104
4.4	Les indices de confort thermique	104
4.4.1	Les inconforts locaux.....	105
4.4.2	Les indices de confort ou de stress thermique en espace intérieur	106
4.4.3	Les indices de confort ou de stress thermique en espace extérieur.....	112
4.5	Conclusion	120
4.6	Références bibliographiques	122
5	<i>Conclusion</i>	125

Deuxième partie : Modélisation numérique des transferts de chaleur en espace urbain

6	<i>Introduction</i>	129
7	<i>Le couplage thermo-aéraulique</i>	133
7.1	Introduction	133
7.2	La modélisation des transferts de chaleur	133
7.2.1	Les échanges radiatifs.....	133
7.2.2	Les échanges convectifs	142
7.2.3	Les échanges conductifs	148
7.2.4	Traitements spécifiques pour la végétation	152
7.3	La simulation en régime transitoire et le couplage thermo-aéraulique	155
7.3.1	Principes généraux.....	155
7.3.2	Etapas préliminaires	160
7.3.3	Structure de la simulation en régime transitoire sans couplage.....	162
7.3.4	Structure de la simulation en régime transitoire avec couplage	168
7.3.5	Les résultats en sortie	172
7.3.6	Post-traitement des sorties : application au confort.....	173
7.4	Conclusion	176
7.5	Références	176
8	<i>Eléments de validation</i>	181
8.1	Introduction	181
8.2	Validation de la partie aéraulique	181
8.2.1	Introduction	181

8.2.2	Comparaison des résultats numériques.....	182
8.3	Validation de la porosité et des pertes de charges dans N3S.....	185
8.3.1	Comparaison à des résultats analytiques	185
8.3.2	Perturbations engendrées par une forêt.....	186
8.3.3	Conclusion.....	188
8.4	Validation de la partie thermique.....	188
8.4.1	Conditions expérimentales	188
8.4.2	Paramètres de la modélisation	189
8.4.3	Comparaison des valeurs mesurées et simulées	190
8.4.4	Conclusion.....	193
8.5	Conclusion	193
8.6	Références.....	194
9	Application à un ensemble urbain : le quartier Antigone	195
9.1	Introduction.....	195
9.2	Analyse du site.....	195
9.2.1	Présentation du projet urbain	195
9.2.2	Evolution de la végétation	196
9.3	Analyse des données météorologiques.....	197
9.3.1	Température de l'air	198
9.3.2	Condition d'ensoleillement.....	199
9.3.3	Régime de vent	200
9.3.4	Humidité de l'air.....	201
9.4	Simulations thermo-aérauliques.....	201
9.4.1	Modélisation géométrique	202
9.4.2	Calculs préliminaires	203
9.4.3	Ecoulements aérauliques en 2D.....	205
9.4.4	Ecoulements aérauliques en 3D.....	208
9.4.5	Simulation sans couplage thermo-aéraulique	211
9.4.6	Simulation avec couplage thermo-aéraulique.....	215
9.5	Impact de la végétation.....	217
9.5.1	Le rayonnement transmis.....	218
9.5.2	Les vitesses de vent	218
9.5.3	Les températures de surface.....	219
9.5.4	Les températures d'air	219
9.6	Analyse des conditions de confort.....	221
9.6.1	Les indices utilisés.....	221
9.6.2	Le cas d'un parcours.....	221
9.6.3	Les pourcentages d'espace confortable	223
9.7	Conclusion	223
9.8	Références.....	224
10	Conclusion.....	227
	Conclusion générale	229
	Bibliographie générale	233

Nomenclature

a	: Diffusivité thermique	[m ² .s ⁻¹]
A	: Amplitude	
A _{Du}	: Aire de Dubois	[m ²]
c _p	: Chaleur massique à pression constante	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
Cd	: Coefficient de perte de charge	
C _μ , C _{ε1} , C _{ε2}	: Constantes du modèle de turbulence k - ε standard	
d	: Distance	[m]
D	: Perte en eau par percolation	[g.s ⁻¹]
D _η	: Diffusivité hydraulique	[m ² .s ⁻¹]
e	: Epaisseur	[m]
e _a	: Tension de vapeur d'eau à la température de l'air	[Pa]
e(T)	: Tension de vapeur saturante à la température T	[Pa]
E _a	: Capacité évaporative de l'air	[kg.m ⁻² .s ⁻¹]
f	: Coefficient d'efficacité de la transpiration	
f _p	: Coefficient de surface projetée du corps	
F	: Terme source: forces de flottabilité	
F _{eff}	: Facteur de surface effective de rayonnement	
F _{i,j}	: Facteur de forme entre la surface i et la surface j	
F _{pcl}	: Coefficient de perméation de la vapeur d'eau	
F _{ciel}	: Facteur de vue du ciel	
F _{cl}	: Facteur d'isolation des vêtements	
h	: Hauteur angulaire du soleil	[°]
H	: Hauteur	[m]
h _c	: Coefficient d'échange par convection	[W.m ⁻² .°C ⁻¹]
h _e	: Coefficient d'échange par évaporation	[W.m ⁻² .Pa.C ⁻¹]
h _r	: Coefficient d'échange par rayonnement	[W.m ⁻² .°C ⁻¹]
I	: Infiltration d'eau	[g.s ⁻¹]
I _{air}	: Isolation due à la couche limite de l'air	[m ² .°C/W]
I _{cl} , R _v	: Isolation due aux vêtements	[clo, m ² .°C/W]
j	: Numéro du jour dans l'année	
J _l , J _v	: Flux vertical d'eau liquide et vapeur	[Pa.s ⁻¹]
k	: Energie cinétique turbulente	[m ² .s ⁻²]
K	: Coefficient de conductivité totale	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
K _{cl}	: Coefficient relatif à la vêtue	
K _f , K _η	: Conductivité hydraulique	[m.s ⁻¹]
K _H	: Coefficient d'échange turbulent de chaleur sensible	
K _m	: Coefficient de transfert de masse	
K _M	: Coefficient d'échange turbulent de quantité de mouvement	
K _{pe}	: Coefficient relatif à la position et au site	
K _{va}	: Coefficient de diffusivité moléculaire de la vapeur d'eau	
K _w	: Coefficient d'échange turbulent pour la vapeur d'eau	
L	: Chaleur latente de vaporisation	[J.kg ⁻¹]
L	: Longueur, Longueur de Monin-Obukov	[m]
M _a	: Masse molaire de l'air	[kg.mol ⁻¹]
p	: Coefficient relatif à la vêtue	
p _{ssk}	: Pression de vapeur saturante au niveau de la peau	[Pa]
p _v	: Pression partielle de vapeur	[Pa]
P	: Terme de production de ε	
Pa	: Pression atmosphérique	[Pa]

Pr, Pr_T	: Nombre de Prandtl et de Prandtl turbulent	
q	: Humidité spécifique	$[\text{kg.kg}^{-1}]$
R	: Constante des gaz parfaits	$[\text{J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}]$
R_a	: Résistance aux transferts dans l'atmosphère	$[\text{s.m}^{-1}]$
R_c	: Résistance aux transferts dans le couvert végétal	$[\text{s.m}^{-1}]$
R_I	: Nombre de Richardson	
R_n	: Rayonnement net	$[\text{W.m}^{-2}]$
R_s	: Résistance stomatale	$[\text{s.m}^{-1}]$
S	: Surface	$[\text{m}^2]$
t	: Temps	$[\text{s}]$
T	: Période	$[\text{s}]$
u, v, w	: Composantes de la vitesse du vent	$[\text{m.s}^{-1}]$
U	: Module de la vitesse du vent	$[\text{m.s}^{-1}]$
U_{sol}	: Coefficient de chauffage dû au soleil	
v_{ij}	: Fonction de visibilité entre une surface i et une surface j	
V	: Volume molaire	$[\text{m}^3.\text{mol}^{-1}]$
W	: Largeur (Width)	$[\text{m}]$
y^+	: distance adimensionnelle	
z_d	: Profondeur d'amortissement	$[\text{m}]$
Z	: Altitude	$[\text{m}]$
Z_0	: Longueur de rugosité	$[\text{m}]$

Températures

T_{air}	: Température de l'air	$[^{\circ}\text{C}]$
T_{ciel}	: Température du ciel	$[^{\circ}\text{C}]$
T_{cl}	: Température des vêtements	$[^{\circ}\text{C}]$
$T_{confort}$: Température de confort	$[^{\circ}\text{C}]$
T_{corps}	: Température interne du corps	$[^{\circ}\text{C}]$
T_f	: Température moyenne des feuilles	$[^{\circ}\text{C}]$
T_{eq}	: Température de surface équivalente au soleil	$[^{\circ}\text{C}]$
T_{ext}	: Température extérieure	$[^{\circ}\text{C}]$
T_{in}	: Température à l'entrée du domaine	$[^{\circ}\text{C}]$
T_{int}	: Température intérieure	$[^{\circ}\text{C}]$
$T_{météo}$: Température de l'air à la station météorologique	$[^{\circ}\text{C}]$
T_{mrt}	: Température radiante moyenne	$[^{\circ}\text{C}]$
T_{perm}	: Température en régime permanent	$[^{\circ}\text{C}]$
T_{rs}	: Température résultante sèche	$[^{\circ}\text{C}]$
T_s	: Température de surface	$[^{\circ}\text{C}]$
T_{sk}	: Température de la peau	$[^{\circ}\text{C}]$
T^+	: Température adimensionnelle	

Flux

$D \downarrow$: Irradiation solaire diffuse reçue par une surface horizontale	$[\text{W.m}^{-2}]$
$L \downarrow$: Rayonnement de la voûte céleste vers le sol	$[\text{W.m}^{-2}]$
$L \uparrow$: Rayonnement du sol vers la voûte céleste	$[\text{W.m}^{-2}]$
M	: Métabolisme	$[\text{W.m}^{-2}]$
M_{th}	: Métabolisme thermique	$[\text{W.m}^{-2}]$
$S \downarrow$: Irradiation solaire directe reçue par une surface horizontale	$[\text{W.m}^{-2}]$

W	: Métabolisme mécanique	[W.m ⁻²]
Φ_{conv}	: Densité de flux convectif	[W.m ⁻²]
Φ_{cond}	: Densité de flux conductif	[W.m ⁻²]
Φ_{evap}	: Densité de flux évaporatif (LE)	[W.m ⁻²]
Φ_{GLO}	: Densité de flux par rayonnement GLO	[W.m ⁻²]
Φ_{res}	: Densité de flux lors de la respiration	[W.m ⁻²]
Φ_{CLO}	: Densité de flux par rayonnement CLO	[W.m ⁻²]
Φ_{trans}	: Densité de flux de rayonnement transmis	[W.m ⁻²]
Φ	: Flux	[W]

Evapotranspiration

E	: Evaporation	[g.s ⁻¹]
E_{sk}	: Evaporation réelle de la peau	[W.m ⁻²]
E_{max}	: Evaporation maximale	[W.m ⁻²]
E_{d}	: Evaporation par diffusion (perspiration)	[W.m ⁻²]
E_{res}	: Evaporation lors de la respiration	[W.m ⁻²]
E_{rsw}	: Evaporation de la sueur régulatrice	[W.m ⁻²]
EP	: Evaporation potentielle	[g.s ⁻¹]
EP*	: Evaporation potentielle théorique	[g.s ⁻¹]
ET	: Evapotranspiration	[g.s ⁻¹]
ETP	: Evapotranspiration potentielle	[g.s ⁻¹]
ETPc	: Evapotranspiration potentielle climatique	[g.s ⁻¹]
ETR	: Evapotranspiration réelle	[g.s ⁻¹]
ETRm	: Evapotranspiration réelle maximale	[g.s ⁻¹]

Symboles grecs et latins

α	: Azimut solaire	[°]
α_{cl}	: Albédo solaire des vêtements	
α_{sk}	: Albédo solaire de la peau	
α_{sol}	: Albédo solaire de la surface	
α'	: Coefficient d'excentricité	
β	: Rapport de Bowen	
γ	: Constante psychrométrique	[Pa.K ⁻¹]
δ	: Déclinaison (coordonnée équatoriale)	[°]
Δ	: Pente moyenne de la courbe de tension de vapeur saturante	
ΔS	: Stockage d'eau ou chaleur dans le sol	[g.s ⁻¹]
ΔT	: Ecart de température	[°C]
ε	: Emissivité de la surface	
ε	: Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente	[m ² .s ⁻³]
ε_{th}	: Efficacité thermique	
κ	: Constante de Von Karman	
λ	: Conductivité thermique	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
λ	: Longueur d'onde	[m]
μ, μ_e, μ_t	: Viscosité dynamique, efficace et turbulente du fluide	[kg.m ⁻¹ .s ⁻¹]
ν_t	: Viscosité turbulente	[m ² .s ⁻¹]
η	: Humidité volumétrique	[kg.m ⁻³]
φ	: Latitude	[°]

ρ	: Masse volumique	[kg.m ⁻³]
τ_{cl}	: Coefficient de transmission solaire des vêtements	
σ	: Constante de Stefan-Boltzmann	[W.m ⁻² .K ⁻⁴]
σ	: Ecart-type, turbulence absolue	
$\sigma_k, \sigma_\epsilon$: Constantes du modèle de turbulence k - ϵ standard	
θ	: Angle	[°]
ω	: Angle horaire (coordonnée équatoriale)	[°]
ω	: Mouillure cutanée	
Ψ	: Potentiel hydrique	[Pa]

Indices de confort

(en anglais)

DISC	: Indice d'inconfort	(DISC)
ICT	: Indice de contrainte thermique	(ITS)
PMV	: Vote moyen prévisible	(PMV)
PD	: Pourcentage d'insatisfait	(PD)
PPD	: Pourcentage prévisible d'insatisfait	(PPD)
TE	: Température effective	(ET)
TE*	: Nouvelle température effective	(ET*)
TES*	: Nouvelle température effective standardisée	(SET*)
TR	: Température résultante	(RT)

Acronymes

ASHRAE	: American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers
CERMA	: Centre de Recherche Méthodologique d'Architecture
CIE	: Commission Internationale de l'Eclairage
CFD	: Computational Fluid Dynamics
CLO	: Courte Longueur d'Onde
CLS	: Couche Limite de Surface
EDF	: Electricité De France
ET	: Equation du Temps
GLO	: Grande Longueur d'Onde
HR	: Humidité relative
RNG	: ReNormalisation Group
TL	: Temps Légal
TSV	: Temps Solaire Vrai
TU	: Temps Universel
UV	: Ultra Violet

Notations mathématiques

∇	: Opérateur nabla, gradient
$\nabla \cdot$: Opérateur divergence
Δ	: Opérateur laplacien
$\text{tr}()$: Opérateur trace
$\overline{\overline{d}}$: Tenseur des taux de déformations

Introduction générale

Les grandes villes actuelles sont souvent accusées de développer en leur centre un certain nombre de problèmes microclimatiques dont le plus connu est l'« îlot de chaleur urbain ». Cette augmentation excessive des températures, par comparaison à celles obtenues en zone rurale proche, entraîne des perturbations aussi bien au niveau du confort, qu'au niveau des consommations énergétiques (climatisation) et des nuisances associées (pollution). La minéralisation des villes, en remplaçant la végétation et les zones humides par du béton et de l'asphalte contribue à ces problèmes. La capacité du paysage urbain à intervenir sur les excès thermiques est ainsi réduite.

Ce constat nous incite à essayer de mieux comprendre comment l'espace urbain est affecté par le climat et surtout comment il agit sur celui-ci en retour. De nombreuses solutions définies au cours des précédents siècles et basées sur des approches empiriques ou pragmatiques, ont été proposées et correspondent relativement bien à l'urbanisation raisonnée ou ajustée par rapport aux contraintes climatiques. De nos jours, la donne a changé et la multiplication des surfaces minérales ou vitrées, la structure des villes et les activités humaines ont considérablement évoluées rendant inadaptées les préconisations liées au bon sens. Des mesures de compensation ou de régulation sont alors à apporter. Un travail de compréhension, de démonstration et d'information est alors nécessaire. Des passerelles sont également à trouver pour justifier la plantation d'un alignement d'arbre par exemple. Ainsi, l'argument microclimatique au niveau du projet urbain n'est intéressant que dans la mesure où la quantification de l'impact est significative, où des améliorations du cadre de vie et des conditions de confort peuvent être attendues, et où des économies d'énergie peuvent être chiffrées. Dans le cadre de ce travail exploratoire nous n'allons pas jusqu'à ce niveau d'analyse mais nous essayons de donner des pistes permettant à terme de l'atteindre.

Le caractère interdisciplinaire de cette recherche est une des motivations fréquentes dans les domaines de l'architecture et de l'urbanisme. Ainsi, au cours de notre manuscrit nous allons aborder un certain nombre de champs, comme la microclimatologie urbaine, l'arboriculture urbaine, le confort thermique en extérieur, et la modélisation numérique. Les connaissances recueillies dans ces différents domaines de recherche apportent des éléments d'information sur la manière d'influencer, voire de réguler les problèmes thermiques par le biais de systèmes passifs naturels comme la végétation, les bassins et les fontaines.

La caractérisation microclimatique des ambiances de la ville est actuellement présentée, soit par des campagnes de mesures, soit par des études en soufflerie soit par la modélisation numérique des phénomènes physiques. De nombreux travaux, analysés dans la première partie du manuscrit font appel à ces différentes techniques. Plutôt que d'affronter ces différents moyens d'investigations nous verrons, que même si nous faisons le choix de la modélisation numérique, nous sommes amenés à valider notre approche par les autres procédés, démontrant ainsi la nécessité de coexistence des différentes techniques.

En espace extérieur, l'ensoleillement et le vent sont deux paramètres essentiels dont l'analyse via le développement d'outil de simulation numérique est une des préoccupations du laboratoire CERMA. Cependant, il est nécessaire de non seulement considérer ces deux éléments en même temps mais surtout de mettre au point une réelle méthodologie de couplage thermo-aéraulique afin d'appréhender plus finement les transferts de chaleur. Pour être plus complet encore, la prise en compte de ces deux agents du climat par le biais des échanges radiatifs courte longueur d'onde et des échanges convectifs doivent être associées d'une part aux transferts par rayonnement de grande longueur d'onde entre les différents éléments de la scène, et entre les

éléments de la scène et la voûte céleste et d'autre part aux transferts par conduction en régime transitoire dans les parois et le sol. Si à cela nous ajoutons les comportements spécifiques des bassins et de la végétation, nous comprenons que la complexité du microclimat urbain ne peut s'obtenir qu'au détriment de quelques hypothèses que nous serons amenés à préciser. La mise en application de tels modèles dans l'analyse des morphologies urbaines et dans l'étude des espaces urbains devrait permettre d'établir des correspondances entre les éléments constitutifs de l'espace construit, l'eau et la végétation, les conditions microclimatiques et les situations de confort résultantes.

Enfin, nous voulons insister sur le fait que les avantages offerts par les dispositifs naturels que nous envisageons d'étudier sont importants en terme de régulation du microclimat, mais que de plus, ils touchent à des préoccupations diverses, allant des considérations esthétiques et visuelles, aux intérêts structurels et fonctionnels et peuvent induire des modifications multi-sensorielles dans l'espace urbain. La transition entre des problématiques concernant la notion d'ambiance peut alors apparaître et ne pas réduire notre discours à des considérations uniquement physiques.

A partir des éléments que nous venons de souligner, deux questions peuvent être posées :

Peut-on obtenir des améliorations réellement quantifiables des caractéristiques microclimatiques des villes, en situation climatique chaude, par l'introduction ou la multiplication de la végétation et des bassins ?

Les conséquences induites par cette modification du microclimat, sont-elles significatives en terme de pratiques urbaines, de confort, voire d'ambiances ?

Le développement des connaissances relatives à la microclimatologie urbaine et notamment à la présence d'eau et de végétation en milieu urbain et la définition d'une méthodologie de couplage d'outils de simulations numériques sont deux des objectifs importants de ce travail. Le résultat envisagé est non seulement, la caractérisation des phénomènes physiques (convectif, radiatif, conductif) à une échelle microclimatique, mais aussi la quantification de l'impact de la végétation et des bassins sur le microclimat urbain et sur les situations de confort thermique ressenties par un individu, voire la préconisation de stratégies favorisant le développement de ces éléments naturels. Ainsi, les applications de ces modélisations peuvent intéresser les bureaux d'étude en urbanisme et en architecture soit dans des phases en amont du projet (avant projet sommaire, pré-programmation, études préalables, études d'impact) soit lors d'aménagement d'espaces existants.

Le manuscrit s'organise en deux parties de manière à bien séparer la synthèse des connaissances issues de l'analyse bibliographique de notre contribution.

La première partie apporte un état de l'art non exhaustif des trois thèmes dominants que sont la microclimatologie urbaine, l'eau et la végétation en ville et le confort thermique en espace extérieur.

Dans le chapitre, « La microclimatologie urbaine », nous explicitons les différents types de transferts de chaleur et de masse en milieu urbain. Ainsi, après avoir rappelé quelques définitions sur les échelles climatiques, nous abordons successivement les transferts de chaleur par rayonnement, par convection et par conduction. Le bilan hydrique et la diffusion de l'eau dans le sol sont également décrits. Ensuite, nous passons en revue certains des travaux menés

dans le domaine de la microclimatologie urbaine et soulignons les spécificités du microclimat urbain. Enfin, nous terminons cette partie en présentant différents outils de simulation numérique appliqués à la modélisation des microclimats urbains.

Dans le chapitre, « L'eau et la végétation en milieu urbain », nous rappelons, dans un premier temps, que les dispositifs liés à l'eau et les aménagements végétaux sont largement présents en ville et ce sous de multiples formes. Ainsi, nous dressons un bref rappel historique sur les relations entre l'eau et la ville, puis nous soulignons les qualités et les dimensions symboliques associées aux arbres et leurs utilisations dans les projets urbains. Ensuite, nous poursuivons notre exposé par la capacité de l'eau à intervenir sur les caractéristiques thermiques d'un espace. Les impacts des grandes étendues d'eau et des sources ponctuelles sont discutés et un exemple de modélisation de bassin est présenté. L'impact de la végétation sur le microclimat urbain est ensuite discuté. Après quelques rappels succincts de travaux à l'échelle de la ville, nous sommes amenés à considérer les implications de la végétation sur les échanges radiatifs, sur les écoulements aérauliques et sur le phénomène d'évapotranspiration.

Dans le chapitre, « Le confort thermique en espace extérieur », plusieurs définitions générales de la notion de confort sont proposées soulignant la complexité du domaine abordé. Les différents paramètres intervenant dans l'établissement des critères de confort sont présentés. Ils concernent à la fois les éléments relatifs à l'environnement et à l'individu. Les bilans d'énergie appliqués à l'individu font intervenir différents échanges thermiques que nous détaillons. Enfin, différents indices de confort sont rappelés pour les situations en espaces intérieurs. Des extensions relatives à ces indices ou des intégrations de phénomène physique au niveau des bilans énergétiques sont définies de manière à caractériser ou à comparer différentes conditions de confort en espace extérieur.

La deuxième partie s'attache plus précisément à quantifier les effets révélés dans l'analyse précédente par le biais de la modélisation numérique et se divise également en trois sous parties : l'élaboration d'une méthodologie de couplage, la validation des modules de simulation et l'application à un exemple urbain.

Dans le chapitre, « Le couplage thermo-aéraulique », nous décrivons précisément la modélisation des transferts de chaleur, en considérant les échanges radiatifs de courtes et grandes longueurs d'onde, les échanges convectifs, les échanges conductifs au niveau des parois et du sol. Des traitements spécifiques à la végétation doivent être développés de manière à prendre en compte leurs caractéristiques thermiques et aérauliques. Les étapes nécessaires à la réalisation des simulations thermo-aérauliques sont alors détaillées. Les résultats obtenus en sortie correspondent aux informations utiles à l'analyse du microclimat urbain et à la détermination des conditions de confort.

Dans le chapitre, « Eléments de validation », différentes comparaisons sont réalisées entre nos résultats de simulation et des valeurs obtenues à partir de travaux dits de référence qui proviennent soit de simulations effectuées à l'aide d'autres codes de calcul, soit de mesures en site urbain. Les parties aérauliques et thermiques sont ainsi testées.

Dans le chapitre, « Application à un ensemble urbain : le quartier Antigone », nous illustrons notre démarche en prenant pour étude de cas un espace urbain de Montpellier, dans lequel la végétation est amenée à passer de l'état d'alignement d'arbre de dimension moyenne, à l'état de voûte végétale couvrant l'ensemble de la place du Millénaire. Les résultats des simulations démontrent les capacités d'analyse offertes par la modélisation numérique ainsi mise en place et l'impact important de la végétation sur les composantes microclimatiques et sur les conditions de confort.

Première partie

Impact de l'eau et de la végétation sur le microclimat urbain et sur le confort en espace extérieur

1 Introduction



Figure 1 : L'association de l'eau et du végétal [Stefulesco 1993]

Dans la plupart des villes méditerranéennes et dans de nombreuses régions chaudes, la présence de végétation et de fontaines dans les espaces extérieurs est caractéristique d'un mode de vie qui ne se limite pas à l'intérieur des bâtiments (Figure 1). Les potentialités intrinsèques de ces espaces les transforment en lieux de détente, de rencontre et permettent un grand nombre d'activités. Dans ces climats chauds, afin de lutter contre certaines situations excessives voire insupportables, le recours à des dispositifs naturels s'est imposé de manière pragmatique à travers les siècles.

Cependant, les modifications urbaines récentes induisent une minéralisation généralisée, souvent synonyme de surchauffe estivale, aussi bien à l'échelle de la rue qu'à l'échelle de la ville. Ainsi, depuis quelques années, tous les étés, des signaux d'alarme sont tirés dans de nombreuses grandes villes, lorsque les taux de pollution, dont certains sont fortement corrélés à l'augmentation de température (comme l'ozone par exemple), dépassent les normales. Ces fortes vagues de chaleur et de pollution sont accusées d'entraîner un grand nombre de nuisances voire d'augmenter les taux de mortalité.

Dans le cadre de notre recherche, nous ne cherchons pas à analyser ces conséquences extrêmes, mais nous souhaitons démontrer que des choix judicieux de régulation du microclimat urbain sont possibles grâce à la bonne disposition de certains éléments naturels, l'eau et la végétation. Ces systèmes que l'on peut qualifier de passifs, c'est-à-dire ne nécessitant aucun apport d'énergie externe, se comportent tantôt comme des protections tantôt comme des puits d'énergie.

L'objectif de notre recherche est la mise au point de techniques de simulation numérique basée sur un couplage thermo-aéraulique permettant une quantification précise des impacts microclimatiques liés à l'eau et à la végétation en espace urbain. Cette proposition nécessite en amont une investigation de type bibliographique. Ainsi, dans cette première partie du manuscrit, nous associons des éléments théoriques comme les différents transferts de chaleur en espace urbain entre l'individu et son environnement (bâtiments, végétation, bassin, soleil, ciel) et des résultats expérimentaux relatifs à la microclimatologie urbaine, comme ceux issus de mesures thermiques in situ classiques ou par thermographie infrarouge, de mesures en soufflerie, de simulations d'ensoleillement et thermique et des simulations aérauliques ou thermo-aérauliques.

Les études réalisées à partir de mesures représentent sans aucun doute la partie la plus importante des contributions scientifiques liées aux impacts de l'eau et de la végétation sur le microclimat urbain. Les recherches par simulation, sont certes moins nombreuses, mais la tendance semble s'inverser, les évolutions technologiques permettant des calculs de plus en plus lourds et de plus en plus rapides. Ces travaux basés sur des techniques numériques sont maintenant comparés à des mesures sur site ou en soufflerie et la validation de ces outils est devenue indispensable. Ainsi, les deux procédés possèdent

certaines des avantages spécifiques selon les recherches envisagées, mais doivent plutôt être considérés comme des techniques complémentaires.

Cette partie peut se décomposer en trois grands chapitres, le premier traitant de la microclimatologie en général, le deuxième de l'impact de l'eau et de la végétation sur le microclimat urbain et le troisième du confort thermique.

Dans le premier chapitre, nous développons les principes de microclimatologie urbaine en passant en revue les éléments nécessaires à la bonne compréhension des phénomènes de transferts de chaleur et de masse en milieu urbain (échanges radiatifs, convectifs, conductifs, bilan hydrique et bilan énergétique total). Ensuite, nous analysons les différentes études menées sur ce thème à l'échelle de la rue, le rôle de la géométrie et phénomène d'îlot de chaleur urbain. Les spécificités du microclimat urbain sont alors résumées en indiquant les causes de l'îlot de chaleur urbain, les relations entre ce phénomène et la population, et les impacts sur les précipitations. Enfin, nous présentons certains outils de simulation qui sont appliqués à la microclimatologie urbaine (ensoleillement, énergétique, aérodynamique, thermo-aérodynamique).

Dans le chapitre suivant nous insistons sur les relations qu'entretiennent la ville, l'eau et la végétation. Ainsi, nous rappelons que ces deux éléments naturels peuvent être considérés comme des dispositifs urbains à part entière possédant de nombreuses qualités. Nous les envisageons ensuite en tant qu'éléments de régulation du microclimat. En ce qui concerne l'eau, des informations sur l'impact des zones étendues d'eau et des sources ponctuelles sont discutées et un exemple de modélisation d'un bassin est présenté. Pour la végétation, les points abordés concernent la modification des échanges radiatifs, des températures des surfaces végétales, des températures d'air et des surfaces dans les parcs, les rues et les squares, la perturbation engendrée au niveau des écoulements aérodynamiques et l'évapotranspiration. Là encore des études basées sur la simulation de l'impact des arbres en microclimatologie urbaine sont mises en avant.

Enfin, nous abordons le confort thermique en espace extérieur par l'analyse des paramètres relatifs à l'environnement et à l'individu. Les échanges thermiques (par rayonnement, convection, respiration, diffusion et sudation) sont détaillés et des indices de confort ou de stress thermique en intérieur et en extérieur sont commentés de manière à argumenter ceux que nous retenons pour les simulations.

Nous essayons, tout au long de cette phase, de ne retenir que les notions pertinentes et suffisamment explicites à la bonne compréhension des phénomènes. Les éléments nécessaires à la mise au point des calculs par simulation sont présentés afin de justifier les hypothèses retenues dans la deuxième partie. Des citations, des analyses de travaux et des résultats sont empruntés à de nombreux auteurs, dont les références complètes sont indiquées à la fin de chaque chapitre et regroupées à la fin du manuscrit.

2 La microclimatologie urbaine

2.1 Introduction

Il est important de faire une distinction entre les différents niveaux géographiques car les phénomènes qui s'y produisent ne sont pas forcément les mêmes ou n'ont pas les mêmes répercussions. Ainsi, il est possible de cataloguer, de manière simplifiée, quatre types d'échelle des climats [Oke, 1987, CSTB 1995a] :

- L'échelle globale ou échelle « macro » (quelques milliers de kilomètres) : les caractéristiques astronomiques de la Terre entraînent les principales variations climatiques, selon la latitude et la saison et des pondérations liées à la répartition des océans et des continents.
- L'échelle régionale ou échelle « méso » (quelques centaines de kilomètres) : les reliefs, la proximité d'une zone océanique et l'emplacement de la région par rapport aux déplacements d'air affectent le climat à ce niveau.
- L'échelle locale (quelques dizaines de kilomètres) correspond aux modulations du climat régional créées par la présence d'une vallée, d'un groupe de collines ou la proximité immédiate de la mer. C'est l'échelle des modifications du régime général des vents, des brises thermiques, des dorsales pluviométriques et effets thermiques diurnes.
- L'échelle microclimatique est limitée à quelques centaines de mètres. L'homme peut y intervenir pour atténuer les conséquences climatiques (haie, brise-vent, urbanisme adapté aux vents dominants, à l'ensoleillement, à la présence d'eau).

Dans cette étude, nous nous attardons sur ce dernier point en nous focalisant tout précisément sur le microclimat urbain. Nous allons mentionner les différents types de transferts de chaleur et de masse qui s'y déroulent. Cette approche physique de la ville doit permettre de poser les bases utiles à la mise au point des simulations envisagées. Certains des travaux menés dans le domaine de la microclimatologie urbaine sont alors présentés de manière à décrire les spécificités du microclimat urbain. Enfin, différents outils de simulation numérique appliqués à la modélisation des microclimats urbains démontrent que cette démarche encore peu développée est prometteuse.

2.2 Les différents types de transfert de chaleur et de masse

Les transferts d'énergie et de masse sont à la base des processus climatiques et microclimatiques. L'atmosphère est une machine thermique dont l'équilibre énergétique dépend des bilans relatifs aux transferts radiatifs, convectifs et conductifs. Le bilan hydrique met en jeu les transferts d'eau sous forme liquide et vapeur, ce qui induit des phénomènes diffusifs. Les quelques rappels de physique évoqués dans cette partie sont largement détaillés dans la littérature [Sacadura 1982, Oke 1987, Monteith et al. 1991, Musy et al. 1991, Guyot 1996]. Ainsi, seules les informations nécessaires à la mise au point des outils de simulation sont présentées.

2.2.1 Les échanges radiatifs

Le rayonnement solaire est la principale source d'énergie du système terre-atmosphère. Il est possible de décomposer le bilan radiatif des surfaces en deux parties, dont l'une correspond à la bande solaire (rayonnement de courte longueur d'onde comprenant le visible et le proche infrarouge, bande comprise entre 0.15 et 3.0 μm [Oke 1987]) et l'autre aux échanges infrarouges (rayonnement de grande longueur d'onde, bande comprise entre 5 et 100 μm).

2.2.1.1 Rayonnement solaire

L'énergie reçue du soleil par la terre évolue au cours de l'année, à cause de la variation de leur distance (Figure 2) et de l'inclinaison (Figure 3). Cette variation saisonnière est faible et on appelle constante solaire la valeur moyenne du rayonnement incident hors atmosphère (environ 1370 W/m^2). Le soleil peut être considéré comme un corps noir de température équivalente égale à 5900 K. 98 % de son rayonnement émis est réparti dans des longueurs d'onde (λ) comprises entre 0.25 μm et 4 μm ($\lambda_{\text{max}} = 0.5 \mu\text{m}$, d'où la couleur jaune du soleil). En traversant l'atmosphère, une partie du rayonnement solaire est absorbée, une autre partie est diffusée et enfin le reste est réfléchi. Par conséquent au niveau du sol on ne considère que le rayonnement direct atténué provenant du soleil et la partie diffuse provenant de la voûte céleste. En France, une surface perpendiculaire aux rayons solaires, située au niveau du sol, reçoit au maximum 700 W/m^2 en hiver et 1000 W/m^2 en été par ciel clair.

Le rayonnement direct est absorbé dans l'ultra violet ($\lambda < 0.3 \mu\text{m}$) par l'ozone dans les hautes couches de l'atmosphère et dans l'infrarouge ($\lambda > 0.73 \mu\text{m}$) par la vapeur d'eau et le gaz carbonique au niveau des basses couches. L'absorption dépend du trajet des rayons (inclinaison) et de la concentration de molécules absorbantes. Les molécules d'air diffusent selon la loi de Rayleigh (en $1/\lambda^4$), elles affectent par conséquent surtout les courtes longueurs d'onde, d'où la couleur bleue du ciel. Les aérosols, étant de dimensions variables, diffusent dans toutes les longueurs d'onde, d'où la couleur blanche des nuages et de la brume [CSTB 1995a].

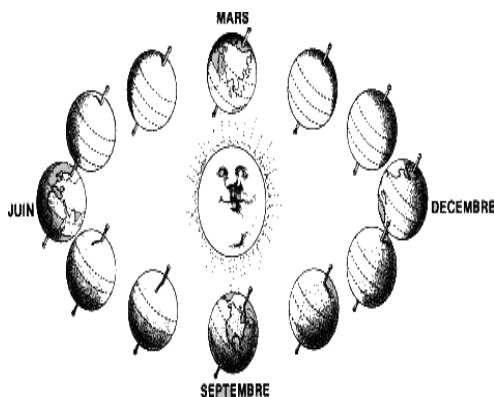


Figure 2 : Terre - Soleil [Mazria 1981]

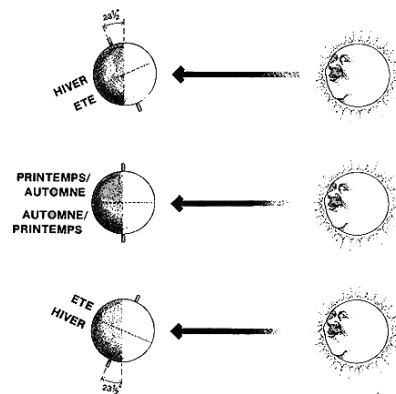


Figure 3 : Terre-Soleil-Saisons [Mazria 1981]

Les calculs nécessaires à la détermination de la position du soleil en un lieu, pour un jour et un instant donné font apparaître la latitude de ce lieu, la déclinaison et l'angle horaire [Siret 1997]. Des procédures de modélisation des trajectoires solaires sont présentes dans de nombreux logiciels commerciaux d'aide à la conception comme Autocad et dans des logiciels de simulation orienté recherche comme Townscope [Teller. et al. 1999] et SOLENE [Groleau et al. 1992a].

2.2.1.2 Rayonnement du ciel

Les gaz de l'atmosphère absorbent et émettent certaines longueurs d'onde. A travers ce bilan on peut en définir une température d'émission du ciel. Cette dernière est fonction de la température de l'air et de l'humidité. La température de l'air décroît avec l'altitude (environ 1°C tous les 100m) de sorte que, pour un ciel sans nuage, la température d'émission du ciel peut s'écrire :

$$T_{\text{ciel}} = T_{\text{air}} - \Delta T \quad (1)$$

ΔT est fonction de l'humidité de l'air et plus précisément de la pression de vapeur du sol [Perrin de Brichambaut et al. 1982] (Tableau 1).

P_v (en hPa)	4	8	16	32
ΔT (°C)	26	22	19	16

Tableau 1 : Ecart de température entre l'air et le ciel [Perrin de Brichambaut 1982]

Ainsi, le rayonnement de grande longueur d'onde du ciel peut s'écrire :

$$L\downarrow = 315 + 4,45 T_{\text{ciel}} \quad (2)$$

Dans le cas d'un ciel avec des nuages on peut ajouter de 40 à 90W/m².

Une équation empirique, proposée dans la littérature [Monteith et al. 1991], basée sur des mesures réalisées en Angleterre pour des variations de température allant de -6°C à +26°C, fait directement intervenir la température de l'air (T_{air} en °C) dans l'expression du rayonnement de grande longueur d'onde du ciel dégagé :

$$L\downarrow = 213 + 5.5 T_{\text{air}} \quad (3)$$

Il est important de signaler que cette formule est une corrélation statistique et qu'elle ne peut décrire les relations fonctionnelles directes. Pour la prévision, elle est considérée valide sous des conditions moyennes.

2.2.1.3 Le rayonnement thermique

Lorsque deux corps i et j , de surface S , de coefficient d'émission ϵ , sont à des températures (T en K) différentes et qu'ils ne sont pas en contact, un transfert de chaleur par rayonnement électromagnétique se produit. La densité de flux net radiatif de grandes longueurs d'onde (ϕ_{GLO} exprimée en W. m⁻²) est définie par la loi de Stefan-Boltzmann :

$$\phi_{GLO} = \frac{\sigma(T_i^4 - T_j^4)}{\frac{1 - \epsilon_i}{\epsilon_i} + \frac{1}{F_{i,j}} + \frac{1 - \epsilon_j}{\epsilon_j} \frac{S_i}{S_j}} \quad (4)$$

Si $S_i \ll S_j$:

$$\varphi_{GLO} \approx \frac{\sigma(T_i^4 - T_j^4)}{\frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i} + \frac{1}{F_{i,j}}} \quad (5)$$

Si les interr reflexions sont négligées, nous pouvons écrire :

$$\varphi_{GLO} = \sigma \varepsilon_i F_{i,j} (T_i^4 - T_j^4) \quad (6)$$

Ces relations font intervenir la constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$) et le facteur de forme entre la surface i et la surface j ($F_{i,j}$).

2.2.1.4 Facteurs de forme

L'échange d'énergie par rayonnement électromagnétique entre deux surfaces nécessite la connaissance des facteurs de forme. Ces derniers sont des nombres sans dimension compris entre 0 et 1 qui traduisent le rapport entre la quantité d'énergie qui quitte une surface et qui atteint une autre surface et la quantité totale d'énergie qui quitte la surface. Ils sont donc proportionnels à l'angle solide sous lequel une surface émettrice voit une surface réceptrice. Autrement dit, nous cherchons à déterminer la proportion d'espace visible à partir d'une surface en fixant l'autre surface par rapport à l'espace total devant cette surface.

Le facteur de forme entre deux surfaces i et j , orientées d'un angle θ par rapport à leur normale n et séparées d'une distance r (Figure 4) s'écrit :

$$F_{i,j} = \frac{1}{\pi A_i} \int \int_{A_i A_j} \frac{\cos \theta_i \cdot \cos \theta_j \cdot dA_i \cdot dA_j}{r^2} \quad (7)$$

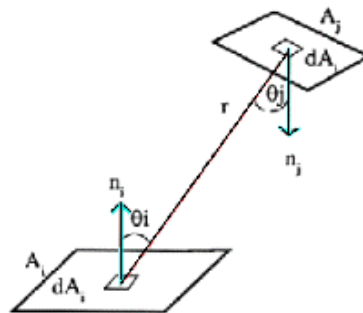


Figure 4 : Facteur de forme

La détermination des facteurs de forme peut se faire de manière analytique ou à partir d'abaques dans un nombre de cas bien précis. Pour l'analyse générale des facteurs de formes que l'on peut rencontrer dans les simulations en contexte urbain, des méthodes géométriques, comme celles basées sur l'analogie de Nusselt [Groleau et al. 1992b] ou sur une expression analytique due à Lambert (1760), permettent ce type de calcul [Miguet et al. 1996] ou sur une méthode par suivie de contour [Miguet 1996].

2.2.1.5 Bilan radiatif

Au sol le bilan radiatif net (RN) pour une surface horizontale peut s'écrire ;

$$R_N = (1 - \alpha_{sol}) (S \downarrow \sin h + D_H) + L \downarrow - L \uparrow \quad (8)$$

Avec :

- α_{sol} : albédo solaire ;
- $S \downarrow$: Irradiation solaire directe (surface perpendiculaire aux rayons solaires)
- h : hauteur angulaire du soleil au-dessus de l'horizon ;
- D_H : Irradiation solaire diffuse reçue par une surface horizontale.
- $L \downarrow$: rayonnement de l'atmosphère vers le sol ;
- $L \uparrow$: rayonnement du sol vers la voûte céleste.

2.2.2 Les échanges convectifs

Un phénomène de convection naturelle apparaît lorsque sous l'effet d'une différence de densité de l'air due à une différence de température, un courant d'air se met en place. Lorsque l'air est en mouvement sous l'action d'une force externe, on emploie le terme de convection forcée. Plus la vitesse de l'air est élevée, plus les échanges thermiques sont importants. Différentes corrélations sont proposées dans la littérature pour estimer la valeur de ces coefficients d'échanges. En milieu urbain, les caractéristiques du vent sont importantes car les transferts de chaleur, d'humidité et de polluants dans l'atmosphère sont essentiellement gouvernés par le mouvement des masses d'air. Grâce à certains travaux de nombreux effets aérauliques sont maintenant bien connus et apportent des informations pertinentes aux aménageurs de l'espace urbain.

2.2.2.1 Les coefficients d'échange convectif

Des corrélations permettent d'exprimer le coefficient d'échange convectif (h_c). Ils sont obtenus à partir d'études en convection naturelle ou forcée sur des plaques planes horizontales ou verticales. Il est possible d'exprimer ce coefficient à partir d'un écart de température entre la surface et l'air et de paramètres que l'on note a, n et b :

$$h_c = a (T_s - T_a)^n + b \quad (9)$$

Dans le tableau ci dessous (Tableau 2), les valeurs de ces paramètres sont définies par différents auteurs [Inard 1988]. Des différences relativement importantes apparaissent dans les valeurs obtenues (Figure 5).

Auteurs	Surfaces verticales			Surfaces horizontales					
				Flux ascendant			Flux descendant		
	a	n	b	a	n	b	a	n	b
Briss	1.88	0.32	0	2.42	0.31	0	0	0	0.6
Byvok	0	0	4	0	0	5	0	0	2.5
Heat	1	0.425	1.7	1	0.425	1.7	1	0.425	1.7
Gaignou	1.85	0.25	0	-	-	-	-	-	-
Mitalas	1.02	0.33	0	-	-	-	-	-	-
Ferries	1.6	0.33	0	2.1	0.33	0	1	0.33	0
ASHRA	1.24	0.33	0	1.31	0.33	0	1.52	0.33	0

E									
---	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Tableau 2 : Paramètres a, n et b en convection naturelle [Inard 1988]

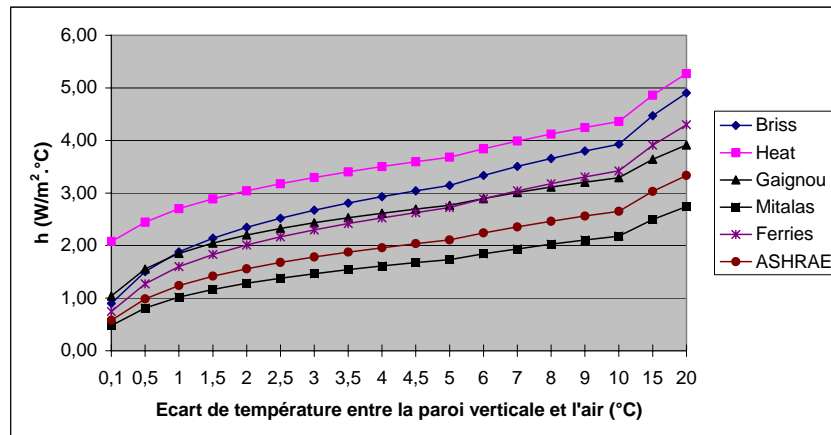


Figure 5 : Coefficients d'échange convectif en fonction de l'écart de température entre la paroi et l'air (convection naturelle)

En convection forcée, le coefficient d'échange peut s'exprimer en fonction de la vitesse du vent et des paramètres a, n et b (Tableau 3) :

$$h_c = a + b U^n \quad (10)$$

Auteurs	Conditions	a	b	n
Nusselt et Jurges	$U < 5 \text{ m/s}$	5.8	4.1	1
	$U > 5 \text{ m/s}$	0	7.3	0.78
Ferries		2.5	3.5	1
Sturrock	Paroi au vent	11.4	5.7	1
	Paroi sous le vent	0	5.7	1
Kimamura	Paroi au vent			
	$U < 2 \text{ m/s}$	0	8	0.605
	$U > 2 \text{ m/s}$	0	12.23	1
	Paroi sous le vent	0.3	0.05	1
Laret	$U < 1 \text{ m/s}$	0	2	1
	$U > 1 \text{ m/s}$	2	4	1
Ito	Paroi au vent			
	$U < 2 \text{ m/s}$	11.7	0.3	1
	$2 < U < 8 \text{ m/s}$	6.7	2.8	1
	$U > 8 \text{ m/s}$	15	1.8	1
	Paroi sous le vent	9	0.7	1
Croiset	-	3.1	4.1	0.605

Tableau 3 : Paramètres a, n et b en convection forcée [Pignolet 1994]

Les écarts entre les différentes valeurs résultent des différences entre les protocoles expérimentaux (instrumentation différente, soufflerie et mesure in situ).

La corrélation généralement utilisée est celle de l'ASHRAE qui est issue de mesures en soufflerie sur une plaque plane [ASHRAE 1993a].

$$\text{ASHRAE : } h_c = 5.7 + 3.8 U \quad (11)$$

Il semble qu'elle surestime la valeur du coefficient d'échange convectif, notamment pour des vitesses de vent élevées. Des mesures en extérieur ont montré que pour une plaque centrale d'un mur vertical les valeurs des coefficients d'échange convectif varient de 6 à 10 W/m².K pour des vitesses de vent comprises entre 0 et 4 m/s [Jayamaha et al. 1996]. La direction du vent n'a pas d'effet significatif sur le coefficient pour des murs larges. Par ailleurs, les auteurs montrent que le coefficient d'échange convectif ne suit ni l'intensité du rayonnement solaire ni l'écart de température mais qu'il est directement relié à la vitesse du vent, d'où la corrélation suivante :

$$h_{c,moy} = 5.85 + 1.7 U \quad (12)$$

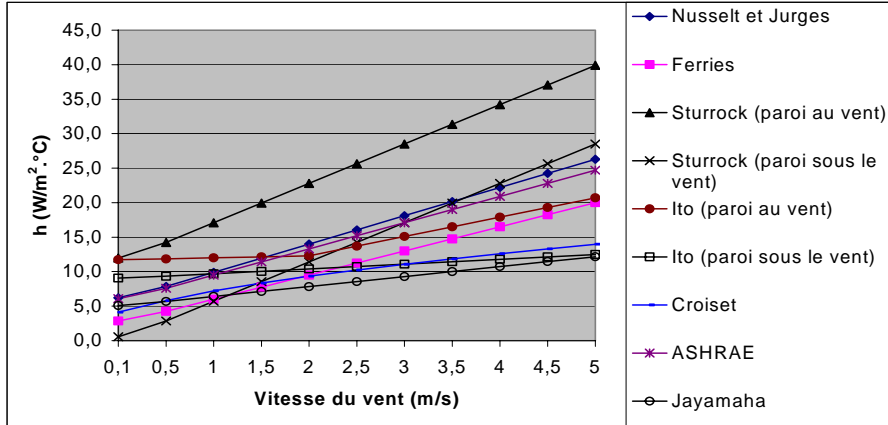


Figure 6 : Coefficients d'échange convectif pour différentes vitesses de vent (convection forcée)

A partir des différentes corrélations et des valeurs obtenues dans les deux graphiques (Figure 5 et Figure 6), il est à souligner que les coefficients d'échange convectif obtenus en convection forcée dépassent largement ceux obtenus en convection naturelle. Pour la majorité des auteurs, dès que la vitesse du vent dépasse 0.1 m/s, l'écart de température qui entraîne la même valeur doit être de 20 °C. Les différences de résultats entre chaque corrélation ne permettent pas de retenir a priori telle ou telle formule. Ainsi, nous avons préféré récupérer directement dans le code CFD N3S la valeur du flux convectif en chaque point de la scène plutôt que de lire les vitesses et de les traduire avec une corrélation. Nous revenons sur ce point dans la deuxième partie lorsque nous abordons le couplage thermo-aéraulique.

2.2.2.2 Caractéristiques du vent

Le vent est un écoulement qui tend à équilibrer les zones de pressions différentes dans l'atmosphère. Dans les basses couches (0 à 300 m environ) la rugosité du sol (végétation, construction, etc.) induit des forces de frottement qui réduisent la vitesse moyenne du vent avec création de turbulence. L'écoulement du vent peut être décrit par la superposition d'une vitesse moyenne sur une période T assez longue et d'une vitesse fluctuante fonction du temps :

$$U = \bar{U} + U' \quad (13)$$

La turbulence, c'est-à-dire la dispersion de la vitesse autour de sa valeur moyenne, étant aléatoire, est étudiée de manière statistique. Elle est caractérisée sur la période T par l'écart-type

σ , qui est homogène à une vitesse et correspond à la racine carrée de la moyenne sur la période T du carré des fluctuations de vitesse :

$$\sigma = \sqrt{\overline{U'^2}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U'^2(t) dt} \quad (14)$$

La vitesse moyenne du vent varie avec la hauteur Z, la rugosité du sol et la topographie éventuelle des sites. Pour quantifier le phénomène vent et notamment sa force, on utilise une vitesse moyenne de référence U_{ref} . Par convention, cette vitesse est prise à 10 m du sol, en site plat et à faible rugosité. En général, la vitesse de référence correspond à la vitesse mesurée à la station météo. La variation de la vitesse moyenne avec la hauteur et la rugosité peut être décrite par un modèle logarithmique [Gandemer et al. 1981] :

$$\overline{U}_z = k \overline{U}_{ref} \ln \frac{Z}{Z_0} = C_z \overline{U}_{ref} \quad (15)$$

La correspondance entre σ et la vitesse moyenne de référence s'exprime par :

$$\sigma = K \overline{U}_{ref} \quad (16)$$

Des classes de rugosité sont définies pour certains types de sites (Tableau 4).

Classe de rugosité	I : Océan – grand lac	II : Rase campagne	III : Bocage, banlieue	IV : Zone urbaine	V : Centre des grandes villes
Z_0	0.005	0.07	0.03	1	2.5
k	0.166	0.202	0.234	0.266	0.292
K	0.17	0.20	0.21	0.23	0.23

Tableau 4 : Classe de rugosité d'après [Gandemer *et al.* 1981]

Les transferts dus à l'écoulement moyen sont appelés transferts advectifs, leur composante horizontale est largement prédominante. Ils sont importants en ville car ils permettent d'atténuer les contrastes qui apparaîtraient dans le seul cas d'échanges verticaux. Les transferts turbulents de quantité de mouvement, de chaleur ou d'humidité sont caractérisés par les coefficients d'échange turbulent de ces quantités : K_M , K_H et K_W [Penicaud 1978] et [Oke 1987]. Les flux verticaux de quantité de mouvement (M), de chaleur (H) et d'humidité (W) transportés par turbulence sont alors notés en fonction de la vitesse de l'air (U), de la température virtuelle ($\bar{\theta}$) et de l'humidité spécifique (q) :

Pour la quantité de mouvement :

$$M = -K_M \rho \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right) \quad (17)$$

Pour le flux de chaleur :

$$H = -K_H C_p \rho \left(\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} \right) \quad (18)$$

Pour la vapeur d'eau :

$$W = -K_W \rho \left(\frac{\partial q}{\partial z} \right) \quad (19)$$

Les rapports entre les différents coefficients de transfert (coefficient de diffusion moléculaire) dépendent de l'état de stabilité de l'atmosphère.

En adiabaticité : $K_H = K_M = K_w$
 En instabilité : $K_H > K_M \approx K_w$
 En stabilité : $K_H \approx K_w < K_M$,

Au voisinage du sol on distingue deux types de turbulence [Pignolet 1996]. En effet, un processus cinétique génère une turbulence dynamique ou de cisaillement due à l'influence de la rugosité du sol sur l'écoulement du vent et un processus thermique de nature convective se rencontre par vents faibles ou homogènes lorsque le gradient thermique devient supérieur au gradient adiabatique.

La prédominance d'un type de turbulence sur l'autre est déterminée par l'état de stabilité de l'atmosphère et a des incidences sur l'intensité des transferts de quantité de mouvement, de chaleur et d'humidité. Les mouvements turbulents ont tendance à s'amplifier en conditions instables. Un flux de chaleur sensible s'établit entre le sol et les basses couches de l'atmosphère s'il existe une différence de température. Les états de stabilité de la couche limite de surface (CLS) se différencient par le signe de ce flux de chaleur turbulent vertical :

- CLS neutre : la température de surface du sol est égale à celle de l'air adjacent et le flux de chaleur sensible est nul (phénomène assez rare).
- CLS instable : la température de surface est supérieure à celle de l'air au-dessus. Le flux est dirigé vers le haut. La production de turbulence est alors essentiellement thermique.
- CLS stable : la température de surface est inférieure à celle de l'air adjacent. Le flux de chaleur sensible est dirigé vers le sol. Les processus turbulents, thermiques et dynamiques sont alors plus ou moins inhibés (phénomène plutôt nocturne).

L'état de stabilité locale de l'air peut être décrit par un des deux paramètres que sont le nombre de Richardson et la longueur de Monin-Obukov. Le nombre de Richardson R_F relatif au flux est le rapport entre la turbulence convective et la turbulence dynamique. Le nombre de Richardson de gradient s'écrit : $R_I = R_F \cdot K_H / K_M$. Lorsque R_I a une valeur faible, le fluide est en stabilité neutre (conditions adiabatiques). Lorsque R_I est négatif l'écoulement est instable et lorsque R_I est positif, il est stable. La turbulence commence à se dissiper vers $R_I = 0.1$ et elle disparaît pour $R_I = 0.3$. La longueur de Monin-Obukov L est définie de telle manière que pour des hauteurs très faibles devant L , la turbulence mécanique prédomine, alors que pour des altitudes très supérieures à L c'est la turbulence convective (Tableau 5) [Penicaud 1978].

Valeurs de z / L	Phénomène
$z / L < -0.3$	Convection libre
$-0.3 < z / L < -0.03$	Convection mixte
$-0.03 < z / L < +0.3$	Zone proche adiabatique
$0.3 < z / L$	Écoulement stable

Tableau 5 : Relations entre la longueur de Monin-Obukov et les écoulements [Penicaud 1978]

2.2.2.3 Les effets aérauliques en milieu urbain

Les principes des écoulements d'air en milieu urbain sont assez bien connus pour certaines configurations géométriques. Ainsi, des effets sont identifiables en ville et sont répertoriés dans

certains ouvrages [Gandemer et al. 1976]. Nous présentons ci-dessous quatre effets qui pourront se retrouver dans les simulations que nous souhaitons réaliser :

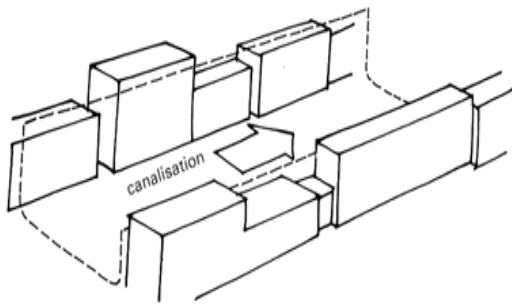


Figure 7 : Effet de canalisation

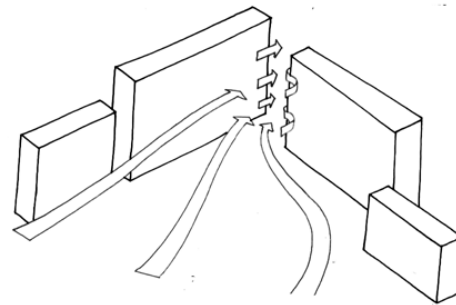


Figure 8 : Effet Venturi

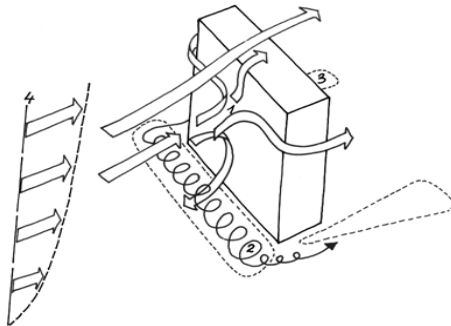


Figure 9 : Effet de contournement

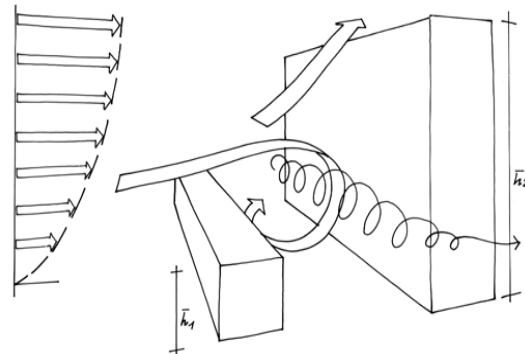


Figure 10 : Effet Wise

2.2.2.3.1 L'écoulement autour d'un bâtiment

Lorsqu'un vent vient heurter un bâtiment, trois zones principales de perturbation apparaissent : à l'avant un vortex turbulent dû à l'écoulement descendant sur la face au vent, à l'arrière une zone de turbulence qui s'étire dans la cavité de basse pression due à la séparation des écoulements au niveau des bords du bâtiment, et plus loin le sillage du bâtiment caractérisé par une turbulence élevée et des vitesses horizontales inférieures à celles de l'écoulement non perturbé [Oke 1988].

2.2.2.3.2 L'écoulement dans une rue

L'écoulement au-dessus d'une rangée de bâtiments est moins bien compris. Pour analyser les différents types de rues, il est d'usage d'utiliser un indicateur, le rapport d'aspect, qui correspond au quotient des hauteurs moyennes des bâtiments sur la largeur de la rue, on le note H/W . Si les bâtiments sont bien séparés ($H/W > 0.05$) les écoulements n'interagissent pas. A des espacements plus réduits, les sillages sont perturbés. Lorsque la hauteur, l'espacement, et la densité de la combinaison de rangées se combinent, le régime de l'écoulement de rugosité isolé (« isolated roughness ») se transforme en un écoulement à interférence des sillages (« wake interference »). Ce dernier est caractérisé par des écoulements secondaires dans l'espace du canyon. A des rapports d'aspect et des densités plus élevées un vortex stable s'établit dans le canyon et un régime d'écoulement rasant « skimming » apparaît où l'enveloppe de l'écoulement ne pénètre plus dans le canyon (Figure 11) [Oke 1987, 1988].

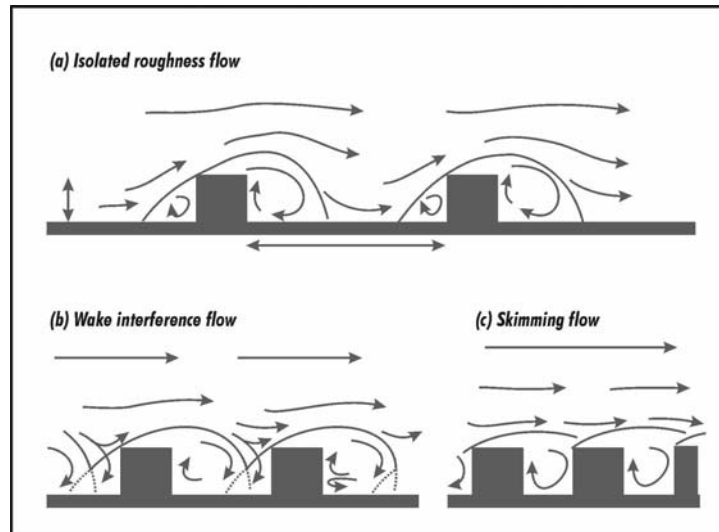


Figure 11 : Ecoulements aérauliques dans les rues [Oke 1987]

La géométrie urbaine affecte la capacité à disperser les polluants dans la ville, en modifiant la production de turbulence mécanique, le profil vertical du vent et l'épaisseur de la couche de mélange. De plus, ces phénomènes peuvent être amplifiés, à une échelle microclimatique, les rues et les bâtiments générant des zones de faibles vitesses de vent et des effets de recirculation turbulente.

Pour les écoulements perpendiculaires, les mécanismes déterminant les caractéristiques de l'écoulement dans le canyon sont soit la création d'un vortex dû au transfert de quantité de mouvement à travers une couche de cisaillement au niveau du toit, soit les effets de longueur finie du canyon qui sont liés à des vortex intermittents qui s'étendent au niveau des coins et qui sont responsables des mécanismes d'advection. Dans des canyons profonds, les études ont montré que deux vortex se développent, celui du haut conduit par l'écoulement de l'air ambiant, celui du bas conduit dans la direction opposée par la circulation du dessus.

Cependant, la circulation dans le canyon n'est pas seulement gouvernée par l'air ambiant, mais est la résultante de trois mécanismes spécifiques : écoulement de l'air ambiant au-dessus du canyon, stratification verticale de l'air dans le canyon qui peut atteindre la valeur de 6 °C et mécanismes d'advection au niveau des coins des bâtiments. Ainsi, les comportements aérauliques et les valeurs seuils obtenues en soufflerie et en simulation numérique ne sont pas systématiquement retrouvées. Dans le cas d'un écoulement parallèle à l'axe du canyon, les données dans le canyon donnent une direction équivalente. Dans les cas où l'écoulement fait un angle par rapport à l'axe du canyon, un vortex en spirale apparaît le long du canyon [Santamouris et al. 1999].

2.2.3 Les échanges conductifs

Dans les solides et les fluides au repos, les transferts de chaleur s'effectuent par conduction. Ce phénomène correspond à la propagation de proche en proche des énergies moléculaires internes dans les milieux sans mouvement [Guyot 1996]. Les transferts de chaleur dans les sols sont gouvernés par quatre propriétés thermo-physiques : la conductivité thermique (λ), la masse volumique (ρ), la capacité calorifique (c_p) et la diffusivité thermique (a). On distingue la conduction en régime permanent, pour laquelle la température ne varie pas en fonction du temps et la conduction en régime transitoire dans laquelle l'inertie intervient.

2.2.3.1 Conduction de la chaleur à travers un solide

Suivant la loi de Fourier, la densité de flux de chaleur est proportionnelle au gradient de température. Le coefficient de proportionnalité est appelé conductivité thermique (λ en $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). Ainsi, on exprime le flux par la relation suivante :

$$\overrightarrow{\varphi}_{cond} = -\lambda \cdot \overrightarrow{grad}T \quad (20)$$

De plus, pour un solide, si nous considérons que la conductivité thermique est indépendante de la température, l'équation de l'énergie se réduit à :

$$\Delta T = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (21)$$

Le laplacien de la température s'écrit en coordonnées cartésiennes :

$$\Delta T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (22)$$

Ces équations permettent d'évaluer le champ de température en tout point du solide ainsi que la densité de flux. La recherche de la solution pour chaque cas nécessite d'adjoindre des conditions aux limites et une condition initiale.

2.2.3.2 Conduction en régime périodique

Dans notre étude nous serons amenés à traiter le cas particulier de la conduction dans le sol qui peut être assimilé à un corps semi-infini monodimensionnel. Lorsque la sollicitation thermique appliquée au sol est de type périodique, la variation de la température, à une profondeur donnée, est une fonction périodique du temps assimilée à une sinusoïde. L'amplitude des températures s'atténue rapidement et on constate un certain déphasage de l'onde thermique en fonction de la profondeur. Il est possible d'écrire l'évolution de la température dans le sol sous la forme d'une sinusoïde amortie [Guyot 1996] :

$$T(z) = T_m + A_s \cdot \exp(-z/z_d) \cdot \sin[\omega \cdot (t - t_m) - (z/z_d)] \quad (23)$$

Cette solution de l'équation de Fourier satisfait aux conditions limites suivantes :

$$\begin{aligned} \text{Pour } z = 0, T &= T_s(t) \\ \text{Pour } z \rightarrow \infty, T &\rightarrow T_m \end{aligned}$$

Avec :

$$\begin{aligned} T_s &: \text{température de surface ;} \\ T_m &: \text{température moyenne de la surface ;} \\ A_s &: \text{amplitude ;} \\ t_m &: \text{instant de la journée où } T_s = T_m \text{ ;} \\ \omega &: \text{pulsation } (\omega = 2/86400 \text{ à l'échelle journalière, si le temps est en seconde) ;} \\ z_d &: \text{profondeur d'amortissement} \end{aligned}$$

$$z_d = \sqrt{\frac{2a}{\omega}} \quad (24)$$

L'évolution de l'amplitude en fonction de la profondeur est exponentielle et s'écrit :

$$A(z) = A_s [1 - \exp (-z/z_d)] \quad (25)$$

Ainsi, à la profondeur $z = z_d$, l'amplitude thermique est pratiquement divisée par trois, à $z = 3 z_d$, elle est divisée par 20 et à $z = 5 z_d$, elle est inférieure à 1 % de la valeur initiale. Elle est alors considérée complètement amortie. Cela explique pourquoi il est possible de prendre comme référence la température mesurée à une profondeur inférieure à un mètre quel que soit le type de sol. A la profondeur $z = \pi z_d$, l'onde thermique est en opposition de phase avec l'onde thermique à la surface (la température y est minimale lorsque la température à la surface est maximale et réciproquement). A l'échelle journalière, l'opposition de phase apparaît à une profondeur relativement faible à savoir moins de 50 cm [Guyot 1996].

Le régime de température de chaque sol est profondément modifié par la croissance de la végétation car la surface est de plus en plus à l'ombre lorsque la canopée augmente. La présence d'ombre réduit la température maximale et augmente la température minimale à chaque profondeur et il existe une légère diminution de la température moyenne [Monteith et al. 1991].

2.2.4 Le bilan hydrique et la diffusion de la vapeur

Le comportement hydrique d'un sol est caractérisé par des transferts en eau qui se produisent partiellement en phase liquide et partiellement en phase gazeuse. Il est possible de considérer qu'ils sont globalement proportionnels à un gradient de potentiel décroissant et inversement proportionnels aux résistances qu'ils rencontrent [Musy et al. 1991]. Le potentiel hydrique (Ψ) traduit l'effet des différentes forces de liaison (osmotique, capillaire, d'imbibition...) existant entre les molécules d'eau et les constituants du sol ou de la plante. Il peut être défini comme le travail à fournir à une unité de masse d'eau, située en un point du système, pour la faire passer de l'état d'eau liée à un état de référence, correspondant à celui de l'eau libre à la même température et à un niveau de référence (au niveau du sol, par exemple). Dans les végétaux, le potentiel hydrique peut être considéré comme la somme algébrique des trois composantes : le potentiel de pression, le potentiel osmotique et le potentiel de gravité (faible voire négligeable). Le potentiel hydrique peut être exprimé en fonction de l'humidité relative de l'air en équilibre avec l'eau liée à la même température [Guyot 1996] :

$$\Psi = \frac{RT}{V_w^0} \ln\left(\frac{e}{e_s}\right) \quad (26)$$

Avec :

R : constante des gaz parfaits ;

T : température de l'air (K) ;

e : tension de la vapeur d'eau en équilibre avec l'eau liée ;

V_w^0 : volume molaire de l'eau liquide, ($V_w^0 = 18 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$).

Le flux vertical d'eau dans le sol est composé de liquide (J_l) et de vapeur (J_v). Le flux d'eau liquide est relié au gradient vertical du potentiel en eau par la loi de Darcy [Oke 1987], K_f étant la conductivité hydraulique :

$$J_l = -K_f \frac{\partial \Psi}{\partial z} \quad (27)$$

L'effet de l'évapotranspiration est de créer un gradient potentiel qui devient plus important que le gradient opposé dû à la gravitation et encourage un mouvement ascendant de l'eau d'un potentiel faible à un potentiel élevé.

Le flux de vapeur suit une équation reliant le flux au gradient, K_{va} étant la diffusivité moléculaire de la vapeur d'eau et ρ_v la densité de vapeur d'eau :

$$J_v = -K_{va} \frac{\partial \rho_v}{\partial z} \quad (28)$$

Parmi les différents paramètres climatiques qui ont fait l'objet d'études en milieu urbain, l'humidité a reçu peu d'attention. Cela est peut-être dû au fait que les écarts entre l'humidité mesurée en milieu urbain et en milieu rural semblent être faibles et que la distribution spatiale est généralement complexe. Les différences d'humidité sont parfois de l'ordre de grandeur de l'incertitude de la mesure et des affirmations contradictoires peuvent en découler. Pendant la nuit, une atmosphère stable et une diminution des phénomènes advectifs peuvent mettre en évidence des sources locales de vapeur d'eau.

Le bilan hydrique, au niveau d'un sol (Figure 12), nous permet d'estimer que les pertes par évapotranspiration proviennent de l'eau qui s'est infiltrée, à laquelle il faut retrancher les pertes par percolation profonde et la fraction retenue par le sol [Musy et al. 1991]. Un bilan, pour une surface, peut alors s'écrire :

$$I - (E + D) = \Delta S \quad (29)$$

Avec :

- I : infiltration
- E : perte par évapotranspiration
- D : perte par percolation
- ΔS : stock

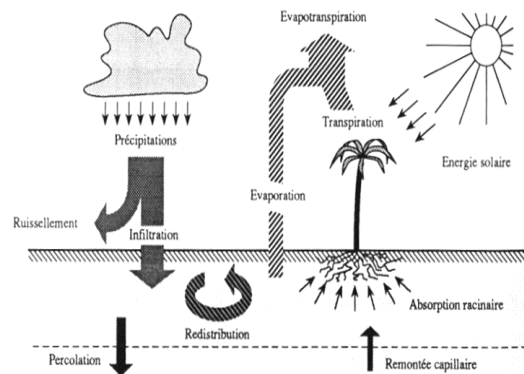


Figure 12 : Bilan hydrique [Musy et al. 1991]

Les types de sol dans l'environnement urbain sont nombreux. Les propriétés thermodynamiques et hydrauliques peuvent être sélectionnées pour différents profils de sol et différentes surfaces [Bruse et al. 1998]. Ainsi, dans un sol traité comme une colonne verticale, l'humidité volumétrique du sol (η) est calculée par l'équation :

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = D_\eta \frac{\partial^2 \eta}{\partial z^2} + \frac{\partial K_\eta}{\partial z} - S_\eta(z) \quad (30)$$

Les paramètres hydrauliques utilisés sont : la contenance en eau par volume (η), sa valeur de saturation (η_s), la conductivité hydraulique (K_η) et la diffusivité hydraulique D_η . Tous ces coefficients sont calculés à partir des formules de Clapp et Hornberger (1978) [Bruse et al. 1998]. L'eau absorbée par les racines des végétaux peut être traitée comme un terme puits

interne d'humidité. Au niveau de la couche supérieure le flux de vapeur pour une surface de sol est considéré comme un terme source ou un puits additionnel.

2.2.5 Bilan énergétique total

Au niveau d'une surface il est possible de déterminer un bilan énergétique à partir des composantes que nous avons présentées ci-dessus. Nous pouvons écrire que le bilan énergétique de la surface est la somme des transferts par convection et advection (φ_{conv}) par conduction (φ_{cond}) et par évaporation (φ_{evap}). Ces transferts doivent équilibrer apports et pertes par rayonnement net (R_n), d'où l'expression suivante :

$$R_n = \varphi_{\text{conv}} + \varphi_{\text{cond}} + \varphi_{\text{evap}} \quad (31)$$

Ce type de bilan peut être résolu grâce aux techniques de modélisation numérique pour des environnements urbains complexes. Des précisions sont apportées dans la deuxième partie quant à l'implémentation des différents transferts dans les logiciels.

2.3 Les études menées dans le domaine de la microclimatologie urbaine

2.3.1 Comportement thermique des rues

La ville est souvent étudiée par l'analyse du comportement thermique des rues canyon [Nunez et al. 1977, Oke 1988, Hunter et al. 1992, Pignolet 1996, Mills et al. 1993, Sini et al. 1996, Arnfield et al. 1998]. La rue canyon est l'unité géométrique de base qui correspond à une rue de longueur infinie, ce qui permet de la traiter en 2D. La section de la ville est approchée par une simple répétition de ces unités. De nombreux modèles, avec des niveaux différents de complexité, ont été développés et partiellement validés. Ils possèdent l'avantage de pouvoir comparer de nombreuses configurations de rue et notamment de rapport d'aspect (H/W) mais demeurent caricaturaux vis à vis de la scène traitée (symétrie des bâtiments, géométrie en deux dimensions, longueur infinie des rues, façades planes). Les informations recueillies peuvent servir à mettre en relation certains paramètres mais ne peuvent qu'approcher la réalité physique de la ville, qui doit-on le rappeler n'est pas un enchaînement de rues parallèles, mais un environnement géométrique complexe, dans lequel les échanges convectifs notamment sont délicats à déterminer.

Des mesures ont été réalisées dans une rue piétonne à Athènes [Santamouris et al. 1999]. Les températures de surface maximales mesurées dans le canyon atteignent 53°C, alors que les minimales sont proches de 25°C. L'amplitude journalière varie entre 20 et 28°C en fonction du rayonnement solaire reçu. La différence maximale de température simultanée entre les deux surfaces opposées des façades des bâtiments est proche de 19°C. Dans la journée, les températures de surface maximales au niveau de la rue sont de 3 à 5°C supérieures à celles des façades. Cela est principalement dû au rayonnement solaire qui est plus élevé pour une surface horizontale en été et à l'absorptivité plus élevée des dalles utilisées pour les trottoirs que celle des façades en plâtre blanc. La stratification de la température d'air dans la rue n'est pas significative dans la journée. Les différences maximales des températures dépassent rarement 2 à 3°C et semblent faibles étant données les différences de températures de surface relevées précédemment. Les résultats obtenus indiquent clairement que la température de l'air de la rue est régie par des facteurs plus complexes que la température de surface, même si la géométrie locale du canyon est d'importance. Aucune distribution spécifique n'a été trouvée avec la

hauteur. Dans la plupart des cas des températures plus faibles sont mesurées au niveau du sol et elles augmentent avec la hauteur en accord avec la distribution des températures de surface. Près de la façade, un film d'air apparaît, il est gouverné par la température de surface et le transport d'air vertical. Au milieu du canyon et au niveau du sol, la température de l'air dépend plus du flux divergent que du volume d'air incluant celui du transport horizontal.

2.3.2 Relations entre géométrie du canyon et microclimat

La relation entre l'aménagement et le climat aux latitudes moyennes et hautes est envisagée dans une étude bibliographique passant en revue les différents résultats obtenus dans les études relatives aux rues canyons urbaines. Le point de départ de ce travail était de mettre en relation quatre objectifs distincts au niveau des rues visant à maximiser : les zones de protection (sécurité et confort des piétons), la dispersion des polluants, la chaleur urbaine la nuit et à la saison froide (en supposant que le stress thermique n'est pas un problème majeur dans ces climats) et enfin l'accès solaire. En s'appuyant sur des relations quantifiables, il apparaît qu'il est possible de trouver une variété de canyon qui soit compatible avec les objectifs conflictuels de l'aménagement des villes aux latitudes moyennes même s'il semble qu'il n'existe pas d'optimum géométrique universel. Les résultats de cette recherche exploratoire et les généralisations possibles pour des villes de latitudes moyennes sont les suivants : une limite inférieure du rapport H/W de 0.4 est fixée pour un besoin de protection au vent et pour retenir une partie raisonnable de l'îlot de chaleur. Une limite supérieure de 0.6 – 0.65 assure la dispersion des polluants et l'accès solaire dans la rue. Ainsi, pour que les quatre objectifs soient atteints, un domaine de compatibilité pour le rapport d'aspect H/W varie de 0.4 à 0.6. Il existe peu de relations disponibles qui utilisent la densité, néanmoins il semble que la rugosité puisse être maximisée pour une densité de 0.25 et l'absorption pour une densité de 0.33. Ainsi, une densité comprise entre 0.2 et 0.4 semble convenable. [Oke 1988]

Des travaux menés au laboratoire CERMA visent à analyser les composantes microclimatiques des espaces urbains. Les différents développements du logiciel SOLENE, que nous présentons dans la deuxième partie, permettent de définir des indicateurs utiles à l'élaboration de catégories typo-morphologiques liées aux apports solaires [Groleau et al. 1995]. Plus récemment, l'analyse de l'impact des formes urbaines sur les échanges radiatifs a permis de proposer une caractérisation spatiale et physique en milieu urbain [Tiraoui 2000].

2.3.3 Ilot de chaleur urbain

Des études américaines [Akbari et al. 1992] ont montré que les températures estivales, dans les zones urbaines, sont généralement plus élevées de 1 à 4 °C que celles des zones rurales environnantes. Ce phénomène peut être un avantage en hiver car il permet de diminuer les factures de chauffage. Cependant, dans les climats chauds, une augmentation de la température entraîne une augmentation de la demande énergétique en conditionnement de l'air. Pour chaque augmentation de la température estivale de 0.5 °C, le pic des charges de conditionnement d'air s'élève de 1.5 à 2 %. Ainsi, avec l'augmentation de la température de 1 à 2 °C lors des 4 dernières décades, on estime que 3 à 8 % de la demande électrique sert à compenser l'effet d'îlot de chaleur. Parallèlement, l'îlot de chaleur urbain estival augmente également la production de brouillard (« smog ») de 10 % pour une élévation de la température de 2.5 °C.

2.4 Spécificité du microclimat urbain

L'interaction entre le climat et la ville est une des préoccupations les plus importantes depuis quelques dizaines d'années, même si, depuis Vitruve, il est admis que l'architecture et les espaces urbains peuvent être ajustés en terme de climat [Péneau 1991]. Il n'existe pas encore de théorie de la climatologie des villes qui soit généralement acceptée. Ce sujet est toujours considéré comme complexe et divers. Seules quelques règles sont suffisamment générales pour être exportées d'une ville vers une autre. En effet, le climat urbain actuel est fortement dépendant aussi bien de la situation géographique que de sa structure, de la météorologie régionale et de son interaction avec les activités humaines [Mestayer et al. 1994].

Pourquoi est-ce que le microclimat est si important ? La croissance des villes est extrêmement rapide, aussi bien en terme de développement des limites urbaines, qu'en quantité de population. On considère qu'au changement de siècle 50 % des individus vivront dans les villes et en 2100 ce nombre devrait atteindre 80 %, alors qu'au début du siècle on estimait cette valeur à 14 % et qu'en 1950 le nombre de citoyens n'était que de 30%. Ainsi, actuellement 170 villes possèdent plus d'un million d'habitants pour lesquelles on considère une création de 25000 tonnes de dioxyde de carbone et un gaspillage de 300000 tonnes d'eau par jour [WMO 1996].

La ville en modifiant le climat agit directement sur les problèmes de santé liés à la pollution et aux vagues de chaleur, sur le confort en espace extérieur et sur l'utilisation d'énergie dans les bâtiments. L'influence indirecte du microclimat apparaît lorsque le comportement humain intervient dans la chaîne cause-effet. Par exemple, dans le cas d'une rue bruyante et polluée, la ventilation naturelle n'est pas attractive et mène à l'installation de l'air conditionné qui non seulement consomme des quantités d'énergie électrique considérables, mais qui en plus baigne le bâtiment dans un air encore plus chaud, exacerbant ainsi le problème.

Des travaux de référence permettent de faire le point sur les spécificités du microclimat urbain [Oke 1987, Akbari et al. 1992, Mestayer et al. 1994]. L'urbanisation d'un paysage (routes, ponts, habitations) altère grandement les caractéristiques en eau, les sols et la végétation. En remplaçant la végétation et les sols par du béton et de l'asphalte, la capacité du paysage à abaisser les températures journalières par évapotranspiration et par ombrage est réduite. Dans les villes, la majeure partie de l'eau est collectée par le réseau de drainage vers les égouts et finalement vers les rivières et la mer, en restant sous forme liquide. Ainsi l'évaporation est fortement réduite dans l'atmosphère urbaine et la chaleur latente qui n'est pas puisée dans ce budget énergétique est une des causes principales de l'îlot de chaleur urbain. La réduction de la couverture végétale et la multiplication des murs verticaux augmentent la surface collectant le flux radiatif solaire. De plus, l'utilisation de matériaux de couleurs sombres pour les routes et les bâtiments, entraîne la création de villes qui absorbent l'énergie solaire incidente au lieu de la réfléchir. Ainsi, les régions urbaines ont souvent un coefficient de réflexion solaire (albédo) plus faible que celui des régions rurales.

Il faut ajouter à ces différences de caractéristiques de surfaces urbaines et rurales le gaspillage de chaleur évacuée par l'industrie, le commerce et la consommation énergétique résidentielle. Les activités humaines ont pris une telle dimension que la pollution de l'air se situe à tous les niveaux : du plus local (près de la source de pollution) jusqu'au niveau planétaire (effet de serre, trou dans la couche d'ozone). Au niveau intermédiaire, les grandes agglomérations, connaissent de graves problèmes de pollution atmosphérique du fait de la concentration des activités sur un territoire restreint. La pollution de l'air pose un grave problème de santé publique et a aussi des impacts négatifs sur la végétation et le patrimoine bâti.

2.4.1 L'îlot de chaleur urbain

Les recherches sur l'îlot de chaleur urbain arrive à une époque où le grand public se sent concerné par les conditions environnementales locales et globales. Pollution de l'air, de l'eau et possibilité de changement global du climat nous imposent de diminuer nos consommations énergétiques. Les températures estivales, dans les zones urbaines, sont généralement plus élevées de quelques degrés que celles des zones rurales environnantes. Ce phénomène est connu sous le nom d'« îlot de chaleur urbain » (Figure 13).

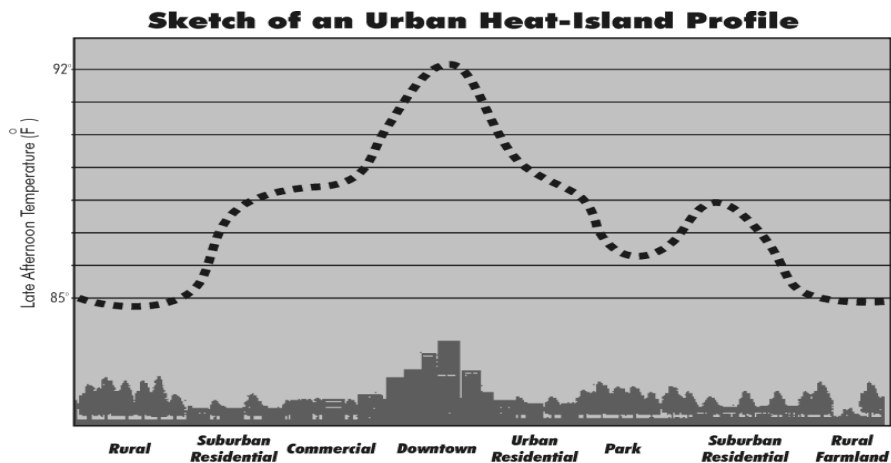


Figure 13: Ilot de chaleur urbain [Akbari *et al.* 1992]

Des comparaisons ont été réalisées entre des mesures à la station météorologique de référence localisée dans une zone suburbaine du sud d'Athènes et des relevées dans différentes rues du centre ville. L'intensité de l'îlot de chaleur au niveau du sol pendant la journée varie entre 10 et 14 °C et s'élève à 1°C pendant la nuit [Santamouris *et al.* 1999].

Les processus physiques ayant une action sur la génération de l'îlot de chaleur sont les suivants [Oke 1987, Mestayer *et al.* 1994, CSTB 1995b] :

- Accumulation de chaleur dans les constructions
- Altération du bilan d'eau (réduction de l'évapotranspiration due à la végétation et augmentation par rejets des activités industrielles)
- Altération du bilan radiatif, plus production de gaz à effet de serre
- Altération du cycle diurne des flux de chaleur sensible, par rayonnement et par conduction, notamment lors du refroidissement nocturne.
- Production de chaleur sensible anthropogénique (chauffage des bâtiments, voitures, industries)
- Réduction de la vitesse du vent (présence des bâtiments)
- Topographie locale et écoulements aérauliques locaux

Dans la canopée urbaine, zone comprise entre le sol et le niveau moyen des toits, les six causes d'augmentation de chaleur sont les suivantes [Mestayer *et al.* 1994, CSTB 1995b] :

- Augmentation de l'absorption du rayonnement solaire par les matériaux urbains (albédo faible)
- Augmentation des rayonnements GLO du ciel

- Augmentation du stockage de chaleur par les surfaces urbaines
- Diminution de la consommation de chaleur latente par réduction de la végétation et collecte des eaux
- Diminution de la réflexion du rayonnement solaire par effet de piégeage radiatif
- Sources anthropogéniques de chaleur et d'énergie

2.4.2 Chaleur urbaine et géométrie

Une ville compacte engendre un phénomène d'îlot de chaleur urbain, notamment la nuit. Le résultat pour plus de 30 villes de latitudes moyennes montre que l'intensité maximale de l'îlot de chaleur urbain (ΔT_{u-r}) est corrélée aux proportions des rues (rapport hauteur sur largeur) [Oke 1987] :

$$\Delta T_{u-r(\max)} = 7.54 + 3.97 \ln(H/W) \quad (32)$$

2.4.3 Température et population

A partir de données expérimentales (Figure 14), Oke (1973) propose l'expression suivante pour relier l'écart de température maximal entre le milieu urbain et le milieu rural à la population (P) et à la vitesse du vent mesurée hors de la ville à une station de référence à 10 m du sol (U) :

$$\Delta T_{u-r} = \frac{P^{0.27}}{4.04 U^{0.56}} \quad (33)$$

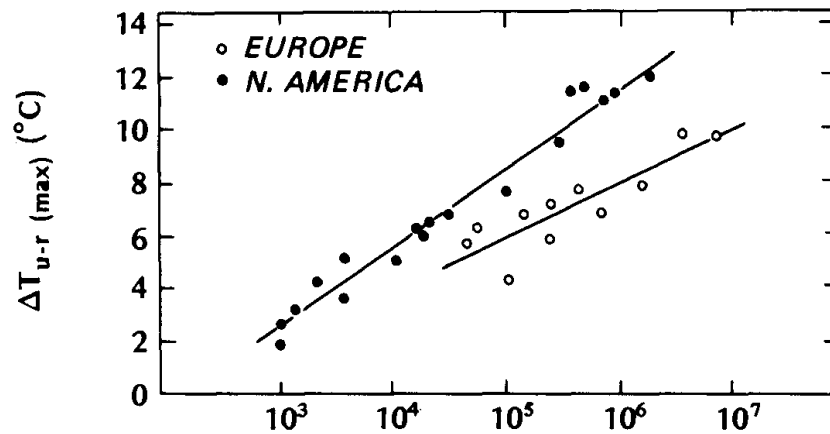


Figure 14 : Îlot de chaleur urbain maximal et population en Europe et Amérique du Nord [Oke 1987]

2.4.4 Urbanisation et précipitation

L'influence de l'urbanisation sur les précipitations est complexe et variable selon les caractères climatiques de la région. La teneur de l'air en vapeur d'eau est légèrement modifiée. L'humidité relative décroît. L'évolution des brouillards est variable selon les agglomérations ou les diverses parties de celle-ci. La transformation des précipitations dépend de la zone climatique, de la saison, du type de masse d'air. L'évaporation serait réduite [Escourrou 1991] de :

- 19 % quand 25 % de la surface est imperméabilisée ;
- 50 % quand il s'agit de 38 % de la surface ;
- 75 % pour 59 % de la surface.

2.5 Les outils de simulation appliqués à la microclimatologie urbaine

La modélisation numérique des différents transferts thermiques, en milieu urbain, peut être envisagée grâce à des logiciels de simulation. Nous allons présenter succinctement certains de ces outils en insistant sur leurs caractéristiques et sur les points qui peuvent être utiles à notre démarche.

2.5.1 Simulations d'ensoleillement et énergétique

TOWNSCOPE II est un outil d'aide à la décision lors de phases de conception urbaine, en mettant principalement en avant l'accessibilité solaire. Le logiciel développé par le laboratoire LEMA (Université de Liège, Belgique), est composé d'un système d'information urbaine tridimensionnel couplé à des outils d'évaluation solaire. Différentes projections sphériques ont été développées et possèdent des avantages spécifiques en terme de représentation et d'évaluation [Dupagne et al. 1998]. L'application la plus basique des projections sphériques est probablement la visualisation de la trajectoire solaire en un point précis. Le calcul des rayonnements direct, diffus et réfléchi est associé à des écoulements de vent et à des analyses de morphologie urbaine. Les interactions entre les espaces urbains ouverts et leur environnement bâti peuvent être analysées en considérant la végétation. A partir des différents rayonnements en un point, il est possible de résoudre l'équation de confort de Fanger, en fournissant des hypothèses réalistes sur la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse du vent, les caractéristiques des vêtements et l'activité métabolique. TOWSCOPE a été couplé avec un algorithme de confort, développé par l'université de Séville dans lequel les paramètres radiatifs en entrée sont estimés directement par le logiciel. En complément des analyses de confort, des indicateurs de qualité spatiale sont proposés (ouverture du ciel, longueur de vision). Enfin il est à signaler que ce logiciel a été appliqué lors d'études de cas et notamment pour le dimensionnement des protections solaires de l'exposition mondiale de Lisbonne (Figure 15) [Pirotte et al. 1994, Teller et al. 1999]

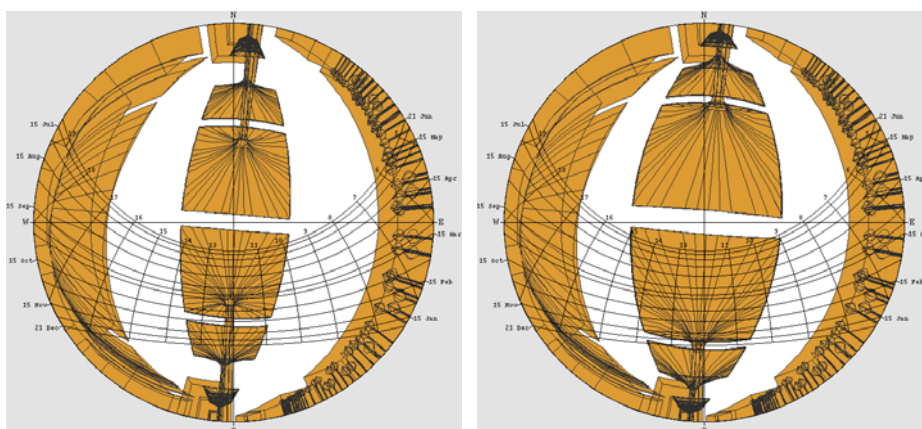


Figure 15: Etude de cas pour LISBOA '98 visualisation des trajectoires solaires pour deux géométries de protection solaire [Teller *et al.* 1999].

2.5.2 Simulations aérauliques

2.5.2.1 Les codes CFD (« Computational Fluid Dynamics »)

Les codes de simulation aéraulique sont nombreux et sont souvent adaptés par leurs utilisateurs suivant leurs besoins. De plus, les comparaisons entre les différents modèles ne sont pas régulièrement réalisées. Ainsi, il est délicat de comparer les différents outils de simulation aéraulique entre eux.

FLUENT est un code CFD qui a été utilisé dans une étude sur une rue de type canyon [Pignolet 1996]. Cet outil numérique traite tous les types d'écoulement couplés ou non à des transferts de chaleur. Sa méthode de discrétisation est celle des volumes finis. Les écoulements considérés peuvent être laminaires ou turbulents (modèle $k-\varepsilon$ standard ou RNG $k-\varepsilon$) et les transferts de chaleur peuvent être traités. Les domaines d'applications de FLUENT / UNS sont larges et principalement industriels (aérospatiale, turbomachines, automobiles, électronique, échangeurs de chaleur, canalisations, hydrologie, etc.).

MERCURE est une version dérivée du code ESTET développé par le Laboratoire National d'Hydraulique (EDF). C'est un modèle d'écoulement atmosphérique et de dispersion de polluants à petite échelle. Il permet de prendre en compte le relief, les bâtiments et les différents types de sol. Il résout les équations de la mécanique des fluides avec des paramétrisations spécifiques à l'atmosphère. Une méthode de discrétisation par différences finies et volumes finis est utilisée. Les données en entrée sont les valeurs météorologiques (vent, température, humidité en fonction de l'altitude : Météo France), un fichier d'altitudes du relief (IGN) et la position des bâtiments est à digitaliser. En sortie, les champs de vent, de température et d'humidité sont obtenus. Parmi les principales applications, on peut souligner des études d'épisodes de forte pollution sur la région parisienne (AZUR), une étude de réaménagement de la circulation d'un quartier (tunnel), une étude de pollution locale (ventilation d'un parking) et une étude d'un rejet accidentel en milieu urbain.

2.5.2.2 Les modèles zonaux

Les modèles zonaux sont parfois utilisés pour prédire le champ thermoconvectif à l'intérieur des bâtiments [Inard et al. 1997]. L'originalité de ces modèles réside dans le calcul des débits massiques d'air entre chacune des zones (découpage en n macrovolumes isothermes à géométrie parallélépipédique suivant les trois dimensions). Les zones à faible quantité de mouvement pour lesquelles les débits sont calculés à l'aide d'un champ de pression sont différenciées des zones motrices qui sont décrites avec des lois spécifiques d'écoulement appropriées. Toutes les zones sont couplées entre elles par des débits massiques d'air et, pour chaque zone, les bilans massique et thermique sont écrits. L'évaluation correcte des transferts de masse et de chaleur entre chacune des zones considérées constitue la difficulté majeure. Une application de cette méthode à l'espace urbain semble envisageable et très prometteuse.

2.5.3 Simulations thermo-aérauliques

2.5.3.1 Des modèles simplifiés

Le terme couplage thermo-aéraulique regroupe des niveaux différents de complexité. Parmi ceux qui reposent sur des hypothèses simplificatrices de modélisation des échanges convectifs, nous pouvons signaler les études suivantes :

Dans le cas d'une rue canyon, un modèle 2D est régulièrement retenu. La modélisation de l'écoulement aéraulique peut alors être basée sur l'observation de l'air ambiant, qui traversant l'axe d'un canyon symétrique, génère un vortex dans le canyon résultant des échanges de chaleur, de masse et de quantité de mouvement. Ainsi, deux sous modèles sont à considérer [Mills 1993] : un modèle semi-empirique pour l'écoulement de l'air [Nicholson 1975] et un modèle de bilan énergétique pour les surfaces du canyon.

La modélisation du comportement thermo-aéraulique d'une rue est considérée, dans le cadre d'un travail de thèse [Pignolet 1996], à partir de trois modèles simplifiés permettant d'évaluer les interactions entre les températures de surface et les température d'air dans la scène. Le premier modèle est inspiré de certains de Noilhan (1980) sur la réponse thermique de l'air au voisinage d'une paroi (les coefficients de diffusion turbulente sont introduits dans l'équation de la chaleur) et est étendu à un modèle 3D qui permet de calculer la température de l'air en tout point. Les hypothèses de travail sont les suivantes : vent quasiment nul, forte irradiation (turbulence d'origine thermique), air ambiant homogène, diathermane et barotrope. La température de l'air est calculée à partir d'une formule dans laquelle les coefficients de transfert turbulent de chaleur sensible sont fonction de la stabilité atmosphérique et sont définis de manière empirique. A l'interface fluide – solide, les conditions aux limites sont de type Fourier linéarisé et font intervenir le flux convectif entre la surface et le fluide. A l'interface fluide - fluide (faces latérales), une condition de flux nul est imposée. A l'interface fluide – fluide (face supérieure) : l'échange thermique entre l'air ambiant et l'air extérieur, considéré à la température météorologique, fait intervenir un coefficient d'échange qui est défini de manière empirique. Les deux autres modèles s'appuient sur la même méthodologie. La couche d'occupation assimilée à une couche limite de la taille d'un individu voit sa température augmenter par apport de chaleur convective. Deux régimes distincts de turbulence traduisent les cas avec et sans vent par l'intermédiaire d'un coefficient convectif adéquat. L'augmentation de température d'un volume d'air situé à proximité de la paroi est, à un instant donné, proportionnelle au flux convectif reçu, la valeur du coefficient d'échange étant fonction de l'écoulement. En effet, si on considère qu'il y a du vent, en régime de convection forcée ce coefficient ne dépend que de la vitesse de l'air à proximité de la paroi (modèle 2). Si par contre on considère qu'il n'y a pas de vent, en régime de convection naturelle le coefficient est fonction de l'écart de température entre la surface et le fluide, cet écart devant être déterminé de manière itérative (modèle 3).

Le logiciel « Canyon » [Alvarez et al. 2000] est un logiciel d'utilisation simple qui a été développé dans le cadre d'un projet européen du nom de « Greencode » (programme ALTENER – DG XVII) [Alvarez et al. 2000]. Il permet d'évaluer à différents niveaux d'interventions l'impact des paramètres de conception (distribution des espaces verts et des zones construites, influence de la géométrie et des matériaux, effet de l'emplacement des arbres et des bassins). La détermination des comportements thermo-aérauliques des rues passe par la résolution d'un bilan d'énergie pour chaque élément de la scène et intègre des calculs de transfert convectif de complexités différentes dont celui proposé dans [Nicholson 1975].

2.5.3.2 Les modèles associant un code CFD

Le modèle présenté dans [Arnfield et al. 1998] est composé de trois parties : un modèle aéraulique, un modèle de dispersion et un modèle de bilan énergétique des surfaces. Le modèle de vent est une implémentation d'un modèle k- ϵ . Il n'y a pas de contribution de la flottabilité au champ de vitesse, ce qui limite le modèle à des situations où la convection forcée domine. La dispersion est modélisée en 3D, avec une dispersion de la chaleur résultante de la diffusion turbulente et de l'advection. Le terme source représente les apports de chaleur des bâtiments et

du sol sous la forme d'un flux de chaleur sensible qui varie en fonction du temps. Les effets des nuages et les flux de chaleur latente ne sont pas considérés. Le rayonnement solaire direct et diffus et le rayonnement de grande longueur d'onde sont évalués dans la rue. Le flux conductif est déterminé à partir de la conductivité des matériaux et du gradient de température 1D. Pour le sol, la température de référence est maintenue constante à la valeur moyenne de la température de l'air sur la journée. Dans les bâtiments, on fixe une température interne. Le flux de chaleur sensible est calculé à partir de la différence entre la température de surface et celle de l'air au nœud le plus proche. Ce calcul fait appel au coefficient de diffusivité turbulente de chaleur qui est établi à partir de la diffusivité turbulente due au vent. Le bilan énergétique est alors calculé.

Un modèle de simulation de la surface urbaine [Vu Thanh Ca et al. 1998] permet la simulation des phénomènes d'échauffement au niveau de la surface urbaine et de l'influence sur le climat en intégrant simultanément l'équation de conduction de la chaleur, les équations de Reynolds moyennées sur un ensemble spatial et les équations de transfert de chaleur et de vapeur d'eau dans l'atmosphère. Un modèle de clôture de la turbulence du type $k-\epsilon$ est développé pour le calcul des champs de vent, de la température de l'air et du rapport de mélange dans la couche limite atmosphérique. Les principales équations du modèle, utilisant un système de coordonnées relatif au terrain et une technique de calcul moyen sur un ensemble spatial, sont l'équation de continuité, les deux équations de conservation de quantité de mouvement, l'équation d'énergie cinétique turbulente, l'équation du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente, l'équation de l'énergie et l'équation de transfert de vapeur d'eau dans l'air. Les températures de surface du sol, des murs et des toits sont calculées à partir de l'équation unidimensionnelle de conduction de la chaleur en prenant pour condition limite extérieure un bilan de rayonnement net, de chaleur sensible et latente. Les températures à l'intérieur des pièces ou dans le sol à une certaine profondeur sont considérées comme constantes. Le taux d'évaporation est calculé à partir du rapport de Bowen. Le taux de transpiration des plantes au niveau de la canopée est évalué par l'hypothèse d'un rapport de Bowen constant et d'une capacité calorifique nulle des feuilles des arbres. Pour le calcul des moments, les canopées des bâtiments et des arbres sont traitées comme des puits, en introduisant des forces de frottement évaluées à partir de la densité de surface des bâtiments, des feuilles et de la vitesse du vent dans la canopée.

Enfin, le modèle ENVI-met [Bruse et al. 1998] apparaît comme le plus complet. Il permet l'étude et la comparaison, à une échelle microclimatique, des surfaces artificielles (bâtiments) et de la végétation dans des rues, dans des cours ou dans des espaces verts. Ce modèle tridimensionnel résout les équations classiques en fonction du temps et simule les modifications « fortes » du vent (limites solides) comme celles dues aux murs et les modifications plus « faibles » (barrières poreuses) comme celles dues à la végétation. Il est composé d'un modèle atmosphérique (équations de Navier-Stokes en condition non-hydrostatique et incompressible, approximation de Boussinesq, modèle de clôture de turbulence d'ordre 1.5), d'un modèle de sol (température, humidité, eau), de surface (bâtiments) et de végétation. Toutes les équations différentielles sont calculées par la méthode des différences finies et sont résolues par un schéma implicite (« forward in time »). Les équations combinées d'advection diffusion sont résolues par une méthode implicite (ADI) en combinaison avec un système d'advection amont.

2.6 Conclusion

La microclimatologie urbaine est une science qui est relativement récente et qui est en plein essor à l'heure actuelle, à en juger par le nombre croissant d'articles dans les derniers congrès. Elle fait intervenir les différents éléments du bilan énergétique au niveau des surfaces de manière complexe car des phénomènes localisés apparaissent et les bilans doivent prendre de nombreux paramètres qui sont eux-mêmes en étroite relation les uns avec les autres. La

connaissance des transferts de chaleur sous les différentes formes possibles apporte la base nécessaire aux simulations. Nous nous appuyons sur ces échanges pour mettre au point les outils numériques qui intéressent notre recherche.

Des relations quantitatives existent entre la géométrie des villes et le microclimat. Elles sont potentiellement utiles à l'établissement de recommandations. Malheureusement, il existe moins de bases pour relier les caractéristiques du climat à des objectifs socio-économiques de confort ou de sécurité. Dans de nombreux cas, le choix des seuils est arbitraire ou largement subjectif. Il existe un besoin de raffiner ces éléments grâce à des recherches mais il y aura toujours un élément de jugement de valeur dans le choix des priorités et des limites acceptables pour une ville. Clairement, des lacunes au niveau des connaissances et des méthodes doivent être améliorées et de nombreuses spéculations doivent être vérifiées [Oke 1988].

Pour combler ces manques, on constate que les études réalisées en microclimatologie urbaine s'appuient de plus en plus sur des techniques de calcul numérique. Les modèles sont nombreux et possèdent chacun leurs spécificités. Certains n'envisagent que des problématiques d'ensoleillement et d'énergie, alors que d'autres sont spécialisés en aéraulique ; notons que des modèles de simulation thermo-aérauliques commencent à apparaître.

L'analyse des spécificités du microclimat urbain a révélé des phénomènes comme celui de l'îlot de chaleur urbain qui peut entraîner des nuisances aussi bien au niveau des consommations énergétiques, qu'au niveau des taux de pollution et des risques de santé publique induits.

Des concepts comme celui de développement durable sont de nos jours présentés comme solution. Cette notion s'appuie sur un certain nombre de principes dont le principe de solidarité entre les peuples et les générations, le principe de précaution, c'est-à-dire se donner la possibilité de revenir sur des actions quand on n'est pas sûr de leurs conséquences et le principe de participation, à savoir associer la population aux prises de décision. Des sommets, dont celui de Rio en 1992, mettent en avant la prise de conscience internationale des problèmes environnementaux planétaires tels que le réchauffement planétaire dû à l'effet de serre, trou dans la couche d'ozone, Les états et les organisations non gouvernementales ont adopté un plan d'action global pour assurer un développement durable à l'ensemble des communautés humaines: l'Agenda 21, aussi nommé Action 21. Ce texte, fixe les objectifs sociaux et économiques, présente les mesures de conservation et de gestion des ressources nécessaires, précise le rôle des principaux acteurs de la société et dans une dernière partie, décrit les principes de mise en œuvre. Cependant, depuis ces engagements les problèmes demeurent, voir même se sont amplifiés car ces déclarations ont rarement été suivies d'actions.

Cette première présentation rapide des éléments de base de la microclimatologie urbaine sera bien évidemment développée plus en profondeur dans les chapitres suivants grâce à des travaux sur ce domaine en relation avec l'impact de l'eau et de la végétation et en posant les principes de nos simulations thermo-aérauliques. Les spécificités en milieu urbain ont été largement commentées par différents auteurs et nous ont permis de mieux les appréhender.

2.7 Références bibliographiques

- [Akbari *et al.* 1992] AKBARI H., DAVIS S., DORSANO S. *et al.* (1992). Cooling our communities – a guidebook on tree planting and light colored surfacing. U.S. Environmental Protection Agency. Office of Policy Analysis, Climate Change Division. Berkeley : Lawrence Berkeley Laboratory, 217 p.

- [Alvarez *et al.* 2000] ALVAREZ S. *et al.* (2000). Greencode : Reglementary frame for renewable energy use in urban site through vegetation plannings ans strategic surfacing. ALTENER – DG XVII (in press)
- [Arnfield *et al.* 1998] Arnfield, J. *et al.* (1998). A numerical investigation of urban canyon energy budget variations. In : Proceedings of the second urban environment symposium and 13th conference on biometeorology and aerobiology, November 2 – 6. Albuquerque: American Meteorology Society, pp. 2 - 5.
- [ASHRAE 1993a] ASHRAE (1993a). Handbook of Fundamental. Atlanta : ASHRAE, 8.1-8.29.
- [Baker *et al.* 1999] BAKER, N. and RATTI, C (1999). Simplified urban climate models from medium-scale morphological parameters. 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].
- [Bottema 1992] BOTTEMA, M. (1992). Wind climate and urban geometry. Eindhoven: University of Technology, 212 p.
- [Bruse *et al.* 1998] BRUSE, M. and FLEER, H. (1998). Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. Environmental Modelling & Software, Vol 13, Issue 3-4, pp. 373-384.
- [CSTB 1995a] CSTB (1995). Climatologie générale. Nantes : CSTB, 50 p.
- [CSTB 1995b] CSTB (1995). Climatologie urbaine. Nantes : CSTB, 40 p.
- [Dupagne *et al.* 1998] DUPAGNE A. and TELLER J. (1998). Spherical projections as a communication instrument for morphological decision-making in urban design. In : Proceedings of the International workshop on Groupware for urban planning, Lyon, February 4-6.
- [Escourrou 1991] ESCOURROU, G. (1991). Le climat et la ville. Paris : Nathan, pp. 63-65.
- [Gandemer *et al.* 1976] GANDEMER, J. et GUYOT, A. (1976). Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti, Guide méthodologique et conseils pratiques. Paris : Ministère de l'Équipement, 130 p.
- [Gandemer *et al.* 1981] GANDEMER, J et GUYOT, A. (1981). La protection contre le vent. Paris : CSTB, 132 p.
- [Groleau *et al.* 1992a] GROLEAU, D. et MARENNE, C. (1992). Simulation numérique des l'enseillement dans les projets urbains. In : Séminaire inter chercheur RRIA – 1, RRIA – 2. Paris, 8 décembre 1992 et 28 janvier 1993, 13p.
- [Groleau *et al.* 1992b] GROLEAU, D. et MARENNE, C. (1992). Evaluation géométrique des facteurs de forme dans une scène avec prise en compte des masques et de l'enseillement. In : SFT, journée d'étude sur les méthodes de calcul des échanges radiatifs, Paris, 25 mars 1992, 14 p.
- [Groleau *et al.* 1995] GROLEAU, D. and MARENNE, C. (1995). Environmental specificities of the urban built forme. In : Proceedings of Rebuild – Rebuild the European city – Integration of renewable energies in established urban structures. Corfou, July 1995, 8 p.
- [Guyot 1996] GUYOT, G. (1996). Climatologie de l'environnement - De la plante aux écosystèmes. Paris : Masson, 505 p.

- [Hunter *et al.* 1992] HUNTER, L. J., JOHNSON, G. T. and WATSON, I. D (1992). An investigation of the three-dimensional characteristics of flow regimes within the urban canyon. *Atmospheric Environment*, vol 26b, n° 4, pp. 425 – 432.
- [Inard 1988] INARD, C. (1988). Contribution à l'étude du couplage thermique entre un émetteur de chauffage et un local. *Etudes expérimentales en chambre climatique*. Lyon : Thèse de l'INSA de Lyon, N° d'ordre 88 ISAL 0042, 449 p.
- [Inard et al. 1997] INARD C., DEPECKER P. et Roux J-J. (1997). Un modèle simplifié pour la prédiction du champ de température dans les bâtiments. *Revue Générale de Thermique*, n° 36, pp. 113-123.
- [Jayamaha *et al.* 1996] JAYAMAHA et al. (1996). Measurement of heat transfer coefficient for walls. *Building Environment*, vol 31, N°5, pp. 399-407.
- [Mazria 1981] MAZRIA, E. (1981). *Le guide de l'énergie solaire passive*. Ed Parenthèse, traduction BAZAN, P, illustrations BALL, R., 333 p.
- [Mestayer *et al.* 1994] MESTAYER, P. G. and ANQUETIN, S. (1994). Climatology of cities. In : *Diffusion and Transport of Polluants in Atmosphéric Mesoscale Flow Fields*. Atmospheric Sciences Library, Kluver Academic Publishers, pp. 165 - 189.
- [Miguet 1996] MIGUET F. (1996) *Eclaircements énergétiques et lumineux en milieu urbain*. Nantes, Rapport CERMA, 67 p.
- [Miguet *et al.* 1996] MIGUET F., GROLEAU D., MARENNE C. (1996). A combined sunlight and skylight tool for microclimatic analysis in urban architectures. In : *Proceedings of the 4th European conference on solar energy in architecture and urban planning*, Berlin, pp. 338-345.
- [Mills 1993] MILLS, G. M. (1993). Simulation of the energy budget of an urban canyon – I. Model structure and sensivity test. *Atmospheric Environment*, Vol. 27 B, n° 2, pp. 157-170.
- [Mills *et al.* 1993] MILLS, G. M. and ARNFIELD, J. A. (1993). Simulation of the energy budget of an urban canyon – II. Comparison of model results with measurements. *Atmospheric Environment*, Vol. 27 B, n° 2, pp. 171-181.
- [Monteith *et al.* 1991] MONTEITH J.L. and UNSWORTH M.H. (1991). *Principles of environmental physics*. New York : Edward Arnold, 291 p.
- [Musy *et al.* 1991] MUSY, A. et SOUTTER, M (1991). *La physique du sol*. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes. Collection Gérer l'environnement, 335 p.
- [Nicholson 1975] NICHOLSON S.E. (1975). A pollution model for street-level air. *Atmospheric Environment* 9, pp. 19-31.
- [Nunez *et al.* 1977] NUNEZ, M. and OKE, T.R (1977). The energy balance of an urban canyon. *Journal of Applied Météorologie*, Vol 16, n 1, January, pp. 11-19.
- [Oke 1987] OKE, T.R. (1987). *Boundary layer climates*. London and New York : Methuen, Second edition (first edition 1978), 435 p.
- [Oke 1988] OKE, T.R. (1988). Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Building*, 11, pp. 103-111.

- [Péneau 1991] PENEAU, J.P. (1991). Some problems relating to the numerical simulation of urban ambient environments. *Environment and Planning B: Planning and design*, 1991, volume 18, pp. 107-117.
- [Pénicaud 1978] PENICAUD, H. (1978). Microclimats urbains étudiés sous l'angle du confort à l'extérieur des bâtiments. Paris : Plan construction, RAUC.
- [Perrin de Brichambaut 1982] PERRIN de BRICHAMBAUT, Ch. et VAUGE, Ch. (1982). Le gisement solaire – Evaluation de la ressource énergétique. Paris : Lavoisier, Tec & Doc, 222 p.
- [Pignolet 1996] PIGNOLET - TARDAN, F. (1996). Milieu thermique et conception urbaine en climat tropical humide, modélisation thermo - aéralique globale. Thèse de l'INSA de Lyon, 246 p (+Annexes).
- [Pirotte *et al.* 1994] PIROTTE A. F., RENOTTE N. (1994). Etude d'insolation et effet d'ombre, Expo'98 Lisboa, Etude du vent, de l'ensoleillement et des ambiances urbaines. Liège : LEMA, Université de Liège.
- [Sacadura 1982] SACADURA, J. F. (1982). Initiation aux transferts thermiques. Paris : Technique et documentation, 445 p.
- [Santamouris *et al.* 1999] SANTAMOURIS M., PAPANIKOLAOU N., KORONAIIS I., *et al.* (1999). Thermal and air flow characteristics in a deep pedestrian canyon under hot weather conditions. *Atmospheric Environment*, vol 33, pp. 4503-4521.
- [Sini *et al.* 1996] SINI, J. F., ANQUETIN, S. and MESTAYER, P. G. (1996). Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons. *Atmospheric Environment*, vol 30, n° 5, pp. 2659 – 2677.
- [Siret 1997] SIRET D. (1997). Proposition pour une approche déclarative des ambiances dans le projet architectural. Application à l'ensoleillement. Thèse de doctorat de l'université de Nantes. Nantes : Université de Nantes, juin 1997, 323 p.
- [Teller *et al.* 1999] TELLER J., AZAR S., (1999), "TOWNSCOPE II - A computer system to support solar access decision-making", to be published in *Solar Energy Journal*.
- [Tiraoui 2000] TIRAOUI, L. (2000). Proposition pour une analyse radiative thermique des espaces urbains. Thèse de doctorat de l'Université de Nantes. Nantes : Université de Nantes, mai 2000, 326 p.
- [Vu Thanh Ca *et al.* 1998] VU THANH CA *et al.* (1998). A numerical model for the urban climate. In : *Proceedings of the second urban environment symposium and 13th conference on biometeorology and aerobiology*, November, 2 – 6. Albuquerque: American Meteorology Society, pp. 6 – 9.
- [WMO 1996] WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (1996). *Climate Urban Development*. Geneva : WMO, n° 844, 24 p.

3 L'eau et la végétation en milieu urbain

« Au Moyen Age, dans les pays islamiques, on déployait des efforts considérables pour rafraîchir l'air de la salle du trône ou des appartements du Sultan. On bâtissait des fontaines et des bassins pour rafraîchir l'air par évaporation. » [Heschong 1981]

« Jardins, parcs, squares, ensembles végétaux constituent des éléments essentiels de la qualité du cadre de vie en ville, encore faut-il qu'ils soient bien conçus et que les arbres qui en constituent l'armature essentielle soient bien disposés, bien choisis et bien plantés pour créer des volumes et des ambiances qui répondent aux aspirations des habitants. » [Cabanel 1993]

3.1 Introduction

Le thème des relations entre l'eau, la végétation et la ville est un sujet vaste et qui ne peut qu'être partiellement abordé dans le cadre de ce travail. Les dispositifs liés à l'eau et les aménagements végétaux sont largement présents en ville et ce sous de multiples formes. Les qualités et les dimensions symboliques associées aux arbres sont nombreuses et sont généralement soulignées par leur utilisation dans les projets urbains. Notre manière d'aborder le thème des interactions eau - végétation - ville envisage certes de rappeler ces différents points, mais vise avant tout à démontrer la capacité d'action régulatrice de ces deux éléments naturels du paysage urbain sur le microclimat. En se basant sur une analyse bibliographique des différents travaux menés dans ces différents champs d'investigation nous cherchons à faire ressortir les éléments utiles à la connaissance des différents phénomènes physiques mis en jeu, mais surtout nous essayons d'en extraire les informations nécessaires au développement des simulations. Ainsi, au fur et à mesure, des hypothèses de travail sont présentées et justifient, des choix dans les manières de considérer l'eau et la végétation suivant une approche globale de modélisation du comportement thermique.

3.2 L'eau et la végétation en tant qu'éléments urbains

3.2.1 L'eau et la ville

Dans les rapports entre l'architecture, l'urbanisme et l'eau, il est aisé de démontrer l'influence évidente de cet élément naturel dans notre environnement. Les stratégies des aménageurs pour la transporter ou la mettre en valeur dans la ville sont diverses. Le rôle de l'eau en ville est complexe. En effet, la nécessité vitale et hygiénique que représente les sources d'eau n'est appréciée que si le contrôle est total ce qui mène soit à une minéralisation de l'espace soit à une amplification des dimensions symboliques et à des aménagements spécifiques.

3.2.1.1 L'eau évitée

Dès les premiers traités d'urbanisme et notamment dans les ouvrages de Vitruve, la recherche d'un lieu sain est une constante. Les caractéristiques en termes d'humidité d'un site doivent

déterminer la qualité hygiénique de cet emplacement et les critères de sélection pour l'implantation des villes sont les suivants :

« En ce qui concerne les enceintes, voici les principes. D'abord le choix d'un lieu très sain. Celui-ci sera élevé, exempt de brumes et de gelées, exposé à une orientation ni chaude ni froide, mais tempérée ; ensuite on évitera un voisinage marécageux. En effet lorsque les brises matinales parviendront à la ville avec le soleil levant, que les brumes prendront naissance et se joindront à elles et que leur souffle répandra dans le corps des habitants les exhalaisons empoisonnées des bêtes des marais mêlées à la brume, elles rendront l'endroit malsain(...). Le refroidissement de l'humidité dans les vents et les brises produit également des dommages dans l'organisme. » [Vitruve (Fleury) 1990]

De la fin du 3^{ème} siècle au début du 5^{ème} siècle le monde romain est en crise. Les villes s'entourent d'une épaisse muraille et d'un large fossé, « première inscription du réseau hydrographique sur le sol ». Les réseaux intra-muros s'appuient sur la consolidation des cours d'eau existants, sur le drainage des marais ou sur l'utilisation du réseau « viaire romain déchaussé et alimenté par une dérivation de la rivière ». Les premiers égouts correspondent plus à une portion de cours d'eau [Guillermé 1983]. Le principe de drainage est un pas important dans l'assainissement des villes. Les fosses d'aisances, les chaussées, les égouts deviennent étanches. Pour veiller à la salubrité publique, les municipalités pavent ou bétonnent [Guillermé 1994]. L'eau quitte ainsi la ville. Les cours d'eau privés de leur rôle de voie de transport sont abandonnés puis comblés, recouverts de bitume et transformés en boulevard ou en parking. Cette mutation des zones humides en zones minérales perturbe les bilans hydrologiques des villes car l'assainissement, la canalisation des ruissellements et l'imperméabilisation des surfaces urbaines ne permettent plus le transfert de chaleur accumulée en perte par chaleur latente comme nous l'avons précédemment expliqué.

3.2.1.2 L'eau désirée

Nous venons de le voir, l'eau non contrôlée est exclue de nos villes. L'eau domestiquée, quant à elle est largement présente. En effet, elle est canalisée dans la ville par de nombreux dispositifs traités selon les circonstances de manière fonctionnelle, fantaisiste ou monumentale. De nombreux points d'eau tendent à disparaître (puits, lavoirs, pontons, moulins, etc.) alors que d'autres résistent ou réapparaissent (bassins ou fontaines).

Les moyens mis en œuvre pour transporter ou mettre en valeur l'eau ont considérablement évolué. Il est assez délicat de situer avec précision l'apparition des bassins dans la ville. Afin d'obtenir de l'eau, on s'est contenté le plus souvent de puits, de citernes ou de sources. Les premiers travaux de transport de l'eau de la source vers l'intérieur de l'enceinte paraissent remonter à 1900-1800 av. J.C, à Gezer en Palestine [Lavedan et al. 1966]. Le transport de l'eau étant résolu plus ou moins facilement suivant les différents moyens d'acheminement, qui s'opéraient uniquement grâce à l'effet de la pesanteur, le stockage et la mise en valeur de cette eau se sont diversifiés par la suite. Des innovations technologiques ont vu le jour, comme la possibilité d'ajouter de la pression à l'eau, le développement des aqueducs, l'utilisation de fontaines pour embellir les squares, et la mise au point d'une quantité de dispositifs ludiques comme les orgues d'eau. L'utilisation de l'eau s'est développée dans les villes et les établissements privés romains [Grimal 1990]. La mise au point au 16^{ème} siècle, de systèmes hydrauliques permet d'acheminer des quantités considérables nécessaires aux jeux et aux paysages d'eau dans les grands jardins de la Renaissance. Au 18^{ème} siècle, les paysagistes anglais qui comprennent que la nature, elle-même, produit une esthétique, anticipe l'intérêt écologique présent aujourd'hui. Construire des lacs et des bassins pour réintroduire l'eau en tant

qu'élément essentiel était une des composantes de cette approche environnementale. Ainsi se sont développés les parcs urbains pour amener la nature dans la ville [Larue 1996]. Enfin, nous pouvons rappeler que la dimension ludique associée à l'eau est un point qui est utilisé de nos jours dans certains aménagements urbains.

Au Moyen-Age les fontaines urbaines sont utilitaires, à l'époque classique s'ajoute la notion d'esthétique. Aujourd'hui, elles conservent cette dernière qualité. Même si elles se perdent un peu dans le flot de circulation permanent et bruyant, elles conservent la force de leur symbole, la fraîcheur en tout premier lieu [Equipe ARTOPOS 1997].

Il est également intéressant de remarquer que de nos jours, les stratégies de climatisation passive en extérieur développent des dispositifs favorisant l'évaporation de l'eau. Ainsi, les jets d'eau, les brumisateurs et les tours de refroidissement apportent des solutions au contrôle thermique d'espace, en situation climatique chaude. Ces dispositifs ont largement été employés durant l'Exposition Universelle de Séville en 1992 (Figure 16) [Alvarez et al. 1992] et pendant l'exposition mondiale de Lisbonne de 1998 (Figure 17).



Figure 16 : Bassin avec jets à Séville
[Alvarez *et al.* 1992]

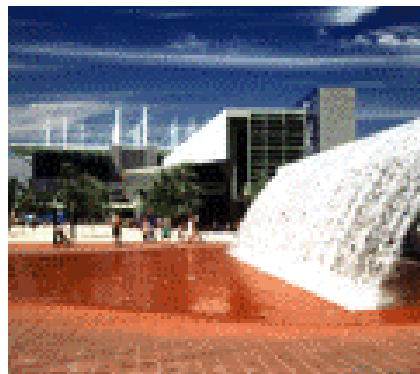


Figure 17 : Cascade et brumisateur
à Lisbonne

Ainsi, l'eau dans la ville est distribuée à la fois pour des besoins quotidiens mais également pour générer une atmosphère propre aux loisirs. L'aménagement d'un site peut passer alors par la mise en valeur de l'eau en l'associant à la compréhension de l'environnement architectural.

3.2.1.3 L'eau, élément indissociable de la végétation

Avant d'aborder le rôle de la végétation en ville il est intéressant de remarquer que l'association de l'eau et de la végétation semble indissociable ou tout du moins représente la meilleure complémentarité dans un environnement urbain minéral.

La représentation islamique du paradis inclut un jardin des plaisirs et des fontaines. L'eau se manifeste dans les fontaines, les cascades, les canaux, les bassins pour « rafraîchir, humidifier et pour atteindre des effets visuels dynamiques et tranquillisant » [Vian et al. 1983]. A ce titre, les jardins et les palais de Grenade nous offrent une quantité de site où le rôle de l'eau associée à une végétation abondante (Figure 18) est conséquent sur les ambiances perçues.



Figure 18 : L'Alhambra de Grenade

L'omniprésence de l'eau fait la célébrité de certaines villes comme celle d'Aix-en-Provence (station thermale depuis l'époque romaine, présence d'une fontaine d'eau chaude, alimentation de la ville par des aqueducs). Une étude réalisée sur cette ville [Equipe ARTOPOS 1997], souligne que dans les lieux particulièrement fréquentés par la population, le facteur principal d'attraction est la présence de végétal, l'eau jouant un rôle plus secondaire dans le choix de ces espaces. L'eau agit comme « un élément d'agrément visuel, auditif, comme symbole de fraîcheur, qui accentue l'impression de détente apportée par les arbres ».

3.2.2 La végétation et la ville

Parmi les points qui intéressent notre étude on peut souligner, tout d'abord, les dimensions symboliques et esthétiques. Puis, d'une manière assez générale, nous présentons les autres qualités de la végétation en contexte urbain. Ensuite, nous analysons les principes et les fonctions mis en œuvre en terme de composition de l'espace urbain. Des dispositifs urbanistiques font largement appel à la végétation comme nous le soulignons.

3.2.2.1 Dimensions symboliques et esthétiques

L'arbre a toujours été d'une grande richesse symbolique à travers les âges et les civilisations. C'est en effet, le symbole du cycle des saisons et donc de la vie, il évoque des concepts comme la liberté et la justice (Saint Louis rendait la justice sous un chêne) [Larue 1996]. L'arbre est donc un élément de référence et un symbole historique.

Les variations de couleurs, de formes, de textures et de densités sont autant d'éléments qui enrichissent le cadre de vie urbain et renvoient aux notions de paysage et de nature (Figure 19). En effet, la palette de couleurs apportée aussi bien par les différentes essences d'arbres que par les nombreuses variétés de fleurs, égaye le quotidien et s'oppose ainsi aux surfaces grises et ternes des parois minérales ou métalliques.

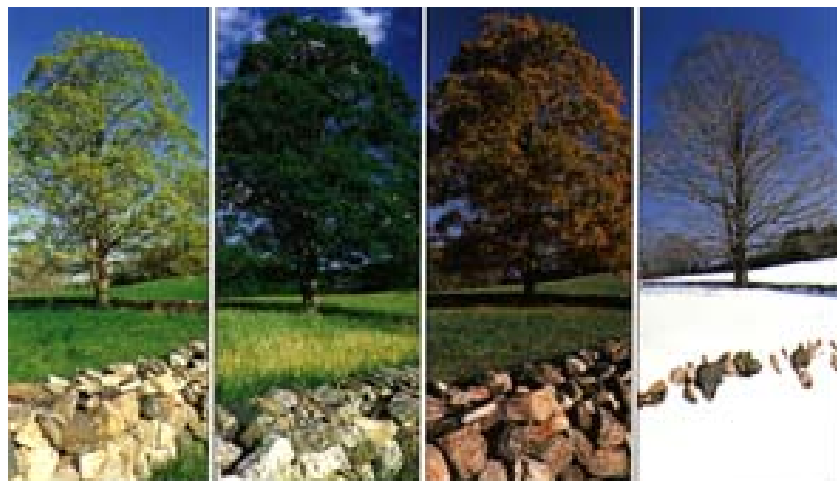


Figure 19 : Un arbre à différentes saisons (carte postale)

La diversité des formes permet de sculpter l'espace urbain. Nous allons insister sur ce point dans le paragraphe sur le rôle des arbres dans le projet urbain. La densité de la masse foliaire intéresse plutôt la notion de transparence vis-à-vis de la lumière.

Ainsi, une masse végétale joue un rôle psychologique ou esthétique en cachant les éléments désagréables, en mettant en valeur la lumière, en créant des jeux d'ombre et en assurant des transitions entre différentes zones. Les qualités esthétiques des végétaux dépassent alors leur simple fonction d'enjoliveur ou de cache-misère car la dynamique induite par ce jeu est teintée de références aussi bien à la nature qu'au temps par leur évolution formelle et chromatique à travers les saisons.

3.2.2.2 Qualités associées à la végétation

Les modalités d'intervention de la végétation sur le milieu urbain sont nombreuses et font appel à une analyse multi-sensorielle. Les dimensions esthétiques et les qualités visuelles ont déjà été abordées dans le paragraphe précédent.

L'impact acoustique est parfois mentionné à travers une atténuation de certaines fréquences du spectre sonore [Robinette 1972] mais reste sujet de controverse [De Sablet 1988]. Le jeu du vent à travers les feuillages via le son est un élément intéressant à retenir : en été un bruissement de feuilles nous avertit qu'un courant d'air peut nous rafraîchir et est donc ressenti comme agréable, alors qu'en hiver le sifflement du vent dans les branches nous alerte de conditions météorologiques défavorables.

La dimension sensorielle aborde également le domaine des odeurs par la qualité olfactive des différentes essences, dont certaines ont le pouvoir d'évoquer un souvenir lié à une période de l'année ou à une région.

Le sens tactile n'est certes pas très développé dans nos sociétés, cependant cette dimension peut être mise en œuvre par le jeu sur les textures des différents végétaux et est donc un point que l'on se doit de signaler.

En terme de protection face à des nuisances, les intérêts de la végétation sont nombreux : réduction de la pollution atmosphérique et amélioration de la qualité de l'air par fixation de certaines poussières, diminution de l'effet de ruissellement par interception des pluies,

protection contre l'érosion due aux vents et à l'eau, affaiblissement de la présence de rosée et de gelée, suppression des éblouissements par effet de filtre ou d'écran, etc.

Cependant, la capacité d'adaptabilité des espèces végétales est à prendre en compte car les nuisances précédemment citées sont autant de problèmes pour les différentes essences. En effet, les arbres doivent présenter des caractéristiques essentielles à leur survie (faculté à tolérer plusieurs stress, à résister aux maladies du sol et de l'air, à la pollution, à l'ombre des bâtiments, etc.). Il est important également de choisir des espèces dont le bois n'est pas cassant et dont les racines ne peuvent pas détériorer les trottoirs et les canalisations.

Bien évidemment nous ne pouvons pas nous attarder sur chacun de ces points, tant la largeur du champ d'investigation nous éloignerait de notre recherche sur l'impact énergétique et nécessiterait un investissement dans de nombreux domaines. Cependant des éléments de réponse sont avancés dans des ouvrages généraux [Robinette 1972, Izard 1979, Muret 1987, Givoni 1991, Maillet et al. 1993] mais doivent être étudiés de manière précise et renvoient donc à la littérature scientifique spécialisée.

3.2.2.3 Dimensions structurelles et composition urbaine

La qualité architecturale et paysagère de la ville peut être reliée à la disposition de ses arbres. Parmi les différentes fonctions structurantes des arbres, on peut retenir que ceux-ci apportent le volume et la verticalité complémentaire à l'horizontalité des voies. En effet, les végétaux, même sans feuilles peuvent constituer des volumes comparables aux structures architecturales [Stefulesco 1993]. Dans le paysage urbain, une grande variété d'arbre existe.

Une classification basée sur leur forme n'est pas évidente mais nous présentons ici celle proposée par Larue qui distingue neuf types de forme (Figure 20 [Larue 1996]) :



Port conique, pyramidal
• thuya géant
• épicéa



Port boule, sphérique
• érable boule
• robinier boule
• catalpa



Port colonnaire

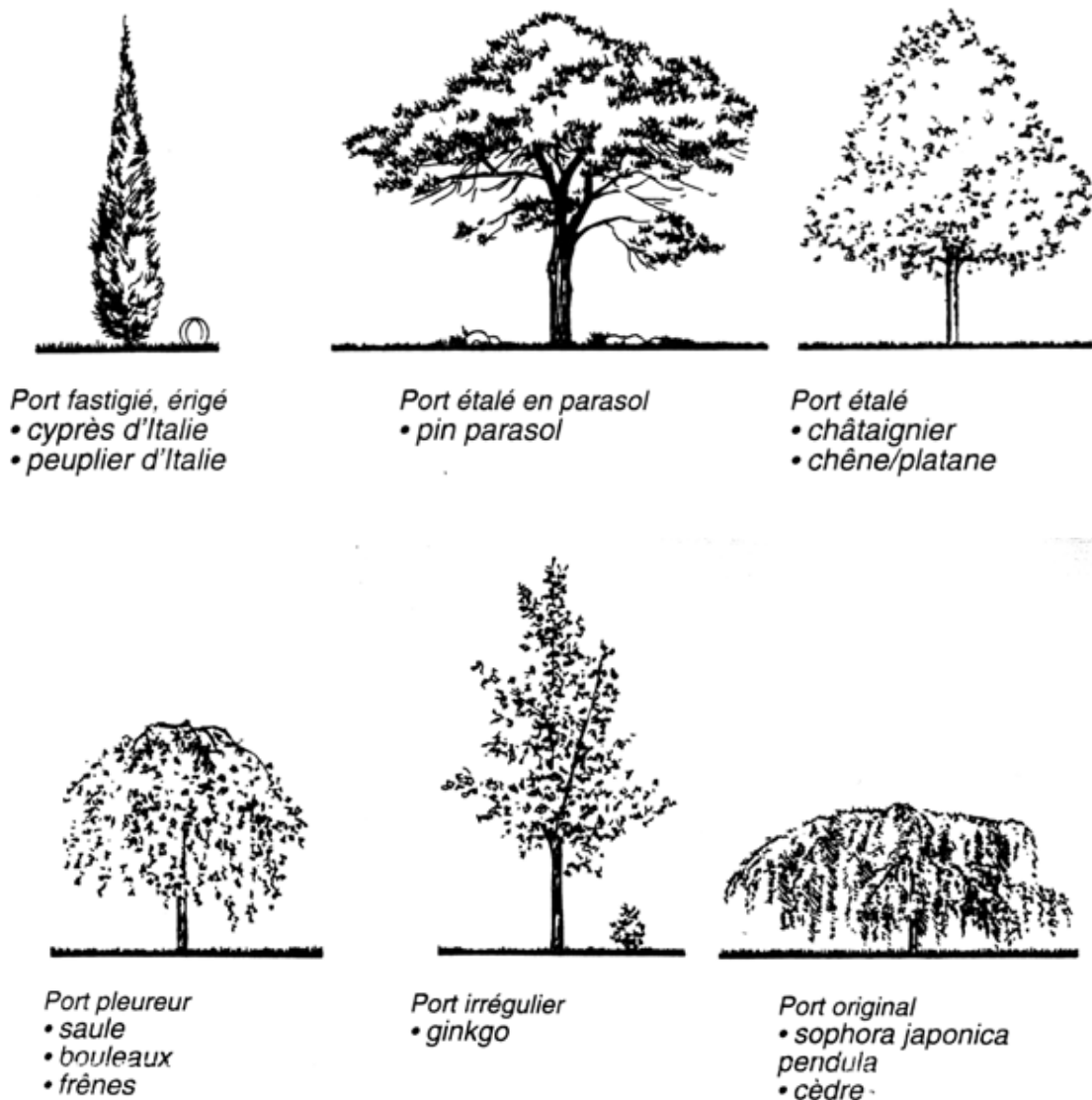


Figure 20 : Ports d'arbre en ville [Larue 1996]

Les dimensions des arbres sont des paramètres important à contrôler aussi bien en tant qu'impact sur l'occupation d'espace que sur l'ombre générée par ceux-ci. Il est nécessaire de prendre en considération ce point lorsque l'on souhaite intégrer des arbres en espace urbain. Nous avons représenté à l'échelle (une flèche vaut 5 mètres) neuf arbres parmi les plus communs en indiquant les hauteurs maximales du tronc et l'arbre en entier à taille adulte (Figure 21). Les dessins indiquent de plus l'image de l'arbre en été et en hiver [Coombes 1993]. A partir de ces indications dimensionnelles, le profil des arbres peut être plus ou moins précisément tracé dans les logiciels de simulation ayant une interface graphique.

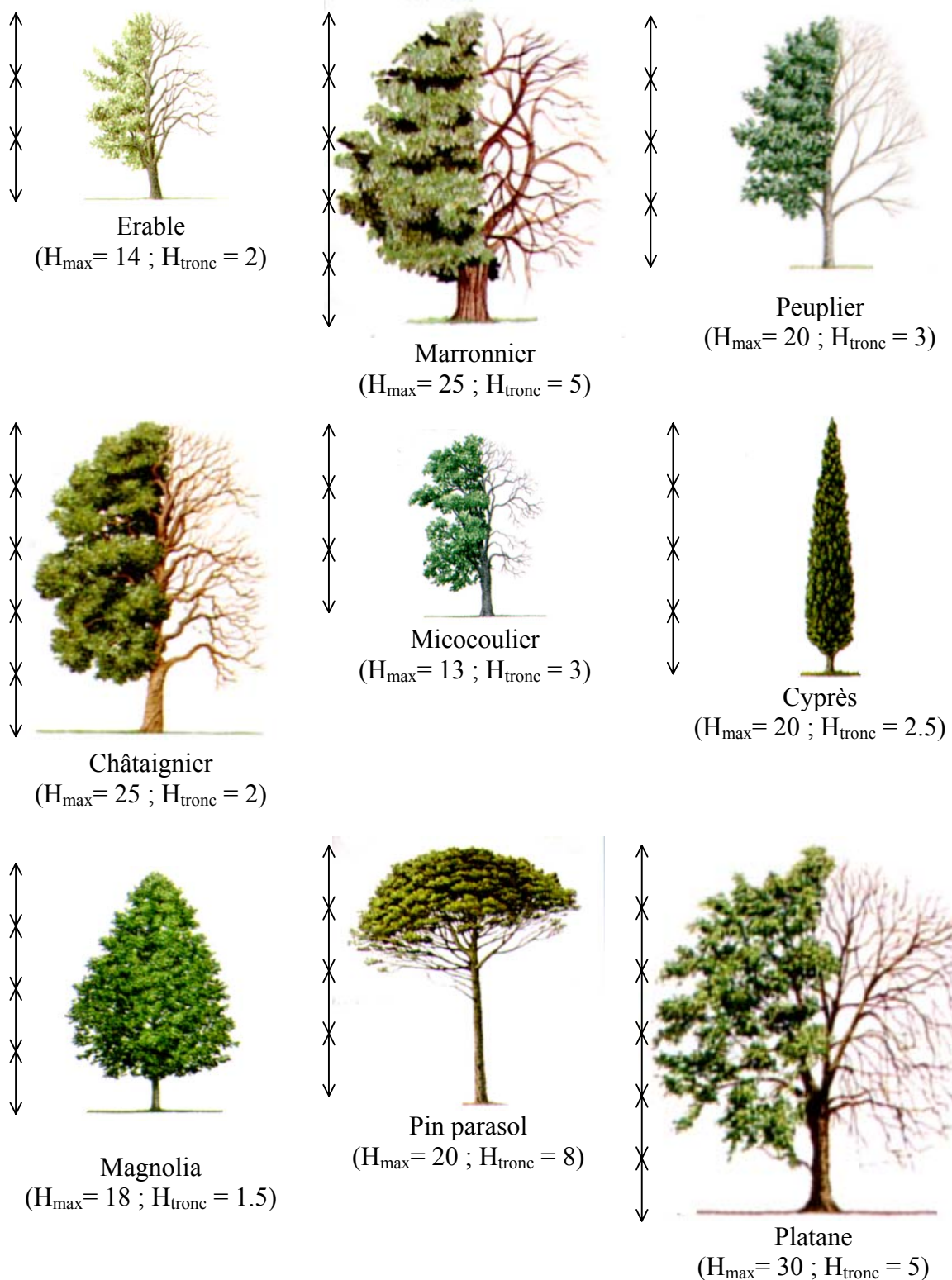


Figure 21 : Dimensions de neuf arbres communs

Le groupement et la composition des arbres entre eux ont parfois pour fonction de créer des effets spatiaux (Figure 22 et Figure 23). Ils sont fédérateurs et donnent une unité ou un caractère particulier à l'ensemble d'un quartier. Ainsi, à l'échelle urbaine, il peut y avoir continuité entre le végétal et le bâti dans la composition d'ensemble. Ils sont des outils d'aménagement précieux car ils sont susceptibles d'entraîner la création d'espaces, la réduction d'échelle entre

espaces plats et volumes imposants, une division de l'espace en sous-espaces, des séparations et des repérages [De Sablet 1988, Stefulesco 1993].

La protection des espaces privés, du moins à un niveau visuel, est assurée parfois par des buissons, des haies ou tout autre système de barrières végétales. A l'opposé, la disposition d'écrans végétaux peut révéler des vues et des panoramas. Ainsi, la végétation sert de guide visuel et induit des phénomènes de masquage, de filtrage, de perspective, de perception modifiée. Elle met en valeur les symboles ou des éléments du décor, elle sert d'articulation, d'indicateur et elle peut moduler l'échelle de perception [Robinette 1972].

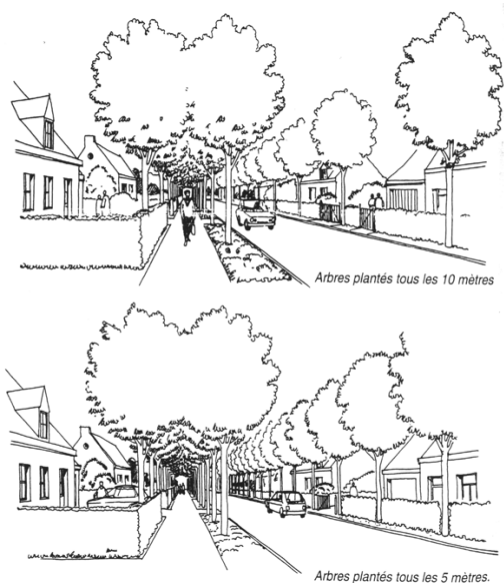


Figure 22 : Modification de l'espace grâce à l'espacement entre les arbres [Larue 1996]

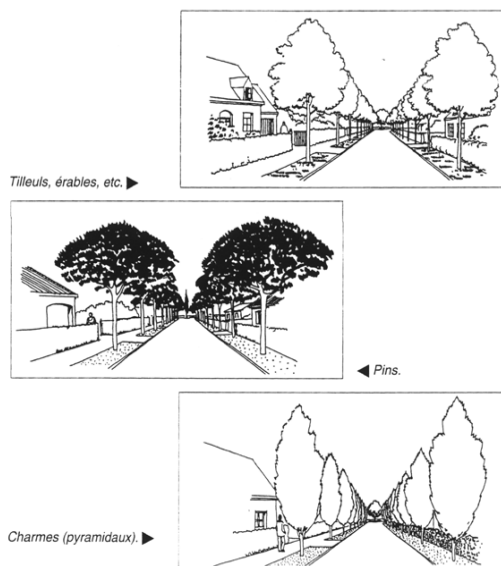


Figure 23 : Modification de l'espace grâce à la forme des arbres [Larue 1996]

Le vocabulaire décrivant certaines propriétés des arbres urbains se rapporte parfois à celui de l'architecture et de l'urbanisme. Afin d'illustrer cette assertion, nous allons nous appuyer sur les citations suivantes :

« Les végétaux, même défoliés, constituent des volumes comparables aux structures architecturales ... Les frondaisons constituent des voûtes qui définissent des espaces intérieurs aux caractéristiques parfois très architecturales ... Les limites et trames végétales participent à la structure de l'espace urbain. Elles peuvent introduire une continuité, souligner un ordonnancement bâti, relier des volumes disparates ou structurer des espaces désorganisés. Elles confrontent et précisent les trames urbaines ... L'environnement végétal qui accompagne presque toujours l'architecture assure la transition avec son environnement. Lorsque le bâtiment et son décor immédiat ont un caractère précieux, la végétation constitue un écrin ... Un arbre ou un ensemble végétal, remarquables par leur taille, leur architecture, leur floraison contribuent à l'orientation et au repérage ... La végétation grimpante ou suspendue transforme sensiblement l'apparence des constructions surtout si les conditions nécessaires à leur croissance ont été intégrées au parti architectural. » [Stefulesco 1993]

Les fonctions et les exemples d'utilisation pourraient donner lieu à des discussions plus approfondies et mériteraient certainement plus d'attention mais nous allons maintenant nous pencher sur le rôle concret des arbres dans une démarche de projet urbain.

3.2.2.4 L'utilisation des arbres dans le projet

« Et si c'était le végétal qui ordonnait l'urbanisation ? Et si c'était le jardin qui générerait la ville, qui lui permettait de fonctionner ? ... Planter un arbre est un geste aux conséquences importantes... Dans la ville, les dispositions végétales résultent non pas du hasard, mais d'une véritable culture urbaine... Le végétal est une composante de l'art urbain ou, si l'on préfère, de l'urbanisme entendu dans son sens initial. » [Stefulesco 1993]

L'agencement des arbres donne lieu à de multiples possibilités, de l'arbre isolé au centre d'une place, à l'allée plantée en alignement le long des boulevards. Les spécificités induites par l'arbre unique font appel à des notions précédemment présentées comme celle de monument, de voûte et de repère. En général, il domine un lieu par ses dimensions exceptionnelles et délimite un espace privilégié [Stefulesco 1993]. Avant le développement au cours du 19^e siècle des premières promenades plantées (mails et cours fermées), les arbres sont rares dans les villes aux rues très étroites. Le développement important des arbres date du milieu du 19^e siècle. Haussmann double le nombre d'arbres d'alignement sous son administration [Malverti *et al.* 1994]. L'arbre devient un élément permettant de structurer les nouvelles voies de plus de 20 m, jusque-là très rares dans la ville. C'est un élément d'embellissement qui permet de hiérarchiser les différentes voies de la ville. Les arbres d'alignement doivent posséder certaines qualités d'ordre esthétique bien évidemment, mais c'est surtout à travers la notion d'homogénéité que l'on doit considérer ce type de plantation.

La majorité des gens attachent de l'importance aux alignements composés d'individus de grande taille. La qualification de marqueur d'espace est fréquemment utilisée pour des arbres situés sur les places ou au niveau des entrées des villes, moins souvent pour les plantations de voirie, qui sont néanmoins considérées comme des éléments structurants de la ville et permettant de se repérer. Les alignements sont d'autant plus appréciés et remarquables qu'ils participent à la qualité sociale d'un espace de vie (mail ombragé, aire de jeux, place du marché ...) et qu'ils se situent près du lieu d'habitation de la personne [Haddad 1997].

Pour l'urbaniste, l'architecte ou le paysagiste, le choix du type de végétal et la disposition de celui-ci se justifie par les qualités précédemment décrites. Parmi les configurations et les agencements les plus caractéristiques nous pouvons citer les plantations d'arbres, le long des avenues et des boulevards, suivant un modèle de grille et surtout suivant une structure en alignement. Chaque élément de l'espace urbain peut donner lieu à un aménagement végétal plus ou moins sophistiqué. Une fois de plus, nous nous appuyons sur l'ouvrage de référence dans ce domaine [Stefulesco 1993] en synthétisant les principaux éléments (Tableau 6).

Dispositifs urbains	Type ou caractéristique	Végétation
Places	Anciennes (dans ensembles médiévaux)	Peu ou pas plantées Arbres monumentaux
	Classiques	Dépourvues de végétation à l'origine puis plantées
	A ordonnancement végétal	Plantation en trame régulière
	Places-jardins Squares	Ambiance de nature, lieux de dépaysement et de tranquillité
Rues	Voies de circulation d'une largeur inférieure à 20 m	Plantation latérale (espace privé). Végétation d'emprunt. Traitement des clôtures, haies
Ruelles, cours, sentes	Réseaux d'accès aux quartiers de faible densité	Végétation plus ou moins décidée, pergolas, plantes décoratives
Ceintures vertes	Promenades associées aux enceintes	Lignes d'arbres
Boulevards	Voies de circulation qui entourent partiellement la ville, le quartier	Plantation sur les trottoirs et les terre-pleins
Déviations	Voies de contournement	Mise en valeur du paysage, des points de vue, des ronds-points
Allées	Espaces de cheminement linéaire	Lignes d'arbres
Cours	Espaces de forme rectangulaire, orientés vers un point de vue remarquable	Ordonnancement végétal et architecturé planté sur sa longueur de lignes d'arbres
Avenues	Rues conduisant à une ville ou à un lieu prestigieux	Plantation de 25 à 30 m de hauteur, symétrie longitudinale
Quais, rives,	Espaces à proximité de l'eau (rivière, fleuve, lac, océan)	Plantation d'alignement Arbres isolés ou bosquet
Esplanades	Compositions monumentales liées à un paysage exceptionnel	La végétation a un rôle d'accompagnement en cadrant la vue
Jardins	Classiques	Plantation régulière, symétrique
	Pittoresques	Rappel de la nature et de la campagne
Espaces verts	Formes d'occupations du sol qui s'accompagnent de présence végétale	Surfaces plantées, espaces libres, ambiances végétales isolées de la circulation et de la ville, terre-pleins engazonnés, aires de jeux

Tableau 6 : Relations urbanisme-végétation (d'après [Stefulesco 1993])

La nature du tissu urbain est importante. En effet, en milieu fortement urbanisé, l'arbre des rues représente l'essentiel du patrimoine végétal et prend un caractère symbolique important, alors que dans les zones pavillonnaires, où il existe une végétation privée, l'attachement aux arbres « publics » est moindre, même si globalement la population porte un intérêt plus soutenu à la présence végétale. Le projet végétal est élaboré par les urbanistes et les paysagers, en fonction de la relation de la ville ou du quartier avec son site, de ses composantes écologiques et culturelles. De plus, le maire est responsable de la présence ou non d'arbres sur le territoire public de sa commune, il peut aussi protéger certains arbres du domaine privé. Il contrôle le budget attribué aux espaces verts et arbitre toute décision. Enfin, parmi les acteurs des projets urbains on peut distinguer deux catégories : l'une relativement favorable aux arbres (paysagistes, service environnement et urbanisme), l'autre dont les intérêts sont plus proches des concessionnaires (service voirie, propreté, architecture, éclairage public, assainissement) [Haddad 1997].

D'un point de vue plus architectural, la liste des différents aménagements envisageables nécessiterait un ouvrage entier, mais nous pouvons néanmoins souligner certains points qui nous intéressent de par leurs conséquences sur les ambiances. En reprenant une classification [Guyot 1988], dans laquelle les variétés d'arbres correspondantes sont mentionnées, on peut noter à nouveau l'intérêt des plantations en alignement (avec possibilité de captation du soleil d'hiver et de protection du soleil d'été). Les plantes tapissantes ont l'avantage de permettre une rétention des terres lors d'inondations. Une exposition ouest - nord assure un effet brise-vent alors qu'une exposition sud apporte une protection solaire d'été. Une isolation thermique en hiver et en été est favorisée par une plantation sur les façades ouest à nord. Le captage solaire d'hiver et la protection solaire d'été peuvent être ajustés par des plantations devant des espaces vitrés. Enfin, les terrasses et pergolas, par la mise en place de plantes grimpantes, assurent le captage solaire d'hiver et la protection solaire d'été.

3.3 L'eau et la végétation en tant qu'éléments de régulation du microclimat

3.3.1 L'eau comme solution microclimatique

Comme nous l'avons déjà souligné, l'eau est présente dans la ville sous de nombreuses formes et est mise en valeur selon différentes modalités. Laissons momentanément de côté l'aspect joyeux ou calme, rassembleur ou dépaysant, parfois magique des situations ressenties à proximité d'une zone d'eau et attachons-nous à comprendre l'aspect rafraîchissant. Pour ce faire, nous allons dans cette partie analyser les bilans thermiques qui s'appliquent à une zone humide et nous allons préciser en quoi ces dispositifs peuvent être utiles en climat chaud à des fins de régulation microclimatique.

Avant d'aller plus avant, nous pouvons rappeler que le rafraîchissement par évaporation est connu et a été largement utilisé de par le passé. Déjà sous l'empire romain, ce principe de climatisation devait être mis en œuvre, en été, à Nîmes, [Berger 1998]. Plus récemment, on arrosait les principales rues de Paris et boulevards deux fois par jour en temps caniculaire, à raison de 2 l/m², de manière à donner « une humidité printanière » aux chaussées et trottoirs et ce, jusqu'à cinq fois par jour sur les Champs-Élysées pour « ajouter un supplément de fraîcheur à l'avenue la plus fréquentée du monde » [Guillerme 1994].

3.3.1.1 Impact d'une grande étendue d'eau

La présence d'une rivière, d'un fleuve ou d'un océan peut modifier considérablement certaines des composantes du climat local. Ainsi, l'existence d'un éventuel microclimat due à la présence du Tage a été étudiée numériquement. Un potentiel microclimatique favorable est constaté, il est maximal jusqu'à 100 m de la berge de cette rivière, et correspond à un abaissement de la température de l'air de 6 à 7 °C (à une hauteur de 1.75 m) et s'étend de manière atténuée sur plusieurs centaines de mètre [Fernandes et al. 1998].

3.3.1.2 Transferts de chaleur et diffusion dans le cas d'un bassin

Revenons maintenant au cas du bassin. Nous allons étudier les différents phénomènes liés à l'évaporation et expliquer les relations entre certains termes du bilan énergétique comme les apports solaires, les pertes par chaleur latente et par chaleur sensible. Nous pouvons considérer un bassin comme un système soumis à des sollicitations extérieures (soleil, vent) et cherchant à équilibrer ces actions (changement de température, évaporation). Un schéma simplifié permet de représenter les principaux phénomènes (Figure 24).

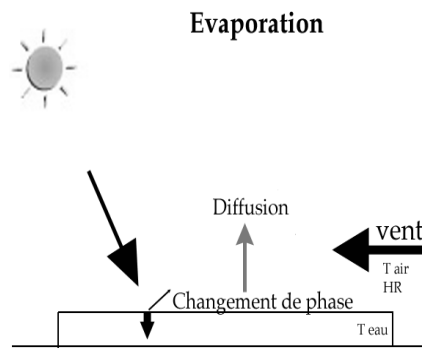


Figure 24 : Transferts thermiques d'un bassin

Les apports énergétiques solaires, qui, en été, peuvent atteindre des valeurs élevées et qui arrivent sur la surface de l'eau sont faiblement réfléchis puisque le coefficient de réflexion n'est que de 3 % pour les heures de rayonnement solaire maximal [Alvarez et al. 1989]. La fraction importante d'énergie qui va être absorbée pourrait entraîner une augmentation de la température de l'eau mais nous allons essayer d'expliquer pourquoi il n'en est rien. En effet, un processus simultané de transfert de chaleur et de masse se produit. Le phénomène de diffusion de la vapeur d'eau entre la surface du bassin et l'air peut apparaître si la concentration de vapeur d'eau dans l'air est initialement faible (le phénomène de transition de la phase liquide à la phase gazeuse est plus intense que l'inverse). Ainsi, la concentration de la vapeur augmente, de sorte que les deux phénomènes tendent à s'équilibrer. Lorsque cet équilibre est atteint, l'air est saturé de vapeur d'eau. La pression de vapeur d'une eau pure à pression atmosphérique est dite pression de vapeur saturante et est égale à la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air.

Cette diffusion qui entraîne un changement de phase de l'eau liquide en vapeur d'eau à l'interface eau-air est le moteur qui permet de remplacer la vapeur d'eau qui est assimilée par l'air. Ce changement de phase nécessite une importante quantité d'énergie, c'est la chaleur latente de vaporisation. Il faut 2450 kJ pour évaporer 1 kg d'eau, soit une épaisseur de 1 mm sur une surface de 1 m². Ainsi, lors de l'évaporation d'une zone d'eau une grande partie des apports énergétiques solaires est perdue sous forme de chaleur latente. C'est pourquoi la température de l'eau est alors inférieure à celle de l'air durant la journée.

Ce décalage entre les deux températures est atténué par un transfert que l'on qualifie de chaleur sensible entre l'air chaud et l'eau froide. Il est fonction de l'écart de température et de la vitesse de l'écoulement. Ces deux phénomènes ont un effet opposé. Le résultat est une température d'équilibre. En résumé, dans un premier temps, le processus d'évaporation refroidit l'eau et dans un second temps, l'eau refroidit l'air.

Dans la littérature, des expressions permettent de quantifier les différents transferts en jeu. Pour un fluide au repos, de température uniforme, si la concentration des constituants n'est pas uniforme, il se produit un mouvement de ces constituants, dû à l'agitation moléculaire tendant à atténuer les différences de concentration. Ce mouvement est décrit par la loi de Fick, dans laquelle intervient le coefficient de diffusion moléculaire qui peut être évalué par la relation de Schirmer. Ainsi, à 35°C et à la pression atmosphérique il est égal à $2,81 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ [Sacadura 1982].

Le fait que la surface de notre bassin soit à une température plus faible que celle d'un sol exposé au même rayonnement solaire nous intéresse car les rayonnements de grande longueur d'onde émis par ces deux éléments sont sensiblement différents. Ainsi, non seulement l'eau renvoie

moins de rayonnement solaire (coefficient de réflexion bas), mais en plus elle émet un rayonnement thermique (de grande longueur d'onde) plus faible car elle est plus froide.

Dans la réalité, les situations apparaissent complexes car les phénomènes convectifs, radiatifs et diffusifs ne peuvent être envisagés de manière séparée. Certains cas bien précis nécessitent une appréhension globale des processus physiques qui n'est possible que par la simulation.

3.3.1.3 Modélisation d'un bassin

Un modèle dynamique a été développé pour analyser les performances thermiques d'un bassin d'eau soumis à différentes conditions atmosphériques [Guerra et al. 1996]. Dans le cas d'un bassin de faible profondeur (approximativement 1 m), on peut considérer que l'eau est à une température moyenne qui ne dépend alors que du temps. Cette température est calculée à partir d'un bilan global pour le bassin par unité de surface :

$$\frac{\rho c_p V}{S} \frac{dT}{dt} = \varphi_{sol} - \varphi_{GLO} - \varphi_{evap} - \varphi_{conv} - \varphi_{spay} + \varphi_{apport} - \varphi_{cond} \quad (34)$$

L'absorption du rayonnement solaire Φ_{sol} s'opère de manière sélective et diffuse. De nombreux facteurs affectent l'atténuation du rayonnement solaire dans le bassin : distribution spectrale des propriétés optiques de l'eau, rayonnement direct, diffus, angle d'incidence du rayon direct, épaisseur de la couche d'eau, coefficient de réflexion du sol et du bassin.

Le flux de chaleur par rayonnement infrarouge Φ_{GLO} entre le bassin et le ciel à une température T_{ciel} , par unité de surface du bassin s'écrit :

$$\varphi_{GLO} = \sigma \cdot \varepsilon_w \cdot (T^4 - T_{ciel}^4) \quad (35)$$

Le coefficient d'émission du bassin ε_w a été fixé à 0.95. Les températures sont ici exprimées en degré Kelvin et en degré Celsius dans la suite. Dans ce cas, le ciel est considéré comme un corps noir et le bassin ne voit pas d'autre surface.

Le flux de chaleur convectif entre la surface du bassin assimilé à une plaque plane et l'air fait appel à un coefficient de transfert qui peut être obtenu grâce à des corrélations :

$$\varphi_{conv} = h_c (T - T_a) \quad (36)$$

Le refroidissement dû à l'évaporation de l'eau est proportionnel à la masse évaporée. Le flux de masse d'eau évaporée est calculé avec le coefficient de transfert de masse K_m estimé à partir d'une corrélation empirique et la différence de pression de vapeur entre l'interface p_{vi} et l'air p_{va} :

$$m_e' = \frac{K_m}{RT_a} (p_{vi} - p_{va}) \quad (37)$$

L'air est saturé à l'interface, la pression P_{vi} est la pression de saturation alors que la pression partielle de l'air P_{va} peut être reliée à l'humidité relative (HR) :

$$m_e' = \frac{K_m}{RT_a} (p_{vs}(T) - HR \cdot p_{vs}(T_a)) \quad (38)$$

La quantité de chaleur perdue par évaporation s'écrit alors en fonction de la chaleur latente de vaporisation (L):

$$\varphi_{evap} = L \cdot m_e' \quad (39)$$

Un modèle de goutte isolée dans un écoulement d'air a été développé de manière à obtenir la perte de chaleur due aux performances du spray [Guerra et al. 1996].

Les apports de chaleur dans le bassin par addition d'eau sont calculés par pour un flux de masse d'eau (m') et une température d'eau qui entre dans le système (T_{apport}) par :

$$\varphi_{apport} = m' c_p T_{apport} \quad (40)$$

Cette modélisation d'un bassin a été implémentée dans le logiciel « Canyon » correspondant à la recherche menée dans le cadre du projet Greencode (programme ALTENER – DG XVII). Des exemples de résultats sont présentés par une équipe de l'Université de Séville [Alvarez et al. 2000].

3.3.1.4 Impact des sources ponctuelles d'eau

Des mesures dans le sud de la France ont permis de montrer que les effets des fontaines sont très localisés. En effet, les faibles échanges entre cette surface froide et l'air ne permettent pas un rafraîchissement. Il ne faut donc pas compter sur une fontaine pour assurer la climatisation naturelle d'un espace urbain (« seuls des effets psychologiques peuvent être escomptés »). Par contre, à proximité d'un grand jet d'eau, des mesures ponctuelles de l'air environnant ont montré qu'il y avait un effet d'humidification et de refroidissement [Groupe ABC 1997].

Il est donc important de favoriser des dispositifs qui peuvent jouer réellement sur l'humidification et le rafraîchissement de l'air. Lorsque dans un courant d'air on fait évaporer des gouttelettes d'eau la température de cet air diminue et parallèlement il se charge en humidité. Ce procédé est déclinable sous de nombreuses formes, c'est le principe des fontaines à jet, des brumisateurs, des climatiseurs, des tours de refroidissement (Figure 25 et Figure 26). Ces techniques, utilisées notamment à Séville et à Lisbonne pour les expositions, ont permis un rafraîchissement local. Ainsi en jouant sur la combinaison des phénomènes convectifs, évaporatifs et diffusifs, la régulation du confort de certains espaces est devenue possible.



Figure 25 : Brumisation dans la végétation
[Alvarez et al. 1992]



Figure 26 : Tour de refroidissement
[Alvarez et al. 1992]

3.3.2 La végétation comme solution microclimatique

Ce thème qui est un des axes importants de ce travail et qui a nécessité un investissement important est largement détaillé ici. En effet, nous allons présenter les phénomènes physiques et intégrer des résultats des recherches menées soit par des séries de mesures, soit réalisées en soufflerie, soit basées sur des simulations numériques. Les éléments pertinents, ainsi soulignés permettent d'argumenter certaines des hypothèses que nous retenons pour les simulations envisagées.

Les avantages relatifs à l'impact de la végétation s'illustrent particulièrement par des choix d'aménagement, bien souvent imposés par un sage pragmatisme et transmis par des connaissances ancestrales, qui ont malheureusement tendance à être négligées au profit d'une systématisation de la climatisation. Dans les différents rapports édités sur l'exposition universelle de Séville [Guerra et al. 1994], une réflexion sur la possibilité d'agir de manière naturelle ou passive sur les caractéristiques climatiques ou microclimatiques d'une région est présentée. Les auteurs partent du constat que les conditions climatologiques d'une localité ont des conséquences sur la forme de vie de ses habitants. La conception des espaces publics est supposée améliorer les conditions défavorables et faciliter l'adaptation de l'homme au milieu ambiant extérieur. L'usage des espaces ouverts comme zones habitables est un des traits culturels des villages méditerranéens. Les rues de ces villages, les places et les édifices historiques les plus représentatifs intègrent des techniques qui amortissent la rigueur des mois d'été. Bâches, pergolas, végétation, fontaines et étangs sont autant de ressources que l'on peut observer fréquemment dans les zones traitées et qui améliorent l'habitabilité de ces espaces.

Ces idées sont partagées par de nombreux auteurs [Robinette 1972, Givoni 1991, Izard et al. 1979]. Ce dernier souligne une similitude entre la fonction végétale et la fonction plan d'eau. Selon lui, la place plantée avec sa fontaine correspond à un modèle d'espace extérieur urbain présentant des aptitudes microclimatiques favorables au confort dans les régions méditerranéennes : l'ambiance climatique répond aux exigences saisonnières de l'espace extérieur, qui est ensoleillé l'hiver et à l'ombre l'été. La voûte formée par le feuillage protège des apports solaires et des éblouissements, par ailleurs elle maintient la fraîcheur dégagée par la présence d'eau. Des études ont permis de souligner la potentialité des villes d'Europe du sud vis à vis de la climatisation passive [Belarbi et al. 1998]. Les indicateurs présentés dans ces travaux

peuvent nous être utiles dans le choix des régions à traiter. Les recherches sur l'impact microclimatique de la végétation ne se cantonnent pas simplement au bassin méditerranéen, des études importantes ont été réalisées dans de nombreuses régions de la planète [Akbari et al. 1992, Meerow et al. 1993, Kanda et al. 1997].

Avant d'aller plus loin nous nous devons d'insister sur le fait que beaucoup des travaux qui se rapprochent de notre problématique envisagent les effets de la végétation en milieu urbain à une échelle mésoclimatique. On considère alors la ville comme un patchwork de zones hétérogènes dans lesquelles on retrouve les industries, les commerces, les résidences et la végétation répartie de manière aléatoire [Avisar 1996]. En modifiant les paramètres de couverture végétale et en modélisant les échanges induits, des simulations nous indiquent de quelles manières les conditions climatiques des villes peuvent être améliorées. Ce genre d'étude nous renseigne sur les différentes causes des « îlots de chaleur urbain ». En affectant un certain nombre d'arbres par habitation et grâce à la résolution d'équations et de corrélations définies pour des modèles numériques on peut faire des estimations d'économies d'énergie [Huang et al. 1987]. L'action directe due à l'ombre des arbres se traduit par une diminution de la température des surfaces, un effet indirect de refroidissement régional peut alors apparaître en augmentant la couverture végétale comme cela a pu être modélisé par ailleurs [Sailor 1998]. Malheureusement, cette échelle entraîne une estimation moyenne des caractéristiques physiques et par conséquent l'appréhension du confort sur l'homme ne peut être précise. De même, du fait des hypothèses qui sont faites pour ce genre d'études, les villes où les zones végétales sont remplacées par des couches avec des coefficients de densité ou des caractéristiques globales qui ne permettent pas de qualifier la sensation ressentie à un endroit précis de l'espace urbain.

Ce préambule étant fait, nous pouvons poursuivre notre présentation des effets de la végétation à l'échelle plus restreinte qui nous intéresse, celle du microclimat. Ainsi, nous allons analyser, de manière précise, comment les végétaux ont la possibilité de modifier leur environnement thermique par leurs actions sur les rayonnements de courte et de grande longueur d'onde, par leur influence sur les écoulements aérauliques et par le phénomène d'évapotranspiration. De nombreux travaux ont abordé ces considérations selon différents angles d'analyse. En effet, certains auteurs ont préféré étudier une modalité d'influence (ombre, température du feuillage, modification des écoulements aérauliques, évapotranspiration, etc.), d'autres ont tenté de les croiser, certains ont estimé les conséquences indirectes à l'échelle de la ville ou d'une région alors que d'autres ont mis l'accent sur les techniques d'évaluation des effets (maquettes, mesures in situ, soufflerie, simulations numériques). En reprenant les éléments essentiels de ces différentes recherches, en les comparant et en les structurant, nous allons voir, de quelles manières et dans quelles conditions, la végétation peut avoir une influence concrète sur le microclimat urbain.

3.3.2.1 Modification des échanges radiatifs en présence de végétation

« L'ombre du platane est unanimement reconnue comme la plus agréable, elle participe sans doute aux raisons de son succès. Fraîche sans être froide, elle reste lumineuse à condition que la taille n'ait pas contenu à l'excès son volume folié. Elle est préférée à celle du micocoulier car ce dernier a une ombre plus tamisée alors que le platane a une ombre unie. Les Provençaux parlent de qualités d'ombre. Parmi les bonnes, ils citent également celle du figuier et du tilleul ; cette dernière pour certains trop froide, peut faire perdre la voix ou donner mal au rein. Le peuplier et le noyer sont mentionnés comme dispensateur d'ombres humides, mauvaises voire maléfiques. C'est le contraire pour le

*pin auquel on reproche une ombre trop chaude et trop sèche. »
[Stefulesco 1993]*

Les échanges radiatifs sont importants dans la vie de l'arbre. En effet, le rayonnement solaire est la principale source d'énergie. Une fois converti en chaleur, il dirige les principaux échanges et certains processus comme la transpiration, déterminant ainsi la température des tissus. Les feuilles absorbent la plupart des radiations solaires qui les atteignent. Une petite partie de cette énergie est transformée en énergie chimique lors de la photosynthèse¹. Le rendement de cette transformation est faible (1 à 2 % [Givoni 1991]) et on peut donc considérer que l'effet thermique est négligeable. La quantité et la distribution des rayonnements CLO sont des éléments importants pour la croissance de la plante (photomorphogénèse). Et enfin, les rayonnements de très courte longueur d'onde, très énergétiques (UV, X, γ) peuvent entraîner des effets dommageables pour les cellules, comme une mutation du matériel et de la structure génétique (mutagénèse) [Jones 1992].

La densité d'un feuillage détermine une plus ou moins grande perméabilité à la lumière, et aux rayonnements de grande longueur d'onde. Cette densité varie de façon sensible suivant l'espèce considérée, la configuration de son développement (élagage, taille ...) et la saison. En tenant compte de ces différents paramètres, on peut considérer que les arbres urbains peuvent constituer trois types d'écran : un écran opaque (conifères), un écran semi-transparent (arbres à feuilles caduques) et un écran transparent (certains arbres fruitiers ou certaines espèces de pins) [Muret et al. 1987]. Des coefficients de transmission solaire (Figure 27) peuvent alors être définis pour différents types d'arbres et pour les différentes saisons [Escourrou 1981, Jones 1992, Brown et al. 1995, Gomez et al. 1998], comme nous le détaillons par la suite.

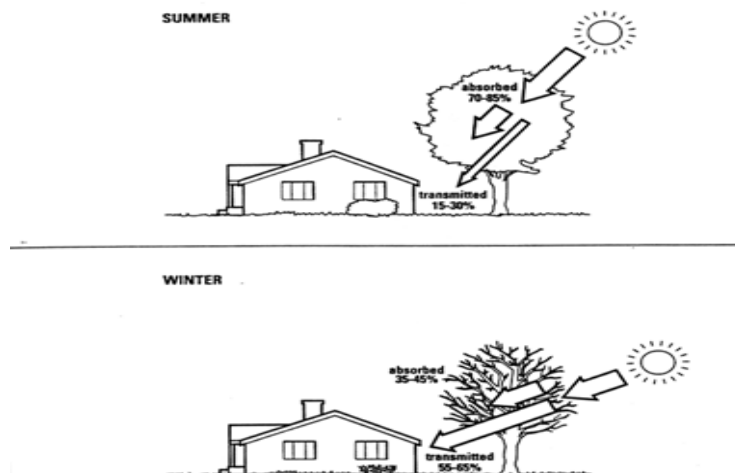


Figure 27 : Transmission solaire d'après [Akbari et al. 1992]

Les propriétés radiatives des feuilles montrent une dépendance vis-à-vis de la longueur d'onde. L'albédo d'une feuille d'arbre est supérieur à celui de l'ensemble du couvert végétal. La feuille réfléchit une partie du rayonnement incident qu'elle reçoit vers l'atmosphère, elle en diffuse une partie de façon sélective (moins de 10 % des UV) ; elle retransmet surtout les jaunes et les verts [0.5 à 0.6 μm] (plus de 10 %) et les infrarouges [0.7 à 1.1 μm] (plus de 50 %). Cette retransmission sélective selon les longueurs d'onde explique la dominante verte que l'œil

¹ On peut rappeler brièvement que la photosynthèse est le processus de conversion d'énergie radiative en énergie chimique, transportable et réutilisable. Elle repose sur la transformation de dioxydes de carbone et d'hydrogène, à faible énergie potentielle chimique, en hydrates de carbone à énergie potentielle chimique élevée (la respiration peut être considérée dans une certaine mesure comme la réaction inverse de la photosynthèse, l'énergie libérée étant sous forme chimique et non radiative).

perçoit de la forêt. Les feuilles absorbent 90 % des UV et une grande partie des infrarouges [$> 2 \mu\text{m}$] [Escourrou 1981].

La transmission du rayonnement solaire à travers une couche de végétation peut être approchée par la loi de Beer qui traduit une décroissance exponentielle, fonction d'un coefficient d'extinction (k) et de la distance traversée :

$$\Phi = \Phi_0 \cdot e^{-kx} \quad (41)$$

La distribution du rayonnement dans la canopée des plantes est difficile à déterminer car elle est fonction de l'architecture de la canopée, de la distribution angulaire du rayonnement incident et des propriétés spectrales des feuilles. Lorsque l'on parle de masse végétale, il est utile de donner la définition de l'indice foliaire que l'on note LAI (de l'anglais Leaf Area Index). On rappelle que l'indice foliaire est le rapport entre la surface de toutes les feuilles du couvert et la surface de sol sous-jacente [Saugier 1996]. Une seule des deux faces de la feuille doit être considérée lorsque celle-ci est plane, pour une aiguille de conifère on prend la moitié de la surface totale. Certains auteurs tiennent compte de la surface totale des aiguilles, d'autres, de la surface projetée sur un plan. L'indice foliaire peut varier entre 0 (sol nu) et 10 ; les valeurs usuelles vont de 4 à 8 pour une culture annuelle à son maximum de végétation ou une forêt de feuillus en été, de 1 à 6 pour une prairie permanente, de 2 à 3 pour une forêt boréale et jusqu'à plus de 10 pour une plantation de sapins ou d'épicéas à forte densité.

Dans le cas d'une distribution quelconque de feuilles le flux transmis s'écrit :

$$\Phi = \Phi_0 e^{-kLAI} \quad (42)$$

Les feuilles planophiles ont une distribution principalement horizontale, les feuilles érectophiles ont une distribution principalement verticale. Dans le cas où les feuilles ont une probabilité équivalente d'être dans toutes les directions, la distribution est dite sphérique. Les valeurs des coefficients d'extinction relatifs à ces situations sont présentées dans le tableau suivant [Jones 92] :

Distribution angulaire des feuilles	Coefficient d'extinction (k)
Horizontale	$k = 1$
Verticale	$k = (2\cot\beta)/\pi$
Sphérique	$k = 1/(2\sin\beta)$
Ellipsoïdale	$k = (x^2 + \cot^2\beta)^{1/2} / (Ax)$
Diaheliotropique	$k = 1/\sin\beta$

Tableau 7 : Coefficient d'extinction pour différentes distributions angulaires des feuilles [Jones 1992]. x est le rapport de l'axe horizontal sur l'axe vertical de l'ellipse et

$$A \approx (x + 1.774(x + 1.182)^{-0.733})/x$$

La décomposition du rayonnement a été mesurée en site forestier pour certaines espèces d'arbre (Tableau 8). Les résultats expriment la répartition entre le pourcentage de la radiation qui est réfléchi, retransmis et absorbé par ces arbres (Lee 1978) cité par [Escourrou 1981]. On constate qu'en moyenne, pour ces six types d'arbre de forêt, le rayonnement réfléchi est légèrement supérieur à 30 %, le rayonnement retransmis est supérieur à 20 % et le rayonnement absorbé est inférieur à 50 %.

Arbres	Réfléchi	Retransmise	Absorbée par les feuilles
Faux acacia	35	26	39
Bouleau	33	24	43
Chêne rouvre	28	25	47
Tremble	33	20	47
Saule	29	21	50
Frêne	31	18	51

Tableau 8 : Coefficients radiatifs pour des arbres en forêt d'après [Escourrou 1981]

Les variations entre les valeurs des coefficients de transmission peuvent être considérables entre les espèces en fonction des conditions de croissance et des zones climatiques et peuvent également être déformées par les instruments de mesure utilisés par les différents chercheurs (Tableau 9). Les plantations du paysage possèdent des caractéristiques qui affectent le rayonnement solaire de diverses manières :

- Par les feuilles individuelles qui permettent à une partie du rayonnement d'être transmis (environ 20 %), qui absorbent (environ 50 %) et réfléchissent une partie du rayonnement (environ 30 %).
- Par les dates de feuillaison foliation et de défoliation
- Par leur hauteur maximale et,
- Par la transmission de la canopée à différentes saisons (combinaison des caractéristiques des feuilles, des branches et de la taille)

Nom botanique	Nom Commun	Taux de transmission Été (%)	Taux de transmission Hiver (%)	Foliation	Défoliation	Hauteur maximale (m)
<i>Acer platanoides</i>	Erable plane	5-14	60-75	P	M	15-25
<i>Acer saccharinum</i>	Erable argenté	10-28	60-87	M	M	20-35
<i>Aesculus hippocastanum</i>	Marronnier	8-27	73	M	T	22-30
<i>Betula pendula</i>	Bouleau	14-24	48-88	M	MT	15-30
<i>Catalpa speciosa</i>	Catalpa	24-30	52-83	T		18-30
<i>Fagus sylvatica</i>	Hêtre	7-15	83	T	T	18-30
<i>Fraxinus pennsylvanica</i>	Frêne	10-29	70-71	M-T	M	18-25
<i>Gleditsia tricanthos inermis</i>	Févier	25-50	50-85	M	P	20-30
<i>Liriodendron tulipifera</i>	Tulipier	10	96-78	M-T	M	27-45
<i>Picea purgens</i>	Epicéa	13-28	13-28			27-41
<i>Pinus strobus</i>	Pin blanc	25-30	25-30			24-45
<i>Platanus acerifolia</i>	Platane	11-17	46-64	T	M-T	30-35
<i>Populus deltoides</i>	Peuplier	10-20	68	P	M	23-30
<i>Quercus rubra</i>	Chêne	12-23	70-81		M	13-30

Tableau 9 : Taux de transmission au rayonnement solaire pour différents arbres [Brown *et al.* 1995]. Avec Foliation, P : précoce = avant 30 avril, M : moyenne = entre le 1 et le 15 mai, T : tardive = après le 15 mai. Défoliation, P : précoce = avant le 1 novembre, M : moyenne = entre le 1 et le 30 novembre, T : tardive = après le 30 novembre

Il est bien évident que les dimensions de la couronne végétale sont des paramètres très importants qui vont définir la tache d'ombre au sol et sur les façades des bâtiments proches. Nous avons noté que les apports solaires transmis ne sont pas forcément nuls. Il est donc nécessaire d'associer à notre tache d'ombre la part d'énergie qui atteint les surfaces. Dans les simulations d'ensoleillement que nous allons réaliser, le tracé des ombres et le calcul des énergies transmises sont donc deux notions essentielles.

Les arbres peuvent être très efficaces pour bloquer les rayonnements solaires. Les effets de réverbération ou d'éblouissement dus à l'ombre et au soleil peuvent être largement atténués par une lumière diffuse fournie par la présence d'une couverture végétale, c'est le cas des mails de platanes. De plus, ils réduisent la consommation d'énergie à l'intérieur des bâtiments de trois manières :

- Les arbres, en créant une ombre sur une fenêtre, limitent les apports solaires.
- Les murs, les fenêtres et les toits à l'ombre s'échauffent moins et donc réduisent la quantité de chaleur atteignant l'intérieur.
- Le sol à l'ombre est plus frais et représente donc un « puits de chaleur » pour la maison.

Les inconvénients liés à l'ombre des arbres en hiver ne sont pas aussi significatifs que les bénéfiques en été. Le soleil est moins intense en hiver et les arbres à feuilles caduques laissent passer une grande partie des apports solaires [Akbari et al. 1992].

3.3.2.2 Température de surface des végétaux

Des mesures thermiques par imagerie infrarouge [Hoyano 1988] indiquent que la température de surface du feuillage est pratiquement équivalente à celle de l'air sous abri, même pour des conditions de rayonnement solaires très différentes. En effet, on peut relever que les différences de température, des feuilles des faces supérieures et inférieures d'une pergola, pour un apport solaire de 465 W/m^2 , sont les mêmes à $1 \text{ }^\circ\text{C}$ près, l'écart n'étant que de 2°C pour un rayonnement de l'ordre de 930 W/m^2 . Dans les illustrations suivantes, nous confirmons ce résultat (Figure 28). Les températures de surface observées dans l'infrarouge, indiquent les zones de la couronne végétale de l'arbre qui sont à 27 , 28 et $29 \text{ }^\circ\text{C}$ dans le cas où celui-ci est dans un air à $28 \text{ }^\circ\text{C}$ et soumis à un ensoleillement important correspondant à celui d'une journée claire d'été [Alvarez et al. 2000].

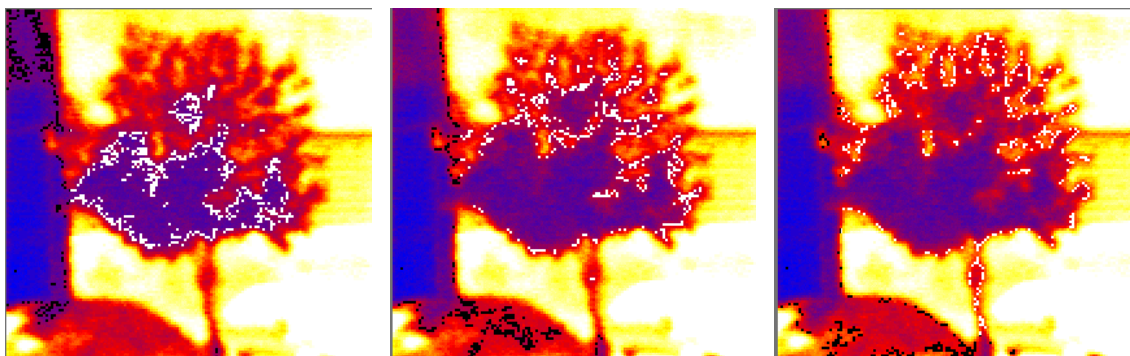


Figure 28 : Zones végétales isothermes à 27 , 28 et 29°C [Alvarez et al. 2000]

Avec le même type de mesure (thermographie infrarouge), l'équipe d'ABC à Marseille est arrivée à la conclusion que la masse foliaire des arbres, en jardin comme en alignement, a tendance à conserver une température voisine de la température d'air sous abri et souvent même une valeur inférieure [Groupe ABC 1997]. Autrement dit, sous un arbre, tout se passe comme si

le rayonnement solaire était totalement annulé. Cet effet est très intéressant sur les voies urbaines avec arbres d'alignement. Celles-ci deviennent des espaces non seulement à l'ombre, mais aussi des zones dans lesquelles aucun effet de surface chaude ne vient augmenter la température environnante. En effet, cela entraîne non seulement une réduction de la température du sol, mais également une diminution de la radiation réfléchie vers les zones occupées. Une masse végétale se comporte donc comme un « plafond réfrigérant » [Destobbeleire et al. 1998].

Les zones de pelouse ont également tendance à équilibrer, comme la couronne des arbres leur température avec celle de l'air [De La Torre et al. 1998].

Certains travaux apportent une correction à ce constat sur l'équivalence des températures d'air et de surface des végétaux [Kjelgren et al. 1998]. En effet, les arbres en ville croissent généralement dans des zones pavées, le long des rues et sur des parkings. Les surfaces pavées comme l'asphalte sont des environnements chauds car l'absence de refroidissement par évaporation entraîne une augmentation de la température de surface. Ces températures élevées induisent des échanges radiatifs de grande longueur d'onde plus importants que dans le cas d'une surface végétale. La manière dont l'arbre répond à une augmentation de l'énergie dépend des espèces, de l'humidité et de l'exposition de la couronne. Les arbres à larges feuilles caduques qui interceptent l'énergie due au rayonnement de grande longueur d'onde ne dissipent pas immédiatement leur chaleur par refroidissement convectif. L'énergie retenue par les feuilles résulte d'une combinaison entre une plus forte transpiration et une clôture partielle des stomates qui entraîne une augmentation de la température des feuilles, celles-ci ne pouvant plus évacuer ces apports. L'écart maximal, en condition extrême, entre les températures des feuilles et de l'air varient de 9°C pour un arbre au-dessus d'une surface en asphalte à 4°C lorsqu'il est au-dessus d'une pelouse. En effet, les espèces à stomates sensibles ou celles placées en zones arides avec une humidité faible, retiennent l'énergie, augmentent la température des feuilles et la valeur du déficit de pression de vapeur entre les feuilles et l'air ce qui peut accélérer le processus de fermeture et donc d'échauffement. Un regroupement des arbres ou une augmentation de la densité de la couronne peut permettre une dissipation du rayonnement intercepté sur plus de feuilles et ainsi réduire les gains d'énergie.

Il est à signaler qu'un calcul en régime permanent des températures de surface peut être envisagé. En effet, la capacité de chaleur par unité de volume varie de 1 MJ.m⁻³.K⁻¹ pour le bois du pin rouge à 2 à 3 MJ.m⁻³.K⁻¹ pour les feuilles et les fruits. Ainsi, les constantes de temps sont de l'ordre de quelques secondes pour les petites feuilles, de quelques minutes pour les feuilles larges et de quelques heures pour le tronc [Monteith et al. 1991]. Enfin, nous ajoutons que la température des troncs suit la température de l'air avec une différence positive moyenne de 0.5 °C, l'écart maximal étant de 2°C en début d'après midi [Escourou 1981].

3.3.2.3 Impact de la végétation sur les températures d'air et de surface

La plupart des études concernant l'influence de la végétation sur les conditions thermiques extérieures se sont principalement concentrées sur les espaces verts de grandes tailles. Les effets de la végétation dans de petites zones, comme les squares urbains et les rues sont moins connus, même si dans la plupart des villes leur influence sur le microclimat est importante.

3.3.2.3.1 Les parcs

Des températures de l'air ont été mesurées la nuit dans certains parcs urbains et comparées à celles relevées dans les zones construites environnantes par de nombreux chercheurs [Upmanis et al. 1998]. L'extension ainsi que l'amplitude de la différence de température dépend de la

taille du parc et de la distance au parc. Des données concernant différentes villes montrent que les écarts de température entre un parc et ses environs vont de 1 °C à 6.8 °C. Le plus grand écart est obtenu pour de grands parcs. Cependant pour des parcs de taille équivalente les écarts peuvent varier de 1.5 °C à 4 °C. Il semble que l'extension de l'effet spatial du refroidissement augmente avec la taille des parcs. L'effet potentiel du parc est largement déterminé par le climat : plus le climat est chaud et sec, plus l'effet est important. Les études de jour sont moins nombreuses et révèlent des résultats contradictoires. Une étude a été menée dans la ville de Göteborg de juin à septembre 1997 [Upmanis 1998]. La différence de température entre les environs et le parc atteint un maximum de 4.7 °C, la valeur moyenne de l'écart est d'environ 3 °C. Des campagnes de mesure se sont déroulées à l'intérieur et aux abords du Parc National d'Athènes pendant 10 jours au mois d'août 1998 [Klitsikas et al. 2000]. Dans ce parc, qui est le plus important du centre ville, la température de l'air varie en fonction de l'ombrage et de la couverture végétale. Les écarts entre les températures les plus basses et les plus hautes peuvent atteindre 1.5 °C. La différence maximale de température entre le parc et les zones environnantes atteint durant la journée environ 3 °C. Dès la sortie du parc, une augmentation immédiate de 1 °C apparaît. La température autour du parc est principalement influencée par des paramètres comme la densité des bâtiments, le taux de chaleur anthropogénique dégagé par les voitures et l'ombrage dans les rues plutôt que par la présence du parc.

3.3.2.3.2 Les rues, les squares

De nombreuses campagnes de mesure ont tenté d'analyser les effets microclimatiques dus aux formes urbaines et à la présence de végétation. Parmi les études françaises, nous pouvons citer les travaux menés à l'École d'architecture de Marseille [Equipe ARTOPOS 1997, Groupe ABC 1997] sur l'analyse de deux villes méditerranéennes, Aix-en-Provence et Nîmes. Les mesures montrent que les jardins, parcs et espaces arborés sont les seuls espaces qui restent plus frais que la station météo (-0.6°C en moyenne et près de -1°C pour les espaces humidifiés). Les espaces urbains végétalisés, sont plus chauds d'environ 0.3°C et les espaces minéraux de 0.8°C. Il a été constaté qu'à l'ombre, une pelouse et une allée minérale ont presque la même température à 1 °C d'écart. Ainsi, la pelouse reste un peu plus fraîche notamment grâce à son humidité due à l'arrosage et à son humidité matinale alors qu'au soleil, une allée s'échauffe beaucoup plus que la pelouse (11°C de plus).

En été, la différence moyenne entre les températures de l'air mesurées entre les zones à l'ombre et au soleil est de 2 °C avec un maximum de 4 °C pour les quatre squares urbains de Milan [Scudo et al. 1998]. Les zones de pelouse ensoleillée atteignent des températures de 14 °C plus élevées que celle de l'air, tandis que pour les zones pavées et les murs la différence peut atteindre 25 °C, dans un petit square de Barcelone [De La Torre et al. 1998]. Des mesures indiquent que les températures de surface des murs orientés est et ouest en béton protégés du rayonnement solaire direct par des arbres, sont plus faibles en moyenne de plus de 13 °C [Parker 1989]. Les températures de surface de l'asphalte peuvent être de 20 à 25 °C supérieures à celles d'une pelouse l'après-midi [Kjellgren et al. 1998]. L'écart de température de l'air, à 1.2 m de la surface du sol (les trottoirs sont recouverts d'asphalte), entre les rues sans arbre et avec arbres est de 0.7 °C en moyenne avec des maxima atteignant 2 °C (effet d'ombrage). Aucune différence n'est relevée la nuit. Le jour, lorsque le canyon est complètement obstrué par les arbres une diminution de la température de surface peut atteindre au maximum 15 °C par rapport au canyon sans arbres, avec une moyenne de 5°C pour les trottoirs. Les différences entre les valeurs de l'humidité relatives ne sont pas évidentes. Des corrélations fortes apparaissent entre les températures d'air et de surface de trottoirs. L'atténuation de la température d'air en présence d'arbre peut s'expliquer par la diminution de la température de surface qui induit une température d'air inférieure [Gao et al. 1995].

Cette analyse synthétique des différents travaux permet de fixer les ordres de grandeur quant aux impacts envisagés au niveau des températures de surface et d'air. A l'issue de ces premières caractéristiques de la végétation, nous pouvons résumer la majorité des éléments que nous avons avancés dans le schéma présenté à la Figure 29. Sur cette figure, les flèches rayées de couleur claire représentent les rayonnements de courte longueur d'onde et celles de couleur foncée les rayonnements de grande longueur d'onde.

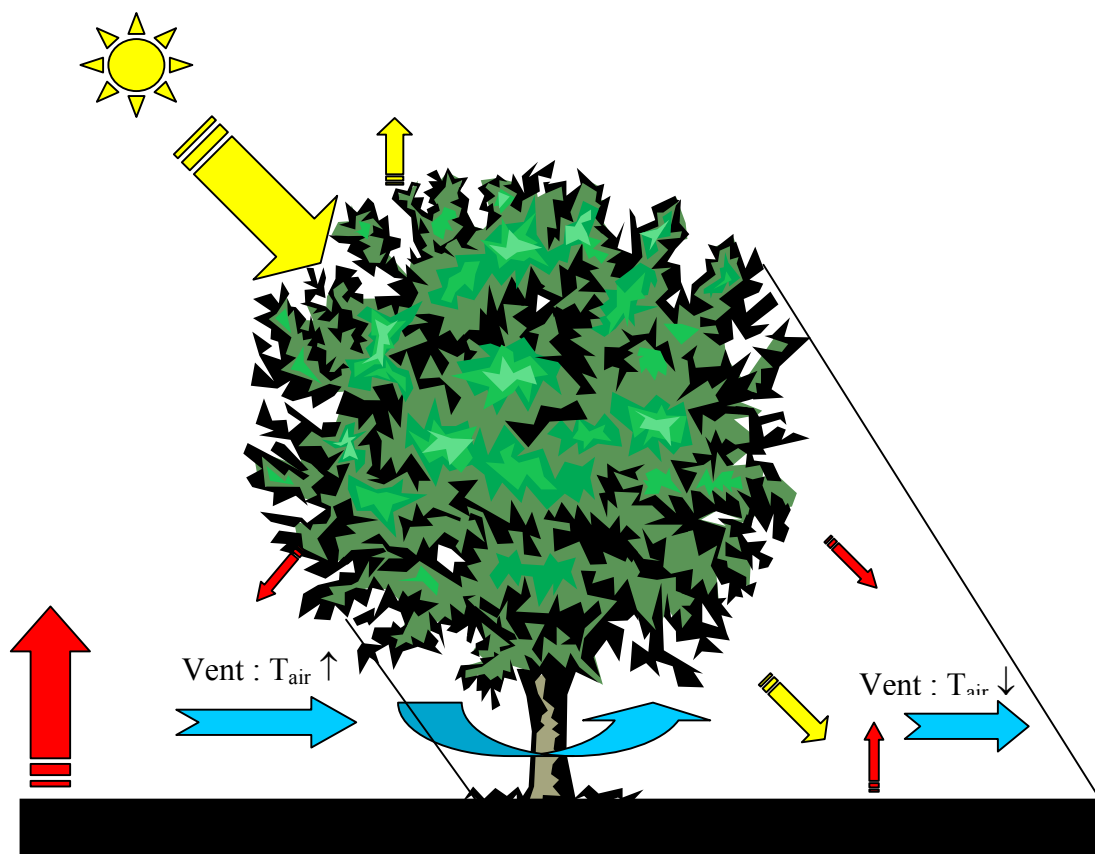


Figure 29 : Modification des transferts de chaleur autour d'un arbre

3.3.2.4 Impact de la végétation sur les économies d'énergie

Les résultats d'une recherche sur les relations entre le microclimat urbain et la densité locale des arbres, à partir de mesures dans la ville de Sacramento, en Californie [Sailor et al. 1992], révèlent une interaction complexe entre différents facteurs et mènent à la conclusion qu'une augmentation du nombre d'arbres peut élever la température de l'air urbain pour des jours globalement frais. Ce point négatif, n'induit pas pour autant d'effet significatif sur les charges énergétiques de refroidissement consommées en ville sur la saison complète d'été. En effet, l'analyse des températures confirme que les charges résidentielles utilisées pour le rafraîchissement (mesurées par les degrés jour) peuvent diminuer de 5 à 10 % chaque fois que la densité des arbres augmente de 10 %.

Des simulations ont été présentées pour analyser les effets des arbres comme option de rafraîchissement passif des bâtiments [Raessi et al. 1999]. Les besoins horaires en charge de refroidissement sont calculés par la résolution de l'équation du bilan d'énergie pour le bâtiment. Cette simulation est validée par comparaison avec des données relatives à une maison construite

à Shiraz (Iran). Les résultats indiquent que pour cette maison, les charges de conditionnement d'air peuvent être réduites de 10 (effet d'ombre seul) à 40 % (ombre + réduction de la température de l'air de 3°C par évapotranspiration) par plantation appropriée d'arbres.

D'autres travaux [Akbari et al. 1992] montrent que les économies annuelles d'énergie liées à une addition de 3 arbres par maison (effet de l'ombre + effet du vent), pour 7 villes des USA sont estimées entre 75 et 175 \$. En ajoutant les effets indirects (prise en compte de l'évapotranspiration) les simulations montrent que les économies d'énergie d'été pour le refroidissement sont de 57 % à Sacramento, 17 % à Phoenix et 23 % à Lake Charles (Figure 30). La valeur de ces économies d'énergies en rafraîchissement est alors comprise entre 100 et 250 \$ par an et par ménage.

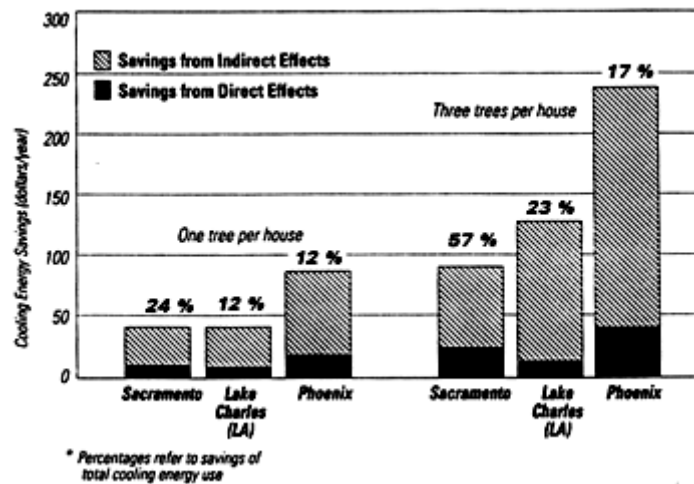


Figure 30 : Economie d'énergie dues aux effets directs et indirects des arbres dans trois villes américaines [Akbari et al. 1992]

Pour être encore, un peu plus réaliste il faut ajouter que l'ombre des arbres réduit certes la demande en air conditionné l'été mais augmente la charge de chauffage l'hiver en interceptant l'énergie solaire qui aurait été apportée à la structure à l'ombre et en considérant la réduction de la vitesse du vent [Simpson et al. 1998]. Les effets cumulés de l'ombre et de la réduction du vent, mais sans prise en compte des effets indirects cette fois ci, induisent une économie totale annuelle de \$14.00 par arbre, soit \$43.00 par propriété.

3.3.2.5 Les effets de la végétation sur les écoulements aérauliques

Dans cette partie nous nous attachons à présenter les différents résultats et les différentes approches mises en œuvre pour appréhender l'influence de la végétation face aux écoulements aérauliques. Ce thème a fait l'objet d'un certain nombre de publications [Gandemer et al. 1981, Heisler 1989, Bottema 1992]. Cependant, il est à signaler que peu de données, concernant l'impact des arbres sur le vent dans un environnement urbain, sont disponibles dans la littérature.

Les relations entre la densité d'arbres, la morphologie des bâtiments et les réductions du vent ont été analysées par des mesures de la vitesse moyenne du vent à 2 m du sol dans le voisinage de maisons individuelles [Heisler 1989]. Dans cette étude, les maisons réduisent la vitesse du vent d'environ 24 %, les arbres, répartis de manière principalement dispersée, apportent une réduction supplémentaire de la vitesse de vent de 46 %. Même dans le voisinage, où la plupart

des arbres sont à feuillage caduc, la diminution de la vitesse du vent par les arbres en hiver atteint en moyenne une valeur de 50 % à 90 % la valeur de la réduction en été. Dans le voisinage d'une maison individuelle avec 23 % de densité d'arbres la réduction de la vitesse par les arbres et les constructions est d'environ 38 % en hiver et 52 % en été, avec une réduction apparente due aux arbres de 14 % et 29% respectivement. Avec une densité d'arbres de 77 % la réduction totale est de 65 % et 70 % et la réduction imputée aux arbres est de 42 % et 46 %.

Parmi les effets recensés, celui de brise-vent est le plus évident, et est le plus utilisé notamment dans les exploitations agricoles et dans la protection de certaines constructions. Une étude en soufflerie, à couche limite, a permis d'examiner l'effet de différentes configurations d'arbres brise-vent sur les infiltrations et sur les charges de vent sur des bâtiments bas [Stathopoulos et al. 1994]. Les résultats montrent qu'une seule rangée, à forte densité, réduit les infiltrations d'air d'environ 60 %, quand les arbres sont plantés à une distance des bâtiments d'environ 4 fois leur hauteur. Les brise-vent composés de grands arbres offrent une protection double de celle des arbres d'une taille deux fois inférieure.

Le choix de la forme de l'arbre dépend de la région à protéger : une couronne en forme de cône augmente la protection sous l'arbre, une couronne ellipsoïdale augmente la protection à l'arrière de l'arbre [Bottema 1992]. Plus les arbres sont hauts, plus le nombre de rangées d'arbres doit être important afin d'apporter une protection. Cependant, nous pouvons noter que des arbres isolés peuvent engendrer une augmentation locale de la vitesse du vent [Gross 1987]. En effet, au lieu de réduire la vitesse du vent, on constate une augmentation des courants d'air à la base des arbres, sous la canopée, au niveau du tronc. Ceci est dû à une diminution de la surface effective, d'où création d'un effet venturi.

Dans les rues, les arbres sont souvent les seuls systèmes de réduction du vent. Une estimation indirecte de l'effet de protection des rangées d'arbres a été réalisée en soufflerie en comparant des données relatives à des districts urbains simplifiés obtenues par Alberts (1981) et une étude réalisée par Visser (1987) qui inclut des rangées d'arbres au niveau des rues. Dans une configuration où la hauteur de construction est uniforme, les réductions de vent estimées dues aux arbres sont de 25 % (± 5 %) pour un vent parallèle aux rues et de 20% (± 20 %) pour un vent en travers [Bottema 1992].

3.3.2.5.1 Porosité aéraulique

La masse foliaire de la végétation représente une rugosité par rapport aux écoulements de l'air, et une partie du flux incident pénètre à l'intérieur du feuillage et se trouve filtré et amorti, diminuant sensiblement en aval les vitesses et les phénomènes tourbillonnaires. L'efficacité de l'effet brise-vent dépend de la porosité effective du feuillage, c'est-à-dire le rapport de surface des trous sur la surface totale de la masse foliaire pondéré par un coefficient de perte de charge. Il est intéressant de noter que cette porosité est variable suivant les saisons et les essences choisies. Ainsi, les feuilles de platane ont une porosité croissante avec la vitesse du vent alors que les aiguilles de pins se plaquent les unes sur les autres et forment un écran plus dense [Izard et al. 1979].

Des informations supplémentaires nous sont apportées par des travaux du CSTB [Gandemer et al. 1981] qui introduisent une caractérisation aérodynamique de l'efficacité des écrans végétaux. La perméabilité est fonction de la vitesse du vent, de l'essence du végétal, de la forme et de l'épaisseur de la masse végétale et de la saison. Ainsi, ils ont pu dégager un certain nombre de paramètres importants comme les dimensions de « l'obstacle végétal », la « perméabilité visuelle » (pourcentage de vide visuel) et la forme globale. Des coefficients de porosité peuvent permettre une caractérisation aéraulique des arbres.

Il est possible en première approximation de considérer une correspondance entre la porosité aéraulique et la porosité visuelle (Tableau 10). En effet, les haies dont le pourcentage de vide visuel est pratiquement nul (écran opaque) se comportent comme un écran mince artificiel de même dimension et de porosité géométrique égale à 0.2. Pour un vide visuel de l'ordre de 1/3, la protection est égale à celle d'un écran mince de porosité 0.5 alors que si la perméabilité visuelle est de 50 à 60 %, l'équivalent porosité géométrique est d'environ 0.7. Pour une perméabilité visuelle supérieure, la protection contre le vent n'existe plus.

Porosité visuelle	Porosité géométrique équivalente
≈ 0	0.2
1/3	0.5
50 % à 60 %	0.7
> 60 %	1

Tableau 10 : Porosité visuelle et aéraulique (d'après [Gandemer *et al.* 1981])

3.3.2.5.2 Pertes de charge

La notion de perte de charge (C_d pour drag coefficient en anglais) peut également être utilisée lorsque l'on cherche à modéliser la végétation. Les termes sources ou puits décrivent la perte de vitesse de vent due aux forces de frottement des éléments végétaux dans les équations traduisant les écoulements. Ils correspondent à la dérivée de la perturbation de la pression locale moyenne suivant les différentes directions. On les obtient en multipliant un coefficient de frottement par la densité d'aire des feuilles à une hauteur donnée, par la vitesse moyenne du vent à la même hauteur et par la vitesse du vent selon une direction. Des termes sources correspondent à la production de l'énergie et à la dissipation de la turbulence au niveau de la végétation [Bruse *et al.* 1998].

La connaissance de la valeur du coefficient C_d pour un arbre ou une forêt réelle est sujette à de nombreuses incertitudes. Les valeurs expérimentales montrent que C_d augmente lorsque la vitesse du vent augmente à cause de la décroissance dans la section effective de la couronne due à l'alignement des feuilles et des branches dans le sens du courant. Ainsi, en condition de vent élevé, les valeurs des coefficients de traînée pour des arbres urbains varient de 0.2 (sans feuille) à 0.86 (en feuilles) [Roodbaraky *et al.* 1994]. De même, Fraser (1962) a exposé des conifères de taille adulte dans une soufflerie avec un vent de 15 m/s et a obtenu des valeurs de C_d qui varient de 0.57 pour l'épicéa à 0.25 pour le Tsuga (conifère) [Monteith *et al.* 1991].

En condition de vent normal, une valeur de C_d proche de 0.2 est généralement retenue dans de nombreuses études [Watanabe 1994, Liu *et al.* 1996]. Il est intéressant de remarquer que les résultats obtenus pour des valeurs de C_d de 0.5, 0.66 et 0.8 montrent une distribution virtuellement identique des contraintes turbulentes de cisaillement de Reynolds. Cependant, une valeur élevée de 3.3 entraîne de grandes différences, dues à une forte production d'énergie cinétique turbulente dans la région de cisaillement [Kobayashi *et al.* 1994].

3.3.2.6 Evapotranspiration : définitions et applications

Ce phénomène physique, essentiel à la régulation thermique de la végétation, est présenté dans de nombreux ouvrages [Guyot 1996, Vilain 1993, Musy *et al.* 1991, Monteith *et al.* 1991] et donne lieu à une quantité de définitions, de corrélations et d'équations. Afin de sélectionner les

bilans ou les équations qui seront utilisés par la suite, lors des modélisations, il est important de s'attarder un peu sur certaines définitions.

On appelle **évapotranspiration** (ET) le phénomène combiné de perte en eau par transpiration et par évaporation directe de l'eau du sol et des surfaces d'eau libre. En effet, les transferts d'eau du système sol-végétation-atmosphère peuvent s'effectuer selon deux processus, soit par évaporation directe de l'eau du sol, soit par évaporation de l'eau de transpiration des végétaux, préalablement prélevée dans le sol par leur système racinaire. L'évaporation directe se produit essentiellement dans une zone de faible épaisseur située immédiatement sous la surface du sol, où l'apport énergétique nécessaire à la vaporisation de l'eau est suffisant. Dans le cas de la transpiration des végétaux, le siège de l'évaporation se situe essentiellement au niveau des parois internes des stomates. Les deux processus se produisent simultanément et de manière telle qu'il est difficile de les distinguer, si bien qu'ils sont englobés sous le terme général d'évapotranspiration.

La notion d'**évapotranspiration potentielle** (ETP), introduite par Thornthwaite en 1948 [Guyot 1996], correspond à la perte en eau par évaporation directe de l'eau du sol et par transpiration d'un couvert végétal dense, bien développé, en pleine croissance et surtout bien alimenté en eau. L'ETP climatique (ETPc) correspond à la valeur de l'ETP obtenue à partir des données météorologiques sur des intervalles de temps allant de la journée au mois à l'échelle décadaire. Les travaux entrepris sur l'estimation des besoins en eau des cultures, ont conduit à la définition des différents termes suivants:

- L'**évaporation potentielle** (EP) est obtenue lorsque toutes les surfaces évaporantes d'un couvert végétal sont recouvertes d'eau (possibilités maximales d'évaporation dans des conditions climatiques données).
- L'**évaporation potentielle théorique** (EP*) est la valeur maximale de EP, lorsque la végétation n'oppose aucune résistance au transfert de vapeur d'eau et peut être déterminée à partir de formules climatiques comme la formule de Penman.
- L'**évapotranspiration réelle** (ETR) correspond au cas général dans les conditions naturelles et par conséquent est celle qui nous intéresse. Elle est égale à la quantité d'eau qui est réellement évapotranspirée et dépend des conditions climatiques (en particulier du bilan radiatif et du vent), de la disponibilité de l'eau à la surface (résistance stomatale en particulier) et des caractéristiques de la partie aérienne des couverts végétaux (étendue, hauteur, disposition des surfaces évaporantes dans l'espace).
- Enfin l'**évapotranspiration réelle maximale** (ETRm) est la valeur de l'ETR lorsque la résistance stomatale du couvert est minimale (même lorsque les stomates des plantes sont largement ouverts, l'ETRm ne peut jamais atteindre la valeur de l'évaporation potentielle). Il existe cependant un cas particulier pour lequel l'EP est égale à l'ETRm : celui d'un gazon bien alimenté en eau, car on peut estimer que la résistance offerte par sa structure au transfert de vapeur d'eau est pratiquement nulle.

L'énergie de vaporisation de l'eau cellulaire est fournie par refroidissement des tissus de la plante, la transpiration assurant ainsi une fonction vitale de régulation thermique. L'évapotranspiration comme les précipitations, s'évalue en hauteur d'eau équivalente sur une période donnée, par exemple mm par an, par mois ou par jour.

3.3.2.6.1 Bilan d'énergie et évaporation

L'ensemble des rayonnements énergétiques (R_n) qui arrivent sur une surface végétale sont soit absorbés par le système, puis transformés en énergie chimique (c'est la photosynthèse) par le

métabolisme (M), soit échangés par chaleur sensible avec l'air ambiant (φ_{conv}), soit reconvertis sous forme de chaleur latente (LE) ou soit dégradés sous forme de chaleur par le sol et transmis par conduction (φ_{cond}) ou stocké (ΔS). Le principe de conservation de l'énergie appliqué à une canopée s'écrit alors :

$$R_n - \varphi_{\text{conv}} - LE = M + \varphi_{\text{cond}} + \Delta S \quad (43)$$

3.3.2.6.2 Formule de Penman

La formule de Penman donne l'évaporation potentielle théorique EP* d'une nappe d'eau ou d'un gazon parfaitement arrosé. La validité de la formule de Penman repose sur cinq hypothèses :

- Le régime doit être permanent. Dans les conditions naturelles une telle relation n'est donc vérifiée que pour des intervalles de temps très courts (quelques minutes à une heure).
- Les flux doivent être conservatifs entre la surface considérée et le niveau de référence dans l'air. Cette hypothèse sera pratiquement vérifiée si la surface est suffisamment étendue pour que l'on puisse négliger les apports latéraux d'énergie par advection.
- La surface doit être plane, homogène et continue.
- La surface est saturée en eau. L'eau doit être libre et la tension de vapeur au niveau de la surface est la tension de vapeur saturante à la température de la surface.
- Toute l'énergie disponible (essentiellement sous forme radiative) est absorbée au niveau de la surface.

En première approximation, il est possible de négliger la photosynthèse qui ne représente que 1 à 2 % des échanges énergétiques et le flux de chaleur dans le sol car il est de l'ordre de quelques dizaines de $W \cdot m^{-2}$. Le bilan, pour une surface humide à l'équilibre peut alors s'écrire :

$$R_n = LE + \varphi_{\text{conv}} \quad (44)$$

Les détails de la démonstration de la formule de Penman sont accessibles dans la littérature [Monteith et al. 1991, Guyot 1996]. On peut la présenter sous cette forme :

$$EP^* = \frac{\Delta \frac{R_n}{L} + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \quad (45)$$

L'évaporation potentielle théorique EP* est exprimée ici en mm par jour, la température de l'air T_{air} en Kelvin et le rayonnement net R_n en W/m_2 . Δ , la pente moyenne de la courbe de tension de vapeur saturante entre la température de surface et la température de l'air, valeur de la dérivée cette courbe à $T = (T_s + T_{\text{air}})/2$. Elle est calculée grâce à l'expression suivante:

$$\Delta = \frac{e(T_{\text{air}})}{T_{\text{air}}} \left(\frac{6463}{T_{\text{air}}} - 3.927 \right) \quad (46)$$

Le pouvoir évaporant de l'air E_a , fait intervenir la vitesse du vent U et l'écart entre la tension saturante à la température de l'air et la tension partielle de l'air. Il est calculé à l'aide de l'expression suivante :

$$E_a = 0.26[e(T_{air}) - e_a](1 + 0.54U) \quad (47)$$

La demande atmosphérique en eau est déterminée par le déficit de saturation de l'air, la température de l'air et la vitesse du vent prise à 2 m. Si cette vitesse est prise à 10 m, il faut remplacer le coefficient 0,54 par 0,4. En remplaçant le rayonnement net R_n par l'exposition énergétique nette H_n et le pouvoir évaporant de l'air par sa valeur moyenne, des valeurs intégrées sur une certaine période peuvent être obtenues. En général, les calculs se font sur une journée.

L'approche de Penman a été étendue par Monteith en 1965. Cet auteur a de la même manière supposé que le flux qui atteint le sol peut pratiquement être négligé et que les coefficients de transfert pour la chaleur et la vapeur d'eau sont identiques. Monteith a indiqué que l'effet global du couvert pouvait être traduit par l'existence d'un niveau moyen identique pour les sources et les puits de chaleur et de vapeur d'eau. T_s représente dans ce cas la température de surface moyenne équivalente du couvert végétal. L'autre différence importante entre l'approche de Monteith et celle de Penman est celle relative à l'évaluation de l'évaporation potentielle. La densité de flux de vapeur d'eau est déterminée en introduisant les résistances aux transferts dans le couvert R_c et dans l'atmosphère R_a .

En reprenant les grandes lignes du calcul [Musy et al. 1991, Monteith et al. 1991], les éléments importants apparaissent sous ces formes et les coefficients des résistances sont donnés dans la suite du document :

$$\varphi_{conv} = \frac{\rho_{air} c_{pair} (T_s - T_{air})}{R_a} \quad (48)$$

$$LE = \frac{\rho_{air} c_{pair} (e(T_s) - e_a)}{\gamma(R_c + R_a)} \quad (49)$$

On obtient :

$$EP = \frac{(Rn - \Delta S)\Delta + (\rho_a c_{pa} (e(T_s) - e_a) / R_a)}{L \left[\Delta + \gamma \left(1 + \frac{R_c}{R_a} \right) \right]} \quad (50)$$

La variation globale d'énergie emmagasinée ΔS est négligeable si l'évapotranspiration est mesurée sur une journée.

Il est intéressant de retenir le résultat avec cette formulation :

$$EP = \frac{EP^*}{1 + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \frac{R_c}{R_a}} \quad (51)$$

En général, dans un couvert végétal, les surfaces évaporantes ne sont pas recouvertes d'eau. Les stomates des feuilles opposent alors une certaine résistance R_s à la diffusion de la vapeur d'eau.

Celle-ci s'ajoute à la résistance R_c opposée par le couvert. La relation entre EP^* et l'évapotranspiration réelle peut donc s'écrire :

$$ETR = \frac{EP^*}{1 + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \frac{Rc + Rs}{Ra}} \quad (52)$$

La valeur de l'évapotranspiration réelle maximum ETR_m sera atteinte lorsque la résistance des stomates aura sa valeur minimale $R_{s,min}$, c'est-à-dire lorsque l'alimentation hydrique sera optimale :

$$ETR_m = \frac{EP^*}{1 + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \frac{Rc + R_{s,min}}{Ra}} \quad (53)$$

Pour un gazon, l' ETR_m diffère de son EP ou même de son EP^* essentiellement en raison de la résistance stomatale $R_{s,min}$ des plantes, la résistance R_c du couvert pouvant être considérée comme négligeable. Si le gazon est bien irrigué et en croissance active, la valeur de $R_{s,min}$ est généralement faible devant R_a et par conséquent :

$$EP_{gazon} = ETR_{m,gazon} \approx EP^*_{gazon}$$

Le calcul de la température de surface (T_s) est alors immédiat à partir des échanges convectifs :

$$T_s = T_a + \frac{R_a}{\rho_{air} c_{pair}} (R_n - LE) \quad (54)$$

A partir de cette dernière formule, on comprend que l'écart entre la température de surface de la végétation et de l'air dépend des apports solaires et des échanges par évaporation. Cette relation permet d'expliquer pourquoi l'excès de température des feuilles peut être important en situation ensoleillée dans des climats froids et faible voire négatif dans des climats chauds [Monteith et al. 1991].

Dans les formules notées ci-dessus, différentes résistances apparaissent (R_a , R_s , $R_{s,min}$ et R_c). La résistance aérodynamique de la feuille (R_a) est fonction de sa géométrie et de la vitesse du vent. Une formule proposée par Barden permet de l'estimer en fonction de la vitesse du vent à la surface (U), d'un coefficient A qui vaut $87 \text{ s}^{0.5} \cdot \text{m}^{-1}$ pour les conifères et l'herbe, et $200 \text{ s}^{0.5} \cdot \text{m}^{-1}$ pour les arbres à feuilles caduques et du diamètre de la feuille (D) qui varie de 0.02 pour les conifères à 0.5 pour les plantes tropicales [Bruse et al. 1998] :

$$R_a = A (D/U)^{0.5} \quad (55)$$

Dans la littérature, une autre relation empirique est utilisée par Landsberg et met en relation la dimension caractéristique de la feuille (d), vitesse du vent au niveau de la canopée (U) et le rapport entre l'aire totale et la section de la couronne dans la direction perpendiculaire au vent (p varie entre 3 et 4 pour un poirier en fleur et entre 0.75 et 1.5 pour un érable) [Kjelgren et al. 1998] :

$$R_a = 58 p^{0.56} (d/U)^{0.5} \quad (56)$$

La résistance stomatale R_s est calculée en fonction des apports radiatifs et de la contenance en eau à l'intérieure de la zone des racines. La résistance stomatale minimale $R_{s, \min}$ dépend du type de végétation et varie de 200 s.m.₁ pour l'herbe à 400 s.m.₁ pour les feuilles caduques [Bruse et al. 1998].

Et enfin la résistance de la canopée (R_c) varie de 70 s.m.⁻¹ pour une herbe rase à 150 s.m.⁻¹ pour une forêt [Oke 1987].

3.3.2.6.3 Estimation de l'évapotranspiration à partir d'autres formules

Les recherches sur la quantification des différentes valeurs d'évapotranspiration nous fournissent un nombre de formules assez conséquent dont la plupart sont recensées dans un ouvrage [Guyot 1996]. Il est possible de faire une distinction entre les formules statistiques et les formules déterminées par des bilans physiques.

Parmi les formules statistiques qui ont été ou qui sont encore les plus utilisées nous pouvons citer celle de Thornthwaite qui est simple d'utilisation car seule la température de l'air est explicitement prise en compte. Cependant les moyennes mensuelles amortissent les résultats, de plus l'humidité de l'air comme la vitesse du vent, qui déterminent le pouvoir évaporant de l'air, n'entrent pas dans les calculs. La formule de Blaney et Criddle (1950) est très couramment employée pour estimer les besoins en eau des cultures à partir de la température moyenne de l'air et la durée relative du jour exprimée en %. Comme cette formule ne tient compte ni de la vitesse du vent, ni de l'humidité de l'air, il est nécessaire d'utiliser des coefficients de correction donnés par des tables ou des abaques (Doorenbos et Pruitt, 1975). Enfin, Turc (1961) a proposé une formule de calcul de l'ETP climatique à la suite d'études statistiques de bilans hydriques à l'échelle décadaire et rend assez bien compte du bilan hydrique à l'échelle du bassin versant.

Dans les formules physiques, celle de Penman dérive de l'équation du bilan d'énergie et n'est en fait théoriquement valable que pour une nappe d'eau libre ou pour un gazon constamment mouillé comme nous l'avons vu précédemment. La formule de Brochet – Gerbier, également appelée formule de la Météorologie Nationale, résulte d'une simplification de la formule de Penman qui donne l'ETP climatique (ETP_c) sous la forme d'une équation faisant intervenir l'exposition énergétique nette, un coefficient de proportionnalité fonction du mois et de la latitude et le pouvoir évaporant de l'air mesuré sous abri avec un évaporomètre Piche (ou atmomètre Piche). Une autre version est parfois donnée, pour laquelle le pouvoir absorbant de l'air est identique à celui calculé dans la formule de Penman. La formule de Bowen est exprimée de manière à faire intervenir le rapport de Bowen qui correspond au rapport entre les échanges par convection et par chaleur latente [Guyot 1996].

Enfin, en simulation numérique des modèles ont été développés pour estimer ces quantités. Un modèle à deux couches, dont une au soleil et une à l'ombre, donne les taux de transpiration calculés à partir d'une équation du bilan d'énergie du type Penman-Monteith [Kjelgren et al. 1998].

Les formules d'estimation de l'évapotranspiration sont basées sur des principes différents. Une comparaison des valeurs qu'elles fournissent dans un même lieu est utile. Ce type d'étude a été réalisé par différents expérimentateurs et on peut se référer aux résultats obtenus à Avignon [Séguin 1975]. L'auteur a comparé les valeurs de l'ETP_c estimées à partir des formules de Thornthwaite, Blaney et Criddle, Turc, Penman et Brochet et Gerbier, aux valeurs de ETR_m mesurées avec un évapotranspiromètre (Tableau 11).

Méthode de détermination	ETPc (mm)	ETPc / ETRm
Evapotranspiromètre	1065	1,00
Thornthwaite	772	0,72
Blaney et Criddle	1104	1,04
Turc	936	0,88
Penman	1030	0,97
Brochet et Gerbier (1)	1111	1,04
Brochet et Gerbier (2)	1032	0,97

Tableau 11 : Comparaison des évapotranspirations annuelles cumulées [Séguin 1975]

Cette étude nous apprend qu'à l'échelle annuelle, les formules de Blaney et Criddle, Penman et Brochet et Gerbier donnent des valeurs satisfaisantes. En revanche les formules de Thornthwaite et, à un degré moindre, de Turc, sous-estiment les valeurs de l'évapotranspiration de 28 et 12 % respectivement. Cependant, cette comparaison à l'échelle annuelle peut être trompeuse car les formules sont susceptibles d'introduire des erreurs importantes à l'échelle mensuelle ou décadaire qui peuvent se compenser à l'échelle annuelle. Ainsi, la formule de Blaney et Criddle, qui donne de bons résultats à l'échelle annuelle, surestime la valeur de ETP en hiver et la sous-estime en été. En revanche, la formule de Thornthwaite et, à un moindre degré, celle de Turc, sous-estiment la valeur de ETP de façon assez régulière au cours de l'année.

La formule de Penman ainsi que les formules de Brochet et Gerbier donnent des résultats beaucoup plus satisfaisants. Avec la formule de Penman, on observe une surestimation de l'ETP en hiver et une sous-estimation en été. Cet écart s'explique par la mauvaise adaptation au climat méditerranéen des coefficients utilisés dans les formules pour calculer l'exposition énergétique nette et le pouvoir évaporant de l'air. Elle apparaît cependant la plus apte à suivre les variations de l'ETP. La méthode simplifiée et mise au point par la météorologie nationale s'avère particulièrement intéressante car elle permet par une procédure simple et rapide d'obtenir des valeurs très proches de la formule de Penman.

Enfin, les calculs basés sur l'équation de Penman Monteith apportent probablement la technique générale la plus puissante pour estimer les taux d'évaporation de la végétation, bien que l'estimation de la résistance des stomates puisse être une limitation majeure. L'utilisation de l'équation de Penman standard pour estimer l'évaporation d'eau libre, associée à des coefficients de correction reste adéquate dans de nombreux cas [Jones 1992].

3.3.2.6.4 Mesures de l'évapotranspiration

L'évapotranspiration d'un arbre peut atteindre jusqu'à 400 litres par jour, ce qui représente une action de refroidissement équivalente à celle de 5 climatiseurs moyens pendant 20 heures en climat chaud et sec [Huang et al. 1987].

L'impact de surfaces comme l'asphalte et la pelouse sur la consommation en eau est analysé en fonction de l'évolution de la résistance des stomates [Kjelgren et al. 1998]. Un poirier en fleur au-dessus de l'asphalte, dans un environnement humide, possède une température de feuillage plus élevée induisant une perte en eau d'un tiers en plus par rapport aux arbres au-dessus de la pelouse alors que la perte en eau d'un frêne vert ou d'un érable de Norvège au-dessus de l'asphalte, dans un environnement aride, est égale voire inférieure à celle au-dessus de la pelouse (Tableau 12). Cette faible perte en eau est due à une fermeture prolongée des stomates. Ce phénomène entraîne une augmentation de la température des feuilles. Nous pouvons donc

retenir que la perte en eau d'un arbre au-dessus de l'asphalte dépend du degré de fermeture des stomates (résistance stomatale), qui est une réaction à l'interception importante des flux d'énergie et à l'écart de pression de vapeur d'eau trop élevé entre l'air et les feuilles.

Date	Perte d'eau journalière (mm)			
	Frêne vert		Erable de Norvège	
	Asphalte	Pelouse	Asphalte	Pelouse
17 juillet	2.60	2.10	1.61	1.33
23 juillet	0.75	2.06	0.49	1.13
13 août	0.97	1.52	0.65	1.46

Tableau 12 : Transpiration d'arbres au-dessus de deux surfaces [Kjelgren *et al.* 1998]

Des mesures équivalentes réalisées sur un troène du Japon (*Ligustrum Japonicum*), arbuste à feuilles persistantes réputé pour sa forte consommation en eau, détaillent les transferts d'eau pour trois journées types (normale, aride et nuageuse) [Levinson 1997]. Les jours normaux et arides sont caractérisés par une évapotranspiration plus rapide en matinée qu'en après-midi bien que l'air soit plus chaud et plus sec l'après-midi (fermeture des stomates). Les résistances stomatales, calculées les jours normaux, nuageux et arides, à midi, sont respectivement de 500, 250 et 1200 s/m.

Les caractéristiques des pertes en eau varient fortement entre les végétaux [Kjelgren *et al.* 1998]. Dans la nature et l'environnement urbain, des mesures ne sont pas toujours possibles et des estimations peuvent être proposées en utilisant un coefficient spécifique (k) qui correspond au rapport entre la valeur réelle qui intègre les phénomènes de résistance et de fermeture des stomates et une valeur de référence en condition idéale, à savoir sans aucune résistance. Ainsi, il est possible de considérer que l'évapotranspiration réelle, ETR que l'on note plus simplement E, est reliée à l'évapotranspiration potentielle par la formule suivante :

$$E = kETP^* \quad (57)$$

Les valeurs de k sont données par le tableau suivant (d'après [Kjelgren 1998]) :

Végétation	Commentaires	Rapport k
Gazon	Saison froide	0.8
	Saison chaude	0.65
Arbres	Forte consommation d'eau	0.5-0.6
	Consommation d'eau modérée	0.4-0.5
	Arbre isolé	0.4 LAI (Indice foliaire)

Table: Valeurs du coefficient k (d'après [Kjelgren 1998])

L'augmentation des arbres devrait entraîner une augmentation des quantités d'eau nécessaires pour l'irrigation et une augmentation des déchets solides générés. Cependant, l'utilisation d'arbres à la place de la pelouse peut réduire de manière drastique les besoins en eau d'une communauté et l'utilisation de buissons à la place des arbres réduit encore plus la consommation en eau [Akbari *et al.* 1992]. Dans les climats arides, il est intéressant d'utiliser la végétation locale qui est moins consommatrice d'eau.

3.3.2.7 Simulation de l'impact des arbres en microclimatologie urbaine

Le type d'approche que nous souhaitons réaliser grâce à la simulation numérique des transferts de chaleur en milieu urbain avec prise en compte de la végétation est un thème qui se développe

et qui motive un certain nombre de laboratoires. Nous présentons ici deux recherches parmi les plus intéressantes.

Des observations et des simulations ont été menées dans la région suburbaine et dans le centre de Tokyo afin d'y étudier l'intensité de l'îlot de chaleur et de vérifier un modèle numérique [Vu Thanh Ca et al. 1998]. Dans la région suburbaine, une diminution de 3 °C par rapport à une zone résidentielle est constatée dans une zone qui correspond à deux petits parcs dans lesquels on trouve de grands arbres. Même avec un taux important d'évapotranspiration, la température de l'air au niveau d'un champ en herbe est légèrement supérieure à celle du parc. Cela est dû au fait qu'il n'y ait pas d'ombrage et qu'un fort vent transporte de la chaleur d'une zone résidentielle proche. Dans la région du centre d'affaires de Tokyo, où les bâtiments sont nombreux (les plus élevés atteignent 40 m) et où les arbres sont rares, la température moyenne est de 2 °C supérieure. Cependant, le maximum de température d'air dans cette zone est inférieur à 34 °C, ce qui est inférieur à la valeur correspondante pour la zone suburbaine. Cela peut être expliqué par l'ombre des bâtiments élevés. Les zones avec une forte température de l'air sont celles ayant une surface pavée et avec un rapport de bâti faible. Les zones avec une température d'air faible sont celles où des arbres sont présents.

Les modifications induites par la construction d'un petit parc (120 m sur 60 m) en milieu urbain à la place d'un bâtiment avec une cour intérieure et l'ajout d'arbre le long d'une rue (Figure 31) ont été simulées [Bruse et al. 1998]. La distribution horizontale et verticale de la température résulte de la prise en compte des écoulements aérauliques et des températures de surface différentes dues à l'ombre des maisons et des arbres. Grâce à ce type de simulation à échelle microclimatique, des effets complexes apparaissent et permettent une analyse détaillée du comportement thermo-aéraulique de cet espace urbain.

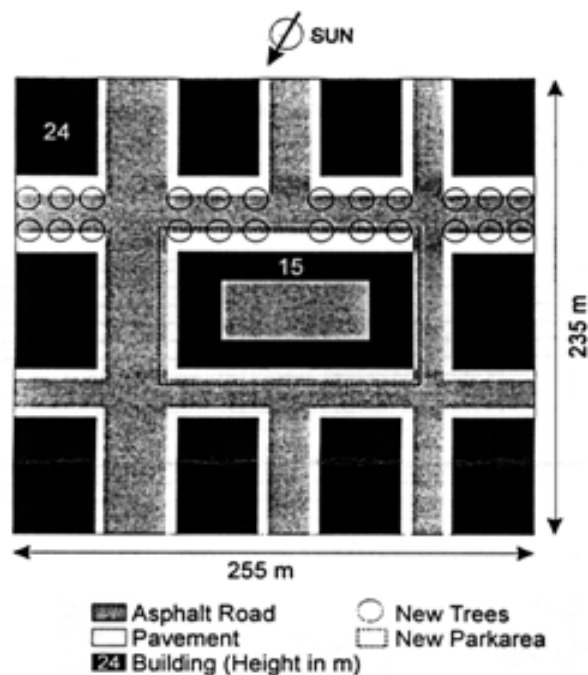


Figure 31 : Impact microclimatique [Bruse et al. 1998]

3.4 Conclusion

L'analyse des relations entre l'eau et la ville nous montre que cet élément naturel est fortement présent pour de nombreuses raisons, parmi lesquelles son influence sur la régulation du climat est à souligner. L'évaporation de l'eau nous a permis de rappeler certains phénomènes physiques et surtout d'expliquer les processus liés aux transferts de chaleur et de masse. Ces rappels nous sont utiles afin de définir le comportement thermique des sites dans lesquels l'eau est présente.

A travers cette étude bibliographique, nous avons essayé de souligner l'importance de la présence de la végétation en milieu urbain. En effet, après avoir rappelé les dimensions symboliques, les qualités esthétiques et multi-sensorielles mises en œuvre, nous avons cherché à définir certaines relations entre la ville et la végétation. Ainsi, nous avons pu constater que l'utilisation des arbres et des espaces verts dans des projets urbains ou architecturaux ne pouvait être qu'un élément favorable à l'amélioration du cadre de vie.

Puis, en se concentrant sur l'impact énergétique de la végétation dans un contexte urbain, nous nous sommes aperçus que les recherches étaient souvent effectuées à une échelle qui est celle de la ville ou de la campagne, que les préoccupations apparaissent sous forme d'économie d'énergie ou de quantité d'eau à fournir pour des récoltes. Afin d'analyser l'influence à un niveau microclimatique, nous avons adopté une approche multi-critères des phénomènes physiques, dans un cadre urbain, à une échelle perceptible par l'homme. Ainsi, l'analyse des impacts de la végétation suivant des modalités différentes permet de dresser des bilans assez complets dont les éléments font appel à des champs d'investigation différents.

Cette analyse de travaux démontre, s'il en était besoin, que l'investigation que nous souhaitons développer sur les effets de la végétation correspond à des préoccupations qui motivent un grand nombre d'équipes de recherche. Une analyse plus synthétique est maintenant à mettre en place. Les modalités d'étude sont diverses et se retrouvent réparties en majorité entre la mesure et la simulation. Les informations recueillies dans ces deux domaines nous intéressent car même si notre démarche a pour but la mise au point d'un outil de simulation thermo-aéraulique, les comparaisons possibles avec certains résultats expérimentaux apportent des éléments de validation.

Des éléments méthodologiques ont pu être apportés pour les principaux phénomènes que nous désirons modéliser. Dans ce chapitre nous avons souhaité apporter les résultats d'expériences ou de mesures. Grâce au travail de synthèse effectué, les comportements globaux de l'eau et de la végétation sont mieux appréhendés et il est désormais possible de passer à la phase de simulation que nous discutons dans la deuxième partie de cette étude.

3.5 Références bibliographiques

- [Akbari *et al.* 1992] AKBARI H., DAVIS S., DORSANO S. *et al.* (1992). Cooling our communities – a guidebook on tree planting and light colored surfacing. U.S. Environmental Protection Agency. Office of Policy Analysis, Climate Change Division. Berkeley : Lawrence Berkeley Laboratory, 217 p.
- [Alvarez *et al.* 1989] ALVAREZ *et al.* (1989). Acondicionamiento climatico de los espacios abiertos en Expo'92. Laminas de agua. Sevilla : Universidad de Sevilla.
- [Alvarez *et al.* 1992] ALVAREZ D. S., CEJUDO L. J.M., GUERRA M. J.J. *et al.* (1992). Control climatico en espacios abiertos, El Proyecto Expo'92. Sevilla: Ciemat, pp.4-49.

- [Alvarez *et al.* 2000] ALVAREZ S., BLANCO A., SANCHEZ F.J. *et al.* (2000). Case study X: 'Ensanche de Vallecas'. Greencode : Reglementary frame for renewable energy use in urban site through vegetation plannings ans strategic surfacing. ALTENER – DG XVII (in press).
- [Avisar 1996] AVISSAR, R. (1996). Potential effects of vegetation on the urban thermal environment. *Atmospheric Environment*, Vol 30, n 3, pp. 437-448.
- [Belarbi *et al.* 1998] BELARBI, R. and ALLARD, F. (1998). Atlas of natural cooling techniques in Southern Europe application to evaporative cooling systems. In : Proceedings of EPIC'98, 2nd European conference on energy performance and indoor climate in buildings and 3rd Intenational conference on indoor air quality, ventilation and energy conservation in buildings, November 19-21. Lyon : ENTPE, pp. 763 –768.
- [Berger 1998] BERGER, X. (1998). Human thermal comfort at Nîmes in Summer heat. In proceedings of EPIC'98, 2nd european conference on energy performance and indoor climate in buildings and 3rd intenational conference on indoor air quality, ventilation and energy conservation in buildings, November 19-21 Lyon : ENTPE, pp. 201-206.
- [Bottema 1992] BOTTEMA, M. (1992). Wind climate and urban geometry. Eindhoven: University of Technology, 212 p.
- [Brown *et al.* 1995] BROWN, R. D. and GILLESPIE, T. J. (1995). Microclimatic Landscape design. Creating thermal comfort and Energy Efficiency. New york : Wiley J. and Sons, 193 p.
- [Bruse *et al.* 1998] BRUSE, M. and FLEER, H. (1998). Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software*, Vol 13, Issue 3-4, pp. 373-384.
- [Cabanel 1993] CABANEL, J. In STEFULESCO, C (1993). L'urbanisme végétal. Paris : IDF, 323 p. (avant-propos, p 9).
- [Coombes 1993] COOMBES A. J. (1993). Les arbres. Paris : Bordas, 1993. Collection L'œil Nature. Traduction Isabelle Delvallée, 320 p.
- [De La Torre *et al.* 1998] De La TORRE, J. M. O. and SERRA, R. (1998). Microclimatic analysis of some urban scenarios. In proceedings of PLEA 98, Lisbon, Portugal, June 1998. London: James & James, pp. 159 – 162.
- [De Sablet 1988] De SABLET, M. (1988). Des espaces urbains agréables à vivre – Places, rues, squares et jardins. Paris : Moniteur. La végétation urbaine pp. 127-135.
- [Destobbeleire *et al.* 1998] DESTOBBELEIRE, G. and IZARD, J-L. (1998). Rôle de la végétation sans le microclimat urbain : utilisation de la thermographie. In : Proceedings of EPIC'98, 2nd European conference on energy performance and indoor climate in buildings and 3rd Intenational conference on indoor air quality, ventilation and energy conservation in buildings, November, 19-21. Lyon : ENTPE, pp. 749 – 755.
- [Equipe ARTOPOS 1997] EQUIPE ARTOPOS (1997). Morphologie, végétal et microclimats urbains. Cas d'Aix-en-Provence et de Nîmes. Tome 1, le contexte, analyse urbaine. Plan urbain, Ministère de l'Equipement, 52 p (+ fiches).
- [Escourrou 1981] ESCOURROU, G. (1981). Climat et environnement, Les facteurs locaux du climat. Paris : Masson, 182 p.

- [Fernandes *et al.* 1998] FERNANDES E. O., ALMEIDA F. and CARDOSO P. (1998). Energy and environment at EXPO'98 Lisbon. In : Proceedings of PLEA 98. Environmentally Friendly Cities, Proceedings of PLEA 98, Lisbon, Portugal, June 1998. London : James & James, pp. 7 – 12.
- [Gandemer *et al.* 1981] GANDEMER, J et GUYOT, A. (1981). La protection contre le vent. Paris : CSTB, 132 p.
- [Gao *et al.* 1995] GAO, W. SUGIYAMA, H. and OJIMA, T. (1995). Field study of effect of street and its trees on thermal environment of sidewalks. Journal of Architecture and Planning Environment Engineering, n° 469, pp. 53-64.
- [Givoni 1991] GIVONI, B (1991). Impact of planted areas on urban environmental quality : a review. Atmospheric environment Vol n°3, pp. 289-299.
- [Gomez *et al.* 1998] GOMEZ, F. *et al.* (1998). The green zones in bioclimatic studies of the Mediterranean city. In : Proceedings of PLEA 98, Lisbon, Portugal, June 1998. London : James & James, pp. 207 – 210.
- [Grimal 1990] GRIMAL, P. (1990). Un urbanisme de l'eau à Rome. In : Le grand livre de l'eau. Paris : La Cité des Sciences, 15 p.
- [Gross 1987] GROSS, G. (1987). A numerical study of the air flow within and around a single tree. Boundary-Layer Meteorology, 40, pp. 311-327.
- [Groupe ABC 1997] GROUPE ABC (1997). Morphologie, végétal et microclimats urbains. Cas d'Aix-en-Provence et de Nîmes. Tome2, les mesures. Plan urbain, Ministère de l'Equipement, pp. 131 - 133.
- [Guerra *et al.* 1994] GUERRA *et al.* (1994). Control climatico en espacios abiertos: evaluacion del proyecto Expo'92. Sevilla : Grupo de Termotecnia, Universidad de Sevilla.
- [Guerra *et al.* 1996] GUERRA J. J., ESTEBAN C. J. and MOLINA J. L. (1996). Detailed Modelling of Roof Ponds Including Sprays and Covering. Meeting at CIEMAT, Madrid (Spain), December 1996.
- [Guillerme 1983] GUILLERME, A. (1983). Les temps de l'eau. Paris : Chauvillon, 263 p.
- [Guillerme 1994] GUILLERME, A. (1994). La disparition des saisons dans la ville, les années 1830-1860. Les annales de la recherche urbaine n°61, 7 p. Les saisons dans la ville.
- [Guyot 1988] GUYOT, A. (1988). L'arbre élément du confort vivant. In : Vivre dehors, confort des espaces publics. Manosque : actes de colloques, pp. 71 – 80.
- [Guyot 1996] GUYOT, G. (1996). Climatologie de l'environnement - De la plante aux écosystèmes. Paris : Masson, 505 p.
- [Haddad 1997] HADDAD, Y. (1997). Les arbres d'alignement urbains, un enjeu pour les partenaires multiples. Les Annales de la Recherche Urbaine, n°74, pp. 113-118. Titre du numéro : Natures en Villes.
- [Heisler 1989] HEISLER, G. M (1989). Mean windspeed below building height in residential neighborhoods. In : Proceedings of the workshop on saving energy and reducing atmospheric pollution by controlling Summer heat islands. Berkeley: Applied Science Division LBL, pp. 256 – 272.

- [Heschong 1981] HESCHONG, L. (1981). *Architecture et volupté thermique*. Paris : Parenthèses, 93 p. Traduction : GUILLAUD, H
- [Hoyano 1988] HOYANO, A (1988). Climatological uses of plants for solar control and the effects on the thermal environment of a building. *Tokio Institute of Technology, Japan. Energy and Buildings*, 11, pp. 181 - 199.
- [Huang *et al.* 1987] HUANG, Y. J. *et al.* (1987). The potential of vegetation in reducing Summer cooling loads in residential buildings. Berkeley: University of California, 32 p.
- [Izard *et al.* 1979] IZARD, J. L. et GUYOT, A. (1979). *Archi Bio*. Paris : Parenthèse, 135 p.
- [Jones 1992] JONES, H. G. (1992). *Plants and microclimate : A quantitative approach to environmental plant physiology*. 2nd Edition, Cambridge University Press, 428 p.
- [Kanda *et al.* 1997] KANDA *et al.* (1997). Environmental effect of Meiji-Shrine forest as a sink of energy and pollutant – field observation and numerical Simulation by SPAM3. In : *Proceedings of International on monitoring and management on urban heat island*. Fujisawa, pp. 69-83.
- [Kjelgren *et al.* 1996] KJELGREN, R. and MONTAGUE, T. (1996). Isolated tree water use in various surfaces. In : *Proceedings of the International conference on evapotranspiration and irrigation scheduling*, , San – Antonio, pp. 250-256.
- [Kjelgren *et al.* 1998] KJELGREN, R. and MONTAGUE, T. (1998). Urban tree transpiration over turf and asphalt surfaces. *Atmospheric Environment* , Vol 12, n°1, pp. 35-41.
- [Klitsikas *et al.* 2000] KLITSIKAS N., GEORGAKIS C. and SANTAMOURIS M. (2000). Greek case study : the National Park of Athens. *Greencode : Reglementary frame for renewable energy use in urban site through vegetation plannings ans strategic surfacing*. ALTENER – DG XVII (in press).
- [Kobayashi *et al.* 1994] KOBAYASHI, M. H. *et al.* (1994). Numerical study of the turbulent flow over and in a model forest on a 2d hill. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 53, pp. 357-374.
- [Larue 1996] LARUE, D. (1996). *L'arbre dans la ville*. Edition Sang de la terre et Foncier Conseil, Paris, 168 p. Collection écologie urbaine.
- [Lavedan *et al.* 1966] LAVEDAN, P et HUGUENEY, J. (1966). *Histoire de l'urbanisme, Antiquité*. Paris : Laurens, p 63.
- [Levinson 1997] LEVINSON, R. M. (1997). Near-ground cooling efficacies of trees and high-albedo surfaces. Ph. D. Thesis. Berkeley: Department of Mechanical Engineering, University of California and Environmental Energy Technologies Division, LBNL, 148 p.
- [Liu *et al.* 1996] LIU *et al.* (1996). Modelling of turbulent air flow downwind of a model forest edge. *Boundary-Layer Meteorology*, 77, pp. 21-44.
- [Maillet *et al.* 1993] MAILLET, L. et BOURGERY, C (1993). *L'arboriculture urbaine*. Paris : édition I.D.F., 320 p. Collection Mission du Paysage.
- [Malverti *et al.* 1994] MALVERTI, X. et PICARD, A. (1994). Les saisons dans la rue. Paris : *Les annales de la recherche urbaine*, n° 61, pp. 114-120. Les saisons dans la ville.

- [Meerow *et al.* 1993] MEEROW, A. W. and BLACK R.J. (1993). *Enviroscaping to conserve energy: a guide to microclimate modification*. Florida: University of Florida, 9 p.
- [Monteith *et al.* 1991] MONTEITH J.L. and UNSWORTH M.H. (1991). *Principles of environmental physics*. New York : Edward Arnold, 291 p.
- [Muret *et al.* 1987] MURET, J. P. *et al.* (1987). *Les espaces urbains – concevoir, réaliser, gérer*. Paris : édition du Moniteur, 364 p.
- [Musy *et al.* 1991] MUSY, A. et SOUTTER, M (1991). *La physique du sol*. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 335 p. Collection Gérer l'environnement.
- [Oke 1987] OKE, T.R. (1987). *Boundary layer climates*. London and New York : Methuen, Second edition (first edition 1978), 435 p.
- [Parker 1989] PARKER, J. H. (1989). The impact of vegetation on air conditioning consumption. In *proceedings of workshop on saving energy and reducing atmospheric pollution by controlling Summer heat islands*. Berkeley: Applied Science Division LBL, pp. 45 – 52.
- [Raessi *et al.* 1999] RAESSI, S. and TAHERI, M. (1999). Energy saving by proper tree plantation. *Building and Environment* 34, pp. 565-570.
- [Robinette 1972] ROBINETTE, G. (1972). *Plants / people / and environmental quality*. Washington, D. C., Department of the Interior, 140 p.
- [Roodbaraky *et al.* 1994] ROODBARAKY, H.J *et al.* (1994). Experimental observation of the aerodynamic characteristic of urban trees. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 52, pp. 171-184.
- [Sacadura 1982] SACADURA, J. F. (1982). *Initiation aux transferts thermiques*. Paris : Technique et Documentation, 445 p.
- [Sailor *et al.* 1992] SAILOR *et al.* (1992). Measured impact of neighborhood tree cover on microclimate. Berkeley: Energy & Environment Division, LBL, University of California, 19 p.
- [Sailor 1998] SAILOR, D. J. (1998). Simulations of annual degree day impacts of urban vegetative augmentation. *Atmospheric Environment*, Vol 32, No 1, pp. 43 – 52.
- [Saugier 1996] SAUGIER, B (1996). *Végétation et atmosphère*. Paris : Dominos, Flammarion, p 149.
- [Scudo *et al.* 1998] SCUDO, G. *et al.* (1998). Microclimatic effect of vegetation in urban squares. Cases studies in Milan. In : *Proceedings of Rebuild*, Florence, April 1998, edited by Butera, F. *et al.* 403 p, pp 129 – 132.
- [Séguin 1975] SEGUIN, B (1975). Etude comparée des méthodes d'estimation D'ETP en climat méditerranéen du sud de la France (région d'Avignon). *Annales Agronomiques*, INRA, pp. 671-691.
- [Simpson *et al.* 1998] SIMPSON, J. R. and Mc PHERSON, E. G. (1998) Simulation of tree shade impacts on residential energy use for space conditioning in Sacramento. *Atmospheric Environment*, Vol 32, No 1, pp. 69 – 74.

- [Stathopoulos *et al.* 1994] STATHOPOULOS, T. *et al.* (1994). Wind shielding effects of trees on low buildings. *Building and Environment*, 29, 2, pp. 141-150.
- [Stefulesco 1993] STEFULESCO, C. (1993). *L'urbanisme végétal*. Paris : I.D.F, 323 p.
- [Upmanis 1998] UPMANIS, H. (1998). Daytime Summer temperature differences between a green area and Its build-up surroundings in a high latitude city. In second urban environment symposium and 13th conference on biometeorology and aerobiology, November, 2 – 6. Albuquerque: American Meteorology Society, pp. 210 - 211.
- [Upmanis *et al.* 1998] UPMANIS, H. *et al.* (1998). The influence of green areas on nocturnal temperatures in a high latitude city (Göteborg, Sweden). *International Journal of Climatology*, 18, pp. 681 – 700.
- [Vian *et al.* 1983] VIAN, C *et al.* (1983). *L'Alhambra de Grenade*. Paris : Atlas, 80 p.
- [Vilain 1993] VILAIN, M (1993). *La production végétale*. Deuxième édition, vol 1. Paris : édition Lavoisier, 438 p. Collection Agriculture d'aujourd'hui.
- [Vitruve (Fleury) 1990] VITRUVÉ (1990). *Les dix livres de l'architecture*. Livre 1. Paris : Les Belles Lettres. Traduction de FLEURY, P.
- [Vu Thanh Ca *et al.* 1998] VU THANH CA *et al.* (1998). A numerical model for the urban climate. In second urban environment symposium and 13th conference on biometeorology and aerobiology, November, 2 – 6. Albuquerque: American Meteorology Society, pp. 6 – 9.
- [Watanabe 1994] WATANABE, T. (1994). Bulk parametrization for a vegetated surface and its application to a simulation of nocturnal drainage flow. *Boundary-Layer Meteorology* 70, pp. 13-35.

4 Le confort thermique en extérieur

4.1 Introduction

Avant de définir la notion de confort thermique en extérieur, il est intéressant de s'attarder sur les définitions relevées dans la littérature, du confort thermique en général. Les auteurs sont nombreux et convergent généralement vers le point de vue qu'une ambiance confortable est une ambiance pour laquelle l'organisme humain peut maintenir constante sa température corporelle (homéothermie) sans mettre en jeu d'une manière perceptible, donc désagréable, ses mécanismes instinctifs thermorégulateurs de lutte contre le chaud et le froid [Depecker *et al.* 1989]. Le confort thermique de l'être humain correspond à une motivation simple mais permanente qui le pousse à rechercher, voire créer, certaines situations climatiques, à en maintenir certaines d'entre elles et à les juger en terme d'agrément ou de désagrément [Galeou *et al.* 1989]. La définition la plus large est celle proposée par l'ASHRAE puisqu'elle considère que le confort thermique est atteint lorsque l'individu exprime une satisfaction au sujet de son environnement [ASHRAE 1993b].

Cependant, signalons que d'autres auteurs affirment que le confort n'est pas forcément lié au maintien permanent de la neutralité thermique, mais qu'il peut aussi résulter de l'alternance de stimuli qui se compensent, à condition que le sujet en ait une maîtrise parfaite [Hofmann 1994] et que pour d'autres encore, des variations de confort, en fonction de la localisation de l'individu et de l'instant de la journée, sont nécessaires dans les espaces publics [Teller 1998]. Globalement, le confort thermique peut être défini comme une sensation complexe produite par de nombreux facteurs, conduisant l'individu à exprimer le bien-être de son état. La sensation de confort thermique reste cependant une notion personnalisée, dans la mesure où les individus sont différents [Depecker *et al.* 1989]. Des travaux récents sur la notion de confort adaptatif mettent en avant ces variations individuelles, conduites par des stratégies personnelles qui peuvent être d'ordre physiologique, psychologique, sociale, culturelle ou comportementale [Humphreys *et al.* 1998].

Malgré la complexité évidente d'appréhension de cette notion, il est possible d'estimer des circonstances dans lesquelles aucune situation de confort n'est atteinte (stress thermique) et il est également envisageable de comparer deux états de confort en termes relatifs, comme par exemple, la variation du niveau de confort dû à un nouvel aménagement. C'est pourquoi, nous ne pouvons faire autrement que d'approcher la sensation de confort thermique à travers la connaissance des différents échanges thermiques entre l'individu et son environnement. Ainsi, nous entamons cette partie par l'analyse des différents paramètres relatifs à l'environnement et à l'individu. Nous présentons quelques rappels sur des éléments de physiologie humaine (températures internes et cutanées, mécanismes de thermorégulation et comportement du corps en régime transitoire). Nous pouvons alors définir les échanges thermiques entre l'homme et son milieu. Certains indices permettent d'approcher et de quantifier la part objective ou quantifiable du confort thermique à l'intérieur du bâtiment, nous présentons les principaux en essayant d'insister sur leurs spécificités. Enfin, nous terminons ce chapitre par la définition et la caractérisation du confort thermique d'un individu en extérieur et notamment pour des climats chauds et nous proposons des indices applicables dans les simulations des espaces urbains. Notre souci étant bien évidemment de dégager les informations importantes pour que nous puissions par la suite grâce à une approche de type modélisation, quantifier certains de ces indices et apporter une analyse comparative sur le comportement des espaces étudiés et sur leur impact au niveau du confort de l'utilisateur.

4.2 Les paramètres du confort thermique

Les relations entre l'individu et son environnement sont déterminantes dans l'estimation des situations de confort. Avant de présenter les différents indices de confort en espace intérieur et extérieur, nous commençons par détailler les différents paramètres qui interviennent.

4.2.1 Paramètres relatifs à l'environnement

Dans la description des éléments concernant le confort thermique, la prise en compte de l'environnement relatif à l'individu nécessite la connaissance précise de quatre paramètres microclimatiques importants :

- Température de l'air
- Température radiante moyenne
- Humidité de l'air
- Vitesse de l'air

En extérieur, en plus de tous les paramètres précédemment cités, il faut prendre en compte :

- Les apports solaires (directs, indirects et diffus)
- La température de la voûte céleste
- Les phénomènes naturels : la pluie, la grêle, la neige, etc.

Alors que dans les espaces intérieurs la notion de confort thermique est intrinsèquement liée à la valeur de la température de l'air, en extérieur il est indispensable d'insister sur l'importance des rayonnements solaires réellement reçus par l'individu. Des vitesses de courant d'air qui auraient pu paraître insupportables dans un bâtiment peuvent devenir, en situation chaude, non seulement tolérables mais parfois indispensables de manière à favoriser l'évacuation de la chaleur par transpiration. Un point qui doit également être souligné est la plus grande diversité des surfaces de l'environnement construit (matériaux, couleurs, végétation) qui induit une non homogénéité des transferts de chaleur et la plus grande complexité des géométries à envisager en espaces extérieurs. Le traitement des facteurs de forme devient alors un élément primordial.

4.2.2 Paramètres relatifs à l'individu

4.2.2.1 Mécanismes de thermorégulation

L'homme est un être homéotherme. Sa température interne doit être comprise entre 36.8 °C et 37.2°C (inconfort généralisé en dessous de 36.5 °C et au-dessus de 37.4°C) pour un individu au repos et elle doit être comprise entre 37.0 °C et 37.5 °C pour un individu au travail (> 2 met, 1 met étant équivalent à 58.2 W/m²) [Galeou et al. 1989].

Le corps humain tend à maintenir constante sa température interne à environ 37 °C, comme nous venons de le signaler, cependant on peut relever trois éléments qui peuvent faire varier cette valeur : une variation diurne d'environ 1 °C (cycle circadien du métabolisme basal), l'activité (variation linéaire de 37 °C au repos à 38.5 °C pour 500 W/m² [Mc Intyre 1980]) et la température ambiante (l'amplitude de variation peut être de 1°C pour des changements de température compris entre 30 et 48 °C [Stolwijk et al. 1966]).

La température moyenne de la peau peut évoluer entre 33.5 °C et 34.5 °C chez l'homme dévêtu et au repos (inconfort généralisé en dessous de 32.5 °C et au-dessus de 35.5 °C), alors qu'elle peut varier entre 33.0 °C et 34.5 °C chez l'homme vêtu (inconfort généralisé en dessous de 32.5°C et au-dessus de 34.8°C). La température de la peau est fortement dépendante de la température ambiante et est quasi indépendante du métabolisme [Mc Intyre 1980]. La température de la peau peut être déterminée grâce à une équation empirique [Alvarez et al. 1992], dans laquelle la température de l'air (T_a), le métabolisme (M) et l'isolation des vêtements (I_{cl}) interviennent :

$$T_{sk} = 29.55 + 0.196 T_a - 1.064 M * (1 - 0.295 I_{cl}) \quad (58)$$

Lorsque le corps est soumis à des conditions thermiques défavorables, des mécanismes de régulation apparaissent.

Ainsi, en condition froide, le corps peut lutter en générant un mécanisme thermoprotecteur qui est le frisson.

Les deux mécanismes de thermorégulation en situations chaudes sont la vasodilatation et la transpiration. La vasodilatation est un phénomène permettant une augmentation du transfert de chaleur entre la peau et l'extérieur. L'augmentation du débit sanguin, jusqu'à dix fois dans l'ensemble du corps et 30 fois dans les mains, entraîne une modification de la « conductivité apparente », pouvant aller jusqu'à 55 W/m².°C [Stolwijk 1966]. Ce mécanisme a une faible efficacité, il ne peut compenser qu'un degré d'élévation de température ambiante entre 30 et 34°C.

La transpiration, grâce à l'évaporation de la sueur est le principal mécanisme de thermorégulation. Chez l'homme exposé à la chaleur la production et l'évaporation de la sueur représentent le mécanisme thermorégulateur le plus puissant et à la limite, le seul efficace pour lutter contre l'hyperthermie. L'évaporation fatigue l'organisme parce qu'elle entraîne une perte importante d'eau et d'électrolytes (Na⁺, K⁺ : désodification), alors que la perspiration n'engendre qu'une perte d'eau [Lemaire 1966].

4.2.2.2 Le métabolisme

L'homme produit une certaine quantité de chaleur en fonction de son activité que l'on appelle production métabolique. Le métabolisme peut se décomposer en une partie purement thermique (M_{th}) et une partie « mécanique » (W) :

$$M = M_{th} + W \quad (59)$$

Le rendement mécanique ($\eta_w = W/M$) n'excède pas 0.2. Des valeurs du métabolisme sont répertoriées pour différentes activités (Tableau 13), pour un sujet standard (70 kg et surface de corps S_D : 1.8 m²) [Depecker et al. 1989].

Activité	M (W)	M _{th} (W)	W (W)
Sommeil	75	75	0
Assis, au repos	105 - 110	105 – 110	0
Secrétariat	125	125	0
Danse slow	125	125	0
Assis, écriture	125	125	0
Debout, relax	125 - 130	125 – 130	0
Travail de laboratoire	170	170	0
Enseignement	170	170	0
Activité dans la maison	180	180	0
Debout, travail léger des bras	180	160	20
Vente	210	200	10
Marche (1.6 km/h) pente 5 %	250	230	20
Travail sur machine outil	290	260	30
Gymnastique	360	330	30
Marche rapide(4.8 km/h pente 5 %)	420	375	45
Travail de pelletage	460	390	70
Danse rock	460	460	0
Tennis	480	450	30
Creusement de tranchées	630	510	120
Marche forcée(6.4 km/h pente 5 %)	640	580	60
Squash	750	700	50
Basket ball	790	750	40

Tableau 13 : Métabolisme thermique et énergie mécanique [Depecker *et al.* 1989]

On préfère rapporter les valeurs à l'unité de surface cutanée. Ainsi, on utilise la formule dite de « l'aire de Dubois » [Hofmann 1994] pour évaluer cette aire cutanée :

$$A_{Du} = 0.202 P^{0.425} H^{0.725} \quad (60)$$

Avec, P : poids de l'individu [kg]

H : taille de l'individu [m].

L'aire est d'environ 1.8 m² pour un individu moyen (1,7 m et 70 kg).

Ainsi, il est possible de définir une unité, le met, qui correspond à 58,15 W/m² (métabolisme moyen d'une personne assise au repos). L'activité lorsqu'elle est exprimée en met s'écrit parfois « act » dans les bilans.

4.2.2.3 Les vêtements

Les difficultés à définir les caractéristiques thermiques des vêtements sont nombreuses et représentent un problème lors des prévisions de confort. La résistance thermique du vêtement aux transferts de chaleur (I_{cl} ou R_v) est souvent exprimée dans une unité que l'on note clo (1 clo = 0.155 m².K/W). Un clo représente l'isolation apportée par une tenue d'intérieur typique d'hiver. L'isolation thermique d'un vêtement peut être soit mesurée, soit calculée en cumulant l'isolation des différentes parties du vêtement [Sprague *et al.* 1974] :

$$\text{Hommes : } I(\text{ens}) = 0.113 + 0.727 \sum I(\text{pièces}) [\text{clo}] \quad (61)$$

$$\text{Femmes : } I(\text{ens}) = 0.05 + 0.77 \sum I(\text{pièces}) \text{ [clo]} \quad (62)$$

On retrouve une formule simplifiée dans la norme ASHRAE 55-81 :

$$I(\text{ens}) = 0.82 \sum I(\text{pièces}) \quad (63)$$

Les valeurs des isolations thermiques de la plupart des vêtements sont données (Tableau 14) ainsi que les valeurs moyennes de l'ensemble des vêtements dans des situations courantes (Tableau 15) [Depecker et al. 1989].

Vêtements d'hommes	$I_{cl.} \cdot 10^4$	Vêtements de femmes	$I_{cl.} \cdot 10^4$
Maillot de corps	93	Slip	20
Tee shirt	140	Soutien-gorge	60
Slip	80	Combinaison courte	200
Tee shirt à manches	155	Combinaison longue	300
Caleçon long	155	Tee shirt à manches	310
Chemise légère		Blouse légère	310
manches courtes	220	Blouse chaude	450
manches longues	340	Robe légère	340
Chemise chaude		Robe chaude	1080
manches courtes	390	Jupe légère	155
manches longues	450	Jupe chaude	340
Veste légère	230	Pantalon léger	400
Veste chaude	450	Pantalon chaud	680
Pantalon léger	250	Pull over léger	260
Pantalon chaud	500	Pull over chaud	570
Pull over léger	310	Cardigan léger	260
Pull over chaud	350	Cardigan chaud	570
Cardigan léger	340	Bas	16
Cardigan chaud	570	Collant	18
Chaussettes	60	Chaussures	
Chaussettes montantes	155	sandales	30
Chaussures		escarpins	60
sandales	30	bottes	125
mocassins	60		
bottes	125		

Tableau 14 : Valeurs des résistances propres I_{cl} de quelques vêtements [Depecker *et al.* 1989]

Eté $R_v \text{ (m}^2\text{°C/W)}$	Printemps – Automne $R_v \text{ (m}^2\text{°C/W)}$	Hiver $R_v \text{ (m}^2\text{°C/W)}$
0.08	0.109	0.158
0.166	0.213	0.225

Tableau 15 : Valeurs moyennes (hommes et femmes) des I_{cl} [Depecker *et al.* 1989]

Les vêtements non seulement influencent les échanges de chaleur sensible, mais en plus peuvent freiner la diffusion de l'humidité évaporée sur la peau. Ainsi, un coefficient d'efficacité de perméation de la vapeur d'eau, noté F_{pcl} , qui varie de 0 pour un vêtement étanche à 1 en l'absence de vêtement, permet de décrire la puissance dissipée par évaporation [Nishi et al. 1970] :

$$E_{\text{v\^etu}} = F_{\text{pcl}} \cdot E_{\text{nu}} \quad (64)$$

$$F_{\text{pcl}} = 1 / (1 + 0.143 h_c I_{\text{cl}}) \quad (65)$$

Notons que la valeur de 0.143 a été contestée par certains chercheurs [Candas et al. 1991] et que ce coefficient ne dépend pas du type de tissu, ce que l'expérience confirme à peu près.

On définit, le facteur F_{cl} , de manière à prendre en compte l'augmentation de la surface due au vêtement, à partir de la relation suivante [Fanger 1970] :

$$F_{\text{cl}} = 1 + 0.77 I_{\text{cl}} \quad (66)$$

Enfin, signalons que le vêtement joue un rôle complexe en absorbant de la sueur. Celle-ci s'évapore ensuite dans son épaisseur, donc avec un moindre rendement pour le refroidissement du corps. Cependant ce phénomène est compensé au moins en partie par l'augmentation de la conductivité thermique du vêtement humide, de sorte que l'hypothèse selon laquelle on considère que la sueur s'évapore directement sur la peau, peut être adoptée en pratique [Nishi et al. 1970]. Berger en modélisant le vêtement a noté qu'un échange radiatif direct d'au moins 15 % entre le corps et l'environnement persiste lorsque le tissu est serré et qu'un microclimat sous-vestimentaire apparaît et est fonction du temps de confinement de l'air sous le vêtement [Berger 1993].

4.2.3 Confort en régime transitoire, acclimatation et inertie thermique du corps

L'homme réagit en permanence à des variations de température, d'humidité et de rayonnement. Si le taux de production de la chaleur dans le corps n'est pas égal au taux des pertes, la différence est stockée ce qui entraîne un changement de la température moyenne du corps. Sur des périodes longues le stockage net de chaleur doit être nul, mais sur de courtes périodes la capacité thermique du corps est suffisamment importante pour absorber temporairement les écarts avec une faible variation de la température. La chaleur spécifique du corps a été quantifiée à une valeur de 3.49 kJ/kg.K soit environ 83 % de la valeur relative à l'eau. Pour un homme de 70 kg et de surface 1.8 m², le taux d'élévation de la température moyenne du corps (en K/s) est défini en fonction du taux de stockage de chaleur (S) :

$$\frac{dT_{\text{corps}}}{dt} = 7.4 \times 10^{-6} S \quad (67)$$

Ainsi, la température de corps augmente de 1 K en 1 heure avec un taux de stockage de 38 W/m² [Mc Intyre 1980].

En conditions chaudes, le phénomène de sudation apparaît avec un certain décalage avant de réagir rapidement aux variations des contraintes thermiques. Ce retard est fonction de l'acclimatation des individus. Il est plus important pour les femmes que pour les hommes et peut dépasser une heure. Après plusieurs jours passés en conditions chaudes, l'organisme augmente son débit sudoral et peut ainsi maintenir son équilibre thermique dans des conditions plus dures.

En régime transitoire, même pour des variations relativement rapides, les indices de confort, développés pour la plupart en statique, ne donnent pas une image trop éloignée de l'optimum de confort. Même si un temps de stabilisation de la sensation thermique apparaît après un changement des conditions thermiques et peut atteindre plusieurs heures, il n'affecte que des fractions d'unité de vote et peut en pratique être négligé [Hoffmann 1994].

4.3 Les échanges thermiques

Les échanges thermiques entre l'individu et son environnement (Figure 32) sont définis dans de nombreux ouvrages [Fanger 1970, Givoni 1976, Hofmann 1994, Depecker et al. 1989, Alvarez et al. 1992]. Nous allons passer en revue les différents transferts de chaleur sensible (échange radiatifs et convectifs) ainsi que les pertes par respiration, par diffusion et par sudation. Les échanges par conduction ne sont pas présentés ici car ce type d'échange entre l'individu et le sol est considéré comme négligeable. En effet, la résistance thermique des chaussures est élevée et la surface d'échange est très réduite. Nous ne revenons pas sur les échanges au travers des vêtements cela ayant été traité précédemment.

L'équilibre du bilan thermique sur un individu peut être calculé en connaissant ou en estimant un certain nombre de paramètres. Dans les différentes analyses réalisées, la description mathématique des termes entrant dans le bilan énergétique de l'individu est une combinaison d'équations ou de relations empiriques (coefficients d'échange et certains paramètres physiologiques).

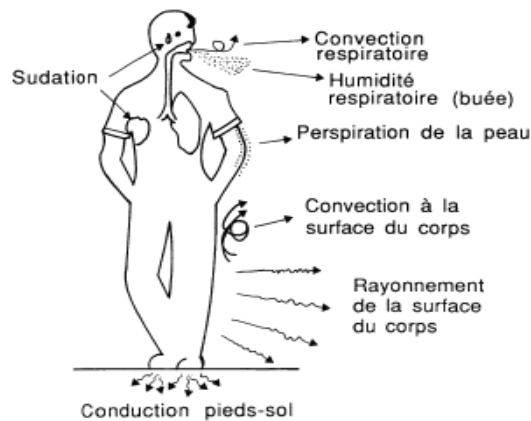


Figure 32 : Les différents types d'échanges thermiques [Depecker *et al.* 1989]

L'équation du bilan thermique appliquée à l'individu est la suivante :

$$M = \varphi_{CLO} - \varphi_{conv} - \varphi_{GLO} - E_{dif} - \varphi_{res} - E_{res} - E_{rsw} \quad (68)$$

Les différents termes intervenant dans cette expression sont détaillés dans ce chapitre.

4.3.1 Les échanges radiatifs

4.3.1.1 Rayonnement de grande longueur d'onde

Le calcul de ce type d'échanges entre l'individu et son environnement peut se faire grâce à la loi de Stefan-Boltzmann :

$$\varphi_{GLO} = F_{eff} F_{cl} \varepsilon \sigma [(T_{cl} + 273.2)^4 - (T_{mrt} + 273.2)^4] \quad (69)$$

Dans cette équation F_{eff} représente le facteur de surface effective de rayonnement qui est le rapport entre la surface effective de rayonnement de l'individu et sa surface totale, on adopte en

pratique une valeur de 0.7, ϵ est l'émissivité moyenne de la peau et des vêtements dans l'infrarouge lointain, soit environ 0.97. A titre d'exemple, pour une personne vêtue d'une tenue d'été dont la température de surface extérieure est de 26°C et dans une ambiance dont la température radiante moyenne t_{mrt} équivaut à 22 °C, les pertes par rayonnement sont égales à 18 W/m² [Hofmann 1994].

4.3.1.2 Rayonnement de courte longueur d'onde

Ce flux de chaleur inclut la fraction de l'énergie du rayonnement solaire incident (S_{\downarrow}) qui est directement absorbée par la peau :

$$\phi_{CLO} = ((1 - \alpha_{sk}) * \tau_{cl} * S_{\downarrow}) / F_{cl} \quad (70)$$

Avec τ_{cl} le coefficient de transmission du vêtement, α_{sk} l'abédo solaire de la peau et F_{cl} la fraction entre la surface du vêtement et la surface de la peau, ce qui permet de calculer le flux de chaleur par unité de surface de peau. Les apports dus aux réflexions sur les parois et la fraction du rayonnement solaire qui est absorbée par le vêtement ne sont pas considérés dans cette expression.

Dans le paragraphe relatif à la température radiante moyenne, nous précisons comment les apports radiatifs de courte et grande longueurs peuvent être pris en considération.

4.3.2 Les échanges convectifs

Un phénomène de convection naturelle apparaît lorsque sous l'effet d'une différence de densité de l'air due à une différence de température, un courant d'air se met en place. C'est ce qui se passe, au voisinage de la peau, lorsque celle-ci est à une température supérieure à celle de l'air ambiant. Lorsque l'air est en mouvement sous l'action d'une force externe, on emploie le terme de convection forcée. Plus la vitesse de l'air est élevée, plus les échanges thermiques sont importants.

Les équations qui régissent ce type de phénomènes sont complexes et ne donnent lieu à des résultats analytiques que pour très peu de configurations. Afin d'estimer ces échanges, il est d'usage d'introduire un coefficient de convection que l'on note h_c . Ainsi, nous pouvons estimer le terme convectif par l'équation suivante :

$$\phi_{conv} = f_{cl} h_c (T_{cl} - T_{air}) \quad (71)$$

La norme ISO 7730 adopte pour valeur de h_c la plus grande des deux valeurs suivantes :

$$\text{en convection naturelle : } h_c = 2.38 (T_{cl} - T_a)^{0.25} \quad (72)$$

$$\text{en convection forcée : } h_c = 12.1 U^{0.5} \quad (73)$$

Avec U : vitesse relative de l'air par rapport à la personne.

Dans la littérature, les valeurs des coefficients d'échange convectif donnent lieu à de nombreuses corrélations. De plus, en espace extérieur, des vitesses de vent élevées peuvent apparaître. Des formules sont répertoriées pour le calcul de ce terme pour différentes vitesses de vent (Tableau 16 [Penicaud 1978]).

Vitesse de vent (U en m.s ⁻¹)	U < 0.1	0.1 < U < 2.4	2.4 < U
Echange par convection (W.m ²)	2.05 f _{cl} (T _{cl} - T _a) ^{1.25}	10.4 f _{cl} V ^{0.5} (T _{cl} - T _a)	8 f _{cl} V ^{0.8} (T _{cl} - T _a)

Tableau 16 : Echange par convection d'après [Penicaud 1978]

Le rôle de la turbulence dans les transferts de chaleur est également à considérer. En effet, grâce à une approche expérimentale, le rôle très marqué de la fluctuation du vent sur l'amélioration des transferts thermiques a été mis en évidence [Moreau 1999]. Les résultats de cette série de tests donnent pour efficace, du point de vue de l'échange thermique des fréquences comprises dans une gamme de 0.2 à 0.4 Hz. Ces valeurs restent dans un ordre de grandeur équivalent à celles proposées par Fanger et Pedersen qui mettent en évidence d'un point de vue purement sensoriel un maximum de sensibilité pour la gamme de fréquences 0.3 – 0.5 Hz.

4.3.3 Pertes par respiration

L'air à la sortie des poumons est pratiquement saturé en humidité. Les poumons fonctionnent comme un échangeur de surface quasi infinie, d'environ 100 m². L'air expiré est quasiment saturé d'humidité. En ambiance sèche, la quantité de vapeur d'eau expirée est de l'ordre de 30 g/h. En climat chaud et humide, elle est réduite à une valeur variant de 0 à 20 g/h. Les pertes apparaissent sous deux formes : pertes par chaleur sensible dues au réchauffement de l'air inspiré et pertes par chaleur latente dues à l'humidification de celui-ci.

$$\phi_{res} = 0.0014 * M * (34 - T_{air}) \quad (74)$$

$$E_{res} = 0.0173 * M * (5.87 - HR_a * Pv(T_{air})) \quad (75)$$

Avec, M en W/m², T_{air} et HR_a la température sèche et l'humidité relative de l'air, et Pv(T_{air}) la pression de vapeur d'eau à la température Ta exprimée en kPa

4.3.4 Pertes par diffusion d'humidité à travers la peau

La perte de chaleur par évaporation est un mécanisme de régulation très efficace et constitue le meilleur indice physiologique de stress thermique. La perte de chaleur par évaporation à la surface de la peau E_{sk} oscille entre deux niveaux : une valeur minimum d'évaporation diffuse (E_{dif}) et une valeur maximale (E_{max}) lorsque 100 % de la peau est couverte de sueur. Ces deux types de pertes dépendent des mouvements d'air, du gradient de pression de vapeur entre la surface de la peau à travers les vêtements et l'air ambiant, ainsi que de la résistance au transfert de masse de vapeur d'eau due aux vêtements.

Les pertes par diffusion, également appelée pertes par perspiration, sont permanentes et ne dépendent que de l'écart de pression de vapeur d'eau au niveau des pores de la peau, à saturation et à la température de la peau, et dans l'air ambiant. Elles représentent environ 6 % de la dissipation maximale de chaleur par évaporation. Pour des valeurs élevées de E_{max} ou des expositions longues en ambiance d'humidité faible, le taux précédent peut baisser jusqu'à 2%. Il est possible de les évaluer à partir de la formule suivante [Mc Intyre 1980] :

$$E_{dif} = 4 + 0.12 (p_{ssk} - p_a) \quad (76)$$

Avec :

p_{ssk} : pression saturante de la vapeur d'eau à la température de la peau [Pa]
 p_a : pression partielle de la vapeur d'eau dans l'ambiance [Pa]

4.3.5 Pertes thermiques par sudation

L'évaporation totale d'eau à partir de la peau est un phénomène de transfert de masse de la vapeur d'eau depuis la surface vers l'air ambiant. Elle est le résultat de quatre processus : sécrétion de la sueur par des glandes sudoripares à proximité de la peau, transport de la sueur jusqu'à la surface de la peau, dispersion en une pellicule sur la peau et évaporation de cette pellicule à la température de la peau. Le moiteur de la peau est le rapport entre le taux de sécrétion requis pour assurer un bilan nul et l'évaporation maximale possible dans l'air ambiant. La perspiration des individus existe toujours et est au minimum de 6 % comme nous venons de le dire. En dessous de 12 % le moiteur n'est pas perceptible et le corps semble sec. De 12 à 30 %, le corps ressent une faible moiteur puis des zones humides apparaissent. Au-delà de 30 % l'efficacité de la sueur tombe en dessous de 1 car les gouttes de sueur de grandes tailles ne peuvent pas s'évaporer [Berger 1998]. L'inconfort augmente avec la valeur de cet indice qui avertit le corps d'un recours à un processus de sueur. Dans le cas d'une peau entièrement saturée d'eau, la valeur maximale de l'évaporation s'écrit :

$$E_{\max} = h_e (p_{ssk} - p_a) \quad (77)$$

Le coefficient d'échange thermique par évaporation h_e (W/m².Pa) peut s'exprimer à partir de la relation de Lewis en fonction du coefficient d'échange convectif h_c et d'une constante Lr qui dépend des substances en présence et de la pression atmosphérique :

$$h_e = Lr \cdot h_c \quad (78)$$

En pratique, la peau n'est pas intégralement mouillée, à la fois parce que le corps fait rarement appel à ses capacités maximales de sudation et parce que les glandes sudoripares ne sont pas uniformément réparties. L'évaporation réelle de la peau, qui est la somme des pertes par diffusion et par transpiration «régulatrice» (Edif + Ersw), s'écrit :

$$E_{sk} = \omega Lr h_c (p_{ssk} - p_a) \quad (79)$$

ω est un coefficient adimensionnel qui caractérise la mouillure cutanée. Il est égal au rapport entre l'évaporation réelle et l'évaporation maximale :

$$\omega = E_{sk} / E_{\max} \quad (80)$$

4.4 Les indices de confort thermique

Afin de quantifier le confort thermique, de nombreux travaux, généralement réalisés à l'intérieur des bâtiments, dans des conditions expérimentales parfaitement contrôlées, ont recensé les principales causes d'inconfort et ont permis d'établir un certain nombre d'indices. Nous en présentons quelques-uns parmi les plus intéressants. Certains, ont donné lieu à des développements ou à des transpositions en situations extérieures. En insistant sur les intérêts et les limites de chacun, nous essayons de retenir les indices ou les méthodes qui peuvent être utiles dans le cadre de notre recherche. Il est à signaler que de nombreuses informations sont référencées dans la littérature [Givoni 1976, Mc Intyre 1980, Gagge et al. 1986, Hofmann 1994,

Pignolet 1996]. Ainsi, nous allons présenter succinctement les indices qui ont dans un premier temps été développés pour définir le confort intérieur : température résultante, la température effective (et ses dérivés), les indices DISC et le PMV. Puis, nous nous attardons sur les travaux qui nous intéressent plus précisément, c'est-à-dire ceux permettant d'appréhender le confort en espace extérieur. Le confort ou plus exactement l'inconfort dû au vent est discuté. La définition des températures radiantes est un des points clés de ces recherches et est détaillée dans cette partie. Pour finir, nous présentons les indices les plus applicables dans nos configurations : l'indice de contrainte thermique (ITS), le vote moyen prévisible modifié (PMV*), la température physiologique équivalente (PET) et la nouvelle température effective standard modifiée (OUT_SET*).

4.4.1 Les inconforts locaux

Les sources locales d'inconfort sont nombreuses et parmi les plus fréquemment citées dans les traités de thermique du bâtiment, nous pouvons relever l'asymétrie de rayonnement horizontale et verticale, le gradient vertical de température d'air, la sensation de courant d'air, un air respiré trop chaud ou trop froid, des extrémités froides du corps, une humidité excessive ou insuffisante, des différences de température d'air le long du corps. Il existe peu de travaux équivalents en espace extérieur sur la quantification des inconforts locaux, ainsi, une transposition des résultats ci-dessous au milieu urbain ne peut être envisagée. Néanmoins, les thèmes traités doivent être considérés et intégrés dans l'analyse du microclimat urbain avec des ordres de grandeur sensiblement différents.

4.4.1.1 Asymétrie de rayonnement

Les parois froides ou chaudes entraînent des déséquilibres au niveau des échanges radiatifs qui peuvent engendrer une sensation d'inconfort. On considère qu'il n'y a pas de gêne si, à 1 m devant la façade, l'écart entre la température radiante orientée vers cette façade et la température radiante orientée vers la cloison opposée ne dépasse pas 8 °C [Chemillier 1986]. Dans la figure ci-dessous (Figure 33), l'asymétrie de rayonnement est reliée au pourcentage de personnes insatisfaites (sujet assis, vêtu 0.6 clo) à partir de travaux réalisés par Fanger [Brindel-Beth et al. 1998] (source ASHRAE). L'asymétrie de température rayonnante due à des surfaces verticales froides doit être inférieure à 10 °C. L'asymétrie de rayonnement due à un plafond chauffant doit être inférieure à 5°C.

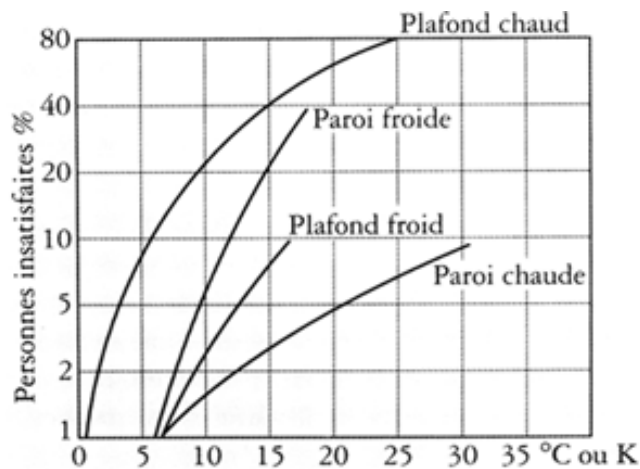


Figure 33 : Asymétrie du rayonnement et insatisfaction

4.4.1.2 Température du sol

Une température de sol trop élevée ou trop basse entraîne un inconfort au niveau des pieds. Une température de sol inférieure à 17 °C ou supérieure à 26 °C procure un inconfort [Brindel-Beth et al. 1998]. D'après Olesen, une température optimale de sol est de 23 °C pour un individu chaussé debout et 25 °C pour un individu chaussé assis, mais ces résultats sont fortement dépendants de la température d'air [Hoffmann 1994].

4.4.1.3 Gradient vertical de température

Dans les bâtiments on considère généralement que l'écart entre les températures mesurées à 1.10 m et à 0.10 m doit rester inférieur à 3°C [Chemillier 1986].

4.4.1.4 Courant d'air

Ce point est considéré comme la principale source d'inconfort local. Un écoulement à vitesse fluctuante est plus inconfortable qu'à vitesse constante. A l'intérieur des bâtiments, dans tous les cas la vitesse de l'air doit être inférieure à 0.35 m.s⁻¹ [Chemillier 1986]. Dans la norme ISO 7730-93, une équation relie le pourcentage d'insatisfaits (PD) aux caractéristiques du courant d'air [Hoffmann 1994] :

$$PD = (34 - T_{air}) (U - 0.05)^{0.622} (37 \sigma + 3.14) \quad (81)$$

Avec : t_a : température d'air,

U : vitesse moyenne de l'air

σ : écart type des vitesses d'air ou turbulence absolue

Ces résultats concernent des individus sédentaires en tenue courante, sachant que la sensibilité au courant d'air décroît avec une isolation des vêtements plus importante. Pour des personnes actives le courant d'air est plutôt un facteur de confort. Cependant des auteurs aboutissent à des résultats différents puisque Mayer a montré que la proportion d'insatisfaits croît linéairement en fonction de la vitesse d'air pour une intensité de turbulence jusqu'à 40 % et en fonction de la turbulence absolue au-delà [Mayer 1985]. Des recherches dans ce domaine sont en cours.

4.4.2 Les indices de confort ou de stress thermique en espace intérieur

4.4.2.1 Indice de la « Température Résultante »

Cet indice, également appelé température opérative, combine la température d'air, supposée égale à celle des parois, l'hygrométrie sous forme de la température humide, la vitesse d'air et l'influence du métabolisme et des vêtements [Missenard 1972]. Il est défini comme la température d'une ambiance saturée d'humidité et en air calme qui procure la même sensation que celle étudiée dans le cadre explicite d'une équivalence de passage ou de séjour.

La température résultante sèche correspond à la température d'une ambiance dans laquelle le corps humain a les mêmes pertes par rayonnement et par convection que dans l'ambiance étudiée. En air calme, c'est-à-dire $U < 0.2$ m/s et lorsque $|T_{mrt} - T_{air}| \leq 4$ K :

$$T_{rs} = \frac{T_{mrt} + T_{air}}{2} \quad (82)$$

Lorsque l'air s'écoule à une vitesse U , d'au moins 0.1 m/s, l'expression devient [Hofmann 1994]:

$$T_{rs} = \frac{T_{mrt} + T_{air} \cdot \sqrt{10 \cdot U}}{1 + \sqrt{10 \cdot U}} \quad (83)$$

4.4.2.2 Indice de la « Température Effective » et ses dérivées

Cet indice intègre également la température, l'humidité et la vitesse de l'air [Houghten et al. 1923]. L'impression thermique instantanée, éprouvée par le sujet dès son introduction dans une ambiance donnée, est le critère de réaction retenu pour cet indice. L'indice de Température Effective original ne tient pas compte des effets du rayonnement ; il est néanmoins possible de substituer la température prise au thermomètre à globe à la température de l'air. Deux abaques ont été développés : l'un pour des sujets nus jusqu'à la ceinture et l'autre pour des sujets portant des vêtements d'intérieur ordinaires.

La température standard effective (Figure 34) est définie comme la température d'un environnement isotherme dont les températures de surface et d'air sont équivalentes, où l'humidité relative est de 50 % et l'air calme (0.12 m/s). Dans cet environnement une personne ayant une isolation de vêtement standard subit les mêmes pertes de chaleur et possède la même température moyenne de peau et la même mouillure cutanée que dans l'environnement réel et avec des vêtements pas nécessairement standards. Le niveau d'activité est le même dans la situation réelle et dans la situation standard, et l'isolation standard des vêtements est une fonction du niveau d'activité. Lorsque l'environnement ne permet pas un équilibre rapide, il est usuel d'envisager l'état après une heure d'exposition.

L'évaluation du SET requiert deux étapes. La première est de trouver la température de la peau et la mouillure cutanée de l'individu à partir du modèle de thermorégulation à deux nœuds [Gagge et al. 1986]. La deuxième étape consiste à trouver la température d'un environnement standard qui génère les mêmes valeurs de température et de mouillure à partir de l'analyse des transferts de chaleur du corps. L'indice SET est donc fonction du niveau d'activité, des caractéristiques d'isolation des vêtements et des variables physiques de l'environnement. La valeur de SET est directement liée à la sensation et non à la température de l'air, la correspondance est donnée ci-dessous (Tableau 17) [Mc Intyre 1980]:

SET (°C)	Sensation	Etat physiologique d'un individu sédentaire
> 37.5	Très chaud, inconfortable	Défaillance de la régulation
34.5 – 37.5	Chaud, très inacceptable	Sueur abondante
30.0 – 34.5	Chaud, inconfortable, inacceptable	Sueur
25.6 – 30.0	Légèrement chaud, légèrement inacceptable	Sueur faible, vasodilatation
22.2 - 25.6	Confortable et acceptable	Neutralité
17.5 – 22.2	Légèrement frais, légèrement inacceptable	Vasoconstriction
14.5 – 17.5	Frais et inacceptable	Refroidissement lent du corps
10.0 – 14.5	Froid et très inacceptable	Frisson

Tableau 17 : Correspondance entre SET sensation et état physiologique [Mc Intyre 1980]

La nouvelle température effective standardisée SET*, est la valeur de SET lorsque l'individu adapte ses vêtements à son activité [Gagge et al. 1986].

$$I_{cl} = \frac{1.33}{M - W + 0.74} - 0.095 \quad (84)$$

M et W s'expriment en met, I_{cl} en clo. Cet indice est donc plus général, cependant il impose à l'individu d'être vêtu de manière adéquate, ce qui n'est pas toujours évident.

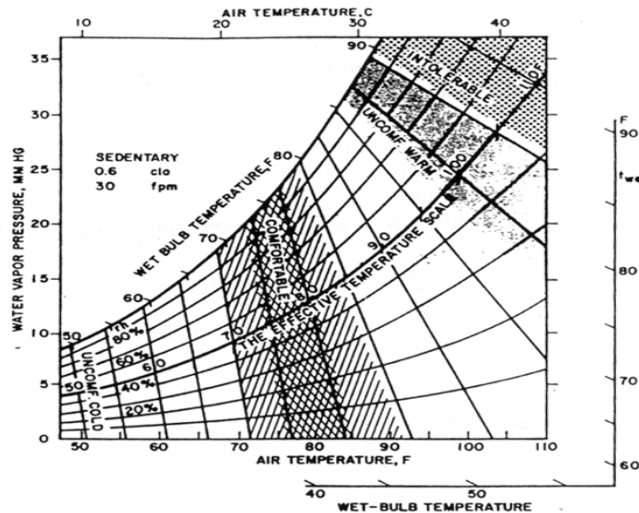


Figure 34 : Zone de confort pour la nouvelle Température Effective [Hofmann 1994]

4.4.2.3 Les indices DISC

Parmi les indices de stress thermique basés sur la mouillure cutanée (ω) et sur le débit sudoral, facteurs physiologiques importants dans les climats chauds, il est possible de citer le DISC [Winslow et al. 1937] dont la définition est la suivante [Gagge et al. 1986] :

$$DISC = 5 \frac{\omega - \omega_0}{\omega_{crit} - \omega_0} \quad (85)$$

L'inconfort est mesuré sur une échelle allant de 0 à 5 : 0 à la neutralité (celle-ci correspondant à une mouillure ω_0 qui n'est voisine de 0 qu'au repos et qui augmente avec le métabolisme), 5 quand la mouillure atteint le point critique ω_{crit} au-delà duquel les mécanismes de thermorégulation cessent d'être efficaces. Gagge propose $\omega_{crit} = 85\%$.

Des zones de confort (1 : agréable, 2 : légèrement agréable, 3 : désagréable et 4 : très désagréable) ont été estimées par Fauconnier et son équipe, en fonction des variations de la mouillure cutanée et du débit sudoral (activité et type de vêtement non précisés) (Tableau 18 d'après [Sangkertadi 1994]) :

Mouillure cutanée	25 %	4	4	4	4
	15 %	3	3	3	4
	6 %	2	2	2	4
		1	2	3	4
		0	50	100	250
Débit sudoral (g/h)					

Tableau 18 : Débit sudoral, mouillure cutanée et confort

A partir de ce tableau, on constate qu'au-delà de 25 % de mouillure cutanée, l'individu est dans la zone très désagréable. On considère que 75 % est la limite maximale d'inconfort.

D'autres indices DISC ont également été proposés (Tableau 19 d'après [Pignolet 1996])

Auteurs	Met	Clo	Equations
Gonzalez (1978)	3	0.5	DISC = 2.4 ω - 0.1
Berglund (1984)	1	0.4 – 0.9	DISC = 4.13 ω + 0.013
Cunningham (1985)	1	0.4 – 1.2	DISC = 5.06 ω + 0.09
Hoeppe (1985)	1 et 5	0.64	DISC = 3.6 ω + 0.25
Sangkertadi (1994)	1.1	0.5	DISC = 3.938 ω + 0.0158 Esd – 0.3348

Tableau 19 : Indices DISC

L'indice DISC n'est plus un indice usuel du fait qu'il se confond pratiquement avec l'indice PMV* que nous présentons plus loin [Hofmann 1994].

4.4.2.4 Le PMV et ses dérivés

Cet indice est certainement le plus connu et le plus utilisé en thermique du bâtiment. En effet, la norme ISO 7730-93 adoptée en 1984 et révisée en 1993, s'intitulant « Ambiances thermiques modérées – Détermination des indices PMV et PPD et spécification des conditions de confort thermique », s'appuie sur les travaux de Fanger [Fanger 1970]. La première exigence est l'existence d'un équilibre thermique : bilan thermique nul (états stationnaires : sensation de séjour). L'équation relie les paramètres classiques que sont la température de l'air, la température radiante moyenne, l'hygrométrie, la vitesse de l'air, le métabolisme et la résistance thermique des vêtements. De plus, deux paramètres physiologiques s'ajoutent, la température moyenne de la peau et l'évacuation de la chaleur par sudation. Au total, 1396 sujets ont été testés sur 8 niveaux d'activité, 9 valeurs de vitesse d'air, 7 valeurs relatives aux vêtements, de nombreuses valeurs de température ambiante, 1 valeur d'humidité 50 %. Des courbes de régression ont pu être déterminées :

$$T_{sk} [^{\circ}\text{C}] = 35.7 - 0.0275 M [\text{W}/\text{m}^2] \quad (86)$$

$$E_{rsw} [\text{W}] = 0.42 A_{Du} \cdot (M - 58) \quad (87)$$

Ces deux équations exprimant la sensation de confort (assimilée à la notion de neutralité thermique) sont combinées avec le bilan thermique pour donner l'équation de confort.

Un certain nombre de remarques critiques sont à apporter à ces résultats [Hofmann 1994]. En effet, les régressions linéaires de la température cutanée et de l'évaporation régulatrice sont faites à partir de nuages de points très étalés et basés pour quelques cas tests sur quelques dizaines d'individus seulement. De même, les lois décrivant les différents types d'échanges thermiques ont été déterminées à partir d'un petit nombre de travaux (parfois d'un seul).

Cependant on constate une bonne correspondance avec des résultats obtenus dans des expériences réalisées auparavant.

Le vote de confort moyen (PMV : Predicted Mean Vote) varie sur une échelle de 7 degrés allant de - 3 (très froid) à + 3 (très chaud). La formule se base sur l'hypothèse fondamentale que le vote de sensation thermique est proportionnel à la charge thermique appliquée à l'individu, c'est à dire à l'effort que les mécanismes régulateurs doivent fournir.

Le PMV est donné par l'équation suivante :

$PMV = (0.303 e^{-0.036 M_{th}} + 0.028)$	coefficient de proportionnalité
$* \{ (M_{th} - W)$	production de chaleur métabolique
$- 3.05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6.99 (M_{th} - W) - p_a]$	pertes par diffusion à travers la peau
$- 0.42 [(M_{th} - W) - 58.15]$	pertes de chaleur par sudation
$- 1.7 \cdot 10^{-5} M_{th} (5867 - p_a)$	pertes de chaleur latente (respiration)
$- 0.0014 M_{th} (34 - T_{air})$	pertes de chaleur sensible (respiration)
$- 3.96 \cdot 10^{-8} F_{cl} [(T_{cl} + 273.2)^4 - (T_{mrt} + 273.2)^4]$	pertes par rayonnement
$- F_{cl} h_c (T_{cl} - T_{air}) \}$	pertes par convection
(88)	

Avec : $T_{cl} = 35.7 - 0.028 (M_{th} - W) - I_{cl} \{ 3.96 \cdot 10^{-8} f_{cl} [(T_{cl} + 273.2)^4 - (T_{mrt} + 273.2)^4] + F_{cl} h_c (T_{cl} - T_{air}) \}$ (89)

$h_c = 2.38 (T_{cl} - T_{air})^{0.25}$ pour $2.38 (T_{cl} - T_{air})^{0.25} > 12.1 U^{0.5}$ (90)

$h_c = 12.1 U^{0.5}$ pour $2.38 (T_{cl} - T_{air})^{0.25} < 12.1 U^{0.5}$ (91)

$F_{cl} = 1.00 + 1.290 I_{cl}$ pour $I_{cl} < 0.078 \text{ m}^2 \cdot \text{C/W}$ (92)

$F_{cl} = 1.05 + 0.645 I_{cl}$ pour $I_{cl} > 0.078 \text{ m}^2 \cdot \text{C/W}$ (93)

Le pourcentage prévisible d'insatisfaits (PPD : Predicted Percentage of Dissatisfied) est une formule dérivée d'analyses statistiques. Les personnes sont considérées comme insatisfaites si elles votent ± 2 ou ± 3 sur l'échelle de 7 points de l'ASHRAE (Figure 35).

$PPD = 100 - e^{-\left(0.03353 PMV^4 + 0.2179 PMV^2\right)}$ (94)

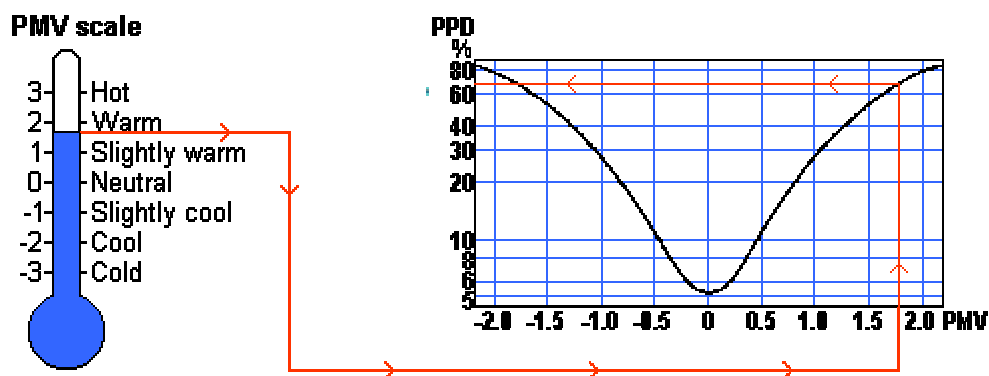


Figure 35 : Correspondance entre le PMV et le PPD (d'après <http://www.innova.dk/books/thermal/thermal.htm>)

Cette formule est caractérisée par le fait qu'elle soit symétrique en chaud et en froid, comme on l'a déjà signalé et qu'il y a toujours au moins 5 % d'insatisfaits.

Comme nous l'avons déjà précisé, les critiques concernant cet indice de confort sont nombreuses, parmi celles qui sont le plus régulièrement recensées nous pouvons citer la liste suivante [Hofmann 1994] :

- Un point de vote sur l'échelle à 7 points correspond à 3.3 °C environ en condition d'été, ce qui signifie que l'on est censé être encore satisfait si l'on se trouve dans une ambiance à 3 ou 4 °C de la température optimale.
- La représentation du vêtement par les clo est très schématique (la ventilation intérieure, l'absorption et la transmission de l'humidité sont négligées).
- Les variations interpersonnelles sont sans doute sous-estimées.
- Dans la zone chaude, le PMV présente une sensibilité faible à l'hygrométrie qui ne traduit pas de façon satisfaisante les sensations que l'on peut observer. Les pertes par sudation sont évaluées en fonction du seul métabolisme, l'hygrométrie ambiante n'intervenant pas du tout dans ce terme.

Pour compenser ce dernier point, Gagge réintroduit l'hygrométrie dans le calcul du PMV [Gagge et al. 1986] en remplaçant la température résultante sèche par ET^* dans cette équation pour définir le PMV^* (Figure 36). Ainsi, cet indice modifié a une sensibilité plus importante à l'humidité dans la zone chaude, tout en laissant la même valeur dans la zone de neutralité et au-dessous. Plus précisément, ET^* est substitué dans l'équation de Fanger à l'ensemble de T_a et T_{mr} . Les droites d'iso- PMV^* sur le diagramme psychrométrique recouvrent avec une unité différente les iso- ET^* et les iso-mouillures cutanées (indice DISC). L'indice PMV^* semble le plus pertinent des indices synthétiques de confort existants et rien de plus convaincant n'a été proposé depuis lors. Il hérite de la légitimité que peut porter le PMV, avec lequel il se confond en zones froides et neutres, ainsi qu'à 50 % HR en zone chaude. Gagge lui-même a souligné que le PMV de Fanger traduit mieux la sensation thermique pure et que le PMV^* représente mieux la sensation de confort.

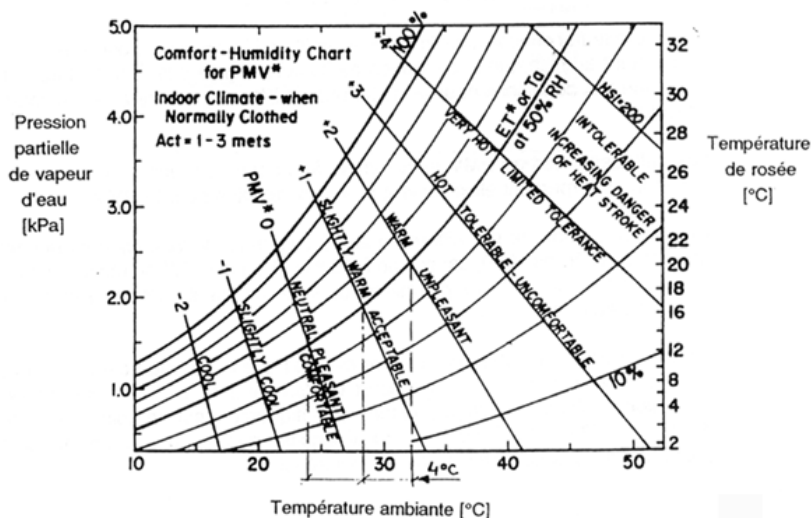


Figure 36 : Diagramme de confort relatif au PMV^* [Hofmann 1994]

4.4.3 Les indices de confort ou de stress thermique en espace extérieur

L'influence des paramètres climatologiques sur les conditions de confort a motivé de nombreux travaux de recherche. L'écriture du bilan des échanges énergétiques à l'interface individu - atmosphère montre que les apports d'énergie thermique sont principalement dus au rayonnement solaire direct, diffus et réfléchi, et que les pertes se font surtout par convection (effet du vent). La température du milieu ambiant joue également un rôle essentiel et l'influence de l'humidité paraît beaucoup moins importante [Sacré et al. 1994]. En présence de rayonnement solaire, seul le vent peut ramener la charge thermique solaire à des proportions acceptables. Les travaux de Penwarden (1974) montrent qu'un sujet passant d'une zone ensoleillée en air calme (vent de 0.5 m/s) à une zone à l'ombre où souffle un vent de 5 m/s doit ressentir une diminution de la charge thermique équivalente à une baisse de la température de l'air de 13 °C (Figure 37 et Figure 38) [Sacré 1983]. En l'absence de rayonnement solaire direct, le paramètre climatique jouant le rôle le plus important est la température de l'air, l'humidité et le rayonnement infrarouge jouant un rôle secondaire [Pénicaud 1978].

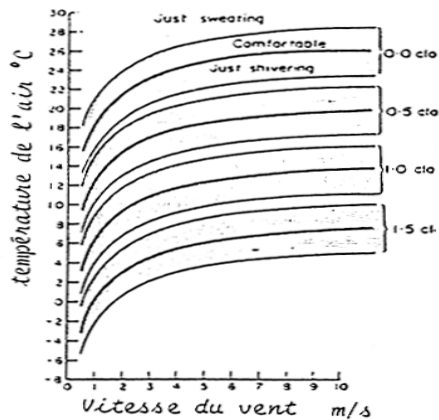


Figure 37 : Conditions de confort pour un piéton au soleil d'après Penwarden [Sacré 1983]

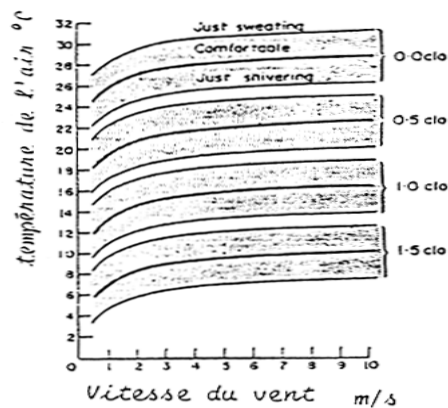


Figure 38 : Conditions de confort pour un piéton à l'ombre d'après Penwarden [Sacré 1983]

Certains auteurs intègrent tous les rayonnements, à savoir les grandes longueurs d'onde et les apports solaires, dans la température radiante moyenne qui devient alors le principal élément influençant le bilan énergétique sur les individus. Pour des individus restant à l'ombre, la température radiante moyenne est souvent considérée comme étant égale à la température ambiante de l'air. L'indice PMV qui est basé sur l'équation de confort de Fanger est étendu par Jendritzky pour des situations en extérieur [Mayer et al. 1997]. Les auteurs de cette recherche insistent sur le fait que la température de l'air n'est pas le bon paramètre météorologique pour la détermination du confort en espace extérieur. Ils constatent que l'évolution diurne de l'indice de la température physiologique équivalente (PET) [Höppe 1984], qui peut être corrélé au PMV, est similaire à celle de la température moyenne, ce qui indique que T_{mrt} est le paramètre qui influence le plus PET, l'importance de la température de l'air étant considérablement plus faible.

4.4.3.1 Les effets du vent

Dans la littérature, il existe de nombreux critères d'inconfort dus au vent et les résultats obtenus avec chacun d'eux semblent être assez différents [Bottema 2000]. Les premiers effets du vent (cheveux au vent, vêtements flottants) apparaissent pour des rafales de vent supérieures à 1.5 m/s. Pour des vitesses supérieures, les effets du vent augmentent considérablement sur la

marche, causant danger pour des vitesses dépassant 15 m/s pour les personnes âgées et 20 m/s pour les individus « standards ». L'échelle de Beaufort (Tableau 20) donne en fonction de la vitesse du vent, à une hauteur de 2m, quelques informations sur les effets et sensations induites.

Vitesse du vent (m/s)		Caractéristiques du vent
Force	H = 2 m	
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 pédestre très difficile et dangereuse.
9	17 à 20	Risque d'être violemment projeté à terre sous l'effet des bourrasques.

Tableau 20 : Echelle de Beaufort [Gandemer *et al.* 1981]

La notion de gêne due au vent est difficilement quantifiable [Sacré *et al.* 1994]. Elle s'appuie en effet sur plusieurs critères : le vent s'oppose au piéton et l'oblige à une adaptation permanente, les échanges thermiques et physiologiques entre le corps humain et le milieu extérieur peuvent être fortement perturbés. L'activité de l'individu, le type de lieu (terrasse de café ou aire piétonnière), de climat (en pays chaud et humide, on recherche plutôt la ventilation), les conditions météorologiques (humidité, température, précipitations, soleil) et le contexte physique ou physiologique de l'individu sont autant de paramètres qui rendent la définition d'un critère unique de nuisance du vent impossible. C'est pourquoi, seule la gêne dynamique est prise en compte via un paramètre (Ψ), qui intègre le module de la vitesse moyenne et le niveau de turbulence, représenté par son écart type. Il est indispensable d'associer à ce critère une fréquence de dépassement, c'est à dire une durée, annuelle par exemple, pendant laquelle le seuil évoqué est atteint ou franchi. La nuisance due au vent est caractérisée localement à 1.5 m du sol par l'équation [Gandemer *et al.* 1981] :

$$v = \bar{U} + \sigma \quad (95)$$

Le seuil de nuisance communément admis à 1.5 m du sol est de 6 m/s ($\bar{U}_s = 5$ m/s, $\sigma_s = 1$ m/s). Cet état de référence correspond grossièrement aux premières manifestations déplaisantes du vent. La turbulence est associée à celle qui règne en rase campagne pour le niveau U_s de vitesse seuil. Par définition, il y aura inconfort ou nuisance chaque fois que, localement, $v \geq v_s$. Dans sa forme générale, le groupement nuisance lié à l'action dynamique du vent prend la forme :

$$v = \bar{U} + \gamma\sigma \quad (96)$$

Avec $\gamma = 1$ pour l'inconfort du piéton.

Pour la sécurité du piéton (chute), c'est la vitesse de pointe (force maximale) qui va faire chuter le piéton. Le groupement de nuisance correspond alors à $\gamma \approx 3.5$. Il y a nuisance « sécurité » chaque fois que $v \geq v_s$ pour un seuil grossièrement égal à 18 m/s.

En pratique, le critère important est celui de fréquence d'apparition F de cette nuisance. La gêne due au vent est inévitable dans les espaces extérieurs, elle sera tolérée ou acceptée par l'utilisateur si sa fréquence d'apparition reste modérée. En outre, la notion d'acceptabilité d'un niveau de nuisance donné sera dépendante de la fonction de l'activité de l'espace extérieur considéré (Tableau 21). La fréquence F peut s'exprimer en pourcentage du temps (durée pendant laquelle le niveau v dépasse le seuil de nuisance v_s) ou directement en nombre d'heures (durée moyenne de nuisance annuelle qui peut être pondérée par la saison ou le cycle jour / nuit). La fréquence F dépend du climat, du site d'implantation, du positionnement du point dans le site.

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 pédestre, passage piétonnier, entrée d'immeuble, etc.)	15 %
Marche rapide (parc auto, trottoir des avenues, belvédère, etc.)	25 %

Tableau 21 : Fréquence de nuisance liée à l'activité [Gandemer *et al* 1976].

4.4.3.2 La température radiante moyenne en extérieur

Nous avons relevé différentes formulations de la température radiante moyenne (T_{mrt}) dans l'analyse bibliographique donnant lieu à des calculs plus ou moins complexes. La température radiante moyenne intègre les flux de courtes et grandes longueurs d'onde et peut être calculée en utilisant la méthode de Höppe (1992) [Matzarakis *et al.* 1998] en considérant que la densité de flux radiatif moyen (φ_{net} exprimé en $W.m^{-2}$) absorbé par le corps, s'obtient en faisant la somme pondérée (W_i) des flux CLO et GLO absorbés mesurés, dans les 6 directions pour un individu qui est debout ou qui marche. A partir de ce résultat, il est possible d'appliquer la loi de Stefan-Boltzmann pour calculer la température radiante moyenne T_{mrt} en Celsius:

$$\varphi_{net} = \sum_{i=1}^6 W_i \cdot ((1 - \alpha) \cdot \varphi_{CLO,i} + \varepsilon \cdot \varphi_{GLO,i}) \quad (97)$$

$$T_{mrt} = \sqrt[4]{\varphi_{net} / (\varepsilon \cdot \sigma)} - 273.2 \quad (98)$$

La température radiante moyenne en Kelvin peut également être calculée à partir de la formule suivante, dans laquelle F_i est le facteur de forme entre la personne et la surface d'indice i, F_{ciel} est le facteur de forme entre la personne et le ciel et $L\downarrow$ le rayonnement atmosphérique GLO reçu sur un plan horizontal [Penicaud 1978] :

$$\sigma T_{mrt}^4 = \sum_i F_i \left[\varepsilon_i \sigma T_i^4 + (1 - \varepsilon_i) \varphi_{GLO,i} \right] + \frac{F_{ciel}}{0.5} L \downarrow \quad (99)$$

Enfin, dans le cadre des modélisations que nous souhaitons développer nous nous appuyons sur certains travaux [Pickup et al. 1999], en améliorant la procédure par la prise en compte des facteurs de forme et donc des échanges réels avec les différentes surfaces environnantes [Vinet et al. 2000c]. Le principe est de calculer la température uniforme de surface pour une enceinte hypothétique autour d'un individu debout qui échangerait le même rayonnement dans l'infrarouge avec l'individu que dans toutes les longueurs d'onde (solaire et infrarouge) dans l'environnement complexe réel. La quantité de rayonnement absorbé par le corps correspond à la soustraction des flux quittant le corps des flux incidents pour la partie de la surface du corps qui participe aux échanges radiatifs. En supposant que le rayonnement direct est absorbé par la surface du corps qui est directement ensoleillée, on utilise le facteur de surface projetée du corps (f_p), qui est calculé à partir de la hauteur du soleil (h), pour pondérer la quantité de rayonnement direct absorbé :

$$f_p = 0.42 \cos(h) + 0.043 \sin(h) \quad (100)$$

Ainsi, la quantité de rayonnement direct absorbée vaut en fonction de l'albédo solaire des vêtements (α_{cl}) :

$$\varphi_{direct} = f_p (1 - \alpha_{cl}) S \downarrow \quad (101)$$

Les rayonnements diffus et réfléchis et de grande longueur d'onde sont supposés être absorbés par la fraction de surface totale du corps qui est disponible pour les échanges radiatifs ; on la désigne par un facteur de surface effective de rayonnement (F_{eff}), qui dépend de la posture de l'individu. Une valeur de 0.75 correspond à un individu debout. Ainsi, la quantité de rayonnement diffus absorbée vaut :

$$\varphi_{diffus} = F_{eff} (1 - \alpha_{cl}) D \downarrow \quad (102)$$

Le rayonnement direct et diffus réfléchi absorbé s'écrit alors :

$$\varphi_{réfléchi} = F_{eff} (1 - \alpha_{cl}) (D \downarrow + S \downarrow) \alpha \quad (103)$$

Le rayonnement GLO est également supposé être absorbé par cette fraction (F_{eff}) :

$$\varphi_{GLO} = F_{eff} (F_{ciel} L \downarrow + \sum_{j=1}^n F_{i,j} \sigma \varepsilon_j (T_j + 273.2)^4 - \sigma \varepsilon_i (T_i + 273.2)^4) \quad (104)$$

j est l'indice désignant l'environnement et i l'individu.

Enfin, la fraction de rayonnement incident absorbé par le corps varie en fonction de l'isolation des vêtements et fait apparaître un facteur d'efficacité de chauffage dû au soleil (U_{sol}), fonction de l'isolation intrinsèque des vêtements, du facteur de surface de vêtements et de l'isolation de la couche limite d'air à la surface de la peau :

$$U_{sol} = \frac{I_{air}}{F_{cl} \left(I_{cl} + \frac{I_{air}}{F_{cl}} \right)} \quad (105)$$

Le vent réduit l'isolation de la couche limite d'air, augmentant ainsi la convection. L'isolation de la couche limite d'air dépend du logarithme de la vitesse du vent :

$$I_{air} = 0.3767 - 0.3225 \text{Log}_{10}(U) \quad (106)$$

La quantité totale de rayonnement absorbé par le corps humain est obtenue en sommant le flux direct, diffus et réfléchi au flux de grande longueur d'onde.

La température radiante moyenne, en Kelvin, correspond à la température isotherme (T_s) de l'enceinte pour laquelle la quantité de rayonnement arrivant sur le corps est donnée par la loi de Stefan-Boltzmann. En supposant que le rayonnement de grande longueur d'onde est absorbé par la surface radiante effective, la quantité de rayonnement absorbé par une personne dans une enceinte isotherme s'écrit :

$$\varphi = F_{eff} \sigma (\varepsilon T_s^4 - \varepsilon_i T_i^4) \quad (107)$$

La température radiante moyenne en Kelvin est alors obtenue ($T_s = T_{mrt}$) soit :

$$T_{mrt} = \left[\sum_{j=1}^n F_{i,j} \varepsilon_j T_j^4 + F_{i,ciel} \varepsilon_{ciel} T_{ciel}^4 + \frac{f_p (1 - \alpha_{cl}) U_{sol} S \downarrow}{\sigma F_{eff}} + \frac{(1 - \alpha_{cl}) U_{sol} (D \downarrow + \alpha_{sol} (S \downarrow + D \downarrow))}{\sigma} \right]^{0.25} \quad (108)$$

4.4.3.3 Indice de contrainte thermique

Ce 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 (métabolisme + ambiance) peut être calculée [Givoni 1976]. Dans le domaine de l'équilibre thermique, la sueur est sécrétée selon un taux suffisant pour obtenir un refroidissement par évaporation, nécessaire pour 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 requise dépend de l'efficacité de refroidissement de la sueur. Lorsque cette efficacité diminue, le corps doit sécréter de la sueur selon un taux plus élevé. La première version de l'indice de contrainte thermique avait été prévue simplement à l'usage de l'intérieur et d'un seul type de vêtement, à savoir vêtement léger d'été. Plus tard, il a été étendu à l'usage extérieur par l'introduction du rayonnement solaire et couvre maintenant différents types de vêtements. La formule générale de la contrainte thermique définit le taux de sueur requis (S_w) qui se calcule à partir de la formule suivante :

$$S_w = [(M_{th} - W) \pm \varphi_{conv} \pm R](1/f) \quad (109)$$

Avec :

$$\varphi_{conv} = \alpha U^{0.3} (T_{air} - 35) \quad (110)$$

$$\frac{1}{f} = \exp\left\{0.6\left(\frac{E}{E_{\max}} - 0.12\right)\right\} \quad (111)$$

Le flux convectif (ϕ_{conv}) s'exprime ici en kcal/h, α est un coefficient sans dimension fonction de la tenue vestimentaire (Tableau 22), U en m/s, et T_{air} en °C. E_{\max} est la capacité évaporative de l'air. De petites fluctuations instantanées de vitesse de vent ont peu d'effet sur le confort thermique des individus (relation en $U^{0.3}$), ainsi, si l'on double la vitesse du vent de 1 à 2 m/s, C et E_{\max} n'augmentent que de 23 %.

Vêtements	Coefficients			
	α	K_{cl}	a	p
Semi-nudité : maillot de bain et chapeau	15.8	1.0	0.35	31.6
Tenue légère d'été : sous-vêtements chemise manches courtes en coton, pantalons longs en coton, chapeau	13.0	0.5	0.52	20.5
Treillis militaires sur shorts	11.6	0.4	0.52	13.0

Tableau 22 : Coefficient des vêtements de l'I.C.T. [Givoni 1978]

Pour prendre en compte le rayonnement de grande longueur d'onde, la température du globe est substituée à celle de l'air dans l'équation de l'échange de chaleur convective pour une exposition à l'intérieur ou à l'extérieur et à l'ombre. Le rayonnement solaire intervient sous la forme suivante :

$$R = S \downarrow \sin h K_{pe} K_{cl} [1 - a (U^{0.2} - 0.88)] \quad (112)$$

Avec : $S \downarrow$: intensité solaire en kcal/h

K_{pe} : coefficient dépendant de la position et du site (Tableau 23);

K_{cl} , a: coefficients dépendant de la tenue vestimentaire (Tableau 22);

U : vitesse du vent en m/s.

Position	Site	K_{pe}
Assis le dos tourné au soleil	Désertique	0.386
	Forêt	0.379
Debout le dos tourné au soleil	Désertique	0.306
	Forêt	0.266

Tableau 23 : Coefficients K_{pe} [Givoni 1978]

Le diagramme de Givoni (Figure 39) permet de visualiser les zones de confort pour un individu dont l'activité métabolique est de 1.8 met, dans un air ayant une vitesse de 0.5 m/s pour des niveaux de mouillure de 6 et 25 % et des niveaux de sudation de 50 et 250 g/h.

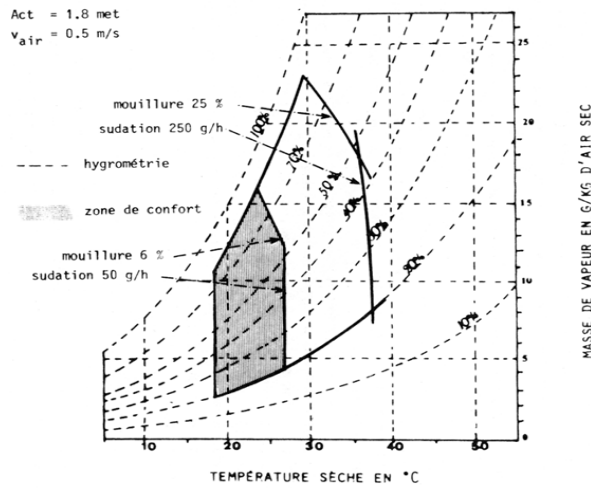


Figure 39 : Diagramme de Givoni

La limite inférieure de $1/f$ est 1.0. Ainsi, la peau est sèche aussi longtemps que le rapport $\eta = E/E_{\max}$ est inférieur à 0.12. Ce critère peut être mis en relation avec une température qualifiée de température de confort [Swaid et al. 1993]. Ainsi, si la température de l'air est en dessous de ce seuil, on suppose que la situation peut être jugée confortable d'un point de vue thermique.

On peut donc écrire :

$$\eta = \frac{E}{E_{\max}} = 0.12 \quad (113) \quad \Rightarrow \quad T_{\text{confort}} = \frac{0.12E_{\max} - (M_{th} - W) - R}{\alpha U^{0.3}} + 35 \quad (114)$$

4.4.3.4 PMV modifié

Le PMV a été étendu par plusieurs auteurs de manière à considérer les apports solaires dans le calcul des votes. Cette procédure artificielle est soumise à caution étant donné les procédures inhérentes à sa définition, à savoir expérimentation à l'intérieur des bâtiments en régime permanent et en climat tempéré.

Une extension de l'indice PMV est présentée en intérieur afin de pouvoir considérer les apports solaires à travers les parois vitrées [Serres 1997]. L'auteur reprend la définition du PMV et considère que le flux solaire (ϕ), absorbé par les vêtements, intervient partout où le rayonnement infrarouge est présent, c'est-à-dire dans les expressions du terme de rayonnement (R), du terme de température de vêtement (T_{cl}) et dans le terme de convection (C). Il définit alors la température de vêtement en présence de flux solaire (T_{cl*}) et note ΔPMV la variation de PMV due à la présence d'apport solaire ϕ :

$$\Delta PMV = A' \frac{\phi}{1 + Coef1 + Coef2} \quad (115)$$

Avec :

$$Coef1 = 1.875 F_{cl} \sqrt{U} I_{cl} \quad (116)$$

$$Coef2 = 0.62 F_{eff} F_{cl} \varepsilon \sigma \bar{T}^3 I_{cl} \quad (117)$$

$$A' = 0.303.e^{-0.36M} + 0.028 \quad (118)$$

L'auteur donne un exemple de modification du PMV, en considérant un homme debout ($F_{\text{eff}} = 0.95$), au repos ($M = 70 \text{ W/m}^2$ soit $A' = 0.0524$), en tenue d'été ($I_{\text{cl}} = 0.5 \text{ clo}$ soit $f_{\text{cl}} = 1.1$, $\varepsilon = 0.9$), dans une ambiance à 27 °C et une vitesse d'air de 0.1 m/s . Il obtient :

$$\Delta\text{PMV} = 0.0295 \varphi \quad (119)$$

Ce qui signifie que pour un flux de 40 W/m^2 le PMV serait augmenté de $+ 1.18$. L'indice variant de -3 à $+3$, l'auteur conclut que le flux solaire modifie de manière conséquente la valeur du PMV.

De son côté, Jendritzky a développé le PMV pour l'extérieur [Matzarakis et al. 1998] en introduisant le rayonnement absorbé par une personne debout dans la valeur de la température moyenne de surface comme nous l'avons signalé précédemment. Cependant les performances du PMV sont considérées moins fiables lorsque l'on s'écarte des conditions moyennes de confort d'où des réserves pour l'utilisation en extérieur [Pickup et al. 1999]

4.4.3.5 La Température Physiologique Equivalente (PET)

L'indice PET est défini comme la température de l'air à laquelle, dans un local intérieur typique avec ou sans rayonnement solaire, le bilan de chaleur du corps humain (activité légère, métabolisme de travail de 80 W à ajouter au métabolisme de base, et résistance des vêtements de 0.9 clo) est équilibré avec les mêmes températures interne et de peau que celles obtenues en conditions extérieures [Hoppe 1999]. Ainsi, le PET permet de comparer les effets d'un environnement thermique complexe en extérieur avec sa propre expérience en intérieur. Le modèle de bilan de chaleur MEMI est basé sur l'équation de bilan d'énergie et sur quelques paramétrisations du modèle à deux nœuds de Gagge. Ainsi, pour résoudre l'équation de bilan il faut évaluer trois quantités inconnues : la température moyenne de surface des vêtements (T_{cl}) la température moyenne de la peau (T_{sk}) et la température interne (T_{corps}). Pour quantifier ces inconnues, deux équations doivent être ajoutées pour décrire le flux de chaleur de l'intérieur du corps vers la surface de la peau et de la peau vers la couche de vêtements. Dans le cas concret d'une journée chaude et ensoleillée d'été, la valeur du 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 ces conditions en extérieur. S'il avait à se déplacer à l'ombre le PET diminuerait de 14 °C pour atteindre une valeur de 29 °C (Tableau 24).

	$T_{\text{air}} \text{ (°C)}$	$T_{\text{mrt}} \text{ (°C)}$	$U \text{ (m/s)}$	$P \text{ (hPa)}$	$\text{PET} \text{ (°C)}$
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

Tableau 24 : Exemples de PET pour différents scénarios [Hoppe 1999]

4.4.3.6 Le OUT_SET*

L'utilisation de la température radiante moyenne en extérieur, calculée par le modèle OUT_MRT et introduite dans l'indice de confort thermique de température standard effective (SET*) obtenue par le modèle à 2 nœuds de Gagge, permet de calculer l'indice de confort thermique OUT_SET* [Pickup et al. 1999]. L'objectif est de définir la température d'un

environnement de référence isotherme ($T_{air} = T_{mrt}$, RH = 50 %, U = 0.15 m/s) telle qu'une personne dans cet environnement (0.6 clo et 1.2 met) possède la même température moyenne de peau (T_{sk}) et la même moiteur (ω) que dans l'environnement réel complexe. Les environnements réels et de référence sont équivalents en terme de contrainte physiologique et d'inconfort thermique car t_{sk} et ω sont fortement corrélées avec l'inconfort subjectif dans des environnements froids et chauds respectivement.

4.4.3.7 Taux de sueur régulatrice

Dans le cadre de l'exposition universelle de Séville en 1992, le problème du confort thermique dans les espaces extérieurs ouverts a été mis en relation avec le type d'activité prévue [Alvarez et al. 1992]. La notion de confort thermique y était associée à l'équilibre du bilan énergétique sur un individu. Si l'ambiance extérieure ne permet pas de réaliser l'équilibre de ce bilan, des mécanismes de thermorégulation apparaissent : dans un contexte de régulation contre la chaleur, le corps sécrète de la sueur qui en s'évaporant abaisse la charge thermique. Cependant, une sudation excessive peut entraîner une sensation d'inconfort (stress thermique). Le bilan énergétique de l'individu est exprimé en terme de quantité de sueur nécessaire à évaporer afin de se trouver dans une zone de confort. Cette quantité est elle-même considérée en fonction du lieu et donc de l'activité. Ainsi, une zone de passage est supposée être confortable d'un point de vue thermique, lorsque le taux de sueur est inférieur à 90 g/h. Si l'individu doit rester un certain temps (plus de 15 minutes) le taux doit être inférieur à 60 g/h. Le temps de résidence moyen joue donc un rôle sur le conditionnement à appliquer dans chaque zone. D'un point de vue sociologique, les auteurs supposent que les visiteurs étaient disposés à accepter des conditions de confort différentes, liées au climat local.

L'originalité de ce modèle réside dans le fait d'exprimer le bilan en fonction de la quantité de sueur évaporée :

$$E_{rsw} = M - (\phi_{res} + E_{res}) - (\phi_{conv} + \phi_{GLO} + E_{dif}) + \phi_{CLO} \quad (120)$$

Le modèle considère le corps humain à une température unique (température de la peau), c'est un modèle à un seul nœud. Des comparaisons entre ce modèle et le modèle à deux nœuds (noyau central et partie périphérique) ont démontré que pour des situations chaudes les résultats sont très similaires.

4.5 Conclusion

A travers ces rappels sur la notion de confort thermique, nous avons pu insister sur la difficulté liée à la qualification et à la quantification de ce concept, même en ne considérant que des paramètres physiques objectifs (transferts de chaleur entre l'individu et son environnement). La majeure partie des recherches ont été effectuées à l'intérieur des bâtiments. La recherche de la thermoneutralité est régulièrement mentionnée dans les travaux, bien que de nombreux inconforts soient liés à la notion de transition. Dans la plupart des études sur le confort, le constat d'une trop grande réduction des caractéristiques du comportement humain est pour l'instant un sérieux handicap lorsque l'on prétend évoquer la notion de confort. Ainsi, l'âge, le sexe, l'état de santé et l'état mental de l'individu devraient également être pris en compte. Les précédents travaux nous montrent qu'il est très délicat d'aborder ce type de problèmes car le degré de complexité des modèles devrait être tel que la pertinence de ces considérations serait en décalage par rapport au degré d'imperfection des simulations thermiques actuelles. Il est à espérer que les efforts des différents travaux dans des domaines pluridisciplinaires aboutissent à

la définition de simulations de plus en plus réalistes, tant au niveau thermique que comportemental.

Les paramètres usuels (température de l'air, humidité, vitesse de vent, température radiante moyenne, activité, vêtements) interviennent dans les nombreux échanges thermiques entre l'individu et son environnement. L'équilibre de ce bilan conduit à la définition de certains indices, d'autres mettent en avant la quantité de sueur évacuée et d'autres globalisent la notion de température en y ajoutant les répercussions induites par les paramètres.

Les indices DISC sont intéressants car la présence de sueur et les échanges par évaporation font de la mouillure cutanée un indice physiologique important, notamment pour l'inconfort chaud.

Le meilleur indice global en intérieur est le PMV* qui est dérivé du PMV de Fanger et développé par Gagge (en améliorant notamment la sensibilité à l'hygrométrie par rapport à la version de Fanger). Nous avons déjà insisté sur certaines de ses limites mais nous avons également présenté certaines extensions possibles qui offrent l'avantage d'introduire les apports solaires. L'utilisation de ce type d'indice en extérieur n'a pas donné lieu à des validations, cependant cette approche, avec toutes les limites qu'on lui connaît, peut servir d'indicateur comparatif.

L'Indice de Contrainte Thermique est adapté à l'analyse des contributions des facteurs métabolisme et ambiance et pour la prédiction de l'effort physiologique imposé aux sujets au repos et au travail. Tant que l'équilibre thermique peut être maintenu, on considère qu'il est fiable dans le domaine des conditions situées entre la zone de confort et la contrainte sévère, au-delà de cette limite, l'indice ne peut plus être appliqué [Givoni 1978].

L'intégration des apports solaires et de l'ensemble des apports radiatifs dans la température radiante moyenne généralise les indices PMV, PET et SET en conditions extérieures. Ainsi, il est possible de comparer les effets d'un environnement thermique complexe en extérieur avec les expériences en intérieur.

D'un point de vue général, l'application d'un bilan permet de raffiner les connaissances des différents échanges d'énergie et de masse. L'expression du bilan en fonction de la quantité de sueur est intéressante car les problèmes de confort que nous aurons à traiter dans les simulations seront liés à l'inconfort chaud.

A partir de ces rappels et de ces constats sur les indices il est envisageable d'utiliser ces différents indicateurs, non pas pour obtenir une réponse exacte à une situation de confort en extérieur mais plutôt pour évaluer l'incidence d'une décision d'aménagement sur les niveaux résultants, en terme de tendance ou de comparaison. Nous sommes conscients que ce genre d'approche est délicat car aucune validation ne nous permet d'affirmer de manière forte la réalité de l'état de confort ou d'inconfort. Cependant en l'absence d'un modèle précis de confort reconnu en extérieur, ces options nous aident à mieux définir les effets du microclimat sur un individu, le modèle restant quant à lui perfectible avec l'accumulation des connaissances et le développement des outils de calcul. Nous ne prétendons pas apporter un critère absolu de quantification du confort, cela nécessiterait bien évidemment un travail de validation qui n'est pas envisagé dans le cadre de cette thèse. Néanmoins, par une comparaison des résultats et par une analyse différentielle des situations, une telle démarche devrait permettre d'apporter des informations pertinentes dans la problématique du confort en milieu extérieur urbain. Enfin, il est important de rappeler que les appréciations personnelles d'une situation thermique peuvent être très diversement affectées, c'est pourquoi s'il est utile d'établir des indices prédictifs de perception thermique et d'évaluation du confort, il est nécessaire d'extrapoler avec prudence à des situations réelles.

4.6 Références bibliographiques

- [Alvarez *et al.* 1992] ALVAREZ D. S., CEJUDO L. J.M., GUERRA M. J.J. *et al.* (1992). Control climatico en espacios abiertos, El Proyecto Expo'92. Sevilla: Ciemat, pp.4-49.
- [ASHRAE 1993b] ASHRAE (1993b). Physiological principles and thermal comfort. ASHRAE handbook of fundamental. Atlanta : ASHRAE, 8.1-8.29.
- [Berger 1993] BERGER, X. (1993) Vêtement et micro-climat : gestion dynamique et modèles d'interfaces. In : Journées d'études S.F.T. 12 mai. Paris : SFT.
- [Berger 1998] BERGER, X. (1998). Human thermal comfort at Nîmes in Summer heat. In proceedings of EPIC'98, 2nd european conference on energy performance and indoor climate in buildings and 3rd international conference on indoor air quality, ventilation and energy conservation in buildings, November 19-21. Lyon : ENTPE, pp. 201-206.
- [Bottema 2000] BOTTEMA , M. (2000). A method for optimisation of wind discomfort criteria. Building and Environment 35, pp. 1-18.
- [Brindel-Beth *et al.* 1998]BRINDEL-BETH, S. et TRICAUD, P. (1998). Isolation thermique et acoustique en résidentiel. Paris : CFE, 328 p.
- [Candas *et al.* 1991] CANDAS, V., HERMANN, C. et HOEFT, A. (1991). Le vêtement : écran thermique et outil climatique nécessaire au confort thermique. Revue générale de thermique n° 356, p. 359.
- [Chemillier 1986] CHEMILLIER, P. Sciences et Bâtiment, la démarche scientifique appliquée à la construction. Paris : Presses de l'ENPC, CSTB, 447 p.
- [Depecker *et al.* 1989] DEPECKER, P *et al.* (1989). Qualité thermique des ambiances. Paris : AFME, 67 p. Collection cahiers pédagogiques Thermique et Architecture.
- [Fanger 1970] FANGER, P. O. (1970). Thermal Comfort. New York : Mc Graw Hill.
- [Galeou *et al.* 1989] GALEOU, M., GRIVEL, F. et CANDAS, V. (1989). Le confort thermique : aspects physiologiques et psychosensoriels. Etude bibliographique. Strasbourg: CNRS, 113 p.
- [Gagge *et al.* 1986] GAGGE, A. P., FOBELETS, A. P. and BERGLUNG, L. G. (1986). A standard predictive index of human response to the thermal environment. Transaction ASHRAE n° PO-86-14, vol. 92-2B, p. 405.
- [Gandemer *et al.* 1976] GANDEMER, J. et GUYOT, A. (1976). Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti, Guide méthodologique et conseils pratiques. Paris : Ministère de l'Equipement, 130 p.
- [Gandemer *et al.* 1981] GANDEMER, J et GUYOT, A. (1981). La protection contre le vent. Paris : CSTB, 132 p.
- [Givoni 1976] GIVONI, B. (1976). Man Climate and Architecture. London : Applied Science Publishers, second edition.
- [Givoni 1978] GIVONI, B. (1978). L'homme, l'architecture et le climat. Paris : édition du Moniteur, 460 p. Traduction de J. L. IZARD.

- [Hofmann 1994] HOFMANN, J. B. (1994). Ambiances climatisées et confort thermique. Les actes du COSTIC, 120 p.
- [Höppe 1984] HÖPPE, P. (1984). Die Energiebilanz des Menschen, Wiss. Mitt. Meteor. Inst. Univ. München, Nr. 49.
- [Höppe 1999] 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].
- [Houghten *et al.* 1923] HOUGHTEN, F. C. and YAGLOU C. P. (1923). Determining lines of equal comfort. In AHSVE Transaction, Vol 29, p 163.
- [Humphreys *et al.* 1998] HUMPHREYS, M.A and NICOL J. F. (1998) . Understanding the adaptative approach to thermal comfort. To be published in ASHRAE Transactions.
- [Lemaire 1966] LEMAIRE, R. (1966). Contribution à l'étude du rôle de l'eau dans les échanges thermiques de thermolyse – mécanisme de l'adaptation à la chaleur. Bordeaux, 146 p.
- [Matzarakis *et al.* 1998] MATZARAKIS, A. and MAYER, H. (1998). Investigations of Urban Climate's thermal Component in Freiburg, Germany. In : Proceedings of the Second Urban Environment Symposium and 13th Conference on Biometeorology and Aerobiology, November, 2 – 6. Albuquerque, New Mexico : American Meteorology Society, pp 140 - 143.
- [Mayer 1985] MAYER, E. (1985). Untersuchungen von Zeigerscheinungen mit Hilfe physikalischer Messmethoden. Gesundh., n°2, pp. 65-112
- [Mayer *et al.* 1997] MAYER, H. and MATZARAKIS, A (1997). The urban heat island seen from the angle of human-biometeorology. In : Proceedings of International symposium on monitoring and management of urban heat island. Fujisawa, pp. 84 – 95.
- [Mc Intyre 1980] MC INTYRE, D. A. (1980). Indoor Climate. London : Applied Science Publishers.
- [Missenard 1972] MISSENARD, A. (1972). Neutralité thermique physiologique. Thermique et Aéraulique n°8.
- [Moreau 1999] MOREAU, S. (1999). Caractérisation et développements aérodynamiques de l'espace intermédiaire en climat tropical humide : Conception d'une architecture de confort adaptée à la contrainte cyclonique. Thèse de doctorat de l'Université de Nantes, Sciences pour l'ingénieur option architecture, 294 p.
- [Nishi *et al.* 1970] NISHI, Y. and GAGGE, A. P. (1970). Moisture perméation of clothing – a factor governing thermal equilibrium and confort. Trans. ASHRAE n° 2135, vol 80/1, p 120.
- [Pénicaud 1978] PENICAUD, H. (1978). Microclimats urbains étudiés sous l'angle du confort à l'extérieur des bâtiments. Paris : Plan construction, RAUC.
- [Penwarden 1974] PENWARDEN, A. D. (1974). Acceptable wind speed in towns. Building Research Establishment, Current Paper, 8 p.

- [Pickup *et al.* 1999] PICKUP, J and de DEAR, R. 1999. An outdoor thermal comfort index (OUT-SET*). 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].
- [Pignolet 1996] PIGNOLET - TARDAN, F. (1996). Milieu thermique et conception urbaine en climat tropical humide, modélisation thermo-aéraulique globale. Thèse de l'INSA de Lyon, 246 p (+Annexes).
- [Sacré 1983] SACRE C. (1983). Le confort dans les espaces extérieurs : analyse microclimatique. Nantes : CSTB, 138 p.
- [Sacré *et al.* 1994] SACRE, C. et GANDEMER, J. (1994). Caractérisation microclimatique des espaces extérieurs, du point de vue du vent et de la température. Paris : Les Annales de la Recherche Urbaine, n° 61. Les saisons dans la ville
- [Sangkertadi 1994] SANGKERTADI (1994). Contribution à l'étude du comportement thermo-aéraulique des bâtiments en climat tropical humide. Prise en compte de la ventilation naturelle dans l'évaluation du confort. Thèse de l'INSA de Lyon, 275 p.
- [Serres 1997] SERRES, L. (1997). Etude de l'impact d'une perturbation thermique locale de type tache solaire. Influence sur le confort thermique. Thèse de L'INSA de Toulouse, 148 p.
- [Sprague *et al.* 1974] SPRAGUE, C. H. and MUNSON, D. M. (1974). A composite ensemble method for estimating thermal insulating values of clothing. Trans. ASHRAE, n° 2299, vol 80/1, p 120.
- [Stolwijk *et al.* 1966] STOLWIJK, J and HARDY, J. D. (1966). Partitional calorimetric studies of responses of man to thermal transients. Journal of Applied Physiology, Vol 21, p. 967.
- [Teller 1998] TELLER J. (1998), "Design tools for outdoor comfort assessment", In : Proceedings of EPIC'98, 2nd European conference on energy performance and indoor climate in buildings and 3rd Intenational conference on indoor air quality, ventilation and energy conservation in buildings, November19-21. Lyon : ENTPE, 8p.
- [Vinet *et al.* 2000c] VINET, J. et GROLEAU, D. (2000c). La modélisation des transferts radiatifs dans le logiciel Solene. Applications au microclimat urbain et au confort thermique en espace ouvert. In : 2ème Conférence IBPSA France 2000, Sophia Antipolis, 26 et 27 octobre 2000, pp. 29-35.
- [Winslow *et al.* 1937] WINSLOW, C.-E. A, HERRINGTON, L. P. and GAGGE, A. P. (1937). Relation between atmospheric conditions, physiological reactions and sensations of pleasantness. Am. J. Hygiene 26, pp. 103-115.

5 Conclusion

Les espaces extérieurs sont nombreux en ville (rues piétonnes, plaines de jeux, espaces verts). L'utilisation optimale de ces espaces nécessite la connaissance des microclimats engendrés par leur environnement urbain. La présence d'eau et de végétation autour des bâtiments n'a pas seulement un effet psychologique mais peut aussi améliorer des conditions microclimatiques défavorables. Les effets induits sont nombreux et concernent aussi bien des problématiques d'urbanisme et de climatologie, que de confort et d'ambiance. Lorsque des architectes et des urbanistes conçoivent un aménagement dans lequel le paramètre thermique joue éventuellement un rôle, ils ont besoin des données qui indiquent les effets de chaque implication climatologique de la végétation.

Les deux principales techniques d'investigation sont basées sur la mesure et sur la simulation. La qualification et la quantification de certains effets thermiques grâce à la présentation d'études réalisées sur l'impact microclimatique de la végétation en milieu urbain est largement détaillée. Les modèles numériques sont nombreux, nous en avons présenté quelques-uns parmi les plus intéressants. Les rappels issus de la recherche bibliographique concernent la définition et le calcul des phénomènes. Les principes et les formulations des échanges thermiques permettent de dégager des informations qui peuvent servir de base de travail, de comparaison, de vérification des ordres de grandeur et de validation éventuelle lors de la réalisation des simulations numériques.

Nous avons défini les caractéristiques principales de la microclimatologie urbaine en expliquant les phénomènes de transferts de chaleur et de masse en milieu urbain (échanges radiatifs, convectifs, conductifs, bilan hydrique). Différentes études menées sur ce thème donnent des pistes sur la compréhension des processus à l'échelle de la rue, de la ville et déterminent les causes et les conséquences de l'îlot de chaleur urbain. De plus en plus d'outils de simulation sont appliqués à ce type de démarche.

Nous avons ensuite insisté sur les relations qu'entretiennent la ville, l'eau et la végétation, ce qui nous a permis de soulever les principes selon lesquels ces éléments peuvent modifier leur environnement suivant différents points de vue et tout particulièrement suivant leur impact au niveau microclimatique. Les dimensions symboliques, historiques et esthétiques soulevées par l'utilisation de ces dispositifs, jouent sur la manière dont la quasi-totalité des sens peut être mise en action. Les nombreuses qualités associées à ces éléments n'ont pu qu'être partiellement abordées et la principale source de préoccupation a été de comprendre les possibilités d'action sur la régulation du microclimat. L'impact des zones étendues d'eau et des sources ponctuelles ainsi qu'un exemple de modélisation d'un bassin ont été présentés. Les modifications des échanges radiatifs, des températures, des écoulements aérauliques et des caractéristiques d'évapotranspiration ont été recensés à différents niveaux (au niveau de l'arbre lui-même, dans les parcs, les rues et les squares). Des simulations numériques de l'impact des arbres en microclimatologie urbaine sont mises en avant et démontrent le potentiel d'investigation associé à cette technique.

Enfin, l'analyse des échanges thermiques entre l'individu et son environnement a permis d'aborder le confort thermique en espace extérieur. Un travail de synthèse des indices de confort ou de stress thermique en intérieur et en extérieur nous a renseigné sur les modalités de calcul et sur les spécificités de chacun. De nombreux indices ont été présentés, ils correspondent en général à des résultats d'expériences à l'intérieur des bâtiments et sont modifiés pour être applicables en espace extérieur, notamment par l'intégration des échanges radiatifs dans la température radiante moyenne. Des analyses comparatives et paramétriques de certains de ces

indices apportent des éléments d'information sur la manière dont nous pouvons rendre l'espace urbain plus confortable.

Cette première partie a permis de montrer que le contrôle microclimatique des espaces extérieurs peut être assuré par des aménagements urbains raisonnés à l'aide de dispositifs naturels, comme les bassins et les arbres. Cette manière passive d'améliorer le microclimat est partagée par de nombreuses équipes de recherche et les impacts relevés dans la littérature méritent d'être précisément étudiés et ce grâce à des techniques de modélisation dont nous exposons le principe dans la deuxième partie.

Deuxième partie

Modélisation numérique des transferts de chaleur en espace urbain

6 Introduction

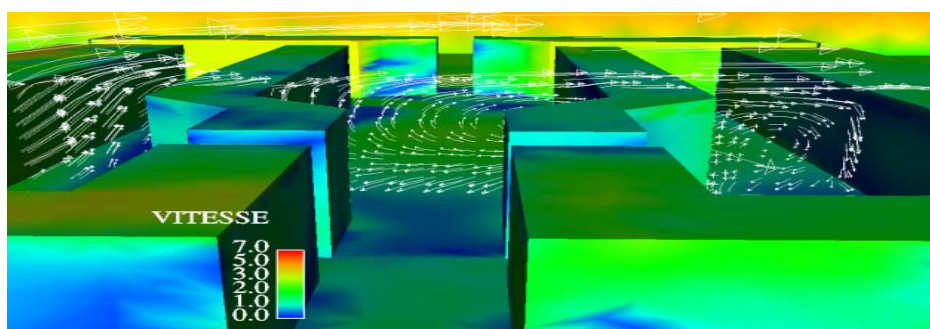


Figure 40 : Simulation thermo-aéraulique du quartier Antigone

La réalisation d'un nouveau bâtiment ou le remplacement d'une zone minérale par une plantation d'arbres dans un site urbain peut induire une modification sensible de l'espace, du microclimat, de la dispersion des polluants ou de la consommation énergétique. Ces préoccupations intéressent les différents acteurs des projets d'architecture et d'urbanisme. Pour concevoir le projet urbain, il est nécessaire de prendre en compte certains résultats expérimentaux obtenus par la communauté scientifique. Cependant, les analyses d'impact demandent une instrumentation appropriée qui passe soit par des campagnes de mesures, soit par des modèles de site placés en soufflerie, soit par l'utilisation de techniques de simulation. Nous l'avons vu, de nombreux travaux ont abordé ces considérations selon différents angles d'analyse. En effet, certains auteurs ont préféré étudier une modalité d'influence (ombre, température du feuillage, modification des écoulements aérauliques, évapotranspiration, etc.), d'autres ont tenté de les croiser, certains ont estimé les conséquences indirectes à l'échelle de la ville ou d'une région alors que d'autres ont mis l'accent sur les techniques d'évaluation des effets (maquettes, mesures in situ, soufflerie, simulations numériques). L'analyse de ces différentes techniques d'évaluation nous a permis de juger les capacités et leurs limites.

Pourquoi choisir la simulation ?

Les interactions entre les surfaces, la végétation et l'atmosphère dans un environnement urbain sont complexes. Il n'est pas possible de faire des hypothèses à première vue sur les effets des changements dans un système en totale interaction comme dans le cas d'un quartier. Les effets induits sur le climat local sont nombreux (échauffement, refroidissement, recirculation d'air, phénomènes d'advection, etc.). Tous ces changements ne peuvent pas se vérifier par une combinaison linéaire de phénomènes connus séparément. Ainsi, seules les simulations numériques permettent une estimation de ces différents effets. Elles peuvent être alors utilisées de manière à optimiser le climat dans lequel nous vivons dès qu'un aménagement urbain est envisagé.

Dans l'analyse microclimatique, dans les études d'impact, dans les avant-projets sommaires (APS) ou détaillés (APD), il est nécessaire de pouvoir tester rapidement l'influence d'une décision dans un site. La flexibilité des outils de simulation et la réduction constante des temps de calcul permettent d'apporter des réponses relatives à des variations concernant de nombreux paramètres. Nous sommes passés de la construction de maquettes à échelle réduite, ne supportant pas ou peu de modifications, à des maquettes numériques, offrant une grande possibilité de changement, à moindre coût. De plus, il est à signaler que les nouvelles techniques de simulation et de modélisation des phénomènes physiques nous permettent de mieux contrôler certains des éléments autres que les composantes visuelles, ce qui dans le domaine de l'architecture et de l'urbanisme est un point important qui permet de se distinguer

des analyses géométriques classiques en apportant une somme de connaissances utiles à ces différents acteurs. La confrontation de différents scénarios est alors intéressante dans la réflexion autour du projet, car des intérêts opposés ou des stratégies d'amélioration d'ordres divers apparaissent.

Le degré de précision, les hypothèses de travail et le niveau de validation des résultats de simulation sont des points essentiels qui doivent être énoncés clairement de manière à permettre un échange constructif entre le spécialiste et l'aménageur. Le traitement des résultats de simulation n'est certes pas accessible à la plupart des acteurs du projet car le caractère expérimental ou orienté vers la recherche de ces outils suppose une maîtrise des notions de climatologie et d'informatique, entre autres, mais peuvent correspondre à des travaux menés dans des bureaux d'étude.

Comment envisageons-nous la modélisation du microclimat urbain ?

Après cette digression sur les intérêts et les limites des simulations nous sommes aptes à savoir ce que nous pouvons en attendre et ce qu'il est délicat d'obtenir. Ainsi, nous retenons cette technique et présentons ce qu'elle nous permet de quantifier dans les domaines qui nous intéressent

La modélisation des différents transferts entre un individu, les bâtiments et l'environnement est une tâche complexe mais importante lorsque l'on veut analyser le microclimat urbain et le confort thermique en espace extérieur. Dans la première partie du manuscrit, nous avons insisté sur le fait que la présence d'eau et de végétation était un point déterminant dans l'analyse du microclimat urbain. Les principes et les phénomènes ayant été décrits, il est maintenant temps d'essayer de quantifier les différents impacts. Le couplage thermo-aéraulique dans les simulations d'un site urbain est une étape délicate de notre recherche. Peu de travaux équivalents nous renseignent sur les modalités d'exécution d'une telle opération. De plus, nous souhaitons présenter une démarche générale de ce type de couplage car, même si les outils numériques de thermique et d'aéraulique sont sensiblement différents d'un laboratoire à l'autre, des interfaces sont à définir pour exploiter les résultats de manière cohérente et transférable.

Nous abordons alors, dans un premier temps, la modélisation des transferts de chaleur, en traitant successivement les échanges radiatifs, convectifs et conductifs et en présentant les deux logiciels sur lesquels se base notre environnement de travail. La prise en compte des propriétés physiques de la végétation nécessite de développer des procédures spécifiques. La simulation en régime transitoire avec ou sans couplage thermo-aéraulique est ensuite largement détaillée. Les résultats calculés en sortie des différentes étapes apportent les paramètres essentiels aux analyses microclimatiques. A partir de ces résultats de simulation, il est possible de réaliser le calcul des indices de stress thermique et de confort thermique en espace extérieur pour des individus dont l'activité et les caractéristiques vestimentaires sont connues.

Une fois les principes et les procédures des simulations présentées, il est important de s'attarder un instant sur le domaine de validité des informations recueillies. Ainsi, nous comparons nos résultats de simulation à des résultats obtenus par d'autres codes de calcul et considérés comme travaux de référence pour la partie aéraulique développé dans N3S. Nous confrontons également nos résultats de simulation à des mesures en site urbain pour la partie thermique développée dans l'environnement SOLENE.

Enfin, nous terminons cette deuxième partie du manuscrit en présentant des résultats relatifs à l'analyse microclimatique d'une configuration urbaine du centre ville de Montpellier, le quartier Antigone, dans laquelle la végétation a un impact de plus en plus important au cours des années. Cette illustration permet non seulement de suivre le traitement complet à effectuer pour arriver

au couplage thermo-aéraulique mais informe également sur les potentialités d'analyse offertes par cette démarche de simulation.

7 Le couplage thermo-aéraulique

7.1 Introduction

Dans la première partie du manuscrit nous avons pu constater que la modélisation des transferts de chaleur pouvait permettre d'appréhender la caractérisation du microclimat et des conditions de confort. La méthodologie, les équations et les hypothèses de travail retenues pour réaliser nos simulations sont présentées dans ce chapitre.

L'objectif étant de déterminer, pour chaque élément de la scène, les températures de surface, les températures et les vitesses de l'air relatives aux différentes zones, nous considérons que l'espace urbain peut être modélisé comme un ensemble de polygones dont les facettes sont ensuite découpées en éléments de surface considérés comme homogènes vis à vis de leurs sollicitations climatiques et de leur comportement thermique. Chacune des facettes possède des dimensions et des propriétés physiques particulières (conductivité thermique, coefficients de réflexion solaires et infrarouges, etc.) et est affectée de certains descripteurs (appartenance au sol ou aux parois, élément végétal ou minéral, etc.). Les valeurs recherchées peuvent être obtenues en appliquant des bilans énergétiques et en mettant en œuvre une méthode de couplage thermo-aéraulique, de manière à traduire les effets d'interaction entre les différents phénomènes physiques. L'évolution de ces informations au cours de la journée impose alors de générer des résultats en régime variable.

La mise au point de ce couplage thermo-aéraulique en condition transitoire fait appel à deux outils de simulation numérique SOLENE et N3S pour lesquels des programmes d'interfaçage et des routines spécifiques de calcul ont dû être développés. Ce travail s'inscrit alors pleinement dans la continuité des activités menées au sein du laboratoire et apporte de nouvelles potentialités quant aux analyses liées à la microclimatologie et aux conditions de confort de l'utilisateur de l'espace urbain.

7.2 La modélisation des transferts de chaleur

Le calcul des températures de surface sur les différents éléments de la scène urbaine s'obtient en résolvant un bilan d'énergie faisant intervenir les flux radiatifs, convectifs et conductifs. Les surfaces présentes en ville sont généralement imperméables et la canalisation des eaux de pluie limite la présence de zones humides aux bassins comme nous avons pu en discuter dans le chapitre sur l'eau et la végétation en milieu urbain. Ainsi, nous avons négligé les transferts par chaleur latente au niveau des façades et du sol. La détermination des caractéristiques des écoulements aérauliques est envisagée par la résolution des équations de Navier-Stokes à l'aide d'un code de mécanique des fluides.

7.2.1 Les échanges radiatifs

Ces transferts de chaleur sont déterminés grâce à une séquence de traitements numériques permettant successivement le calcul des flux solaires incidents, des inter-réflexions solaires et des échanges radiatifs dans les grandes longueurs d'onde entre les surfaces et avec la voûte céleste. Les étapes de calcul s'appuient pour certaines sur des procédures existantes dans le logiciel SOLENE et pour les applications qui nous intéressent tout particulièrement sur les développements que nous allons présenter.

7.2.1.1 Un logiciel de simulation des transferts radiatifs : SOLENE

Le logiciel SOLENE est développé par le laboratoire CERMA [Péneau 1989, Marenne et al. 1992, Groleau 2000]. Il permet l'évaluation de la composante solaire directe, de la composante solaire diffuse et la détermination de l'énergie solaire absorbée à l'issue des multi-réflexions sur les bâtiments et le sol [Miguet 2000]. La version existante au début de ce travail effectuait le calcul des températures de surface en régime permanent [Antoine et al. 1998] (Figure 41 et Figure 42).



Figure 41 : Le square Fleuriot à Nantes

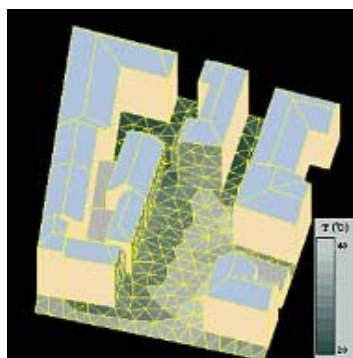


Figure 42 : Températures de surface [Antoine *et al.* 1998]

Dans le cadre de notre recherche, la prise en compte des particularités des arbres nous amène à imposer certaines températures de surface et surtout à considérer la notion de coefficient de transmission solaire. Ce dernier point est intéressant car jusqu'à présent un élément de surface était soit totalement transparent et dans ce cas là on ne le représentait pas créant ainsi un trou, soit totalement opaque. Ces deux points sont plus longuement discutés dans le paragraphe sur les traitements spécifiques de la végétation. Notre contribution dans cet environnement de recherche a été d'améliorer les capacités du logiciel en intégrant notamment les prises en compte des végétaux comme nous venons de le signaler, mais également de passer du calcul des températures en régime permanent à celles en régime transitoire [Vinet 2000a]. Cette amélioration nécessite la mise au point de programmes spécifiques s'inscrivant certes dans un environnement existant mais demandant une analyse précise des interactions des phénomènes physiques et une réécriture complète de certains modules de calcul. Ce calcul en régime transitoire est de plus envisagé selon deux approches de niveaux de complexité croissants en opérant dans premier temps un découplage des flux convectifs à l'aide d'une équation empirique de transfert de chaleur faisant intervenir un coefficient d'échange convectif et en réalisant un couplage thermo-aérouatique au moyen d'une itération entre le code SOLENE et le code de mécanique des fluides N3S.

Dans ce paragraphe de présentation générale du logiciel SOLENE, nous donnons les principes de traitement spécifique, les procédures et les techniques développées dans l'environnement SOLENE et nous ne rentrons pas dans les détails liés aux procédures de calcul des phénomènes physiques. En effet, la méthodologie développée pour définir les caractéristiques microclimatiques d'un site s'appuie sur les capacités de ce logiciel mais n'en est pas pour autant dépendante. D'autres logiciels, basés sur d'autres manières de traiter la modélisation des transferts de chaleur peuvent être exploités selon une structure plus ou moins équivalente. Ce qui donne une grande liberté à l'utilisateur qui souhaite obtenir des résultats équivalents. Nous apportons alors une façon d'aborder le problème et sa solution avec un outil mais donnons également des orientations largement envisageables avec d'autres outils.

Quoiqu'il en soit, la modélisation adoptée considère la scène urbaine comme un ensemble de facettes planes et polygonales ; discrétisées en faces et contours suivant la terminologie en usage dans SOLENE. Ces facettes sont opaques, lambertiennes et baignent dans un air transparent au rayonnement. Elles voient la voûte céleste (du moins partiellement) et reçoivent éventuellement des flux solaires directs et diffus. On suppose que l'on connaît les caractéristiques physiques des matériaux constituant la scène.

Hormis la mise au point de modèles spécifiques pour chacun des phénomènes solaires, lumineux et thermiques, un problème commun demeure : la détermination dans une scène architecturale ou urbaine géométriquement complexe des « accessibilités visuelles » ou des visibilitées entre les différents éléments de l'espace [Groleau 2000]. Trois éléments interviennent dans ce problème d'accessibilité visuelle : un observateur (celui qui regarde, le point à évaluer), une scène 3D (son environnement architectural ou urbain) et l'objet à voir (soleil, partie de ciel, élément du site). Les principes de résolution s'appuient alors sur des vues projectives qui, grâce à des techniques s'apparentant à celles utilisées en visualisation graphique et en synthèse d'image, permettent une analyse numérique des images produites et de statuer sur les visibilitées recherchées. Les intersections des polygones projetés sont résolues par un algorithme du type Weiler et Atherton. Le maillage surfacique de la scène est basé sur une discrétisation en éléments quadrangulaires ou triangulaires dont les aires sont voisines les unes des autres. Pour ce dernier type, il s'agit du code Triangle, réalisé par J. R. Shewchuk de l'Université Carnegie Mellon (Pittsburgh), qui réalise une triangulation de type Delaunay avec une contrainte sur l'aire maximale des éléments [Miguet 2000].

Le problème majeur lors de la résolution du système d'équations linéaires décrivant les multi-réflexions réside essentiellement dans la taille de la matrice des facteurs de formes. Une scène discrétisée de plusieurs milliers d'éléments est fréquente en espace urbain et une méthode à raffinement progressif, due à Cohen et al. [Ashdown 1994] a été retenue pour la résolution des radiosités.

Le logiciel SOLENE, dans un premier temps développé en langage C sur station de travail Unix a été partiellement modifiée en langage C++ et est actuellement accessible dans un environnement Windows pour PC (Figure 43).

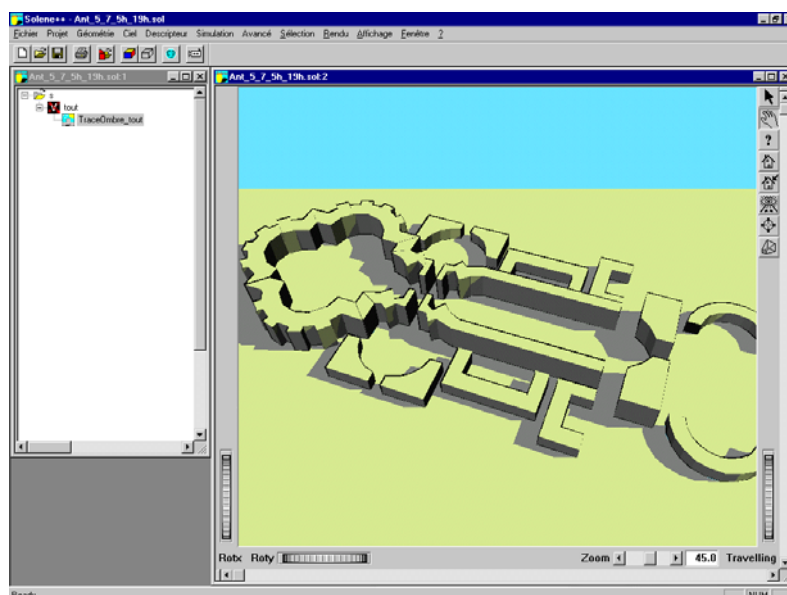


Figure 43 : Logiciel SOLENE

Ces quelques informations sur le logiciel SOLENE étant présentées, il est désormais possible de détailler les procédures de traitement des transferts de chaleur.

7.2.1.2 Flux solaires directs et diffus incidents

La détermination de l'énergie directe pour les différents points d'une scène revient à évaluer les obstacles sur le trajet du rayon solaire et à affecter une valeur relative à l'état d'ensoleillement de la surface considérée. Il est donc nécessaire de définir deux modèles pour caractériser le soleil : le premier est un modèle géométrique qui permet de calculer précisément les trajectoires solaires, le second est un modèle énergétique qui évalue l'éclairement solaire direct.

Les équations des trajectoires solaires qui décrivent le mouvement apparent de la terre autour du soleil en fonction de l'équation du temps, de l'angle horaire ω , de la déclinaison δ , de l'altitude h et de l'azimut α sont celles retenues dans le logiciel SOLENE [Miguet 2000].

L'équation du temps est celle dans laquelle intervient le jour j de l'année. Il existe plusieurs formulations pour la décrire. Nous présentons ici une expression trigonométrique simple :

$$ET = 0.128 \sin \left[\frac{360}{365.25} (j - 2) \right] + 0.164 \sin \left[2 \frac{360}{365.25} (j + 10) \right] \quad (121)$$

L'angle horaire ω correspond à la différence entre l'heure solaire (noté, temps solaire vrai : TSV) et l'heure légale (noté, temps légal : TL). Son expression en degrés est donnée par :

$$\omega = 15(TSV - TL) \quad (122)$$

La déclinaison δ correspond à l'angle formé par les rayons solaires et le plan équatorial. Elle s'exprime également en fonction du jour j de l'année et peut être décrite par différentes formules, dont la suivante :

$$\delta = 23.451 \sin \left[\frac{2\pi}{365} (j - 81) \right] \quad (123)$$

Le calcul de l'altitude solaire (h) fait intervenir la latitude (φ), la déclinaison (δ) et l'angle horaire (ω). Il s'obtient à partir de la règle des cosinus sphériques :

$$\sin(h) = \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (124)$$

L'azimut solaire (α) est l'angle formé par le plan contenant le soleil et le lieu d'observation et celui contenant le plan méridien de ce même lieu. Il est relié à l'altitude par la relation suivante :

$$\sin(\alpha) = \frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (125)$$

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

- la méthode « héliodon » indique le tracé exact des ombres à l'aide d'une projection axonométrique de la scène selon la direction des rayons solaires (la maquette géométrique initiale est découpée en deux ensembles complémentaires à chaque instant, l'un au soleil, l'autre à l'ombre). La dimension temporelle est intégrée en effectuant des simulations par intervalle de temps d'une heure.
- la méthode « masque » permet de connaître les conditions d'ensoleillement d'un site au cours du temps. La visibilité des trajectoires solaires est déterminée, en chaque point d'un maillage appliqué sur la maquette, en tenant compte des différents obstacles (cette technique impose une discrétisation de la scène tridimensionnelle). Des procédures de projection sphérique appliquées au centre de chaque élément de la scène urbaine (Figure 44) permettent de constituer les masques (occultations) au soleil pour l'ensemble de la scène [Groleau 2000].

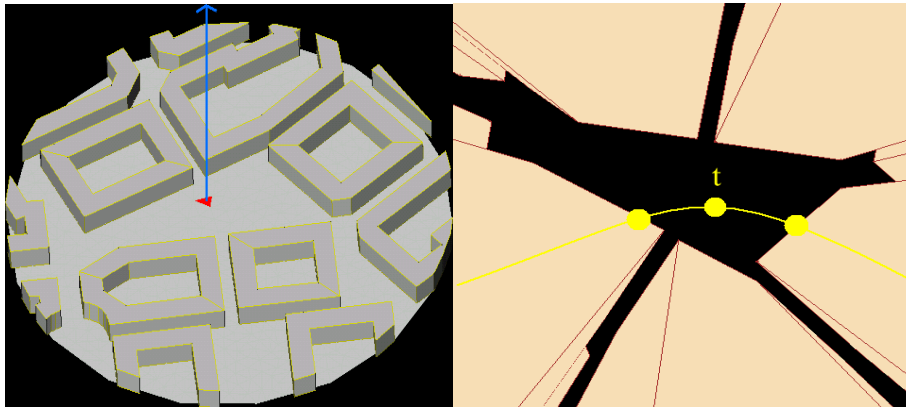


Figure 44 : Projection d'une scène urbaine [Groleau 2000]

Par analyse des images ainsi produites, l'ensoleillement des facettes de l'espace peut être connu au cours du temps. En effet, l'évaluation du flux solaire direct incident est immédiate si on connaît les valeurs des flux solaires normaux ou horizontaux aux instants considérés, les facettes ensoleillées recevant alors un flux solaire direct pondéré par l'angle d'incidence des rayons solaires sur les facettes (angle entre la direction du rayon solaire et la normale à la facette).

Pour constituer le modèle énergétique nécessaire au calcul de l'éclairement solaire direct, il est possible de s'appuyer sur différentes expressions accessibles dans la littérature [Miguet 1996]. La formule de Perrin de Brichambaut permet de calculer pour une surface perpendiculaire aux rayons solaires, la valeur de l'éclairement normal direct du soleil à partir de trois équations statistiques, qui correspondent à trois conditions de ciel distinctes : conditions normales, ciel très pur, ou situation en zone industrielle. En conditions normales, le rayonnement incident moyen ($S \downarrow_{\text{moy}}$) s'écrit :

$$S \downarrow_{\text{moy}} = 1230e^{-\frac{1}{3,8} \sin(h+1,6)} \quad (126)$$

L'éclairement direct (S_e) sur un récepteur horizontal s'obtient par projection du rayonnement incident ($S \downarrow$) sur la normale à ce plan et s'exprime en W.m^{-2} :

$$S_e = S \downarrow \sin h \quad (127)$$

L'expression classique de Dogniaux donne la valeur l'éclairement solaire direct sur un plan horizontal en fonction de la masse d'air (m) traversée, du coefficient d'extinction atmosphérique (a) et du trouble atmosphérique (T) :

$$S_e = 1367e^{-amT} \sinh \quad (128)$$

Enfin, le modèle Perez et al. [Miguet 2000] est paramétrable à l'aide de deux coefficients ε et Δ , le premier traduisant le degré de pureté du ciel ($\varepsilon = 1$ définit un ciel totalement couvert, des valeurs supérieures à 1 et inférieures à 12 correspondent à des ciels intermédiaires), le second sa luminosité (Δ est compris entre 0.01 et 0.6, 0.05 indiquant un ciel sombre et 0.5 un ciel très brillant). L'éclairement énergétique normal direct s'écrit en fonction de la masse d'air optique (m) et de la hauteur solaire (h) :

$$S_e = D_e(\varepsilon - 1) \left(1 + 1.041 \left(\frac{\pi}{2} - h \right)^3 \right) \quad (129)$$

L'éclairement énergétique diffus sur un plan horizontal (D_e) s'exprime quant à lui en fonction du coefficient d'excentricité (α') et de la masse d'air optique (m) :

$$D_e = 1367\Delta \frac{\alpha'}{m} \quad (130)$$

L'ajustement de deux paramètres (Δ et ε) distingue fondamentalement le modèle de Perez des expressions proposées par Brichambaut et Dogniaux, qui ne sont valides que par ciel clair.

La méthode d'évaluation du flux solaire diffus repose sur l'analyse de la voûte céleste (Figure 45). Cette dernière est modélisée géométriquement sous forme d'un hémisphère à triangulation géodésique de rayon infini devant les dimensions de la scène sur lequel on applique un modèle de radiance spécifique de conditions de ciel réparti de manière non uniforme. Pour un élément de surface situé au centre de l'hémisphère, l'angle solide sous lequel est vu chaque élément de la surface du ciel est obtenu à partir du théorème de Girard qui permet de déterminer l'aire d'un triangle sphérique précisément dans le cas où ses cotés sont des portions de grand cercle [Miguet et al. 1996].

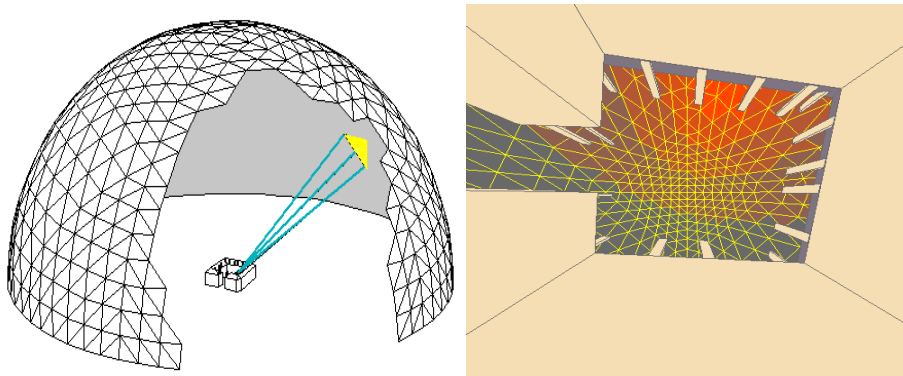


Figure 45 : Voûte céleste modélisée [Miguet *et al.* 1996]

Des fonctions de distributions statistiques sont établies pour différentes conditions d'insolation à partir de mesures effectuées sur un site donné et en général sur une longue période. Celles-ci peuvent prendre en compte les différents points suivants :

- le type de ciel (clair, couvert, couvert sombre, couvert clair, etc.)
- la position de l'élément de ciel considéré sur la voûte céleste
- la position du soleil

La fonction de distribution affecte à chaque élément de ciel une valeur de luminance énergétique valable sur toute l'étendue de l'élément et calculée en son centre de gravité. Dans le logiciel SOLENE, sont implémentés le modèle de Pérez (le plus récent et le plus flexible des modèles présentés) et les modèles de ciel CIE normalisés (clair et couvert). Pour calculer l'énergie qu'est susceptible de recevoir chaque élément de la scène 3D, il convient pour chaque élément de la scène d'identifier les portions de ciel vues depuis cet élément et de déterminer l'énergie reçue par cumul des luminances des éléments de ciel visible, avec respect de l'angle d'incidence et de l'angle solide sous lequel ils sont vus depuis la facette de la scène considérée [Miguet 2000].

Une fois les modèles géométrique et énergétique de ciel définis, l'évaluation de l'éclairement naturel ou d'énergie diffuse est obtenue en évaluant en tout point de la scène à étudier (préalablement discrétisée) l'énergie reçue de la voûte céleste. L'observateur de la scène est le point à analyser. Il regarde verticalement vers le haut avec un champ de vision de 180° lui permettant ainsi de voir l'ensemble de la voûte céleste. Une projection perspective des éléments de la scène est alors réalisée, constituant ainsi dans l'image 2D l'ensemble des occultations du ciel. Le ciel modélisé est également projeté de la même manière venant ainsi se placer en second plan de l'image (les éléments du ciel sont à l'infini). Il reste à déterminer si les différents patches de ciel, examinés par leur centre de gravité, sont contenus ou non dans le masque (la scène 3D). Pour chaque patch de ciel visible, l'énergie incidente est évaluée en fonction du flux émis par le patch de ciel, en tenant compte des angles solides et de la normale au point considéré. La valeur obtenue est ensuite cumulée aux valeurs déjà calculées pour les autres patches visibles de ciel [Groleau 2000].

7.2.1.3 Calcul des inter-réflexions solaires

Les réflexions solaires entre les différentes facettes ou éléments de maillage de l'environnement étudié doivent intégrer la notion d'interaction. Le modèle de radiativité est alors utilisé [Antoine 1999]. Il est nécessaire d'associer aux éléments de maillage leurs caractéristiques d'absorption et de réflexion solaire liées au matériau ou à la couleur. La réflexion est alors supposée diffuse et l'énergie renvoyée vers le ciel considérée comme perdue. Les multi-réflexions nécessitent l'évaluation des facteurs de forme.

7.2.1.4 Flux échangé entre surfaces

Connaissant les facteurs de forme, il est possible de calculer la densité de flux de chaleur échangée par rayonnement de grande longueur d'onde entre chaque élément de surface, à partir des températures exprimées en Kelvin. Dans l'hypothèse où les inter-réflexions ne sont pas considérées dans cette bande de rayonnement, on le note pour une surface extérieure (ext) :

$$\varphi_{GLO} = \sum_{j=1}^n \varepsilon_{ext} F_{ext,j} \sigma (T_{s_{ext}}^4 - T_{s_j}^4) \quad (131)$$

7.2.1.5 Flux échangé avec le ciel

Les facteurs de forme entre chaque surface et le ciel sont calculés en utilisant le même ciel discrétisé que celui construit pour la simulation du flux solaire diffus. Pour chaque élément de la scène, une projection sphérique permet d'identifier les obstructions du ciel et d'évaluer pour les parties visibles les angles solides correspondant, leur sommation divisée par π permet le calcul du facteur de forme correspondant avec le ciel. Le flux échangé s'écrit alors à partir de l'équation suivante :

$$\varphi_{ciel} = F_{ext,ciel} \left(\sigma \varepsilon_{ext} T_{s_{ext}}^4 - L \downarrow \right) \quad (132)$$

Avec un rayonnement du ciel calculé à partir de la formule suivante [Monteith et al. 1991] :

$$L \downarrow = 5.5T_{air} + 213 \quad (133)$$

A partir de cette expression il est possible d'obtenir la température équivalente d'un ciel uniforme dégagé, exprimé ici en Kelvin, en écrivant :

$$L \downarrow = \varepsilon_{ciel} \sigma T_{ciel}^4 \quad (134)$$

Ainsi, nous pouvons exprimer en fonction de la température de l'air. Dans la formule suivante les températures d'air et de ciel sont exprimées en degré Celsius :

$$T_{ciel} = \sqrt[4]{\frac{5.5T_{air} + 213}{\sigma \varepsilon_{ciel}}} - 273.2 \quad (135)$$

De la même manière que la modélisation de la voûte céleste a permis de considérer différents types de ciel, il est envisageable d'appliquer aux différentes mailles du ciel des températures non uniformes.

7.2.1.6 Les facteurs de forme

Le facteur de forme entre deux surfaces est uniquement fonction des relations géométriques entre ces deux éléments et plus précisément de leur distance (d) et de leur orientation relative (Figure 46).

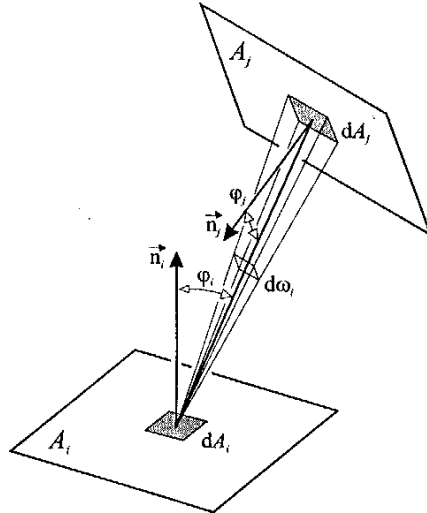


Figure 46 : Facteurs de forme entre deux surfaces

Ainsi, le facteur de forme entre la surface A_i et la surface A_j correspond à l'intégrale double suivante :

$$F_{A_i A_j} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \varphi_i \cos \varphi_j}{\pi \cdot d^2} dA_i dA_j \quad (136)$$

Cette expression des facteurs de forme ne tient pas compte des masques. Pour y remédier, il convient de faire intervenir la fonction de visibilité entre ces deux éléments :

$$F'_{ij} = v_{ij} F_{A_i A_j} \quad (137)$$

La fonction de visibilité est déterminée dans les procédures SOLENE liées aux intervisibilités entre facettes et entre facette et élément de ciel, avec prise en compte des obstacles.

Dans le cas d'une enceinte close :

$$\sum_{j=1}^n F'_{ij} = 1 \quad (138)$$

Dans un environnement urbain, pour chaque élément de surface il est nécessaire de calculer les facteurs de forme entre celui-ci et les autres surfaces et entre celui-ci et le ciel. Le domaine n'est généralement pas clos (par exemple, dans le cas d'une rue de dimension finie, des effets de bords apparaissent). La somme des facteurs de forme de certains éléments devient alors inférieure à 1. Dans le calcul des températures moyennes de surface nous avons pallié ce problème, en divisant les valeurs obtenues après sommation sur l'ensemble des surfaces et des éléments de ciel par la somme des facteurs de forme calculés avec les surfaces et avec le ciel.

La méthode de calcul des facteurs de forme implémentée dans SOLENE ne tient pas compte de la double intégrale mais repose sur une méthode similaire à l'intégration sur les contours des deux polygones qui cernent les surfaces par l'utilisation du théorème de Stokes. Le polygone émetteur est considéré comme une surface infinitésimale (source ponctuelle). Cette simplification reste valable tant que la distance à la surface réceptrice est supérieure à environ 5 fois la dimension maximale de la surface émettrice projetée. L'expression du facteur de forme pour un élément A_j totalement visible depuis dA_i (Figure 47) s'écrit [Miguet 2000] :

$$F_{dA_i A_j} = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=0}^{n-1} \beta_k \cos \alpha_k \quad (139)$$

Où β_k est l'angle entre R_k et $R_{(k+1)}$ (en radian) et α_k l'angle que fait le plan défini par R_k et $R_{(k+1)}$ avec le plan contenant dA_i .

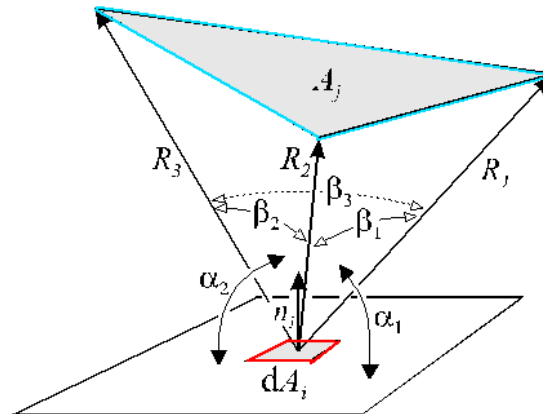


Figure 47 : Calcul du facteur de forme par la méthode d'intégrale de contour [Miguet 2000]

Une validation de cette technique de calcul des facteurs de forme a été réalisée pour trois configurations. La précision est suffisante à condition de subdiviser la surface émettrice si la « règle des 5 fois » n'est pas respectée, de cette manière on s'assure d'une erreur toujours inférieure à 1% [Miguet 1996].

7.2.2 Les échanges convectifs

Dans les basses couches de l'atmosphère, le vent est un écoulement d'air turbulent et incompressible dont les structures particulièrement complexes, sont composées de couches de cisaillement, recirculations, sillages, etc. Le calcul des transferts convectifs peut être approché par des équations empiriques faisant intervenir, soit la vitesse du vent, soit l'écart de température entre l'air et la paroi. Cependant, comme nous l'avons signalé dans le chapitre sur la microclimatologie urbaine, les estimations des coefficients d'échanges convectifs relevés dans la littérature, sont nombreux et peuvent induire des écarts importants entre les résultats. Il semble donc nécessaire de revenir à la nature même des écoulements et prendre en considération le fait que ceux-ci sont régis par les équations de Navier-Stokes. Pour résoudre ces équations, la méthode la plus utilisée consiste à moyenniser les équations du mouvement et à modéliser les contraintes turbulentes à l'aide d'un modèle de fermeture ($k-\epsilon$, RNG, ...).

7.2.2.1 Un logiciel de simulation des phénomènes thermo-aérauliques : N3S

De la même manière que nous avons décidé d'utiliser le logiciel SOLENE pour déterminer les éléments utiles à nos bilans thermiques, nous nous sommes tournés vers le logiciel N3S pour obtenir les informations manquantes. A nouveau, nous voulons insister sur le fait que nous appuyons sur les capacités de cet outil numérique pour mener à bien nos simulations, mais

essayons d'apporter suffisamment d'éléments pour permettre à un utilisateur disposant d'un autre outil de réaliser de travaux équivalents.

Ce code industriel de mécanique de fluides est développé par le groupe LNH de la Direction des Etudes et Recherche d'EDF et est commercialisé par la société Simulog. La résolution des équations de Navier-Stokes tridimensionnelles en régime stationnaire ou instationnaire, avec éventuellement un couplage à un modèle de turbulence et une équation thermique s'opère à l'aide d'une discrétisation par éléments finis sur un maillage non structuré, ce qui permet de traiter des géométries complexes [Simulog 1997].

Dans les applications qui nous concernent, la turbulence est représentée par un modèle statistique utilisant une fermeture au premier ordre. Le modèle $k-\varepsilon$ standard avec lois de parois est conseillé à l'utilisateur, cependant d'autres modèles de turbulence (modèle $k-\varepsilon$ RNG, Kato-Launder, bas nombre de Reynolds) sont accessibles et les modèles existants peuvent être modifiés par l'intermédiaire de sous-routines utilisateurs.

Les différentes solutions pour simuler la couche limite turbulente peuvent être divisées en deux groupes. Le premier, la méthode la plus sophistiquée, comme les modèles à bas nombre de Reynolds, calcule tous les gradients dans la couche limite en considérant la condition physiquement correcte de non-glissement. Ces méthodes sont les plus appropriées mais nécessitent un maillage très fin près de la zone du mur et le nombre de nœuds est beaucoup trop élevé pour des applications industrielles. L'autre manière classique de simuler les couches limites est l'utilisation de lois de paroi où la modélisation de la couche limite turbulente amène la contrainte de cisaillement à une distance donnée du mur (qui est petite, comparée aux dimensions caractéristiques du maillage au niveau du mur). Cette méthode ne nécessite pas de raffinement important dans la zone du mur [Deleenne et al. 1993].

Des équations de type convection-diffusion avec terme source et conditions aux limites générales peuvent être associées pour des effluents passifs supplémentaires. Les conditions limites applicables aux diverses équations à résoudre (composante de la vitesse, pression, quantités turbulentes, effluents passifs) sont de type Dirichlet (valeur imposée), Neumann (flux imposé), symétrie ou loi de paroi dynamique ou thermique. L'influence éventuelle du champ de température sur l'écoulement (force d'Archimède ou de flottabilité) est modélisée à l'aide de l'approximation de Boussinesq [SIMULOG 1997, Raymond 1998a,b].

Les équations différentielles sont discrétisées de manière implicite de façon à calculer efficacement les états stationnaires ; une technique de pas de temps variable (jouant alors le rôle d'un paramètre de relaxation) en temps et en espace permet dans ce cas d'accélérer la convergence du calcul. Le couplage entre les champs de vitesse et de pression est traité par l'algorithme de Chorin ; les systèmes linéaires correspondants aux équations des composantes de la vitesse sont résolus itérativement par une méthode de Gradient Conjugué Préconditionné et celui issu pour l'équation de la pression par une méthode directe. La discrétisation temporelle des équations de diffusion, convection des scalaires et de Navier-Stokes est réalisée grâce à un schéma à pas fractionné. Le pas de convection fait appel à une méthode caractéristique, ceux pour la diffusion et les équations de Navier-Stokes à un schéma d'Euler implicite [Deleenne et al. 1993, Raymond 1998b].

La chaîne de traitement N3S version 3 (version utilisée au début de cette recherche) est constituée de 4 éléments : le mailleur Simail, le pré-processeur Pren3s, le programme de calcul N3S et enfin la visualisation des résultats (post-traitement interactif des résultats assuré par Ensight).

- Simail est un système interactif de maillages structurés et non structurés qui produit un découpage en triangles ou en tétraèdres du domaine étudié. Il permet de réaliser un maillage en éléments finis repérés par un certain nombre de références (ou couleurs). Ces références permettent de classer les éléments concernés selon leur nature physique (nœuds fluides, de paroi, de symétrie...) et de leur appliquer les traitements adaptés.
- Le pré-processeur Pren3s permet de préparer les fichiers de données pour le calcul final ; en particulier, le maillage généré par Simail est transformé en un format directement lisible par N3S. Cette étape permet également de fixer un certain nombre de conditions limites pour les composantes de la vitesse des températures et pour les quantités turbulentes (lois de paroi, symétrie, profils d'entrée).
- Au niveau de N3S s'opère la résolution des équations et le stockage des résultats aux pas de temps choisis par l'utilisateur.
- Ensign permet le post-traitement graphique des résultats et la création de certains fichiers de sortie

Dans la version 4 (installée au laboratoire depuis le début de l'année 2000), la géométrie est toujours définie grâce au logiciel Simail, le post-processeur Pren3s intervient simplement au niveau de la géométrie, et des traitements des conditions limites et initiales, des caractéristiques du fluide et des écoulements (turbulents ou laminares) est gérée par N3S au niveau du fichier data_n3s, les résultats étant stockés dans le fichier resu_n3s. Les calculs et post-traitements graphiques sont effectués sur une station de travail Silicon Graphics Indigo2 (environnement Unix) munie d'un processeur R10000 cadencé à 195 Mhz et d'une mémoire vive de 128 Mo.

Au sein du laboratoire CERMA, le logiciel N3S est utilisé pour analyser les écoulements aérauliques à l'intérieur de certains bâtiments de référence architecturale comme la maison ronde de Botta (Figure 48) [Raymond et al. 1998] ou certains habitats japonais [Groleau et al. 1997] et à l'extérieur dans des espaces nantais comme par exemple le square Fleuriot, la place du Sanitat [Gadilhe et al. 1992] ou la place du Commerce (Figure 49).

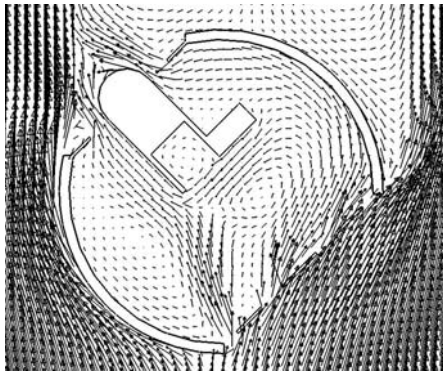


Figure 48 : Ecoulements aérauliques autour et dans la maison ronde [Raymond *et al.* 1998]

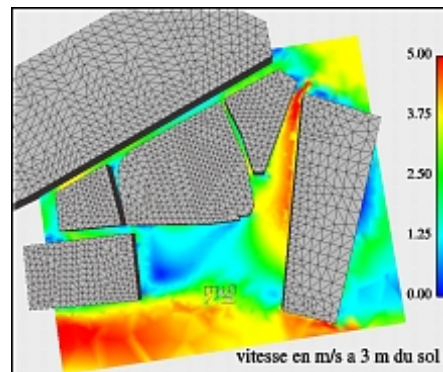


Figure 49 : Vitesse de vent place du Commerce

7.2.2.2 Les équations générales du modèle aéraulique

Pour traiter un problème de climatologie urbaine, il peut être fait appel aux équations de la mécanique des fluides et plus exactement aux principes généraux de mécanique et de thermodynamique. Ceux-ci sont :

- principe de conservation de la masse

- principe de conservation de la quantité de mouvement
- principe de conservation de l'énergie

A ces principes, il est nécessaire d'ajouter l'équation d'état du fluide ainsi que les conditions aux limites et les conditions initiales définissant de manière complète le mouvement.

De plus, les écoulements rencontrés en aérodynamique urbaine sont à très grande majorité de type turbulent, c'est-à-dire que les variables d'état subissent des variations continues en direction (pour les variables vectorielles) et en intensité. Afin de pouvoir traiter le problème, il est d'usage d'utiliser la décomposition de Reynolds qui consiste à écrire la valeur instantanée d'une variable par la somme d'une moyenne temporelle et d'un terme fluctuant. Ainsi, en utilisant la décomposition de Reynolds et après avoir moyenné sur le temps les équations de conservation écrites localement, nous pouvons écrire les quantités suivantes :

Conservation de la masse :

$$\nabla \cdot \bar{U} = 0 \quad (140)$$

Conservation de la quantité de mouvement :

$$\rho \left\{ \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + (\bar{U} \cdot \nabla) \bar{U} \right\} = -\nabla \left(p + \frac{2}{3} k \right) + \nabla \cdot (\mu_e \nabla \bar{U}) + F \quad (141)$$

Conservation de l'énergie :

$$\rho C_p \left\{ \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + (\bar{U} \cdot \nabla) \bar{T} \right\} = \nabla \cdot (\lambda \nabla \bar{T}) + \Phi \quad (142)$$

Outre les valeurs moyennes des variables d'état, ces équations contiennent les termes fluctuants et, notamment, l'énergie cinétique turbulente. Il est alors nécessaire, afin de fermer le problème, de rajouter des équations encore appelées modèle de turbulence. Pour notre part, nous utilisons le modèle k-ε standard. Celui-ci est le plus régulièrement retenu lors des simulations en convection forcée. En effet, ce modèle à deux équations est considéré simple et robuste et constitue le niveau minimum de modélisation physiquement acceptable pour nos problèmes. Les deux équations supplémentaires sont la conservation de l'énergie cinétique turbulente (k) et son taux de dissipation (ε). Nous les notons :

Energie cinétique turbulente k :

$$\rho \left\{ \frac{\partial k}{\partial t} + (\bar{U} \cdot \nabla) k \right\} = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + P - \sigma \varepsilon \quad (143)$$

Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente ε :

$$\rho \left\{ \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + (\bar{U} \cdot \nabla) \varepsilon \right\} = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (144)$$

Avec :

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i'^2} = \frac{1}{2} (\overline{u'u'} + \overline{v'v'} + \overline{w'w'}) \quad (145)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \varepsilon_{ii} = \frac{\mu}{\rho} \overline{\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} \frac{\partial u_i'}{\partial x_j}} \quad (146)$$

$$P = 2\mu_t \text{tr}(\overline{\overline{dd}}) \quad (147)$$

De plus, la viscosité turbulente (ν_t) permet de relier k à ε

$$\nu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (148)$$

Les différentes constantes du modèle de turbulence sont notées $C_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon, C_{\varepsilon 1}, C_{\varepsilon 2}$. Dans le cas du modèle $k - \varepsilon$ standard leurs valeurs sont les suivantes (Tableau 25, [SIMULOG 1997]) :

C_μ	σ_k	σ_ε	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$
0.09	1.	1.3	1.44	1.92

Tableau 25 : Valeurs des constantes du modèle de turbulence $k - \varepsilon$ standard [SIMULOG 1997]

Le modèle $k-\varepsilon$ à haut nombre de Reynolds utilise les lois de paroi afin d'éviter une discrétisation de la sous-couche limite visqueuse. Ceci permet de réduire de manière notable le nombre de nœuds de discrétisation et donc le temps de calcul. Pour les écoulements en convection forcée, les couches limites dynamique et thermique peuvent être divisées en trois sous-couches :

- la sous-couche visqueuse
- la sous-couche pleinement turbulente
- la sous-couche de transition ou région tampon située entre les deux sous-couches précédentes.

Le premier point de discrétisation du maillage est alors situé dans la sous-couche pleinement turbulente. Concernant la couche thermique, le flux de chaleur convectif échangé entre la paroi et le fluide c'est-à-dire l'air dans notre étude, s'effectue dans l'équivalent de la sous-couche limite visqueuse à savoir la sous-couche limite conductive où la diffusion thermique moléculaire est prépondérante par rapport à la diffusion thermique turbulente. D'une manière générale le flux « conducto-convectif » à la paroi s'écrit :

$$\varphi_{conv} = \rho C_p a \frac{\partial T}{\partial y} \quad (149)$$

Il apparaît donc que la détermination du flux convectif à la paroi nécessite la détermination du gradient de température. Or le premier point de calcul étant situé dans la zone pleinement turbulente de la couche limite, il est nécessaire de connaître le profil de température entre ce point et la paroi : c'est la loi de paroi. Plusieurs types de loi ont été proposées [Schiestel 1993] avec leurs avantages et leurs limites. Dans le code N3S, un effort particulier a été fourni pour la représentation de la zone tampon qui est toujours délicate à modéliser. Comme nous l'avons

précisé plus haut dans cette étude, la loi de paroi doit représenter trois zones distinctes. De plus, les variables adimensionnelles suivantes sont utilisées [Schiestel 1993] :

$$V^* = \sqrt{\frac{\tau_p}{\rho}}, \quad y^+ = \frac{y}{V^*} \quad \text{et} \quad T^+ = (T_s - T) \frac{\rho C_p V^*}{\varphi_{conv}}$$

Avec : T_s la température de la paroi

τ_p la contrainte tangentielle à la paroi

Dans le cadre du logiciel N3S et pour un fluide ayant un de nombre Prandtl supérieur à 0.35, les lois de paroi utilisées sont les suivantes [Delenne 2000] :

$$\text{Sous-couche conductive : } 0 < y^+ \leq y_1^+ = \left(\frac{\text{Pr}_r}{a_1 \text{Pr}} \right)^{1/3}$$

$$T^+ = \text{Pr} y^+ \quad (150)$$

$$\text{Zone tampon : } y_1^+ < y \leq y_2^+ = \left(\frac{\kappa}{a_1} \right)^{1/2}$$

$$T^+ = \frac{1}{3} ab^{-2/3} \left[\ln(y^+ + b^{1/3}) - \frac{1}{2} \ln(y^{+2} - b^{1/3} y^+ + b^{2/3}) + \sqrt{3} \text{Arctg} \left(\frac{2y^+}{\sqrt{3}b^{1/3}} - \frac{1}{\sqrt{3}} \right) \right] + c \quad (151)$$

$$\text{Zone pleinement turbulente : } y^+ > y_2^+ = \left(\frac{\kappa}{a_1} \right)^{1/2}$$

$$T^+ = \frac{\text{Pr}_r}{\kappa} \ln \left(\frac{\text{Pr}_r}{\text{Pr} \kappa} + y^+ \right) + \beta \quad (152)$$

Les valeurs de a_1 , a , b , c et β sont données dans la littérature [Delenne 2000].

Ainsi, la loi de paroi permet d'avoir accès au profil de température et donc au gradient à la paroi. Il est donc possible de récupérer les valeurs des flux turbulents (φ_{conv}) aux différents nœuds de paroi dans le logiciel N3S. Une routine rédigée en Fortran dans le programme « istoir.f » permet d'accéder aux données nécessaires à condition que la condition limite pour la température sur les parois concernées soit du type « température de paroi » (afin de prendre en compte correctement la modélisation de la couche limite thermique) et non pas « Dirichlet » : cette dernière condition n'est valable qu'en écoulement laminaire, ce qui est rarement le cas dans les applications considérées ici [Raymond 1999].

Le modèle k- ϵ est bien adapté aux écoulements fortement cisailés qui se développent, par vent fort, sur les terrains homogènes. Cependant, il montre ses limites en présence d'obstacles, lorsque se développent des zones de recirculation ou de grosses structures tourbillonnaires organisées. L'utilisation d'un modèle statistique d'ordre supérieur ou la simulation de grandes échelles est alors généralement recommandée. Les améliorations notables apportées par ces

deux méthodes dans la description de l'écoulement, entraînent des coûts de calculs élevés, sans commune mesure avec ceux du modèle k-ε. Le modèle RNG k-ε, qui a monté sa supériorité sur le modèle standard dans un grand nombre d'applications pratiques est alors présenté dans la littérature comme étant une bonne alternative. Les méthodes du groupe de renormalisation (RNG) ont été utilisées pour construire les équations du modèle de turbulence, de type k-ε, qui s'appuie sur l'hypothèse d'universalité des petites échelles de la turbulence. Ces méthodes, qui font appel à un formalisme mathématique complexe, consistent à éliminer de façon itérative, dans l'espace de Fourier, de fines bandes d'échelles et à représenter leurs effets au travers de coefficients effectifs renormalisés. Un des principaux avantages de la méthode est que pour les grands nombres de Reynolds, les équations finales ont la même forme que celles du modèle k-ε standard. Les principales améliorations apportées par ce modèle concernent la prise en compte de l'universalité des petites échelles, au travers de coefficients qui ne sont plus ajustés mais calculés explicitement par le modèle, et à l'apparition d'un terme supplémentaire dans l'équation du taux de dissipation. Ces modifications le rendent moins diffusif que le modèle standard, et expliquent, en partie, ses bons résultats dans la modélisation d'écoulements complexes, instationnaires, recirculants ou détachés [Turbelin 1999].

Le modèle de turbulence v²-f, qui est une évolution du modèle k-ε, semble également améliorer la connaissance des structures dynamiques des écoulements turbulents [Glockner et al. 1999]. Dans les modèles à concept de viscosité turbulente, cette dernière s'exprime comme le produit d'une vitesse (au carré) et d'un temps caractéristique de l'écoulement. Dans le modèle k-ε, k représente le carré de la vitesse caractéristique. Or près de parois, cette dernière est plutôt représentée par la fluctuation de la vitesse normale aux lignes de courant v² que par k. Par conséquent, le modèle k-ε ne prend pas correctement en compte l'annulation de la viscosité turbulente près de parois. Dans le modèle v²-f, la viscosité turbulente s'écrit :

$$\nu_t = \rho c_\mu v^2 T \text{ avec } T = \max \left[\frac{k}{\varepsilon}, 6 \left(\frac{v}{\varepsilon} \right)^{1/2} \right] \quad (153)$$

Aux équations légèrement modifiées, de k et ε, s'ajoute une équation de transport pour v².

En conclusion, nous pouvons noter qu'en présence d'obstacles, les modèles de turbulence basés sur la notion de viscosité turbulente ont tendance à générer des contraintes turbulentes trop importantes et à surestimer la production d'énergie turbulente. Le modèle RNG moins diffusif, limite ces effets et donne de biens meilleurs résultats que le modèle standard, sans modifier la convergence ni augmenter le temps de calcul. Associé à un modèle de fonction de paroi rugueuse, il donne de bons résultats [Turbelin 1999]. Cependant, il est démontré que les solutions obtenues dans un contexte industriel sont fortement dépendantes, non seulement du modèle de turbulence, mais aussi, et c'est souvent plus important de la conception du maillage et de la méthode numérique. Par exemple une solution obtenue avec le modèle de turbulence k-ε sur un maillage large peut donner des résultats plus proches des données expérimentales que ceux obtenus avec un maillage raffiné avec d'autres schémas numériques. Des affirmations relatives à des vérifications apparentes peuvent alors être fortuites [Cowan et al. 1997].

7.2.3 Les échanges conductifs

Les types de parois traitées correspondent aux cas les plus fréquemment rencontrés sur un bâtiment : murs homogènes avec ou sans inertie thermique, parois vitrées et sol. La propagation de la chaleur à l'intérieur de la paroi est considérée monodimensionnelle. On peut justifier cette

simplification en estimant que les gradients de température sont a priori plus importants entre le fluide et les parois qu'au sein des parois elles-mêmes et que l'épaisseur des parois est faible devant les autres dimensions. Cette partie du traitement numérique est une des nouvelles applications que nous avons intégrées au logiciel SOLENE précédemment présenté.

7.2.3.1 Cas des parois du bâtiment

Il est possible de déterminer la température à l'intérieur et à la surface des parois en appliquant un bilan énergétique en régime transitoire. La méthode de résolution retenue est une méthode aux différences finies. Dans le cas des murs (Figure 50), nous utilisons un modèle à une capacité à l'intérieur de la paroi représentant les 9/10ème de la capacité totale du mur et nous affectons une capacité égale à 1/10ème de la capacité totale du mur au niveau du nœud de surface extérieure. Ce choix particulier de distribution des capacités est le résultat d'étude de sensibilités effectuées à l'aide du modèle Minerve [Neveu 1984]. Les nœuds de surface sont affectés d'une capacité calorifique faible, reflétant assez bien les échanges superficiels dont la réponse thermique est assez rapide. La majeure partie de l'inertie de la paroi se trouve concentrée au nœud intérieur. Les parois vitrées ont par nature une capacité calorifique faible, on peut légitimement la négliger. Cela autorise à calculer les vitrages en régime permanent [Abdesselam et al. 1990] :

$$\varphi_{\text{cond}} = K (T_{\text{int}} - T_s) \quad (154)$$

Avec K (exprimé en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{°C}^{-1}$) la valeur moyenne de la conductance relative à l'épaisseur (e_i) des différentes couches du vitrage de conductivité (λ_i) et du coefficient d'échange convectif à l'intérieur des bâtiments (h_{int}).

$$\frac{1}{K} = \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_{\text{int}}} \quad (155)$$

Pour l'ensemble des autres surfaces, nous travaillons en régime variable et raisonnons en densité de flux de chaleur (W/m^2). Nous supposons que la température interne aux bâtiments est constante à chaque pas de temps, c'est-à-dire maintenue constante par un système de conditionnement d'air. En notant C_{mur} la capacité équivalente du mur, K_1 ($K_1 = \lambda_1/e_1$) la conductance du mur entre les températures de surface intérieure ($T_{s_{\text{int}}}$) et dans le mur (T_{mur}) et K_2 ($K_2 = \lambda_2/e_2$) la conductance du mur entre $T_{s_{\text{ext}}}$ et T_{mur} , on écrit le bilan à chaque nœud.

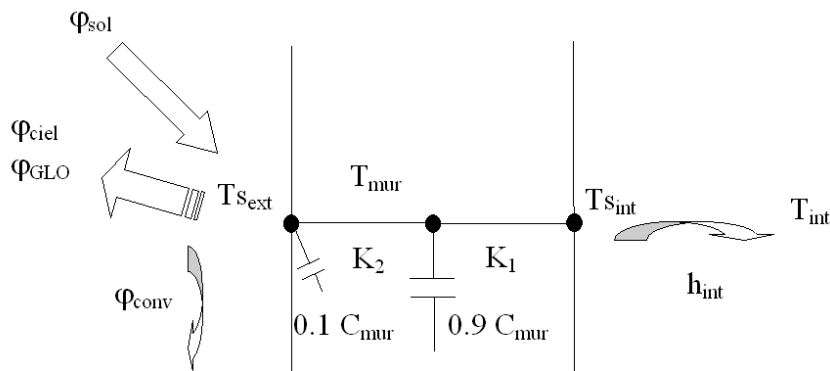


Figure 50 : Modèle thermique d'une paroi

Ainsi, au nœud de surface intérieure, le bilan thermique s'écrit :

$$K_1(T_{s_{int}} - T_{mur}) + h_{int}(T_{s_{int}} - T_{int}) = 0 \quad (156)$$

Au nœud dans le mur :

$$\frac{9.C_{mur}}{10} \frac{dT_{mur}}{dt} + K_1(T_{mur} - T_{s_{int}}) + K_2(T_{mur} - T_{s_{ext}}) = 0 \quad (157)$$

Au nœud de surface extérieure :

$$\frac{C_{mur}}{10} \frac{dT_{s_{ext}}}{dt} + K_2(T_{s_{ext}} - T_{mur}) + \varphi_{conv} + \varphi_{GLO} + \varphi_{ciel} = \alpha \cdot \varphi_{sol} \quad (158)$$

Avec :

$$\varphi_{GLO} = \sum_{j=1}^n \varepsilon_{ext} F_{ext,j} \sigma (T_{s_{ext}}^4 - T_{s_j}^4) \quad (159)$$

$$\varphi_{ciel} = F_{ext,ciel} (\sigma \varepsilon_{ext} T_{s_{ext}}^4 - L \downarrow) \quad (160)$$

$$\varphi_{conv} = f(N3S) \quad (161)$$

Dans la procédure de couplage thermo-aéraulique, le flux convectif φ_{conv} est directement déterminé par N3S pour chaque maille comme précédemment expliqué. Il prend en considération l'ensemble des flux turbubulents (convection et advection). Dans l'étape d'initialisation des températures de surface sans couplage, il est estimé par l'équation suivante :

$$\varphi_{conv} = h_c (T_{s_{ext}} - T_{air}) \quad (162)$$

En discrétisant le dérivée temporelle de la température du mur et en adoptant une méthode implicite, les équations se mettent sous la forme d'un système matriciel. En désignant par n+1 le temps actuel, par n le temps précédent et par Δt le pas de temps, le système à résoudre s'écrit :

$$\begin{bmatrix} K_1 + h_{int} & -K_1 & 0 \\ -K_1 & K_1 + K_2 + \frac{9.C_{mur}}{10.\Delta t} & -K_2 \\ 0 & -K_2 & K_2 + \frac{C_{mur}}{10.\Delta t} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_{s_{int}}^{n+1} \\ T_{mur}^{n+1} \\ T_{s_{ext}}^{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{int} T_{int} \\ \frac{9.C_{mur}}{10.\Delta t} T_{mur}^n \\ \alpha \cdot \varphi_{sol} - (\varphi_{conv} + \varphi_{GLO} + \varphi_{ciel}) + \frac{C_{mur}}{10.\Delta t} T_{s_{ext}}^n \end{bmatrix}$$

7.2.3.2 Cas du sol

Nous appliquons le même type de raisonnement pour la modélisation du sol (Figure 51) en considérant que celui-ci est composé d'une couche superficielle (dallage, asphalte, béton, etc.) et d'une couche de profondeur (en terre par exemple). L'ensemble de ces deux couches représente une épaisseur de 1 mètre (profondeur correspondant à la température de référence dans le sol). Il est à noter qu'une condition limite particulière doit être appliquée pour les facettes du sol. En effet, nous pouvons considérer qu'à 1 mètre de profondeur la température est constante et équivalente à la température moyenne de l'air sur l'ensemble de la journée [Mills et al. 1993].

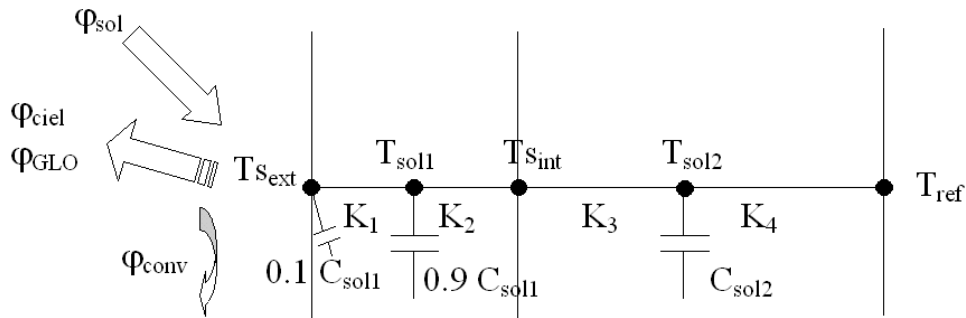


Figure 51 : Modèle thermique d'un sol

Au nœud de surface extérieure :

$$\frac{C_{sol1}}{10} \frac{dT_{s_{ext}}}{dt} + K_1(T_{s_{ext}} - T_{sol1}) + \varphi_{conv} + \varphi_{GLO} + \varphi_{ciel} = \alpha \cdot \varphi_{sol} \quad (163)$$

Au nœud dans la première couche de sol :

$$\frac{9 \cdot C_{sol1}}{10} \frac{dT_{sol1}}{dt} + K_1(T_{sol1} - T_{s_{ext}}) + K_2(T_{sol1} - T_{s_{int}}) = 0 \quad (164)$$

Au nœud à l'interface des deux couches :

$$K_2(T_{s_{int}} - T_{sol1}) + K_3(T_{s_{int}} - T_{sol2}) = 0 \quad (165)$$

Au nœud dans la deuxième couche de sol :

$$C_{sol2} \frac{dT_{sol2}}{dt} + K_3(T_{sol2} - T_{s_{int}}) + K_4(T_{sol2} - T_{ref}) = 0 \quad (166)$$

Le système à résoudre s'écrit alors :

$$\begin{bmatrix} K_1 + \frac{C_{sol1}}{10\Delta t} & -K_1 & 0 & 0 \\ -K_1 & K_1 + K_2 + \frac{9C_{sol1}}{10\Delta t} & -K_2 & 0 \\ 0 & -K_2 & K_2 + K_3 & -K_3 \\ 0 & 0 & -K_3 & K_3 + K_4 + \frac{C_{sol2}}{\Delta t} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_{s_{ext}}^{n+1} \\ T_{sol}^{n+1} \\ T_{s_{int}}^{n+1} \\ T_{sol2}^{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha \cdot \varphi_{sol} - (\varphi_{conv} + \varphi_{GLO} + \varphi_{ciel}) + \frac{C_{sol1}}{10\Delta t} T_{s_{ext}}^n \\ \frac{9C_{sol1}}{10\Delta t} T_{sol}^n \\ 0 \\ \frac{C_{sol2}}{\Delta t} T_{sol2}^n + K_4 T_{ref} \end{bmatrix}$$

Ainsi, pour chaque facette de paroi ou de sol, un système tridiagonal est à résoudre. Nous utilisons alors l'algorithme de Thomas [Press et al. 1993]. La procédure consiste à écrire le système matriciel sous la forme $A \cdot x = b$. La matrice A peut s'écrire sous la forme d'un produit de deux matrices (L et U) dont l'une est une matrice triangulaire inférieure (L) et l'autre une matrice triangulaire supérieure (U). En effet, en utilisant la décomposition précédente ($A = L \cdot U$), nous pouvons écrire le système linéaire ($A \cdot x = b$) sous la forme : $(L \cdot U) \cdot x = b$. Soit : $L \cdot (U \cdot x) = b$. Pour résoudre le système linéaire, il faut donc dans un premier temps résoudre $L \cdot y = b$, en posant $y = U \cdot x$, puis résoudre $U \cdot x = y$. L'avantage de cette méthode est que la solution d'un système triangulaire d'équations est triviale par des techniques dites de substitutions avant et arrière ("forward substitution and backsubstitution"). Dans le cas spécial des systèmes linéaires tridiagonaux d'équations (éléments différents de zéro sur les trois diagonales centrales), la décomposition LU ne réalise que $O(N)$ opérations. La solution peut être programmée de manière concise et seuls les éléments différents de zéro sont stockés dans des vecteurs ce qui évite de réserver de la place pour les N^2 éléments de la matrice.

7.2.4 Traitements spécifiques pour la végétation

7.2.4.1 Modélisation géométrique des arbres

Les arbres sont modélisés géométriquement par un ensemble de facette constituant deux volumes convexes, délimitant respectivement la couronne végétale et le tronc. Le nombre de facettes doit être suffisamment important pour permettre une représentation globale des caractéristiques morphologiques des arbres considérés (par exemple, un marronnier de hauteur maximale 25 mètres et de hauteur de tronc 3 mètres, Figure 52), mais doit également être minimal pour ne pas accroître de manière considérable les temps de calcul associés aux facteurs de forme et aux multi-réflexions. Cette géométrie peut être obtenue par la définition d'un profil type (Figure 53), qui par symétrie de révolution détermine l'enveloppe des végétaux. Ces faces sont ensuite discrétisées (Figure 54) et à chaque facette est associé un certain nombre de descripteur (zone végétale, albédo solaire, émissivité, coefficient de transmission solaire, température de surface) de manière à permettre la détermination des zones à l'ombre et au soleil, le calcul de flux solaires transmis à travers la couronne végétale, l'évaluation des facteurs de forme entre les différentes facettes de la scène, le bilan des échanges de grande longueur d'onde et le calcul des températures de surface des éléments de l'espace urbain.



Figure 52 : Marronnier

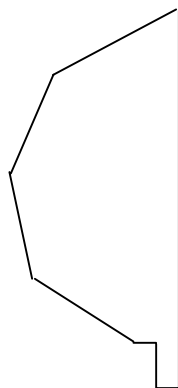


Figure 53 : Profil du Marronnier

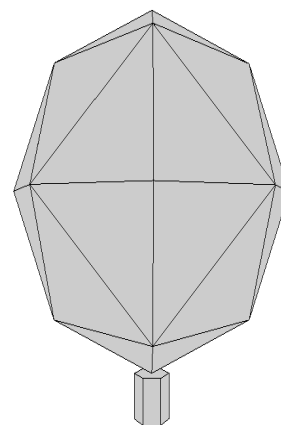


Figure 54 : Marronnier modélisé

Parmi les différents programmes et descripteurs que nous avons développés dans le cadre de cette recherche, ceux que nous présentons ci-dessous ont été spécifiquement réalisés pour rendre compte des spécificités du comportement thermique des végétaux.

7.2.4.2 Transmission solaire à travers la canopée végétale

Jusqu'à présent, nous considérons que la canopée végétale pouvait être délimitée par un ensemble de surfaces opaques. Ainsi le tracé d'ombre dû à un arbre, était certes convenablement obtenu mais le calcul des apports solaires au niveau du sol, sous un arbre était équivalent à celui en présence d'une paroi, c'est-à-dire que nous obtenions une valeur de flux solaire incident direct nulle. Cette première approximation reste valable pour le cas des arbres ayant une forte densité de feuillage ne permettant pas au flux solaire de passer. Cependant, dans le chapitre sur l'eau et la végétation en milieu urbain, nous avons insisté sur le fait qu'un certain pourcentage du flux incident est transmis à travers les arbres. Cela nous a donc amené à définir un sous-programme, « transmission.c », grâce auquel, nous pouvons désormais affecter à une surface des caractéristiques de transmission solaire ou lumineuse qui peuvent être soit constantes, soit fonction de l'angle d'incidence.

Dans le cas des arbres, nous considérons que chaque facette ne laisse passer qu'un certain pourcentage de flux incident de telle manière qu'après la traversée de la canopée, le flux solaire transmis représente 10 à 20 % du flux incident et non pas une valeur nulle (Figure 55). En situation hivernale, cette opération est également intéressante. En effet, certaines variétés d'arbre à feuille caduque laisse passer 50 % du flux incident. La procédure consiste à lire différents paramètres d'entrée comme le fichier à traiter, le fichier masque, le fichier de valeur correspondant au masque (0 pour face opaque et 1 pour non-opaque), la latitude (en degré), le jour et le mois, l'heure du début, l'heure de fin, le pas de temps. Les traitements des faces cachées prennent en compte le fait qu'une face non-opaque est toujours considérée comme visible. Le fichier de sortie est constitué de valeurs de flux transmis (en %) pour chaque face et pour chaque contour du fichier d'entrée.

Ce traitement spécifique aux apports solaires pourrait être étendu à toutes les longueurs d'onde en considérant cette notion de transparence au niveau des échanges de grande longueur d'onde. Ainsi, une surface pourrait échanger un flux de chaleur, non seulement avec l'arbre à proximité et les faces du sol, mais également avec les autres surfaces visibles à travers l'arbre. Des développements sont en cours sur cette notion au niveau du laboratoire.

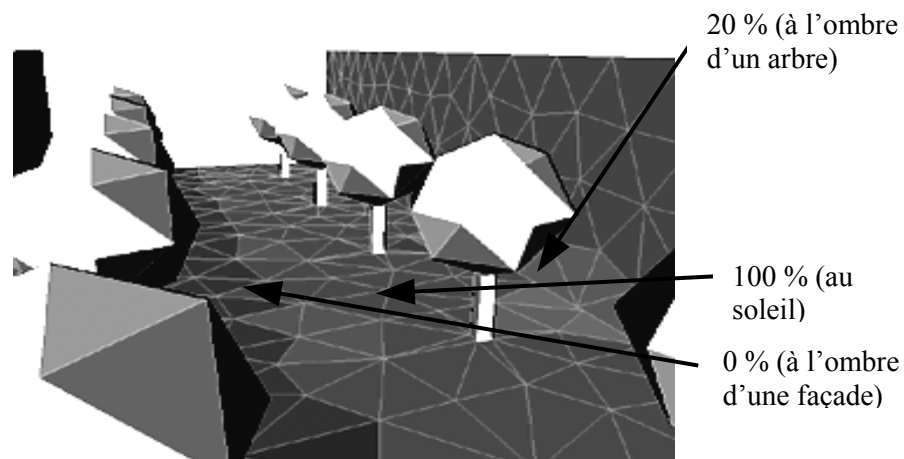


Figure 55 : Pourcentage de flux solaires transmis

7.2.4.3 Pertes de charge dues aux arbres

Pour prendre en compte les effets des pertes de charge au niveau des zones végétales, nous ajoutons au second membre de quantité de mouvement le terme vectoriel :

$$- \rho K \|U\|U \quad (167)$$

Où ρ désigne la masse volumique du fluide, K un tenseur de perte de charge et U le vecteur vitesse. Le tenseur K , également noté C_d pour « drag coefficient », peut être représenté en pratique par une matrice carrée de dimension 2×2 en 2D et 3×3 en 3D. Dans notre cas, les pertes de charge sont considérées comme constantes, diagonales (pas de termes croisés) et isotropes, i.e. égales selon toutes les directions : il suffit alors de préciser une seule quantité, la valeur du coefficient de perte de charge [Raymond 1999]. Ces informations sont intégrées dans la description des conditions limites nécessaires au code de calcul N3S, à partir du moment où, lors du maillage réalisé avec le logiciel Simail les éléments représentant la végétation sont définis et référencés comme un sous-domaine (condition indispensable pour le traitement dans N3S de la perte de charge).

7.2.4.4 Température de surface des feuilles

Enfin, il est à signaler que les températures de surface des feuilles des masses végétales peuvent également être déterminées en intégrant le rafraîchissement dû à l'évapotranspiration de manière à ce que la température des feuilles soit proche de celle de l'air ambiant comme nous l'avons expliqué dans le chapitre sur la végétation en milieu urbain. Une condition de température des feuilles équivalente à la température de l'air est alors imposée comme descripteur. Un bilan spécifique pour chaque face végétale pourrait être envisagé mais n'est pas actuellement développé pour des raisons de complexité de traitement liées à l'estimation de l'état de fermeture de stomates et de la disponibilité en eau du sol. De plus, il apparaît que les conséquences sur l'estimation résultante des températures d'air dans la scène sont faibles dans le cas où la végétation est bien alimentée en eau. Néanmoins, la prise en compte de ce comportement thermique global de la masse végétale grâce à ce descripteur est un élément d'importance lors du calcul des flux de grande longueur d'onde entre les facettes de la scène et celles des arbres. L'arbre représentant alors un puits de chaleur en conservant une température

qui ne s'échauffe que peu en comparaison des autres surfaces soumises aux apports solaires. L'impact au niveau des températures des surfaces de la scène est ainsi possible en jouant sur la densité de la végétation présente.

7.3 La simulation en régime transitoire et le couplage thermo-aéraulique

Dans cette recherche les principales implémentations mises au point concernent d'une part la simulation des températures en régime transitoire et d'autre part la définition d'une méthodologie de couplage thermo-aéraulique.

Le couplage doit, non seulement nous permettre la mise en relation des différents phénomènes physiques, mais doit en plus s'appuyer sur deux outils numériques différents. Ainsi, après avoir présenté dans le début de ce chapitre les bases théoriques des transferts de chaleur et leurs interactions, nous proposons un schéma global des opérations (Figure 56) qui se traduit par une décomposition du traitement en quatre phases : modélisation géométrique, création de deux bases de données relatives aux paramètres d'entrée des logiciels de thermique et d'aéraulique, calculs itératifs et analyse des résultats. Cette méthodologie générale peut facilement être adaptée pour n'importe quel couplage entre outils de simulations thermiques et aérauliques. Les variantes interviennent seulement dans le format d'écriture des fichiers et des paramètres à introduire au niveau des différentes étapes.

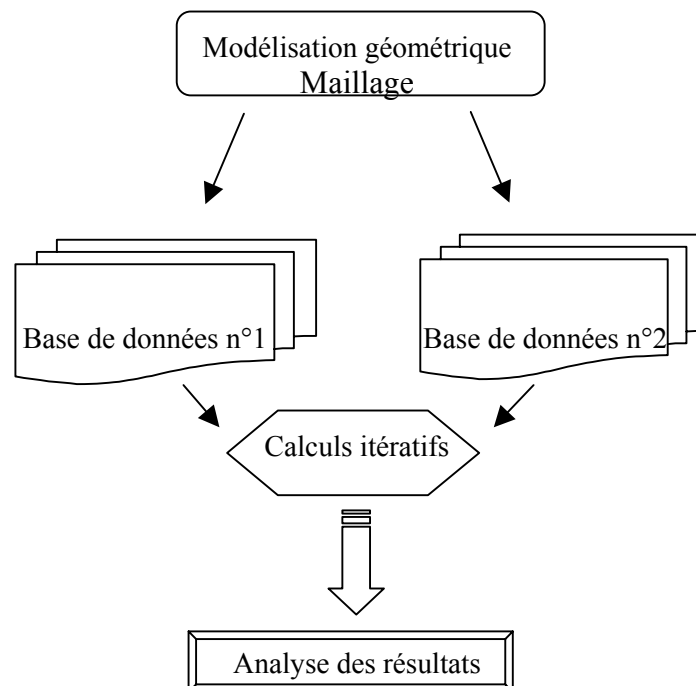


Figure 56 : Schéma de principe des simulations

7.3.1 Principes généraux

7.3.1.1 La modélisation géométrique et le maillage.

Les volumes des bâtiments, des différents espaces (rues, places, squares), des arbres et des bassins doivent être modélisés sous forme de faces dans SOLENE. Le nombre de facettes issues

de la discrétisation de l'espace influe sur les temps de calcul (notamment pour le calcul des facteurs de forme qui peut durer de quelques secondes à quelques heures selon le nombre de maille) et doit donc être minimisé (Figure 57 et Figure 58).

Le maillage dans le logiciel N3S, étant non plus surfacique mais volumique, est bien évidemment totalement différent. De plus, il est certes nécessaire de discrétiser la scène, mais il est également indispensable d'étendre ce maillage dans l'ensemble des directions autour du site de manière à faciliter l'établissement des conditions de profil de vent et à éviter les nuisances des effets de bord sur la zone considérée. Ainsi, en 2 D il faut prévoir une distance amont de 5 fois la hauteur de la rue, de 10 fois en aval, ce qui peut mener à des maillages composés de dizaines de milliers de nœuds (Figure 59). En 3D il est nécessaire d'inclure le site dans une veine dont les proportions peuvent être ajustées en fonction de la hauteur des bâtiments (Figure 60), d'où une augmentation d'importante du nombre de nœud qui peut être alors évalué en centaines de milliers. Enfin, il est nécessaire de raffiner le maillage dans certaines zones (près du sol et des bâtiments), les temps de calcul s'expriment alors en heures pour le cas 2D et en jours pour le cas 3D. Les exemples d'illustrations présentées ci-dessous correspondent à l'étude de cas que nous analysons dans le dernier chapitre de ce manuscrit et ne sont présentés que dans un objectif de rendre plus explicites les éléments décrits dans le texte.

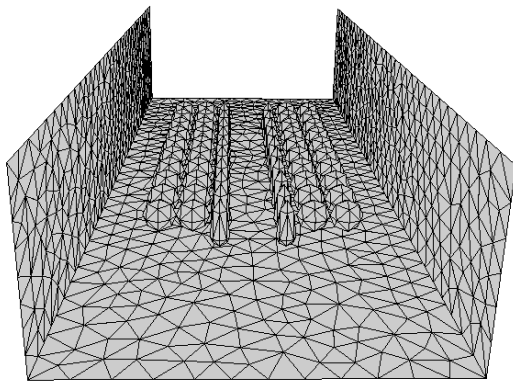


Figure 57 : Détail du site triangulé finement

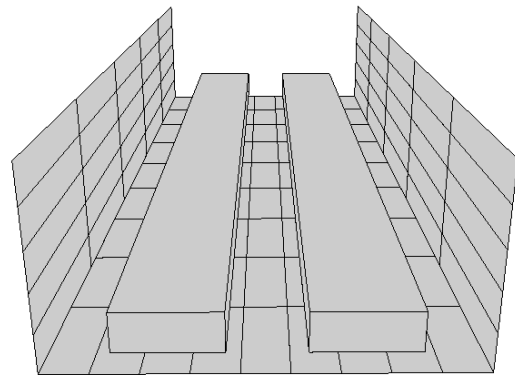


Figure 58 : Détail du site quadrangulé grossièrement

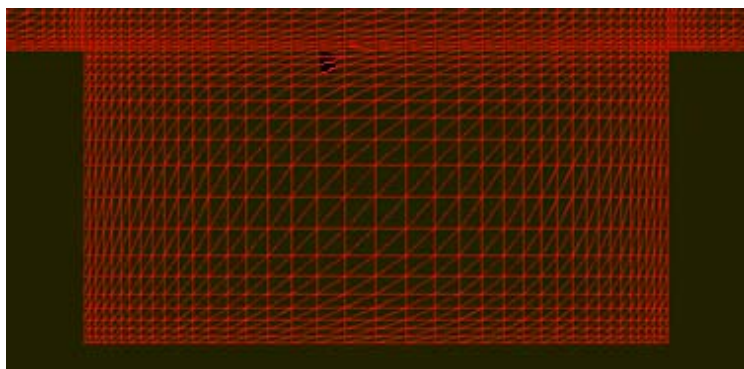


Figure 59 : Coupe d'une rue en 2D dans N3S

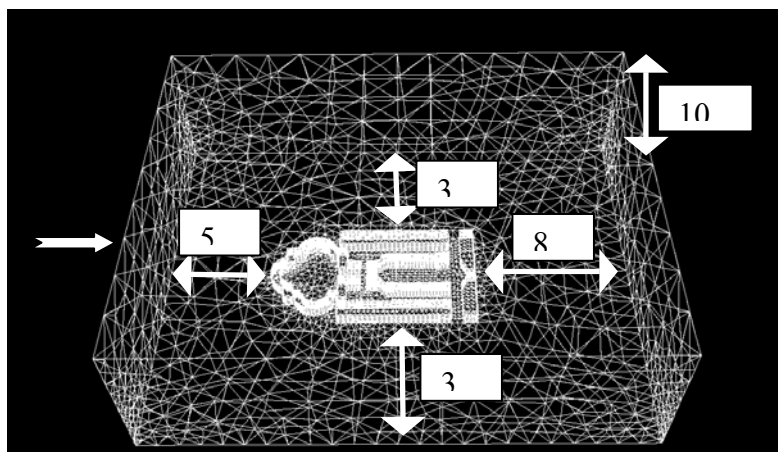


Figure 60 : Site modélisé et maillé en 3D dans N3S

7.3.1.2 Transfert des données entre SOLENE et N3S

Les maillages de paroi étant différents entre les programmes SOLENE et N3S, nous avons recours à une procédure d'interpolation / extrapolation afin de transférer les données d'une localisation à une autre. En effet, le logiciel SOLENE repose sur des maillages surfaciques d'une géométrie tridimensionnelle alors que le code N3S peut effectuer des calculs sur des éléments en deux ou en trois dimensions. Nous décrivons ci-dessous deux cas nécessitant des procédures de transfert particulières, le cas d'un passage de SOLENE vers N3S 2D et le cas d'un passage de SOLENE vers N3S 3D.

7.3.1.2.1 Transferts de données de SOLENE vers N3S 2D

Dans le cas de l'analyse d'une rue de type canyon, il peut être intéressant en terme de temps de calcul de ne travailler qu'en deux dimensions. Pour cette étape, il est nécessaire d'extraire des fichiers de données 3D issus de SOLENE, un ensemble de valeurs représentatives d'une situation 2D pour N3S. Nous définissons alors un plan orienté dans le sens de l'écoulement et placé approximativement au milieu de la rue. Nous utilisons ensuite la notion de largeur de bande (Figure 61) : les données 3D sont extraites de manière à ce que les valeurs affectées aux points dont la distance au plan d'extraction est inférieure à la largeur de bande soient conservées.

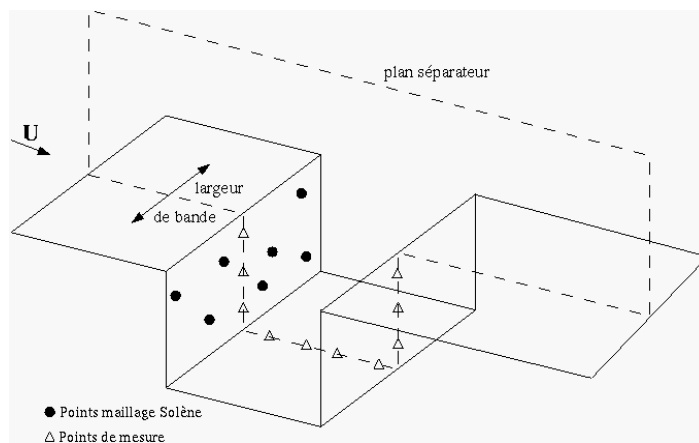


Figure 61 : Définition d'un plan d'extraction et d'une largeur de bande

La largeur de bande doit être adaptée à la précision du problème. En effet, si celle-ci est trop étroite, le nombre de points retenus est insuffisant, ce qui conduit à une mauvaise description des variations de température de surface. Si elle est trop grande, certains points retenus sont trop éloignés du plan d'extraction et les valeurs associées peuvent venir « parasiter » les données produites par l'extraction. Ce comportement est illustré en présentant les valeurs des températures de surface obtenues par SOLENE sur une paroi ensoleillée d'une hauteur de 25 mètres (par exemple le mur où sont représentés les points dans la figure précédente). Les données sont extraites dans des bandes de largeurs équivalentes à 1, 2, 5, 10 et 20 mètres (Figure 62). Les valeurs près du sol sont légèrement plus élevées que celles en haut du mur à cause du phénomène de réflexion et en raison d'un facteur de forme inférieur avec le ciel.

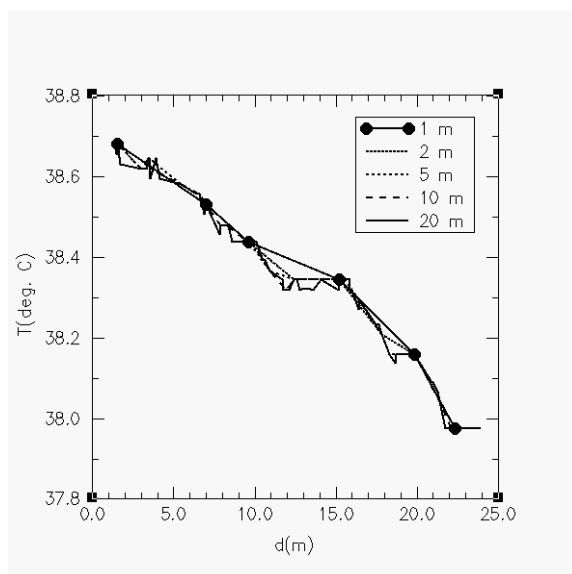


Figure 62 : Influence de la largeur de bande sur les valeurs extraites

On se contente ensuite d'une interpolation à l'ordre 1 (interpolation linéaire), qui donne des résultats satisfaisants pour les cas étudiés. D'autre part, on affecte aux points situés hors du domaine décrit par les points de base (c'est à dire possédant une coordonnée inférieure ou supérieure aux coordonnées minimum ou au maximum des points de base) la valeur du point le plus proche. On présente un exemple d'interpolation obtenue (Figure 63).

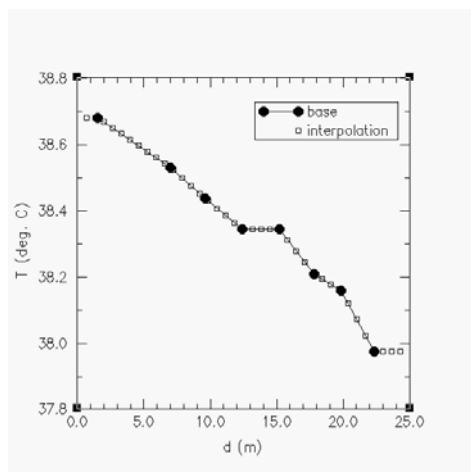


Figure 63 : Exemple d'interpolation entre SOLENE et N3S

7.3.1.2.2 Transferts de données de SOLENE vers N3S 3D

Lors des calculs en trois dimensions, le transfert entre les fichiers SOLENE et N3S ne nécessite plus de définir une bande.

Les coordonnées des contours des différentes faces dans les deux maillages doivent être respectées de manière à ce que dans chaque domaine ainsi délimité une interpolation entre les centres de gravité des mailles du logiciel SOLENE et les nœuds de N3S puisse être opérée.

Concrètement, lorsque les températures de surface sont obtenues dans le logiciel SOLENE, nous modifions le format du fichier résultat contenant les valeurs des températures pour l'ensemble des faces en une série de fichiers relatifs à une seule face, dans lesquels les températures sont indiquées au centre de gravité des contours de la face. Ce programme, développé dans l'environnement SOLENE, se nomme « Sol_vers_n3s_faces.c ». Ainsi, pour chaque face nous obtenons un fichier composé des valeurs x, y, z et T pour chaque centre de gravité. Dans N3S, nous appliquons une procédure dans le fichier « ustemp.f » qui consiste à lire le fichier pour la face concernée, et à affecter à chaque nœud la valeur de température de surface correspondant à celle du point le plus proche parmi les centres de gravité lus. L'interpolation entre les centres de gravité des mailles de SOLENE et les nœuds de N3S reste linéaire dans cette présente recherche.

7.3.1.2.3 Transferts de données de N3S vers SOLENE

Enfin, pour construire un fichier lisible par SOLENE, à partir des données issues de N3S, il faut réaffecter les valeurs lues sur une ligne de mesure (en 2D) ou sur un plan (en 3D) aux différents contours présents dans le maillage 3D SOLENE à l'aide d'un programme développé dans l'environnement SOLENE : « N3s_vers_sol.c ». Pour ce faire, on calcule les centres de gravité de tous ces contours, face par face. On lit le fichier N3S correspondant à la face en cours de traitement, et on recherche le point de la ligne (ou du plan) de mesure le plus proche du centre de gravité du contour courant. On affecte alors la valeur lue au contour, c'est celle qui sera sauvée dans le fichier SOLENE. On lit donc plusieurs fichiers provenant de N3S (autant que de faces dans la géométrie SOLENE) pour former un seul fichier dans l'environnement SOLENE, correspondant à l'ensemble des faces et contours présents.

7.3.1.3 L'organisation des simulations en régime transitoire

La méthodologie mis en place pour aboutir à la simulation des éléments microclimatiques en régime variable avec un réel couplage thermo-aéroulque nécessite un certain nombre d'étapes dont la première est la simulation en régime variable avec découplage des flux convectifs. Cette étape importante est nécessaire à l'établissement des champs de température initiaux à la simulation en régime variable avec couplage. En effet, comme nous allons le démontrer, le fonctionnement du couplage repose sur le transfert des températures de surface obtenues dans le logiciel SOLENE et des flux convectifs turbulents obtenus dans N3S. Nous comprenons alors que les températures de surface doivent être préalablement estimées pour pouvoir être intégrées dans N3S et permettre les itérations aboutissant aux résultats en situation de couplage thermo-aéroulque.

Ainsi, prenons le temps d'insister sur la procédure à suivre. Le premier temps du calcul consiste à calculer les températures de surface sans couplage aéraulique au moyen d'une équation empirique faisant intervenir un coefficient d'échange convectif imposé par l'utilisateur. Cette étape commence à un instant initial (à minuit ou juste avant le lever du soleil par exemple) et évalue les températures sur des séquences météorologiques constituées d'une succession de journées identiques par pas de temps (raisonnement en régime périodique établi) d'une heure de manière à obtenir des températures aux surfaces et dans les parois sans effets des conditions initiales. Si les conditions initiales sont convenablement choisies, ce régime est pratiquement « atteint » au bout de 2 ou 3 jours pour un local léger (exemple paroi en bois, toit en tôle) et d'environ 5 jours pour un local lourd (exemple dalle de béton, murs en parpaings) [Abdesselam et al. 1990].

L'utilisateur peut très bien se contenter de ce type de résultat s'il ne peut avoir accès aux valeurs précises des échanges convectifs en n'ayant pas la possibilité de les estimer au moyen d'un code de mécanique des fluides par exemple. S'il a la possibilité de les obtenir précisément comme dans notre cas, il est alors possible de poursuivre le calcul à l'instant où nous l'avons arrêté (après 3 jours) et de considérer ces valeurs comme des conditions initiales au calcul des valeurs en situation de couplage thermo-aéraulique (Figure 64) . En effet, à partir de celles-ci il est désormais possible de lancer les itérations entre SOLENE et N3S puisque la condition d'entrée manquante dans N3S est la valeur de la température de surface. Le calcul est alors itératif à chaque pas de temps et lorsque la convergence est obtenue au pas de temps, il est possible de passer au pas de temps suivant et ce sur une durée laissée au choix de l'utilisateur.

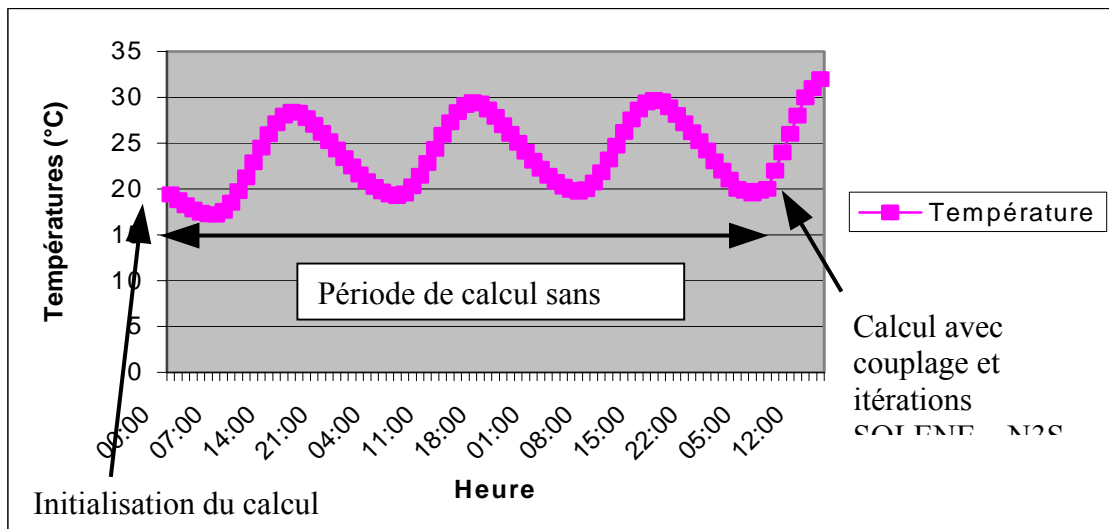


Figure 64 : Déroulement du calcul en régime transitoire pour couplage thermo-aéraulique

7.3.2 Etapes préliminaires

Différentes opérations doivent être réalisées dans le logiciel SOLENE avant de pouvoir procéder au calcul des températures de surface en régime transitoire avec couplage thermo-aéraulique. La plupart des étapes que nous décrivons ici sont détaillées dans le manuel d'utilisateur [Groleau 1998], la terminologie employée est mentionnée entre guillemets. La structure du code étant complètement modulaire, les fonctions actuellement intégrées peuvent être complétées ou modifiées sans aucune conséquence sur le reste des fonctions.

- Le fichier de géométrie de la scène peut être défini, soit par des logiciels d'aide à la conception comme Arc+ ou Autocad, soit directement dans SOLENE. A partir de ce fichier nous devons discrétiser l'espace par triangulation en appliquant l'opération « Transformer Par Triangulation » ou par quadrangulation triangulation en appliquant l'opération « Transformer Par Quadrangulation » en indiquant la dimension de la surface de la maille ainsi créée et définir un fichier masque de la scène (celui-ci n'a pas besoin d'être discrétisé)
- La localisation du lieu est une donnée importante qui se détermine en précisant la latitude et la longitude.
- Chaque face ou facette doit être associée à une base de matériaux de manière à pouvoir effectuer les différents calculs. De même certains descripteurs peuvent être affectés aux facettes.
- La création d'un ciel est nécessaire et consiste à préciser le niveau de discrétisation de celui-ci et son type.
- Un modèle de radiance solaire lui est associé en indiquant le jour, le mois, l'heure du début et de fin, et le pas de temps.

Ses données préparatoires permettent de passer à l'étape des simulations :

- Le tracé des ombres sur notre scène discrétisée, en fonction du fichier masque, s'effectue dans notre cas par la procédure nommée « Simulation Masques », dans laquelle, la date de la simulation doit être donnée en indiquant le jour et le mois.
- La visualisation des zones au soleil et à l'ombre est possible grâce à la fonction « Au Soleil – A l'Ombre » pour la journée donnée et les heures de simulation envisagées.
- La composante directe de l'énergie solaire est alors évaluée pour la même période en précisant à nouveau dans le module « Energie Solaire – Composante Directe » la géométrie masque et la géométrie ciel. A l'issue de cette étape l'énergie solaire directe est sauvegardée selon trois composantes : incidente, absorbée et réfléchie. Il est également possible de sauvegarder ces trois éléments en ne considérant pas les masques de la scène.
- La composante diffuse de l'énergie solaire est calculée en indiquant le ciel et le modèle de radiance solaire retenue dans le module « Energie Solaire – Composante Diffuse ». Les énergies diffuses sont sauvegardées selon les mêmes désignations que précédemment.
- La simulation de la composante globale de l'énergie solaire est obtenue en cumulant les énergies solaires directes et diffuses incidentes avec masque dans la partie « Energie Solaire Globale ». L'ensemble des flux calculés s'exprime en W/m^2 .
- En présence de végétation le pourcentage d'énergie transmis à travers la couronne peut être défini comme décrit précédemment.
- Le calcul des facteurs de forme est également une étape essentielle qui doit être réalisée avant le calcul des températures de surface à l'aide du module « Facteur de Forme », mais qui est indépendante des étapes précédentes et peut ainsi être effectuée à n'importe quel moment. Les fichiers issus de cette étape contiennent les valeurs des facteurs de forme entre les différents éléments de la scène et entre un élément et l'ensemble des éléments de la scène.

Pour résumer les paramètres en entrée sont les suivants :

- Les géométries : scène, masque, ciel
- Paramètres géographiques : latitude, longitude et orientation de la scène
- Paramètres temporels : mois, jour, heure de début simulation, heure de fin simulation, pas de temps
- Type de ciel pour la période considérée
- Caractéristiques des surfaces pour tous les éléments triangulés de la scène : albédo solaire et coefficients de transmission solaire

Les résultats en sortie de ces étapes préliminaires sont alors :

- Les valeurs des énergies solaires directes, diffuses, globales et transmises (Figure 65)
- Les facteurs de formes entre les éléments eux-mêmes (Figure 66) et entre les éléments et le ciel.

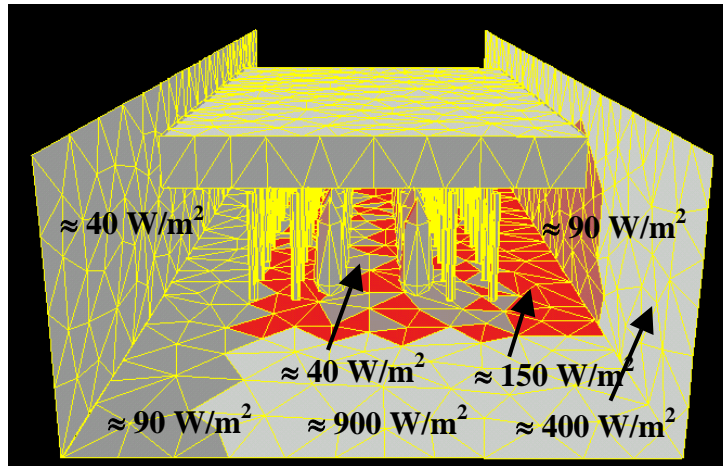


Figure 65 : Exemple de flux solaires globaux transmis

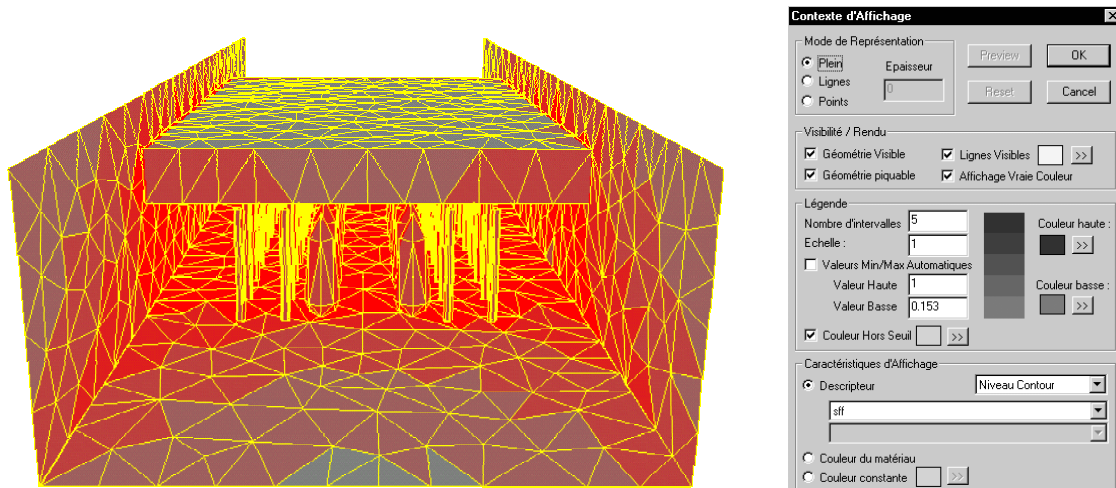


Figure 66 : Exemple de facteurs de forme

7.3.3 Structure de la simulation en régime transitoire sans couplage

Il est désormais possible de passer à l'étape de calcul des températures de surface en régime transitoire sans couplage. Nous précisons ci-dessous les paramètres d'entrée, les conditions initiales, le déroulement et la structure du programme que nous avons développé pour ce traitement spécifique.

7.3.3.1 Les paramètres en entrée

La base de données n° 1 concerne les paramètres et les coefficients relatifs aux échanges thermiques à définir dans le logiciel SOLENE. Chaque coefficient qui intervient dans le calcul

est soit une valeur constante soit un fichier de valeurs, chacune d'elles correspondant à une maille de la géométrie. Ainsi, nous devons connaître les éléments suivants :

- Paramètres temporels : heure de début simulation, heure de fin simulation, pas de temps
- Paramètres météorologiques : les températures sèches sous abri pour l'ensemble de la période
- Caractéristiques des surfaces pour tous les éléments triangulés de la scène : albédo solaire, et émissivité infrarouge, coefficients de conductivité, de masse volumique, de capacité calorifique, coefficient d'échange convectif, coefficient d'échange global (convectif et radiatif) à l'intérieur des bâtiments, descripteur d'appartenance au sol ou à un mur (0 pour mur et 1 pour sol), valeurs des surfaces des facettes, épaisseur du mur, épaisseur de la 1^{ère} couche de sol, épaisseur de la couche de terre dans le sol
- Températures imposées : température à l'intérieur des bâtiments, température du sol à une certaine profondeur, la valeur de la température de l'air pour la couronne des arbres, 1000 pour les autres surfaces (valeur quelconque utilisée comme test)
- Les valeurs des énergies solaires incidentes transmises
- Les facteurs de forme entre les éléments eux-mêmes et entre les éléments et le ciel

La base de données n°2 concernant les paramètres en entrée du logiciel N3S n'intervient pas dans cette simulation du fait du découplage des échanges convectifs

7.3.3.2 Les conditions initiales

Les températures initiales doivent être définies au niveau de la surface extérieure, dans les murs (ou dans la 1^{ère} couche de sol) et dans la 2^{ème} couche de sol. Il est très délicat de les définir à un instant précis à moins de repartir d'une série de mesures déjà existante. Dans notre cas ces informations ne sont pas connues et nous faisons l'hypothèse que celles-ci peuvent être initialisées la nuit (vers 5 heures du matin, par exemple) à la valeur de la température de l'air. En effet, en l'absence de rayonnement solaire, l'équilibre entre les différentes températures apparaît même si des effets d'inerties persistent. La manière dont nous abordons la simulation en reconduisant le calcul sur un certain nombre de cycle journalier équivalent, nous permet de limiter l'impact de ces conditions initiales sur les valeurs finales.

7.3.3.3 Le déroulement de la simulation en régime transitoire sans couplage

A partir des valeurs des flux incidents de courte longueur d'onde transmises à la scène et des valeurs des différents facteurs de forme, le calcul des flux de grande longueur d'onde et des températures de surface est envisageable à condition de connaître la valeur du flux convectif, qui est une inconnue à ce moment du calcul.

Pour résoudre ce problème, le calcul des températures de surface est découplé des échanges convectifs dans SOLENE pendant la période considérée (plusieurs journées équivalentes) en imposant des coefficients d'échange convectif qui peuvent soit être considérés uniformes ($h = 15 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, par exemple) pour l'ensemble des facettes, soit être déterminés à l'aide de corrélations et ajustés pour chaque facette. La température de l'air dans la scène est considérée de la même manière : nous pouvons soit imposer une température uniforme et la fixer à la température de l'air mesurée à la station météo soit donner une distribution de température d'air dans la scène. Le traitement le plus simple en absence d'information sur le champ aérodynamique

consiste à fixer un coefficient d'échange convectif constant et de donner à la température de l'air dans la scène une valeur unique.

Cette étape de simulation sans couplage correspond à l'itération numéro 0, c'est à dire que nous ne faisons pas intervenir le logiciel N3S dans le traitement.

Le déroulement de la simulation fait appel à une subroutine nommée *transitoire_h_options.c*. Ce programme permet de calculer les températures des murs (à l'intérieur et aux surfaces) en régime transitoire. Les transferts thermo-aérauliques sont découplés, le coefficient de convection h et la température de l'air de la scène sont imposés. Un algorithme itératif a été développé sous la forme suivante :

1. Lecture en entrée de la base de données numéro 1, des facteurs de forme et des flux transmis
2. Calcul du flux solaire absorbé net par la méthode des radiosités à partir des flux solaires transmis et des valeurs des coefficients de réflexion solaire.
3. Calcul des températures équivalentes au soleil pour initialiser les flux de grande longueur d'onde :

$$T_{eq} = \frac{h.T_{météo} + K.T_{noeud1,ini} + \varphi_{CLO,net}}{h + K} \quad (168)$$

- Initialisation des températures itératives de surface à la valeur de la température équivalente au soleil
 - Initialisation des critères d'arrêt sur les températures de surface
4. Calcul des flux de grande longueur d'onde avec le ciel et avec les autres surfaces
 - Tant que les critères d'arrêt ne sont pas atteints (écart entre deux itérations supérieur au critère de précision déterminé par l'utilisateur) :

$$\varphi_{GLO} = \sum_{j=1}^n \varepsilon_{ext} F_{ext,j} \sigma (T_{s_{ext}}^4 - T_{s_j}^4) \quad (169)$$

$$\varphi_{ciel} = F_{ext,ciel} \left(\sigma \varepsilon_{ext} T_{s_{ext}}^4 - L \downarrow \right) \quad (170)$$

5. Calcul des températures à l'extérieur et à l'intérieur des surfaces
 - Ecriture des équations sous une forme matricielle $A.X = B$
 - Résolution matricielle par l'algorithme de Thomas
 - Valeurs des températures en régime variable
6. Etude de la convergence des températures (retour à 4 si nécessaire)
7. Sauvegarde des résultats des températures dans et à la surface des parois
8. En option, il est possible de récupérer les valeurs des flux solaires absorbés après multi-réflexions, des températures équivalentes estimées, des flux de grandes longueurs d'onde,

des flux convectifs en fonction du coefficient h , de la température de surface extérieure calculée et de la température météo. De même nous pouvons obtenir les températures de surface calculées en régime permanent et les écarts par rapport au régime variable.

Nous pouvons représenter le déroulement des simulations par l'organigramme suivant (Figure 67) :

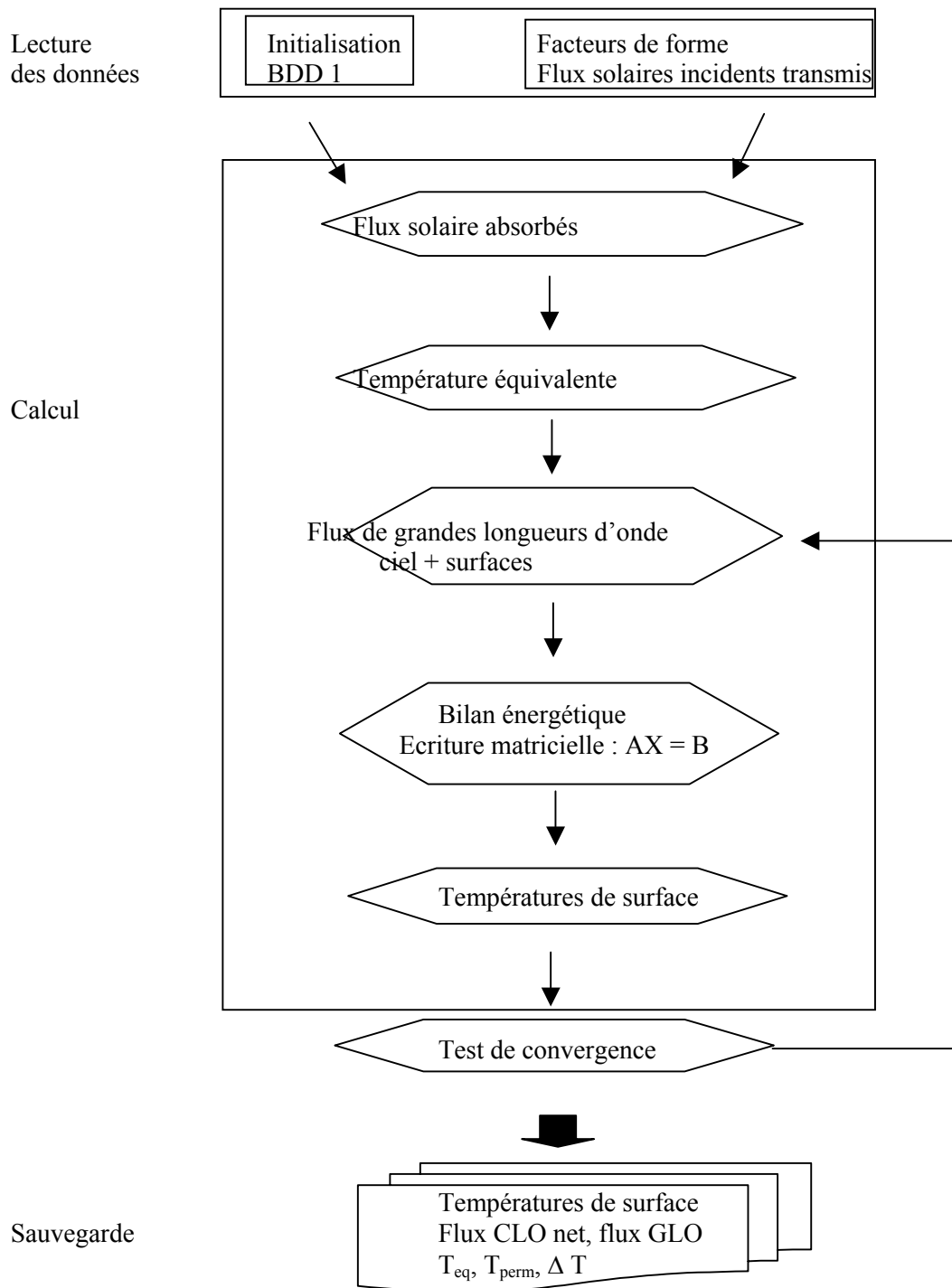


Figure 67 : Calcul des températures de surface sans couplage

7.3.3.4 Exemples de résultats

Dans le cas d'un sol soumis aux sollicitations extérieures en température et en rayonnement décrits dans le graphique suivant (Figure 68), nous avons testé la réponse à différents changement de paramètres physiques comme le coefficient d'échange convectif, l'albédo de la surface et nous avons tracé l'évolution de la température au niveau de la surface et à l'intérieur du sol sur l'ensemble de la période traitée.

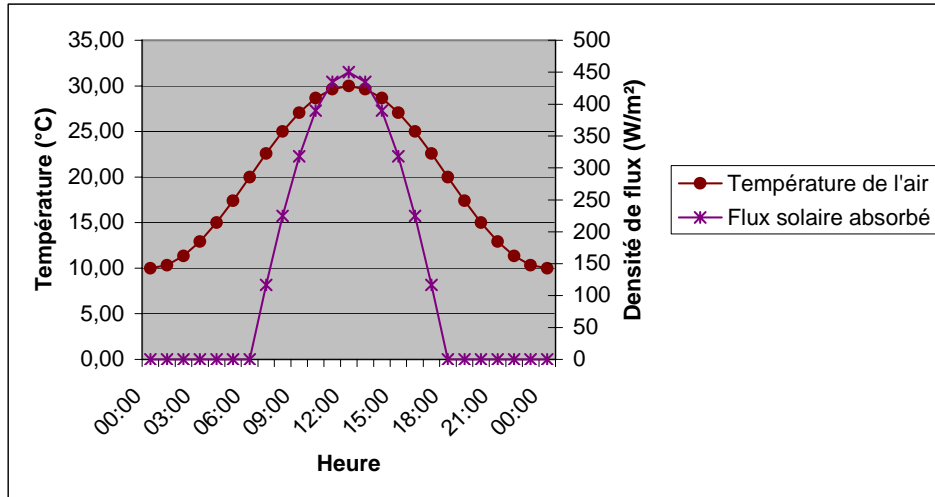


Figure 68 : Evolution de la température d'air et du flux solaire absorbé

Le rôle de l'inertie peut être mis en évidence en comparant les températures simulées à l'intérieure du sol (10 cm) et au niveau de la surface extérieure en régime variable, et en régime permanent (Figure 69). L'amortissement des températures de surface est au maximum d'environ 15 °C et le déphasage de quelques minutes pour la température de surface du sol. Un amortissement important et un retard du signal de plusieurs heures est constaté dans le sol (Figure 69).

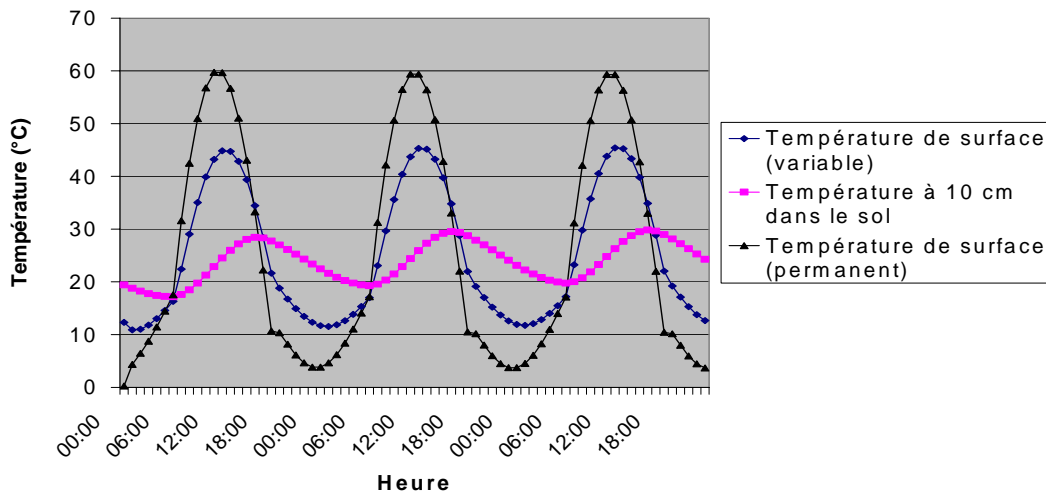


Figure 69 : Comparaison entre les températures intérieure et extérieure en régime variable et permanent

L'analyse de l'impact de la valeur du coefficient d'échange convectif sur les températures est illustrée ici (Figure 70) dans le cas d'un sol soumis à une sollicitation solaire et à une évolution

de la température d'air équivalent pour les trois valeurs de coefficient d'échange convectif (5, 10 et 20 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$). Un écart maximal de la température de surface de 10°C est constatée entre le calcul effectué avec la valeur minimale et la valeur maximale des coefficients d'échange convectif. L'impact est plus faible à 10 centimètres dans le sol, nous pouvons néanmoins constater que l'inertie due aux caractéristiques thermiques du sol est bien représentée par ce type de modélisation.

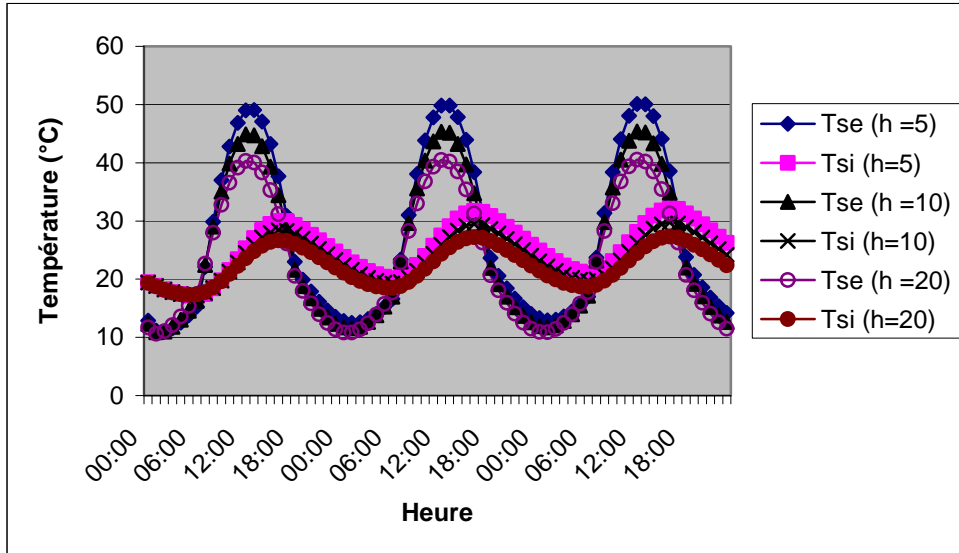


Figure 70 : Températures de surface et dans le sol (10 cm) pour différentes valeurs du coefficient d'échange convectif

Il est également possible de tester l'impact de n'importe quelle caractéristique thermique du sol avec ce type de simulation. Par exemple, à coefficient d'échange convectif équivalent, la modification de l'albédo de 0.5 à 0.2 induit des écarts importants aux niveaux des températures de surface et des incidences non négligeables dans les dix premiers centimètres du sol (Figure 71).

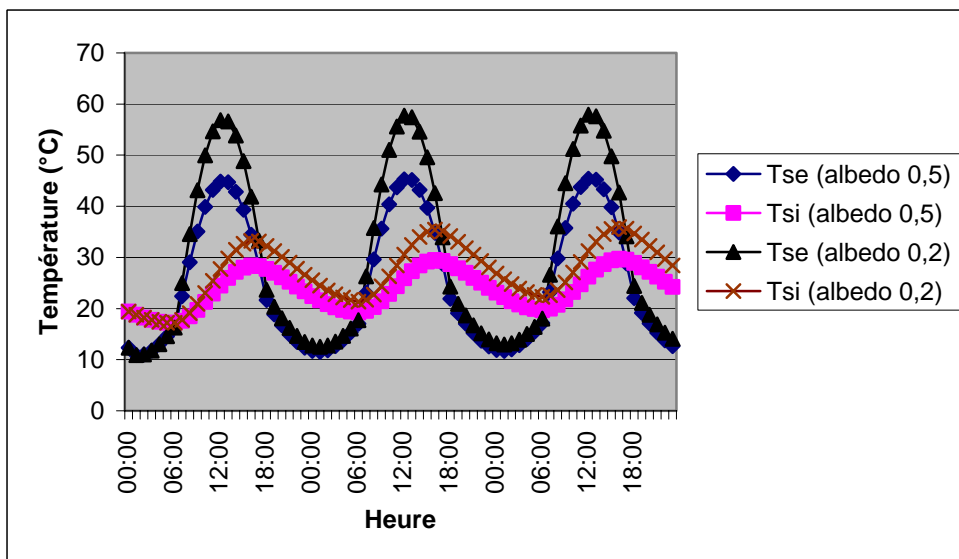


Figure 71 : Températures de surface et dans le sol (10 cm) pour deux valeurs du coefficient d'albédo solaire

En conclusion nous pouvons affirmer que de nombreuses études paramétriques peuvent être réalisées en utilisant la simulation en régime transitoire et que le comportement thermique des matériaux semble cohérent aussi bien au niveau du déphasage que de l'amortissement des signaux. La validation de cette approche est discutée dans le chapitre suivant.

7.3.4 Structure de la simulation en régime transitoire avec couplage

L'étape de simulation en régime variable sans couplage étant maintenant réalisée, il est désormais possible de passer à l'étape de calcul des températures de surface en régime transitoire avec couplage thermo-aéraulique. Nous précisons à nouveau ci-dessous les paramètres d'entrée, les conditions initiales, le déroulement et la structure de ce nouveau programme que nous avons développé pour le traitement spécifique du calcul des températures de surface en régime variable avec prise en compte des flux convectifs issus du logiciel N3S.

7.3.4.1 Les paramètres en entrée

La base de données n°1 concerne toujours les paramètres en entrée du logiciel Solene et est la même que précédemment à l'exception du coefficient d'échange convectif qui n'a plus de raison d'être au niveau du calcul des échanges convectifs, étant directement remplacé par la valeur de flux convectif issu de N3S.

La base de données n°2 concerne les paramètres en entrée du logiciel N3S et est maintenant utile

- Caractéristiques du vent : profil de vitesse, direction, turbulence
- Caractéristiques du fluide : masse volumique, viscosité dynamique, chaleur spécifique, conductivité thermique, coefficient d'expansion volumique
- Modèle de turbulence k- ϵ standard
- Conditions aux limites. En entrée : profil de vent ; sur les cotés et au niveau du toit de la veine aéraulique : condition de symétrie ; en sortie de la veine : condition de flux nul (condition de Neumann homogène) ; au niveau du sol et des bâtiments : loi de paroi avec température imposée.

7.3.4.2 Les conditions initiales

Nous utilisons les conditions de température établies à la suite de la simulation précédente sur une période de plusieurs jours. Nous évitons ainsi le problème de l'impact des conditions initiales sur le calcul en cours. Le calcul itératif entre les deux logiciels se faisant à chaque pas de temps, les conditions initiales à un pas de temps vont être définies comme la condition finale du pas de temps précédent. Par exemple, si nous avons décidé de faire le calcul sans couplage sur une période de 3 jours, les valeurs des températures de surface obtenues à 7:00 du matin peuvent servir de conditions initiales pour déterminer les valeurs des températures à 8:00 du matin en considérant un couplage thermo-aéraulique. Après itérations entre les deux logiciels les valeurs obtenues à 8:00 du matin après convergence vont devenir les nouvelles conditions initiales pour le calcul des températures à 9:00 et ainsi de suite (Figure 64).

7.3.4.3 Le déroulement de la simulation en régime transitoire avec couplage

Nous nous situons à l'instant t de travail considéré. Celui-ci correspond en fait à l'instant t plus n jours du début du traitement, n étant le nombre de jour permettant d'atteindre un régime

périodique établi. Nous débutons cette nouvelle séquence de calcul sur ce pas de temps en imposant comme conditions limites en température au niveau des parois dans le logiciel N3S, les températures de surface obtenues lors du traitement sans couplage.

La base de donnée numéro deux, relatives aux paramètres d'entrée et aux conditions limites du code N3S est mise en application.

Les conditions de vent en entrée sont décrites par un profil en puissance fonction de la valeur de la vitesse de vent relevée à une hauteur de 10 m à la station météo la plus proche ($U_{10\text{météo}}$), de l'épaisseur de la couche limite (h_{lim}) et de l'exposant du gradient vertical (α). Cette loi est ajustée grâce à une constante de recalage (cte) évaluée pour le site considéré.

$$\bar{U}_z = cte \times U_{10\text{météo}} \times \left(\frac{z}{h_{\text{lim}}} \right)^\alpha \quad (171)$$

La température de l'air en amont de la scène est soit mesurée à la station météo, soit modifiée de manière à intégrer l'impact de la ville sur les champs de température.

Le calcul thermo-aéraulique dans N3S permet alors d'obtenir une valeur plus cohérente des flux convectifs turbulents pour chacun des nœuds. Un transfert de ces flux convectifs des nœuds du maillage N3S vers les facettes du maillage SOLENE doit être réalisé à ce niveau, de manière à pouvoir recalculer le bilan énergétique.

Ainsi, dans SOLENE, pour ce pas de temps, nous connaissons les valeurs des flux solaires absorbés après multi-réflexions. Ce résultat fait intervenir uniquement les valeurs des flux solaires et des caractéristiques radiatives des matériaux. Il est donc indépendant du couplage thermo-aéraulique et ne doit pas être réévalué.

Les valeurs des flux de grande longueur sont estimées à partir des températures de surface précédemment calculées. Deux situations sont à envisagées : si nous sommes au premier pas de temps du calcul avec couplage, ces températures sont celles issues du calcul sans couplage, si nous sommes à un pas de temps supérieur les températures de surface sont celles calculées au pas de temps précédent avec couplage.

Les flux de courte et de grande longueur d'onde associés aux flux convectifs sont réunis pour l'établissement du bilan énergétique pour chaque facette. Les nouvelles températures de surface (extérieures et intérieures aux parois) sont alors calculées, en résolvant le système matriciel. Un aller-retour entre les logiciels ayant été réalisé, nous désignerons les résultats obtenus à l'issue de cette étape par l'appellation : 1^{ère} itération.

Nous pouvons désormais recommencer le transfert des températures de surface de SOLENE vers N3S. Nous reprenons le calcul N3S avec les champs de température d'air précédemment établis et nous obtenons un nouveau champ de flux convectifs turbulents. Le fait de repartir du champ de température d'air déjà estimé permet de diminuer considérablement les temps de calcul sur le code de mécanique des fluides. Nous pouvons à nouveau transférer ces flux turbulents vers N3S et recalculer les températures de surface dans le nouveau bilan énergétique. Cette étape correspond alors à la 2^{ème} itération du même pas de temps.

Nous poursuivons les itérations entre les deux logiciels et nous considérons que cette procédure s'arrête dès que le seuil de convergence entre deux itérations successives est atteint comme cela est expliqué plus loin. Les valeurs finales au pas de temps t sont sauvegardées.

Ce critère d'arrêt du calcul permet de passer au pas de temps suivant ($t+1$). Les températures de surface ainsi calculées correspondent maintenant aux températures initiales de ce pas de temps et le processus itératif peut redémarrer.

Le principe général du couplage thermo-aéraulique est illustré dans l'organigramme suivant (Figure 72) :

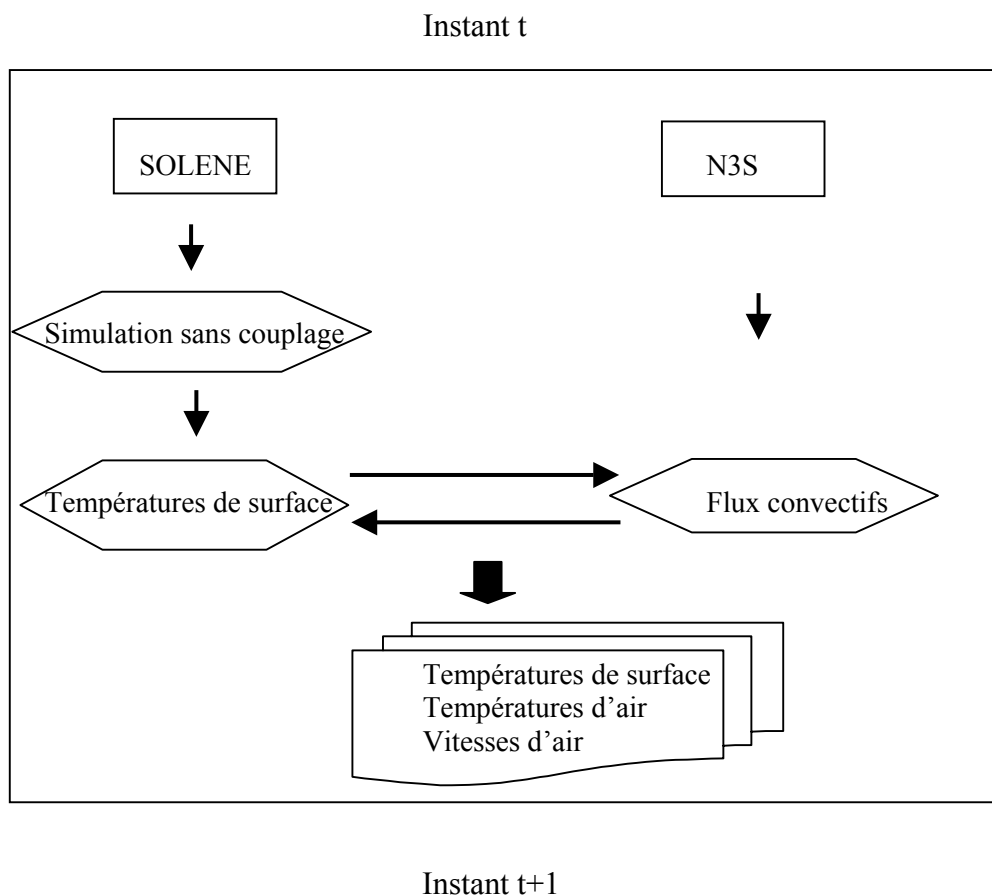


Figure 72 : Principe du couplage thermo-aéraulique

Un deuxième programme, développé dans l'environnement SOLENE et appelé `transitoire_couplage.c` permet le calcul des températures du sol et des murs en régime transitoire, mais cette fois-ci en tenant compte du couplage thermo-aéraulique, les flux convectifs étant obtenus par N3S. La structure du programme est proche du programme précédent et l'algorithme itératif reprend les grandes lignes précédentes :

1. Lecture des entrées de la base de données numéro 1 et des facteurs de forme
 2. Lecture des flux convectifs issus de N3S
 3. Lecture des apports solaires après multi-réflexions
- Initialisation des températures de surface aux valeurs obtenues lors du calcul précédent
 - Initialisation des critères d'arrêt sur les températures de surface

4. Calcul des flux de grandes longueurs d'onde avec ciel et avec les autres surfaces

– Tant que les critères d'arrêt ne sont pas atteints :

$$\varphi_{GLO} = \sum_{j=1}^n \varepsilon_{ext} F_{ext,j} \sigma (T_{s_{ext}}^4 - T_{s_j}^4) \quad (172)$$

$$\varphi_{ciel} = F_{ext,ciel} (\sigma \varepsilon_{ext} T_{s_{ext}}^4 - L_a) \quad (173)$$

5. Calcul des températures des parois

- Ecriture des équations sous une forme matricielle $A.X = B$
- Résolution matricielle par algorithme de Thomas
- Valeurs des températures en régime variable

6. Etude de la convergence des températures (retour à 4 si nécessaire)

7. Sauvegarde des résultats des températures dans et à la surface des parois

A chaque pas de temps, la détermination des températures de surface nécessite un certain nombre d'aller-retour entre SOLENE et N3S. Chaque passage est repéré par un numéro d'itération. L'itération numéro 0 correspond au résultat issu du calcul sans couplage thermo-aérodynamique, les itérations suivantes traduisent l'influence du couplage. L'étude de la convergence des résultats est illustrée ici en prenant comme exemple les résultats relatifs au cas de la « Place du Millénaire » que nous développons dans le chapitre « Application à un ensemble urbain : quartier Antigone » le 5/7/98 à 14h dans le cas sans végétation. Les points de mesure correspondent aux centres de gravité des mailles dans SOLENE dans la tranche centrale de la rue, de gauche à droite (Figure 73). Nous observons en premier le mur gauche (de haut en bas), puis la rue (de gauche à droite) et le mur droit (de bas en haut). Une séparation entre deux valeurs indique le passage entre le mur et la rue.

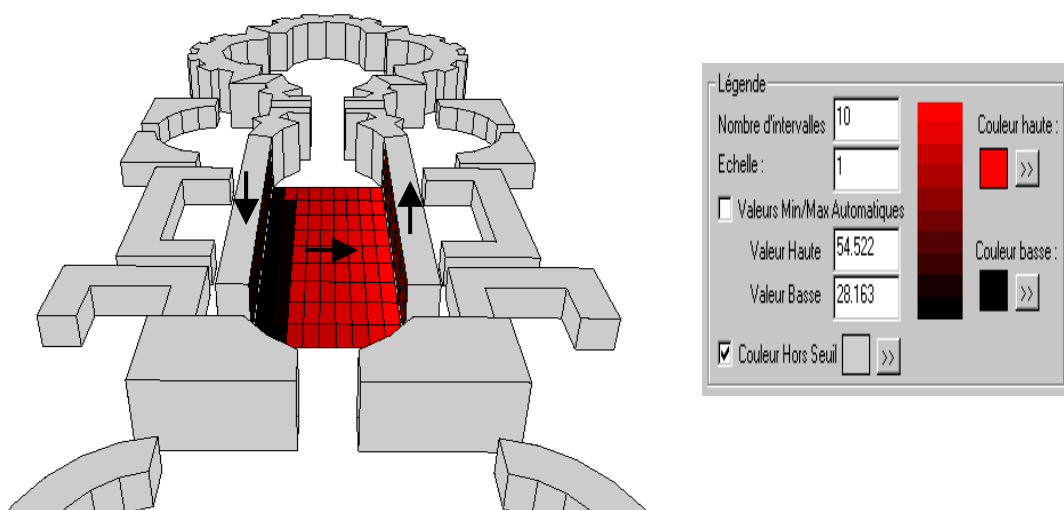


Figure 73 : Exemple de températures de surface calculées à 14:00

Les deux graphiques suivant tracent les variations des valeurs des températures de surface en fonction des itérations entre SOLENE et N3S (Figure 74) et les variations des écarts de température entre deux itérations successives (Figure 75).

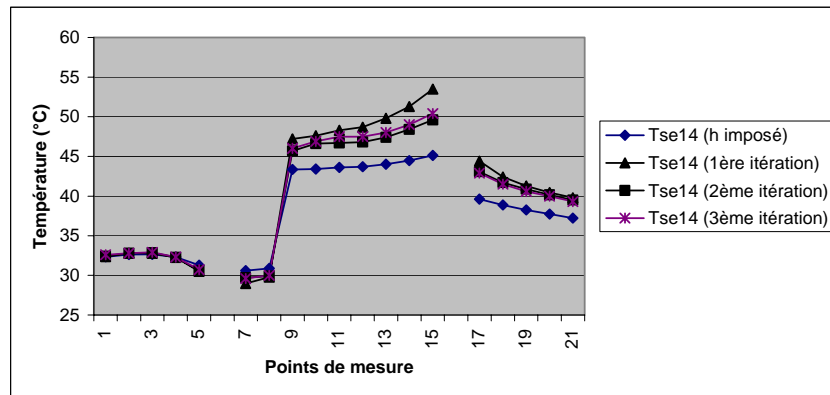


Figure 74 : Températures de surface (cas sans végétation)

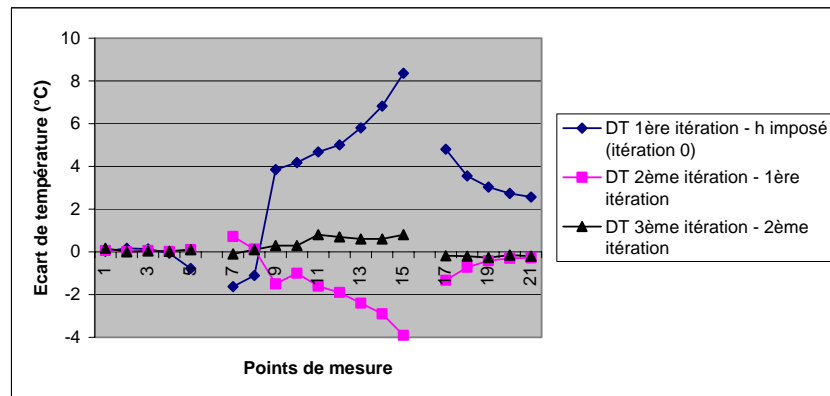


Figure 75 : Ecart de température après itérations (cas sans végétation)

Lors du premier calcul des températures de surface avec le coefficient d'échange imposé, les valeurs des températures de surface sont sous-estimées car ce coefficient a été pris à une valeur trop élevée. Lors de la première itération, les températures évoluent de manière importante pour les surfaces qui sont au soleil. Dès la deuxième itération, la différence devient faible par rapport à l'itération précédente et les courbes évoluent dans le sens de la convergence, en oscillant autour de la valeur finale. Nous constatons que dès la troisième itération les valeurs n'évoluent presque plus, avec un écart maximal entre deux itérations inférieur à 0.5 °C (Figure 75). Cette valeur peut être retenue comme critère de convergence. Une fois la convergence atteinte, il est alors possible de sauvegarder ces valeurs de température et de passer au pas de temps suivant.

7.3.5 Les résultats en sortie

A l'issue de ces simulations, de nombreuses informations peuvent être recueillies à la fois dans SOLENE et dans N3S pour chacune des mailles du site. Les résultats correspondent à des données surfaciques en sortie de SOLENE et à données volumiques en sortie de N3S :

Densités de flux solaire :

- incident direct
- incident diffus

- incident transmis à travers la couronne végétale des arbres
- absorbées au niveau des mailles après multi-réflexions

Densités de flux grande longueur d'onde échangées :

- avec les surfaces
- avec le ciel

Température des parois et du sol :

- au niveau des surfaces extérieures et intérieures
- au niveau des nœuds des différentes couches

Caractéristiques du vent :

- vitesse
- direction
- énergie cinétique turbulente (k)
- taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente (ϵ)

Densité de flux convectifs

Concentration d'un effluent passif

Température de l'air

A partir des simulations ainsi mises en place, les principaux éléments nécessaires à la caractérisation microclimatique de l'espace sont alors disponibles. De même, en définissant l'activité et la vêtue des individus du site, la détermination des zones de confort est envisageable. En effet, tous les paramètres nécessaires à ce calcul sont maintenant déterminés, l'humidité de l'air pouvant être prise égale à la valeur à la station météo la plus proche diminué de 8 % [Swaid et al. 1993].

7.3.6 Post-traitement des sorties : application au confort

7.3.6.1 Modélisation géométrique du « bonhomme confort »

L'individu doit être représenté sous forme de facettes de manière à pouvoir réaliser les différentes opérations nécessaires à la simulation des conditions de confort en espace extérieur. Le « bonhomme confort » peut alors être modélisé soit par un parallélépipède rectangle, soit par un cylindre ou soit par une association de facettes organisées de telle sorte que l'individu soit plus ou moins réaliste (Figure 76). Ces approximations géométriques sont facilement améliorables, mais induisent une augmentation significative des temps de calcul, notamment lors de la détermination des facteurs de forme entre les facettes de l'individu et les facettes de l'environnement composé des autres surfaces et du ciel. La seule condition géométrique à retenir est d'obtenir une surface totale du corps modélisé de 1.8 m^2 valeur correspondant à l'aire de Dubois pour un sujet « standard » de 1.7 m et 70 kg [Hofmann 1994].

7.3.6.2 Températures radiantes moyennes

La modélisation des différents transferts radiatifs et des facteurs de forme entre un individu et son environnement permet d'évaluer un paramètre important dans la définition du confort en espace extérieur, la température radiante moyenne. Nous avons déjà défini les différents flux qui permettent de l'évaluer dans le chapitre sur le confort thermique. Nous en rappelons ici brièvement les grandes lignes.

La quantité de rayonnement absorbé par le corps est obtenue en soustrayant, aux flux incidents, les flux émis, pour la partie de la surface du corps qui participe aux échanges radiatifs. En supposant que le rayonnement direct est absorbé par la surface du corps qui est directement ensoleillée, on utilise le facteur de surface projetée du corps (f_p), qui est calculé à partir de la hauteur du soleil, pour pondérer la quantité de rayonnement direct absorbé. La position du corps dans la scène vis-à-vis des différents masques solaires est un facteur influent qui est déterminé par les procédures géométriques que nous avons déjà présentées. Les rayonnements diffus et réfléchis et de grande longueur d'onde sont supposés être absorbés par la fraction de surface totale du corps qui est disponible pour les échanges radiatifs ; on la désigne par un facteur de surface effective de rayonnement (F_{eff}), qui dépend de la posture de l'individu. Une valeur de 0.75 correspond à un individu debout. Enfin, la fraction de rayonnement incident absorbé par le corps varie en fonction de l'isolation des vêtements et fait apparaître un facteur d'efficacité de chauffage dû au soleil (U_{sol}), fonction de l'isolation intrinsèque des vêtements, du facteur de surface de vêtements et de l'isolation de la couche limite d'air à la surface de la peau. La quantité totale de rayonnement absorbé par le corps humain est obtenue en sommant le flux direct, diffus et réfléchi aux flux de grandes longueurs d'onde (Figure 76).

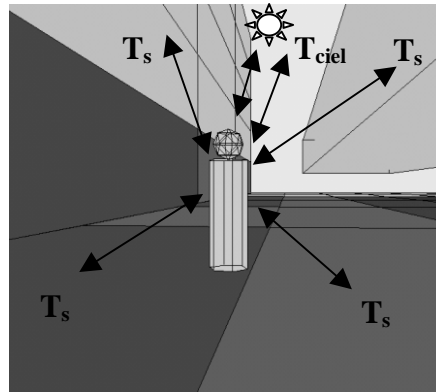


Figure 76 : L'individu dans son environnement

La température radiante moyenne correspond à la température isotherme (T_s) de l'enceinte pour laquelle la quantité de rayonnement arrivant sur le corps est donnée par la loi de Stefan-Boltzmann. En supposant que le rayonnement de grande longueur d'onde est absorbé par la surface radiante effective, la quantité de rayonnement absorbé par une personne dans une enceinte isotherme nous mène à la définition de la température radiante moyenne [Vinet et al. 2000c] :

$$T_{mrt} = \left[\sum_{j=1}^n F_{i,j} \varepsilon_j T_j^4 + F_{i,ciel} \varepsilon_{ciel} T_{ciel}^4 + \frac{f_p (1 - \alpha_{cl}) U_{sol} S \downarrow}{\sigma F_{eff}} + \frac{(1 - \alpha_{cl}) U_{sol} (D \downarrow + \alpha_{sol} (S \downarrow + D \downarrow))}{\sigma} \right]^{0.25} \quad (174)$$

Un programme appelé `proc_out_mrt.c` a été développé pour déterminer la température radiante moyenne. Les paramètres d'entrée sont la géométrie de la scène discrétisée, celle des masques et une géométrie de ciel. Un fichier descripteur permet d'obtenir la localisation du piéton (sur le sol, sur un trottoir, au centre de la rue, ...), le fichier des surfaces de l'individu modélisé et maillé, la valeur de la température d'air météo, la hauteur du soleil pour le calcul des facteurs de projection solaire, les flux solaires incidents directs et diffus sur les différents patches de la scène maillée, les températures de surface, les vitesses d'air, l'albedo et l'émissivité des surfaces. En sortie nous obtenons un fichier de températures radiantées moyennes calculées aux différents emplacements du « bonhomme confort ».

Sur chaque patch du sol, nous déplaçons le « bonhomme confort » en chacun des sommets du maillage, nous déterminons pour chaque face de celui-ci les facteurs de forme avec son environnement (autres surfaces et ciel) et nous calculons les températures radiantes moyennes pour toutes les faces constituant l'individu à partir de la formule précédente. Nous moyennons ensuite ces valeurs en pondérant les températures obtenues par l'aire des faces du « bonhomme confort » modélisé. Cette valeur moyenne ainsi obtenue donne une indication sur la température radiante moyenne pour un sujet placé sur ce patch en considérant l'ensemble des transferts radiatifs évalués préalablement sur l'ensemble de la scène.

7.3.6.3 Indices de confort en extérieur

Dans le chapitre sur le confort thermique, nous avons présenté un certain nombre d'indices applicables en espace extérieur. Des travaux basés sur la détermination des bilans de chaleur liés à l'individu ont été utilisés lors de l'aménagement des espaces extérieurs de l'Exposition Universelle de Séville en 1992. Ces bilans permettent de quantifier l'état de stress thermique en situation chaude en associant à un certain niveau d'activité une quantité de sueur régulatrice à ne pas dépasser [Alvarez et al. 1992]. L'utilisation de la température moyenne radiante en extérieur permet d'étendre des indices de confort thermique comme les indices dérivés du PMV [Fanger 1970] ou le OUT_SET* [Pickup et al. 1999]. Même, si quelques réserves sont à adopter sur la transposition des résultats, les domaines de validité n'étant pas forcément respectés dans certaines situations climatiques, lors d'un travail de comparaison entre deux situations, la différence relative apporte suffisamment d'information pour justifier l'utilisation de ces indices pour évaluer l'impact d'un nouvel aménagement.

Pour ce faire, un programme appelé confort.c permet le calcul de l'indice de confort thermique PMV (ainsi que le PPD) tel qu'il est défini par Fanger [Fanger 1970]. Les paramètres en entrée sont la température (pour l'estimation de la température équivalente du ciel), l'humidité relative à la station météorologique, la température et la vitesse de l'air pour chaque maille de la scène. Les températures radiantes moyennes peuvent être soit calculées pour chaque position à partir des températures de paroi et des facteurs de forme, soit calculées comme précédemment en intégrant l'ensemble des flux radiatifs. Il est également possible de prendre en compte les apports solaires en les faisant intervenir dans un bilan d'énergie relatif aux vêtements [Serres 1997]. Dans ce programme nous considérons un individu « standard » de 1.7 m et de 70 Kg (surface de Dubois = 1.8 m^2) pour lequel il suffit de donner la valeur du métabolisme (relatif à l'activité) exprimée en met ($1 \text{ met} = 58.2 \text{ W/m}^2$) ainsi que la résistance thermique des vêtements exprimée en clo ($1 \text{ clo} = 0.155 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$). En se reportant au calcul présenté dans le chapitre sur le confort thermique, nous pouvons estimer la valeur du PMV et du PPD en calculant, à partir des fichiers d'entrées précédents, les valeurs de la pression de vapeur d'eau au niveau de la peau et dans l'air, les pertes par diffusion, par sudation, par respiration latente, en obtenant de manière itérative la température des vêtements, les pertes par rayonnement et par convection. Les différentes valeurs de PMV que l'on peut obtenir dépendent alors de la manière dont sont intégrés les flux radiatifs.

Dans ce même programme, nous avons calculé la quantité de sueur évacuée par un individu sur 1 heure en faisant un bilan thermique basé sur les travaux réalisés par l'Université de Séville [Alvarez et al. 1992]. Il s'agit là encore de calculer à partir des fichiers d'entrées précédents, les pressions partielles de vapeur dans l'air et les pressions à saturation au niveau de la peau, les pertes par respiration latente et sensible, les pertes par diffusion, le flux de courte longueur d'onde absorbé par l'individu, la température radiante moyenne qui intègre ces apports solaires, les pertes par convection et par rayonnement de grande longueur d'onde. Le bilan est alors exprimé en quantité de sueur (g/h).

Enfin, grâce aux valeurs estimées précédemment de l'évaporation maximale du corps et de l'évaporation au niveau de la peau nous pouvons déterminer la valeur de la mouillure et ainsi calculer l'indice DISC de Berglund (1984) [Pignolet 1996].

7.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons essayé de décrire le plus précisément possible la manière dont nous envisageons la simulation numérique des différents transferts de chaleur (par rayonnement de courte et grande longueur d'onde, par convection et par conduction) en milieu urbain. En nous appuyant sur deux logiciels, SOLENE et N3S et en insistant sur les particularités et les applications de ces deux outils numériques, nous avons pu proposer des développements permettant d'obtenir l'ensemble des informations microclimatiques désirées. Il est à signaler que la démarche présentée ici tente de ne pas être dépendante des outils numériques et demeure générale quant à la modélisation des phénomènes physiques.

La partie importante de notre contribution concerne la mise au point d'un couplage thermo-aérodynamique en régime variable permettant l'intégration des différents transferts de chaleur présents en espace urbain. Ainsi, après avoir décrit les principes généraux de modélisation de la géométrie urbaine considérée et des transferts des données entre les logiciels, nous avons abordé la méthodologie mise en place pour effectuer le calcul des températures de surface en régime transitoire avec découplage dans un premier temps puis couplage thermo-aérodynamique dans un second temps. Ces deux étapes permettent de proposer des stratégies de simulation de l'environnement urbain, avec des niveaux de complexité et de précision différents. A chaque niveau, les paramètres d'entrée et les conditions initiales nécessaires aux différents calculs sont présentés. L'organisation des programmes développés dans ces perspectives traduit la démarche mise en œuvre :

- Un module de calcul des flux solaires incidents transmis : `transmission.c`
- Un module de calcul des températures de surface en régime variable sans couplage : `transitoire_h_option.c`
- Un module de calcul des températures de surface en régime variable avec couplage : `transitoire_couplage.c`
- Un module de calcul des températures radiantes moyennes : `proc_out_mrt.c`
- Un module de calcul d'indices de confort thermique en espace extérieur : `confort.c`

Des exemples de résultats sont mentionnés à titre d'illustration, une étude de cas complète sur un site urbain étant donnée dans le dernier chapitre de ce manuscrit.

A l'issue des simulations, la caractérisation microclimatique du site et la détermination des conditions de confort, notamment par le calcul de la température radiante moyenne et de certains indices de confort thermique applicables en espaces ouverts extérieurs sont deux points importants qui peuvent être mis en avant par ce type de démarche.

7.5 Références

[Abdesselam *et al.* 1990] ABDESSELAM M., BREJON P., CAMPANA D. *et al.* (1990). Casamo-Clim. Cahier scientifique. Paris : édition AFME.

[Alvarez *et al.* 1992] ALVAREZ D. S., CEJUDO L. J.M., GUERRA M. J.J. *et al.* (1992). Control climatico en espacios abiertos, El Proyecto Expo'92. Sevilla: Cimat, pp.4-49.

- [Antoine 1997] ANTOINE M.J. 1997. Calcul des températures de parois pour le facettes du modèle géométrique d'un espace ouvert urbain. Contribution à l'établissement d'un modèle microclimatique urbain. Nantes : CERMA, 34 pages.
- [Antoine *et al.* 1998] ANTOINE M.-J. and GROLEAU D. (1998). Assessing solar energy and environmental variables in urban outdoor spaces: a simulation tool. In : Proceedings of Eurosolar, 5th European conference on solar energy in architecture and urban planning, Bonn, May 27, pp 108-110.
- [Antoine 1999] ANTOINE M.-J. (1999). Comparaison de deux versions d'un algorithme permettant le calcul de températures de surface externes. Contribution à l'établissement d'un modèle microclimatique (suite). Nantes : CERMA, 21 p.
- [Ashdown 1994] ASHDOWN I. (1994). Radiosity: a programmer's perspective. New York : Wiley.
- [Chabard *et al.* 1989] CHABARD J.P. and POT G. (1989). An efficient finite element technique for computation of 3D turbulent flows. Paris : Electricité de France (EDF), département Laboratoire National d'Hydraulique.
- [Cowan *et al.* 1997] COWAN I. R., CASTRO I. P. and ROBINS, A. G. (1997). Numerical considerations for simulations of flow and dispersion around buildings. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol 67&68, pp. 535-545.
- [Delenne *et al.* 1993] DELENNE B. and POT G. (1993). Modelling of the turbulent thermal boundary layer implemented in CFD code N3S and application to flows in heated rooms. Chatou : EDF, HT-32/93-03-A, 14 p.
- [Delenne 2000] DELENNE, B (2000). Projet N3S de Mécaniques des Fluides: Modification et étape de validation du modèle de couche limite thermique turbulente dans N3S 3.0. Chatou : EDF, HT-32/92-06A, 8 p.
- [Fanger 1970] FANGER, P. O. (1970). Thermal Comfort. New York : Mc Graw Hill.
- [Gadhile *et al.* 1993] GADILHE A., JANVIER L. and BARNAUD G. (1993). Numerical and experimental modelling of three dimensional wind flow through an urban square. Journal of Wind Eng. And Industrial Aerodynamics 1993, 46&47, pp. 755-763.
- [Glockner *et al.* 1999] GLOCKNER S., CALTAGIRONE J.P et MOREL P. (1999). Modélisation des écoulements dans les espaces urbains. Int J. Therm. Sci, 38 pp. 703-711.
- [Groleau *et al.* 1997] GROLEAU D., DEGUCHI K. and MARENNE, C. (1997) Evaluation of natural ventilation in traditional japanese dwellings and its possibilities of transposition. In : Proceedings of PLEA 97, Kushiro, January 8-10. Tokyo : PLEA japan committee, vol. 2, pp. 15-20.
- [Groleau 1998] GROLEAU D. (1998). SOLENE – Logiciel de simulation d'ensoleillement et de rayonnement – Guide d'utilisation. Nantes : CERMA, 62 p.
- [Groleau 2000] GROLEAU D. (2000). SOLENE, un outil de simulation des éclairagements solaires et lumineux dans les projets architecturaux et urbains. In : Colloque Artepa, Rouen, février 2000, 8p.
- [Hofmann 1994] HOFMANN, J. B. (1994). Ambiances climatisées et confort thermique. COSTIC, 120 p.

- [Marenne *et al.* 1992] MARENNE C. et GROLEAU D. (1992). SOLENE système de simulation et d'interrogation solaire. Nantes : CERMA, 1992.
- [Miguet 1996] MIGUET F. (1996). Eclairages énergétiques et lumineux en milieu urbain. Nantes, CERMA, 67 p.
- [Miguet *et al.* 1996] MIGUET F., GROLEAU D., MARENNE C. (1996). A combined sunlight and skylight tool for microclimatic analysis in urban architectures. In : Proceedings of the 4th European Conference on Solar Energy in Architecture and Urban Planning, Berlin, pp. 338-345.
- [Miguet 2000] MIGUET F. (2000). Paramètres physiques des ambiances architecturales : Un modèle numérique pour la simulation de la lumière naturelle dans le projet urbain. Thèse de doctorat de l'Université de Nantes. Nantes : Université de Nantes, octobre 2000, 360 p.
- [Mills *et al.* 1993] MILLS, G. M. and ARNFIELD, J. A. (1993). Simulation of the energy budget of an urban canyon – II. Comparison of model results with measurements. Atmospheric Environment, Vol. 27 B, n° 2, pp. 171-181.
- [Monteith *et al.* 1991] MONTEITH J.L. and UNSWORTH M.H. (1991). Principles of environmental physics. New York : Edward Arnold, 291 p.
- [Neveu 1984] NEVEU A. (1984). Etude d'un code d'évolution théorique d'une enveloppe de bâtiment (MINERVE). Thèse de doctorat, juin 1984.
- [Pickup *et al.* 1999] PICKUP, J and de DEAR, R. 1999. An outdoor thermal comfort index (OUT-SET*). 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].
- [Péneau 1989] PÉNEAU, J.P. (1989). SOLENE : un outil au service de l'architecture et de l'urbanisme. Bâtiment et Energie, 57, pp. 30-32.
- [Pignolet 1996] PIGNOLET - TARDAN, F. (1996). Milieu thermique et conception urbaine en climat tropical humide, modélisation thermo - aéralique globale. Thèse de l'INSA de Lyon, 246 p (+Annexes).
- [Press *et al.* 1993] PRESS W. H., TEUKOLSKY S. A., VETTERLING W. T. *et al.* (1993). Numerical Recipes in C : The Art of Scientific Computing. Cambridge: Cambridge University, 2nd edition, 994 p.
- [Raymond 1998a] RAYMOND, F. (1998). Introduction d'un modèle de comportement thermique de paroi dans N3S. Nantes : CERMA, 17 p.
- [Raymond 1998b] RAYMOND, F. (1998). Etude aérodynamique d'un bâtiment solaire site de Plan-Les-Ouates. Nantes : CERMA, 1998, 36 p.
- [Raymond *et al.* 1998] RAYMOND, F. ; MARENNE, C. and GROLEAU D. (1998). Numerical simulation of the air cooling by natural ventilation inside the " Maison Ronde " of Botta. In Proceedings of EPIC'98, 2nd European conference on energy performance and indoor climate in buildings and 3rd International conference on indoor air quality, ventilation and energy conservation in buildings November 19-21. Lyon : ENTPE, pp 807-812.
- [Raymond 1999] RAYMOND, F. (1999). Modélisation des effets de la végétation par porosité et pertes de charge dans N3S. Nantes : CERMA, 23 p.

- [Schiestel 1993] SCHIESTEL, R. (1993). Modélisation et simulation des écoulements turbulents. Paris : édition HERMES, 442 p.
- [Serres 1997] SERRES, L. (1997). Etude de l'impact d'une perturbation thermique locale de type tache solaire. Influence sur le confort thermique. Thèse de L'INSA de Toulouse, 148 p.
- [SIMULOG 1997] SIMULOG (1997). Manuel théorique version 3 et 4. Paris : EDF – SIMULOG, 155 p.
- [Swaid *et al.* 1993] SWAID H, Bar-El M. and Hoffman M.E. (1993). A Bioclimatic Design Methodology for Urban Outdoor Spaces. *Theoretical and Applied Climatology* 48, pp. 49 – 61.
- [Turbelin 1999] TURBELIN G. (1999). Modélisation de la turbulence atmosphérique en vue de l'étude de l'action du vent sur les structures. Choix d'un modèle de turbulence. In : 14ème congrès français de mécanique, 29 août - 3 septembre, Toulouse.
- [Vinet *et al.* 2000a] VINET J., RAYMOND F. and INARD C. (2000a). A simulation tool to assess the impact of vegetation on the urban microclimate. In : *Proceedings of International Building Physics Conference Tools for design and engineering of buildings*. September 18-21, 2000, Eindhoven, pp. 637-644.
- [Vinet *et al.* 2000c] VINET J. et GROLEAU D. (2000c). La modélisation des transferts radiatifs dans le logiciel SOLENE. Application au microclimat urbain et au confort thermique en espace ouvert. 2ème Conférence IBPSA France, Sophia Antipolis, 26 et 27 octobre 2000, pp. 29-35.

8 Eléments de validation

8.1 Introduction

Le travail de validation est une étape délicate mais essentielle en modélisation numérique. Cette étape, souvent coûteuse en temps et en moyen, doit mettre en place des protocoles qui nécessitent des compétences spécifiques et représente parfois un travail impossible à réaliser seul. Les différentes manières de valider notre démarche de simulation numérique passe soit par des comparaisons avec des travaux numériques dits de référence soit par des confrontations à des campagnes de mesures. La complexité des transferts de chaleur en milieu urbain entraîne de nombreuses difficultés de validation. En effet à l'opposé de la cellule test isolée et parfaitement contrôlable, l'espace extérieur est soumis à de nombreuses sollicitations (vent tourbillonnant, alternance de soleil et de nuages, multiplicité des matériaux des surfaces, etc.). Ainsi, dans ce chapitre, nous ne prétendons pas valider l'intégralité de notre méthodologie de modélisation, mais nous souhaitons démontrer la cohérence de notre démarche. Nous abordons, dans un premier temps une amorce de validation de la partie aéraulique en comparant les écoulements obtenus dans une rue canyon par le code N3S avec ceux issus du code CHENSI [Sini et al. 1996]. L'impact des effets thermiques sur les écoulements aérauliques est également envisagé. Nous traitons ensuite l'effet des pertes de charge et des porosités par comparaison avec des résultats analytiques et des travaux de simulation menés sur les écoulements aérauliques à travers une zone végétale [Alvarez et al. 1998]. Nous terminons cette partie en nous préoccupant de la modélisation des apports solaires et des températures de paroi dans SOLENE en mettant en parallèle les résultats de simulation et les mesures réalisées dans une rue à Athènes.

8.2 Validation de la partie aéraulique

8.2.1 Introduction

Les écoulement aérauliques issus du code N3S ont déjà été partiellement validés dans différentes configurations par comparaison avec des résultats expérimentaux issus de mesures sur site au niveau d'une place [Gadilhe et al. 1992] et aux abords d'un bâtiment [Raymond et al. 1999]. De notre côté, nous avons effectué une mise en correspondance avec une étude numérique réalisée sur la rue Canyon [Sini et al. 1996]. La rue canyon est une approximation géométriquement simple d'un schéma de rue en ville. En effet, les hypothèses retenues sont généralement l'aspect symétrique des rues et leur dimension infinie dans le sens de la longueur. La géométrie est un élément important qui détermine les caractéristiques des flux d'air observés dans les rues canyons.

Les trois régimes principaux de flux d'air sont référencés sous la terminologie suivante [Oke 1988] : « skimming » flow, « wake interference » flow et « isolated roughness » flow. Ces trois comportements aérauliques, fréquemment analysés dans la bibliographie, sont illustrés dans le chapitre sur la microclimatologie urbaine. La caractérisation du régime aéraulique apporte des éléments d'information sur la dispersion de polluants dans les rues. En effet, le rapport d'aspect et la localisation de la source de pollution influencent la stagnation ou l'évacuation de rejets automobiles. De même, le nombre de vortex et leur intensité influencent le rapport de concentration résiduelle en contrôlant le trajet et le temps de résidence des polluants. La

transition entre les régimes peut être déterminée en fonction du rapport d'aspect (H/W) pour un rapport arbitraire longueur/hauteur, noté L/H, en général on suppose que la rue est infinie et qu'il est alors possible de la traiter en 2D. Le rapport seuil H/W peut être obtenu suite à des expérimentations répétées en soufflerie aéraulique ou suite à de nombreuses simulations numériques, dans lesquelles la géométrie est modifiée jusqu'à ce que le régime change. Dans le tableau suivant (Tableau 26), les différents régimes de vent sont associés aux valeurs inverses des rapports d'aspect (W/H) et au nombre de vortex présents dans la rue [Sini et al. 1996].

Régime « skimming flow »	Régime « wake interference flow »	Régime « isolated roughness flow »	Écoulement indépendant
W/H ----- 0.6 ----- 1.5 ----- 5----- 8-9 ----- > 50 -----			
Un vortex à contre sens	Un vortex principal	Deux vortex à contre sens	

Tableau 26 : Comportements aérauliques dans une rue et rapports d'aspect [Sini *et al.* 1996]

8.2.2 Comparaison des résultats numériques

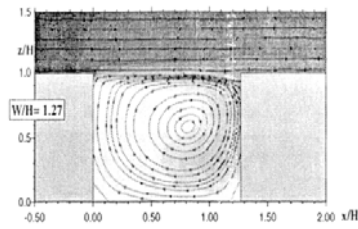
Le modèle numérique utilisé dans le code de calcul CHENSI est basé sur l'hypothèse classique de basse atmosphère. Il permet entre autre d'étudier l'influence de la géométrie du canyon sur les flux et les échanges verticaux de polluants à l'intérieur de la rue et à l'interface avec la couche atmosphérique au-dessus des toits. La résolution des équations moyennées de Navier-Stokes et de transport de polluant passif fait appel à une méthode de calcul en volume fini. Le modèle retenu pour représenter les termes turbulents est du type k-ε standard et l'approximation de Boussinesq est utilisée. Le code de calcul N3S à quant à lui déjà été présenté dans le chapitre précédent.

8.2.2.1 Écoulements aérauliques en condition isotherme

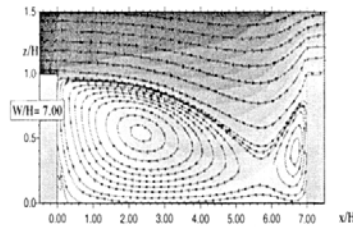
Les simulations présentées dans ce paragraphe sont effectuées en 2D et en condition isotherme. Une étude basée sur l'observation d'une rue canyon à Chicago par Paul et Sheih (1986) a montré qu'une vitesse de vent supérieure à 2 m/s est nécessaire pour maintenir un vortex unique pour une rapport d'aspect (H/W) de 1.5 [Baik et al. 1999]. Un vent modéré d'une valeur de 5 m/s à 100 m de hauteur respecte le critère précédent et est donc imposé en condition d'entrée. IL souffle suivant un angle de 90 ° par rapport à l'axe de la rue, de la gauche vers la droite. Les dimensions du domaine de calcul, les conditions initiales et limites pour les simulations sur le code N3S respectent celles décrites dans l'article [Sini et al. 1996]. Ainsi, la comparaison est également possible avec d'autres travaux [Baik et al. 1999] faisant eux aussi référence aux recherches de l'équipe nantaise.

Trois rapports d'aspects (W/H = 1.27, 7.0 et 9.86), représentant les trois régimes précédemment cités, sont ici illustrés et permettent une comparaison entre les deux codes (Figure 77 et Figure 78). Dans notre étude, le dégradé de couleur correspond à une variation de la vitesse dans le canyon, dans l'étude de référence le dégradé correspond à des valeurs de concentration de polluant. L'analyse des lignes de courant montre que les comportements aérauliques sont très proches dans les trois situations [Vinet et al. 2000b].

W/H = 1.27



W/H = 7.0



W/H = 9.86

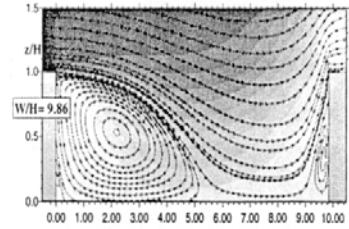


Figure 77 : Ecoulements aérauliques obtenus avec le code CHENSI [Sini *et al.* 1996]

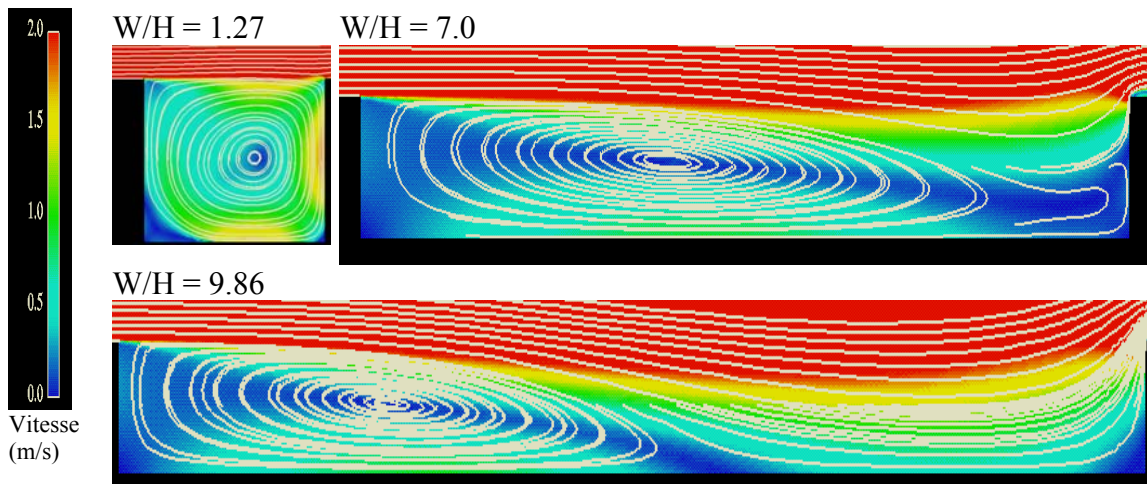


Figure 78 : Ecoulements aérauliques obtenus avec le code N3S [Vinet *et al.* 2000b]

8.2.2.2 Ecoulements aérauliques en condition anisotherme

Les effets thermiques sur les écoulements aérauliques dans une rue canyon ont également été étudiés à l'aide des mêmes modèles numériques. Le transfert de chaleur entre l'air, les murs des bâtiments et le sol de la rue est représenté par une loi de paroi. Des simulations numériques ont été effectuées pour quatre situations thermiques et selon un rapport W/H de 0.89 [Sini *et al.* 1996]. Nous avons également repris les résultats pour W/H = 1 [Kim *et al.* 1999] qui confirme globalement les écoulements obtenus avec le code CHENSI. Les sollicitations thermiques consistent à imposer la température de surface de certaines parois à une valeur supérieure de 5 K ($\Delta\theta_w$) à celle de l'air en amont du canyon. Ainsi, nous distinguons les quatre cas suivants (Figure 79) :

- a – toutes les températures de surface sont égales à la température de l'air (cas isotherme)
- b - $\Delta\theta_w$ est appliqué au niveau du sol
- c - $\Delta\theta_w$ est appliqué sur la paroi verticale gauche
- d - $\Delta\theta_w$ est appliqué sur la paroi verticale droite

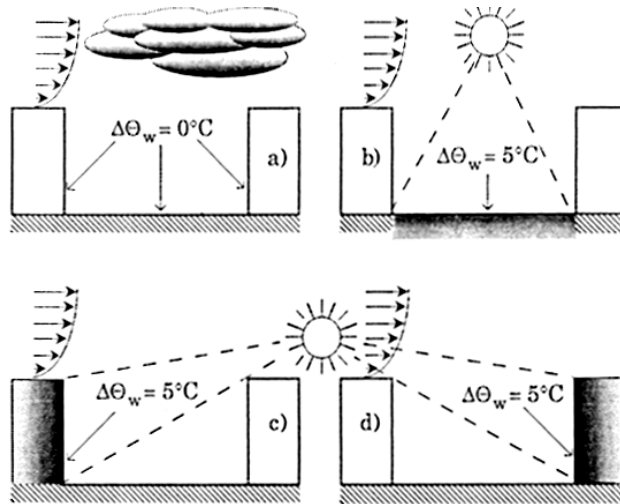


Figure 79 : Sollicitations thermiques dans le canyon [Sini *et al.* 1996]

Les quatre configurations précédentes réalisées avec le code N3S sont mises en relation avec les résultats obtenus avec le code CHENSI et avec les travaux de [Kim *et al.* 1996] dans les illustrations suivantes (Figure 80 à Figure 88). Dans les trois premiers cas (Figure 80 à Figure 85), un vortex classique pour ce type de rapport d'aspect apparaît. Le chauffage du sol et du mur sous le vent ne modifie quasiment par la structure de l'écoulement dans la rue (Figure 82 à Figure 85). Dans le cas du chauffage du mur au vent, deux vortex contra-rotatifs apparaissent pour ce rapport d'aspect (Figure 86, Figure 87 et Figure 88). De manière générale, le vortex dans la couche supérieure est mécaniquement induit par le vent ambiant, alors que le vortex dans la couche inférieure est induit par le chauffage du mur.

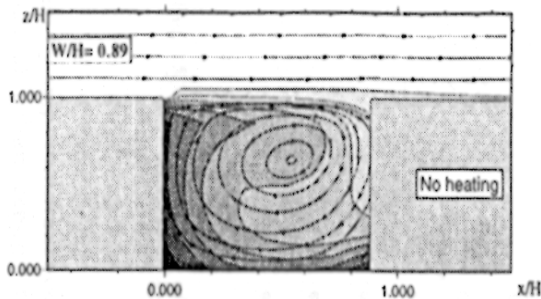


Figure 80 : CHENSI, isotherme (cas a)

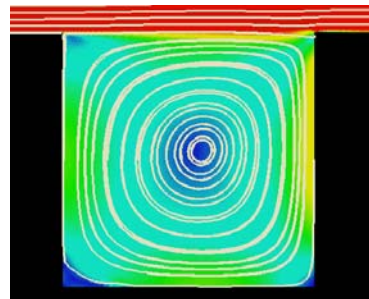


Figure 81 : N3S, isotherme (cas a)

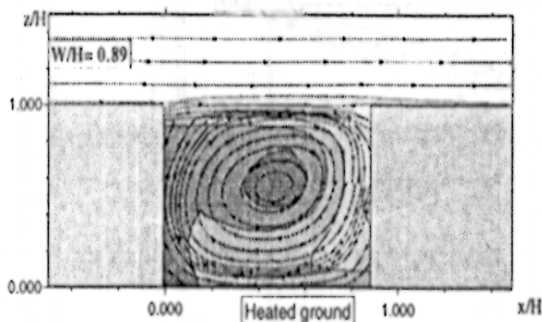


Figure 82 : CHENSI, sol chauffé (cas b)

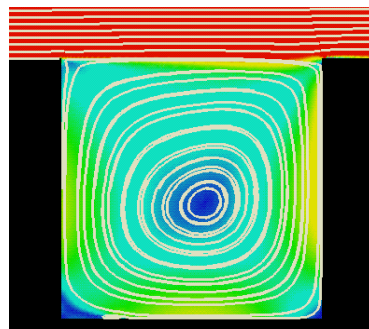


Figure 83 : N3S, sol chauffé (cas b)

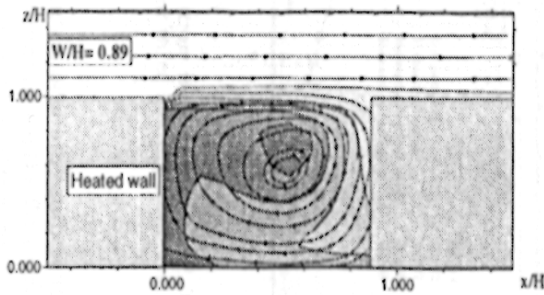


Figure 84 : CHENSI, mur sous le vent chauffé (cas c)

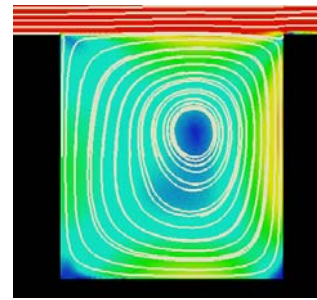


Figure 85 : N3S, mur sous le vent chauffé (cas c)

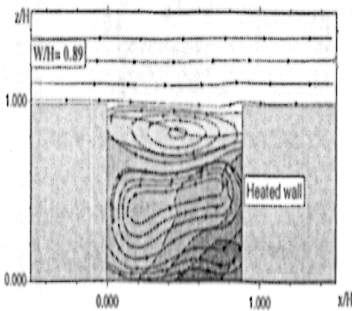


Figure 86 : CHENSI, mur au vent chauffé (cas d)

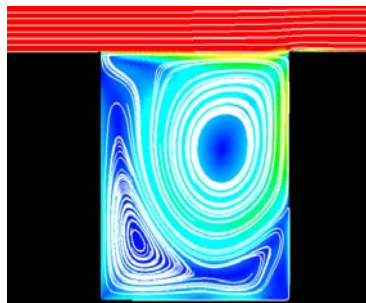


Figure 87 : N3S, mur au vent chauffé (cas d)

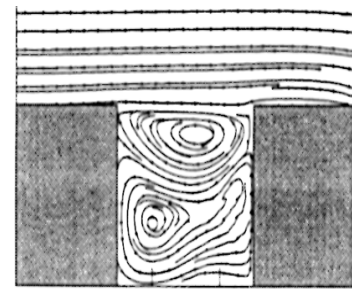


Figure 88 : Mur au vent chauffé (cas d) [Kim et al. 1999]

Cette dernière correspondance est celle qui semble la plus délicate à obtenir. Néanmoins, les deux vortex apparaissent nettement et, bien qu'étant légèrement modifiés par rapport à ceux obtenus par ailleurs, ils traduisent effectivement l'impact des effets thermiques sur les écoulements aérauliques.

La validation du code N3S ayant déjà donné lieu à certain nombre de travaux, nous avons davantage chercher à démontrer que dans un cas simple mais bien référencé le code apportait suffisamment d'information utile aux champs d'application que sont les nôtres. La concordance obtenue entre les deux codes de calcul nous conforte dans l'utilisation de N3S aussi bien en aéraulique pure, qu'en couplage thermo-aéraulique.

8.3 Validation de la porosité et des pertes de charges dans N3S

La validation des options de porosité et perte de charge du logiciel N3S est présentée dans cette partie à partir d'une comparaison avec deux cas analytiques portant sur des géométries académiques dans un contexte industriel [Delaroff et al. 1994] et d'une comparaison avec des résultats obtenus dans le cadre du projet POLIS [Alvarez et al. 1998] sur les effets d'une forêt en terme de réduction de vitesse et de facteur de rafraîchissement. Ces validations sont détaillées dans [Raymond 1999].

8.3.1 Comparaison à des résultats analytiques

L'objectif est ici de comparer les valeurs obtenues par calcul analytique et par simulation sur N3S dans le cas d'une chute de pression d'un écoulement à travers un faisceau de tubes. Deux

cas issus de la note de validation [Delaroff et al. 1994] sont étudiés : un cas avec l'option perte de charge seule (Figure 89) et un cas avec perte de charge et porosité.

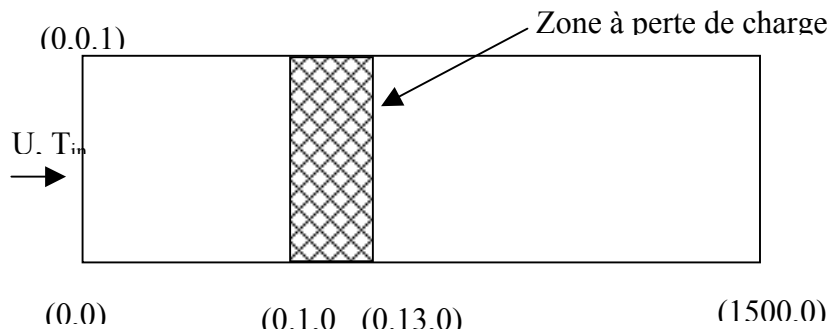


Figure 89 : Domaine de calcul

Dans le premier cas, le fluide est de l'eau, le coefficient de perte de charge est fixé à 100, la vitesse incidente est de 1 m/s. Le nombre de points du maillage est de 4000 ($N_x = 200 * N_y = 20$), le maillage est homogène ($\Delta x = \Delta y = 0.5$ mm) et le pas de temps est de 10^{-4} s. L'erreur relative entre les résultats obtenus pour la chute de pression entre la solution analytique et la simulation est de l'ordre de 3%, ce qui est satisfaisant.

Dans le deuxième cas, l'option porosité est ajoutée et le fluide est de l'air. Le coefficient de perte de charge vaut maintenant 1, le coefficient de porosité vaut 0.5, la vitesse incidente est de 1 m/s, le maillage ne change pas mais le pas de temps est de 10^{-2} s. L'erreur relative sur la chute de pression entre la solution analytique et calculée est alors de 1.1 %.

8.3.2 Perturbations engendrées par une forêt

Dans cette section nous étudions l'effet de rafraîchissement induit par une forêt et la possibilité d'utiliser les arbres comme stratégie pour modifier la température de l'air dans l'environnement urbain. Les variations du microclimat ont été analysées à l'intérieur et en aval de la forêt, de manière à quantifier la capacité de réduction de l'énergie pour le rafraîchissement. En effet, une forêt crée un oasis basé sur une température d'air inférieure et générée par l'ombrage et l'évapotranspiration. Avec cet objectif, une série de simulations a été réalisée à l'aide du code CFD FLUENT en utilisant le modèle de milieu poreux [Alvarez et al. 1998]. Dans ces simulations, la forêt est représentée par un milieu poreux qui introduit un terme puits dans les équation de la conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\mu}{\alpha} U + C_2 \left(\frac{1}{2} \rho U |U| \right) \quad (175)$$

Avec α la perméabilité suivant chaque direction (m^2) et C_2 le facteur de résistance inertiel (m^{-1}). Le premier terme de l'équation précédente est la loi de Darcy dans un milieu poreux et peut être considéré comme le moment puits en écoulement laminaire, où C_2 vaut zéro. En d'autres termes, la loi de Darcy est valide si nous pouvons faire l'hypothèse que l'écoulement est suffisamment lent ou que les pores sont suffisamment petits. Pour des écoulements rapides, la constante C_2 apporte une correction pour les pertes inertielles dans le milieu poreux et parfois le terme de perméabilité peut être éliminé. La constante C_2 a été fixée en accord avec la réduction de la vitesse du vent dans le port de l'arbre. Trois cas ont été étudiés en utilisant des données

expérimentales : forêt de chêne ($C_2 = 1$), verger d'oranger ($C_2 = 0.5$) et forêt d'épicéa ($C_2 = 0.07$)

Ainsi, pour analyser l'impact d'une forêt, il est possible de modéliser la zone végétale par une perte de charge tout en fixant une valeur de température imposée [Alvarez et al. 1998].

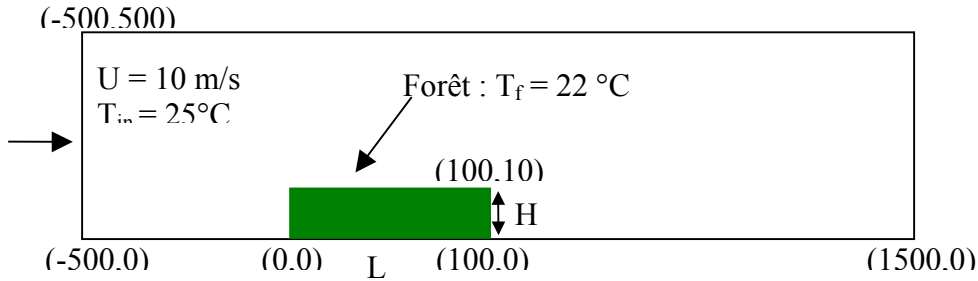


Figure 90 : Domaine de calcul de la forêt

Nous avons traité une zone végétale de 100 mètres de large sur 10 mètres de hauteur (Figure 90). La vitesse U et la température de l'air T_{in} en amont de la forêt sont respectivement égales à 10 m/s et 25 °C. Enfin, la température du feuillage T_f a été fixée à 22 °C. D'un point de vue numérique, le nombre de nœuds est égal à 8500 dont 1200 pour la zone végétale. La figure suivante présente les résultats obtenus à savoir le profil vertical de vitesse adimensionnée u/U en fonction de la hauteur adimensionnée y/H , H étant la hauteur de la zone végétale à une distance de 1 m en aval de la forêt (Figure 91). Nous notons que pour une valeur du coefficient de perte de charge $K = 0.5$, nos résultats sont très proches de ceux obtenues par l'équipe de l'Université de Séville [Alvarez et al. 1998], ce qui nous conforte dans notre démarche.

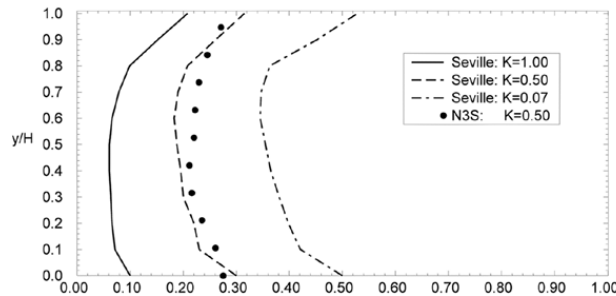


Figure 91 : Profil vertical de vitesse à 1 m en aval de la zone végétale

L'influence de la zone végétale sur la température peut s'obtenir en construisant un coefficient de rafraîchissement ou efficacité thermique (ε_{th}), dans lequel intervient la température de l'air en amont (T_{in}), la température des feuilles (T_f) et la température calculée en un point (T):

$$\varepsilon_{th} = \frac{T_{in} - T}{T_{in} - T_f} \quad (176)$$

L'évolution de ce coefficient en aval de la zone végétale est envisagée à une hauteur de 1.5 m au-dessus du sol. Les valeurs de référence et celles calculées par N3S (Figure 92) restent comparables dans la zone $x/L < 0.30$, mais divergent au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'obstacle : le coefficient de rafraîchissement de référence est deux fois plus élevé que celui

calculé dans cette étude à $x/L = 1$, c'est-à-dire à 100 m en aval de la haie. Il est délicat de se prononcer sur les causes de ces écarts dans le sens où nous ne maîtrisons pas toutes les hypothèses de calcul de la solution de référence. Quoi qu'il en soit, les allures des courbes présentées sont comparables.

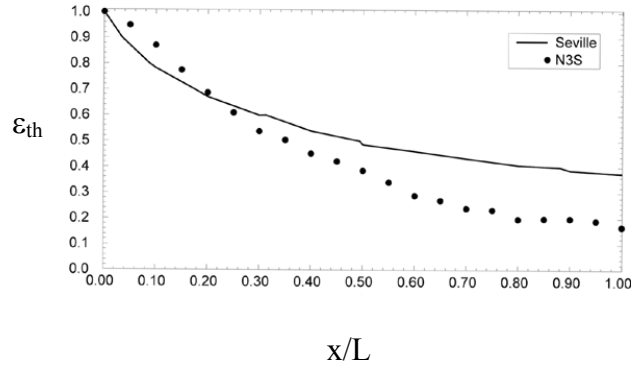


Figure 92 : Coefficient de rafraîchissement en aval de la haie à 1.5 m de hauteur

8.3.3 Conclusion

A partir de l'analyse bibliographique, réalisées dans le chapitre sur l'eau et la végétation en milieu urbain, nous avons vu qu'il était possible de caractériser l'impact d'une zone végétale sur les écoulements aérauliques à partir des coefficients de perte de charge et de la porosité de la zone végétale. Dans ce chapitre, nous avons montré que la modélisation de ces deux paramètres pouvait être appréhendée dans N3S avec suffisamment de précision. Cette précieuse information peut alors être exploitée pour les différentes simulations numériques que nous présentons en avant dans cette étude.

8.4 Validation de la partie thermique

Les températures de surface calculées par le logiciel Solene ont été comparées avec des mesures réalisées dans une rue d'Athènes par des chercheurs de l'Université d'Athènes (Chrissa Georgakis, Nick Klitsikas et Mat Santamouris). Les campagnes de mesure se sont déroulées du 20 au 23 août 1999 à Athènes (dans le voisinage de Aigaleo, à l'est du centre d'Athènes, (37.5°N, 23.4°E). Certaines informations sont manquantes telles que la géométrie de l'environnement, ce qui peut poser des problèmes dans la détermination des parties ensoleillées et à l'ombre, la valeur de la température d'air hors du canyon et à la station météorologique.

8.4.1 Conditions expérimentales

La longueur de la rue est d'environ 500 m, la hauteur des bâtiments de chaque côté de la rue est de 12 m (R+3), la largeur de la rue est de 12 m (soit deux fois 2 m pour les trottoirs et 8 m pour la chaussée). L'axe de la rue forme un angle de 100 degrés par rapport au nord (Figure 93). Le rapport d'aspect (H/W) de la rue est donc de 1 et la longueur importante de la rue par rapport aux autres dimensions permet de la qualifier de rue Canyon.

Différents capteurs sont disposés dans la rue (Figure 94) :

- des capteurs de température au niveau du deuxième et du troisième étage : acquisition toutes les 15 secondes
- des anémomètres 3D coté gauche et droit du canyon : acquisitions toutes les 5 et 10 secondes suivant le capteur
- un anémomètre est installé à 1.5 m au-dessus du toit du bâtiment : acquisition toutes les 6 secondes
- des capteurs de mesure de température de surface (de type « Babuc ») au premier, deuxième étage à hauteur d'homme (environ 1.7 m), sur les trottoirs et sur la rue : acquisition toutes les heures

De plus, toutes les heures de 9h15 à 19h15, les températures d'air sèche et de bulbe humide ainsi que le rayonnement global net et la vitesse de l'air sont mesurés de chaque côté du canyon (au premier et deuxième étage), dans la rue (au niveau des trottoirs et de la chaussée) et à hauteur d'homme, en respectant une distance d'un mètre à chaque paroi.

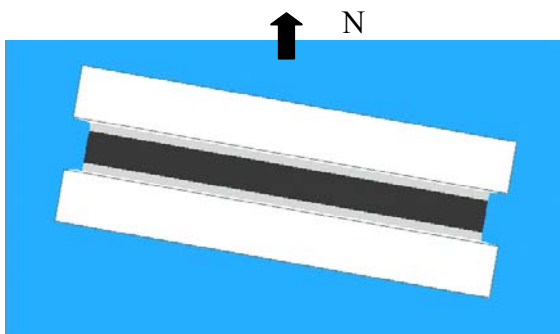


Figure 93 : Orientation du canyon

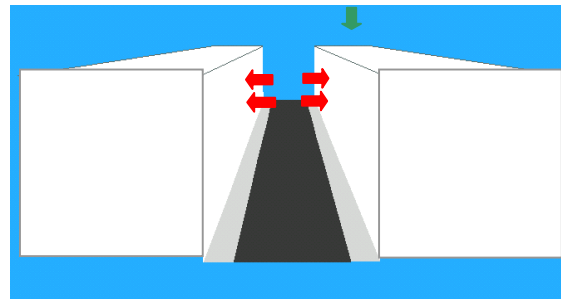


Figure 94 : Localisation des appareils de mesure dans le canyon

8.4.2 Paramètres de la modélisation

Le choix des coefficients thermo-physiques des matériaux est délicat dans ce type d'étude. Les seules informations dont nous disposons sont les suivantes : les façades des bâtiments sont composées à 80 % de briques avec un revêtement de plâtre blanc sans isolant et de 20 % de surfaces vitrées, les trottoirs sont recouverts de ciment et la route d'asphalte. A partir de ces sources il est nécessaire de fixer des hypothèses de travail et de chercher à calibrer les différents paramètres qui interviennent dans les simulations. Ainsi, les caractéristiques des coefficients physiques et les données utilisées dans les modélisations sont données ci-après :

- Valeurs moyennes pour les parois
 $\lambda = 0.85 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $\rho = 2100 \text{ kg.m}^{-3}$, $C_p = 1000 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, épaisseur = 0.3 m, $\alpha_{\text{sol}} = 0.6$, $\varepsilon = 0.95$
- Valeurs moyennes pour le sol
 Ciment clair : $\lambda = 0.75 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $\rho = 2100 \text{ kg.m}^{-3}$, $C_p = 870 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, épaisseur = 0.2 m, $\alpha_{\text{sol}} = 0.6$, $\varepsilon = 0.95$
 Asphalte clair : $\lambda = 0.75 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $\rho = 2100 \text{ kg.m}^{-3}$, $C_p = 870 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, épaisseur = 0.2 m, $\alpha_{\text{sol}} = 0.4$, $\varepsilon = 0.95$
 Terre : $\lambda = 0.5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $\rho = 1800 \text{ kg.m}^{-3}$, $C_p = 640 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, épaisseur = 0.8 m
- Le coefficient d'échange superficiel intérieur global est fixé à la valeur standard de $h_{\text{int}} = 9 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ et la température interne est considérée constante $T_{\text{int}} = 25 \text{ °C}$ (contrôle de la température par climatisation pendant la journée).

- De même, une température de référence à 1 mètre dans le sol est fixée à la valeur moyenne de la température de l'air sur la journée soit : $T_{ref}(1\text{ m}) = 25\text{ °C}$.

Les températures d'air en amont du canyon ne sont pas mesurées et la direction de vent bien qu'étant fluctuante (Figure 95) est en moyenne dans l'axe du canyon, c'est-à-dire 110° par rapport au nord. Nous pouvons également considérer une vitesse moyenne de vent d'environ 2 m/s.

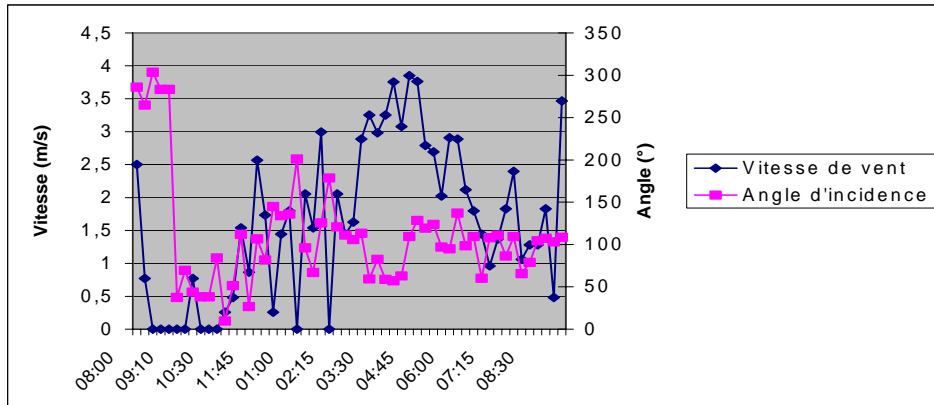


Figure 95 : Vitesse et angle d'incidence du vent au niveau du toit

Pour les simulations, un découplage thermo-aéraulique est utilisé en choisissant un coefficient d'échange superficiel convectif extérieur égal à $h = 14\text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ (formule de l'ASHRAE) et en supposant que la température de l'air est égale à la température moyenne de l'air mesurée dans la rue. Les flux radiatifs sont évalués par le logiciel SOLENE.

8.4.3 Comparaison des valeurs mesurées et simulées

Le jour retenu pour la comparaison est le 22 août 1999 et les différentes valeurs des températures et des flux radiatifs sont mesurées entre 9h15 et 19h15 avec un pas de temps d'une heure. Dans le graphique suivant (Figure 96), sont tracées les courbes relatives aux rayonnements solaires nets mesurés et simulés par Solene en condition de ciel dégagé.

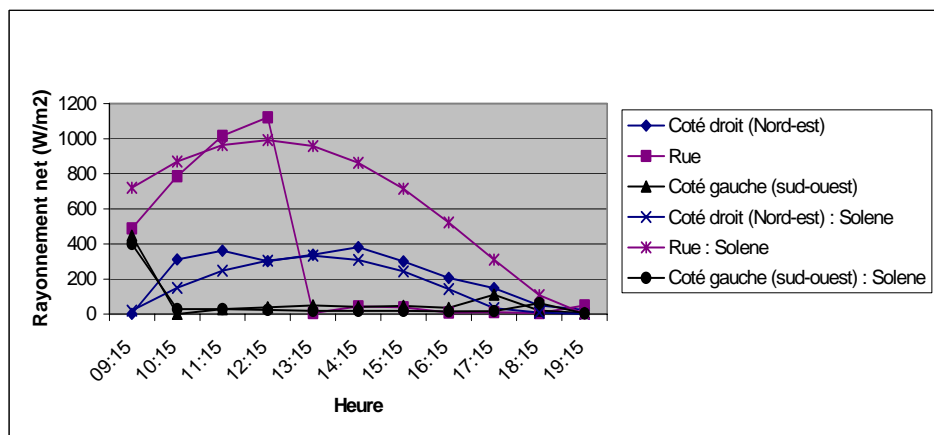


Figure 96 : Rayonnements solaires nets simulés et mesurés

Nous pouvons constater que les rayonnements solaires sont assez bien évalués par Solene. L'écart au niveau de la rue est certainement dû à un masquage de l'appareil de mesure dans

l'après-midi par une ombre portée. Une modification des apports solaires est alors prise en compte au niveau de la rue pour le calcul des températures de surface.

Le calcul des températures de surface est initialisé à partir des valeurs mesurées à 10h15 pour chacun des niveaux de la rue et est effectué jusqu'à 19h15 avec un pas de temps d'une heure. Les valeurs simulées et mesurées sont placées sur le même graphique de manière à faciliter la comparaison. On utilise les abréviations suivantes : T pour température de surface, d pour le coté droit de la rue (orienté vers le nord-ouest), g pour le coté gauche de la rue (orienté sud-est), trot pour les trottoirs, rue pour la partie centrale de la rue, les nombres 1 et 2 correspondent au premier et deuxième étage, et hh signifie hauteur d'homme (Figure 97). Les valeurs simulées sont suivies de la notation suivante : _Solene.

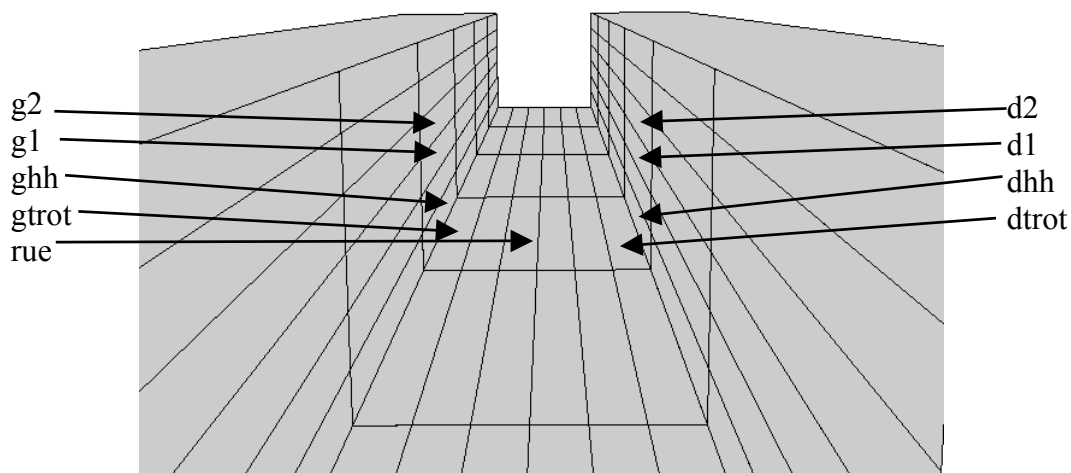


Figure 97 : Points de mesure et de simulation dans le canyon

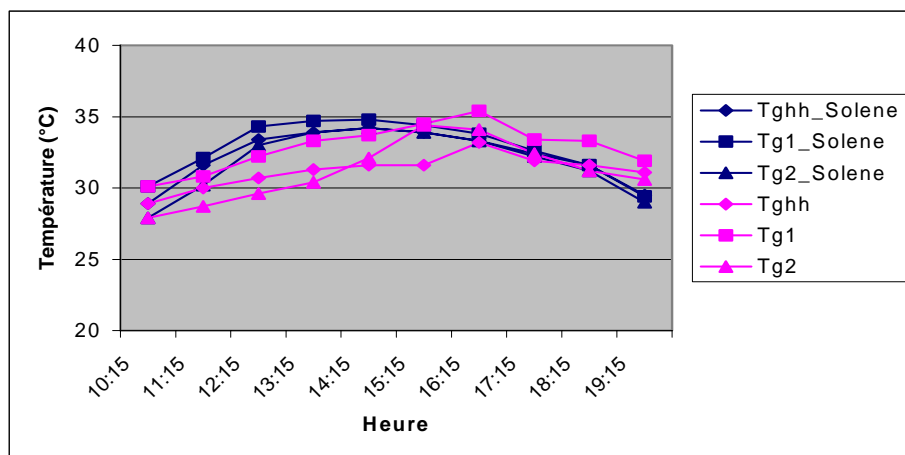


Figure 98 : Comparaison entre les températures de surface simulées et mesurées coté gauche du canyon

Le graphique précédent, représentant les résultats obtenus pour le coté gauche du canyon (Figure 98), indique que les courbes relatives aux valeurs modélisées sont supérieures à celles mesurées pendant la matinée et jusqu'à 15h15. En fin d'après midi les résultats sont soit

équivalents pour les courbes à hauteur d'homme et au deuxième étage soit légèrement inférieures pour le premier étage.

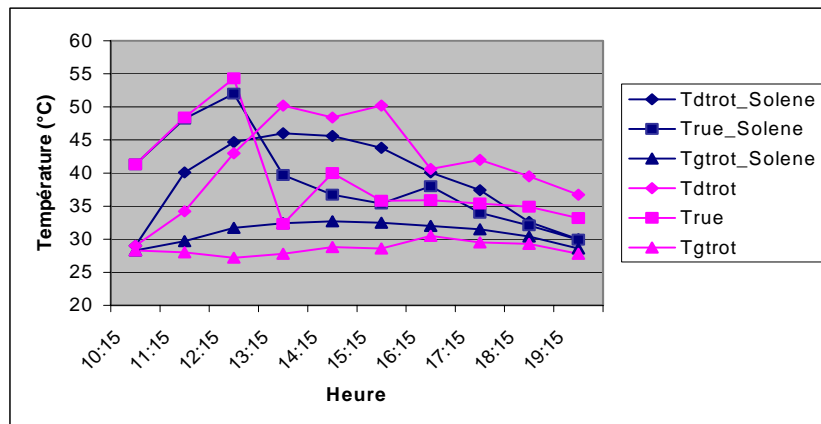


Figure 99 : Comparaison entre les températures de surface simulées et mesurées au niveau de la rue

Les tendances de comportement des différentes courbes sont assez bien respectées dans tous les cas. Les valeurs simulées pour le trottoir de droite et pour l'axe de la rue (Figure 99) oscillent autour des valeurs mesurées, celles du trottoir de gauche restant légèrement supérieures.

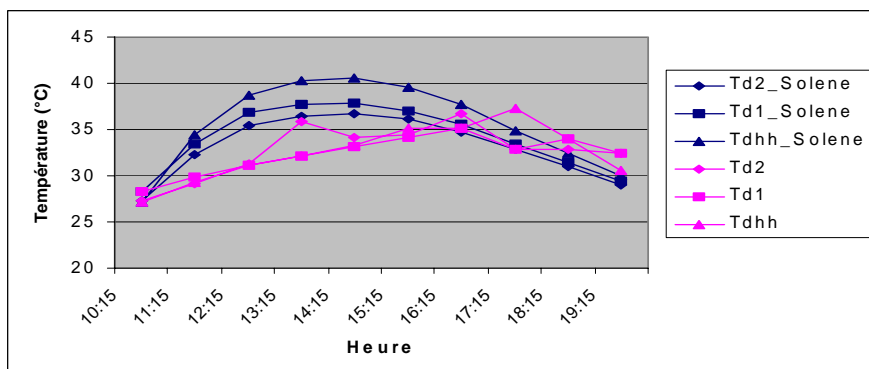


Figure 100 : Comparaison entre les températures de surface simulées et mesurées coté droit du canyon

Les différences les plus importantes ont été obtenues pour le côté droit de la rue (Figure 100) qui est ensoleillé durant la période d'étude. Les températures mesurées montrent que l'échauffement dû au soleil n'est pas aussi important que celui modélisé. Différentes causes peuvent être à l'origine de cette variation : soit les hypothèses de modélisation sont inexactes (mauvaise calibration des coefficients thermiques, d'où impact sur l'inertie du matériau ou mauvaise approximation des échanges convectifs), soit une mauvaise disposition des capteurs peut nuire aux résultats en relevant des zones partiellement ou complètement protégées du soleil.

Dans le tableau suivant, les écarts maximaux, minimaux et moyens entre les valeurs mesurées et simulées sont répertoriés pour l'ensemble des points d'étude (Tableau 27). Les valeurs extrêmes peuvent apparaître importantes mais les conditions de comparaison sont à considérer avec précautions, les informations manquantes lors des séries de mesures induisant des hypothèses de simulation pas toujours vérifiables. Les valeurs moyennes sont généralement encourageantes, les valeurs mesurées étant en moyenne globale inférieures de 0.7 °C à celles simulées.

Delta	d2	d1	dhh	dtrot	rue	gtrot	ghh	g1	g2
Max	3,4	3	2,4	6,9	3,3	0	1,6	2,5	1,6
Min	-4,1	-5,7	-8,1	-5,9	-7,4	-4,6	-2,7	-2,1	-3,5
Moy	-0,5	-1,8	-3,1	2,4	0,4	-2,4	-1,1	0,1	-0,7

Tableau 27 : Ecart entre les valeurs mesurées et simulées

8.4.4 Conclusion

Il ne s'agissait pas de pratiquer dans cette partie une validation très fine du module thermique développé dans Solène car comme nous l'avons déjà signalé la géométrie de l'environnement du site n'est pas connue, de nombreuses hypothèses ont dû être retenues pour pratiquer les simulations et de plus le découplage avec la partie aéraulique entraîne des erreurs au niveau des échanges convectifs non négligeables. Il est à signaler néanmoins que les comportements généraux des courbes sont relativement bien respectés et les écarts entre les mesures et les simulations restent cohérents voire très bons pour certains points (Figure 101).

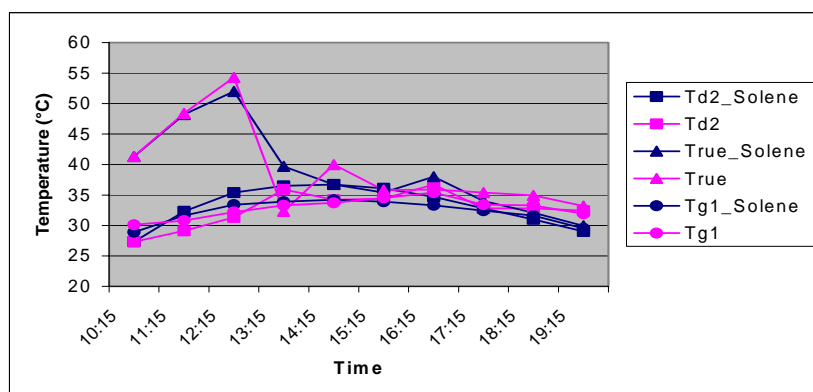


Figure 101 : Comparaison entre valeurs simulées et mesurées pour certains points de mesure

8.5 Conclusion

Dans cette partie, nous avons été amenés à comparer nos résultats soit à des travaux basés sur la simulation, mais réalisés à l'aide d'autres codes de calcul, soit à des mesures sur site. La difficulté du travail de validation est largement apparue dans les paragraphes précédents, la confiance étant accordée aux travaux de références et aux mesures même si un esprit critique doit toujours être conservé. Des éléments importants correspondant à des étapes essentielles ont été partiellement validés. La composante aéraulique des simulations semble être bien approchée, aussi bien dans la caractérisation des écoulements que dans la modélisation des pertes de charge et de la porosité. La composante thermique semble elle aussi être convenablement traitée comme nous l'avons souligné dans les comparaisons entre les mesures et les simulations du rayonnement solaire et des températures de surface. Ce travail de validation est certes incomplet, néanmoins les différents éléments mis en avant permettent d'aborder avec confiance la modélisation du microclimat urbain avec ses composantes diverses et complexes.

8.6 Références

- [Alvarez *et al.* 1998] ALVAREZ S. SANCHEZ, F. and CORONEL J. F. (1998). Techniques to improve microclimate around buildings. POLIS Final Report, Seville.
- [Baik *et al.* 1999] BAIK Jong-Jin and KIM Jae-Jin (1999). A numerical study of flow and pollutant dispersion characteristics in urban street canyon. *Journal of Applied Meteorology*, Vol 38, N°9, September 1999, pp.1249-1261.
- [Delaroff *et al.* 1994] DELAROFF S. et RAZAFINDRAKOTO E. (1994) Projet N3S de Mécanique des Fluides : Description du module de porosité, pertes de charges. Paris : Département Laboratoire National d'Hydraulique, Groupe Etudes et Recherches en Thermodynamique, EDF. Note HE-41/94/0.23.
- [Gadilhe *et al.* 1992] GADILHE, A. ; JANVIER L. and BARNAUD G. (1992). Numerical and experimental modelling of the three dimensional turbulent wind flow through an urban square. In : *First International Symposium on Computational Wind Engineering92*. Tokyo : Japan Association for Wind Engineering, pp. 231-236.
- [Kim *et al.* 1999] KIM Jae-Jin and BAIK Jong-Jin (1999). A numerical study of thermal effect on flow and pollutant dispersion in urban street canyon. *Journal of Applied Meteorology*, Vol 38, N°9, pp. 1249-1261.
- [Oke 1988] OKE T.R. (1988). Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Building*, 11, pp. 103-113.
- [Raymond 1999] RAYMOND F. (1999). Modélisation des effets de la végétation par porosité et pertes de charge dans N3S. Nantes : CERMA, 23 p.
- [Raymond *et al.* 1999] RAYMOND F., BRANCO G. and LACHAL B. (1999). Numerical simulation of the wind flow on a low energy building. *Wind Engineering into the 21st Century*, Larsen, Larose & Livesey, Balkema, Rotterdam, pp. 1329-1335.
- [Sini *et al.* 1996] SINI J.F., ANQUETIN S. and MESTAYER P.G. (1996). "Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons. *Atmospheric Environment* vol 30, n 15, pp 2659-2677.
- [Vinet *et al.* 2000b] VINET J., RAYMOND F. and INARD C. (2000b). Simulated impact of trees on heat and wind flows in an urban open space. In : *Proceedings of Third Symposium on the Urban Environment*, Davis, California, 14-18 August 2000, American Meteorological Society, pp. 137-138.

9 Application à un ensemble urbain : le quartier Antigone

9.1 Introduction

Les projets d'aménagement urbain peuvent modifier considérablement l'image d'un quartier ou d'une ville. Les changements associés à un nouvel agencement spatial de bâtiments ou au remplacement d'un espace vert par un immeuble relèvent du choix d'un certain nombre d'acteur du projet urbain (architecte, urbaniste, paysagiste, politique, maître d'ouvrage, bureau d'étude, ...) et sont soumis à de nombreuses contraintes (politique, économique, écologique, ...) n'ayant pas forcément le même poids en fonction du projet envisagé. Dans ce contexte, la composante microclimatique peut fédérer plusieurs de ces acteurs en préconisant un intérêt pour les économies d'énergie, pour l'ajustement des conditions de confort de l'espace et pour l'amélioration du cadre de vie. Ces trois composantes ont largement été mises en avant lorsque nous avons abordé les relations entretenues entre la végétation et la ville. Dans l'étude de cas présentée dans ce chapitre, la préoccupation liée à l'impact de la végétation sur le microclimat urbain et les conditions de confort ne correspond pas directement à un objectif avoué dans la formulation du projet initial. Néanmoins, comme nous allons essayer de le démontrer, l'évolution à travers le temps de la présence végétale dans ce site amène à considérer cet angle d'analyse et permet d'illustrer nettement les avantages associés à la végétation en milieu urbain.

9.2 Analyse du site

9.2.1 Présentation du projet urbain

Le terrain d'étude que nous avons retenu est le quartier Antigone, à Montpellier (Figure 102), prolongement vers l'est du centre ville, conçu par Ricardo Bofill à la fin des années 1970 [Bofill 1985, SERM 1989]. Antigone correspond à la volonté de la ville et de l'architecte de créer un quartier méditerranéen à « l'antipode des modes architecturaux, à l'antipode de la logique de zoning, où les lieux sont faits pour habiter et d'autres pour travailler ... Antigone s'impose aujourd'hui comme une référence de l'urbanisme contemporain » [SERM 2000].



Figure 102 : Le quartier Antigone à Montpellier (photo SERM)

Dans ce quartier, nous nous attardons tout particulièrement sur la « Place du Millénaire », qui est le deuxième espace construit sur l'axe piéton d'Antigone (Figure 103) après la « Place du Nombre d'Or ». Ce choix de terrain d'étude est dû au fait que cet espace minéral est caractérisée par la présence d'une végétation amenée à occuper une place de plus en plus importante au cours des années. De plus, les commerces situés au niveau des rez-de-chaussées sous les arcades et la voie de communication vers le centre ville imposent aux piétons un passage voire des arrêts dans ce lieu d'où une nécessité d'un espace extérieur de qualité. Dans ce contexte méditerranéen, les alignements de cyprès et de pins parasols, insérés dans cet environnement composé de façades et de mobilier urbain en béton architectonique de couleur claire sont des éléments naturels et vivants de cet espace et ont un impact évident sur celui-ci. Ainsi, il nous a semblé intéressant d'analyser les modifications induites par cette végétation au cours du temps, aussi bien en terme de structuration et perception de l'espace, qu'en terme de microclimat et situations de confort.



Figure 103 : La « Place du Millénaire »

9.2.2 Evolution de la végétation

Dans l'analyse des conséquences liées à l'évolution temporelle de la végétation, le premier élément concerne l'impact spatial de ce type de végétation. En effet, la différence principale au niveau de la perception de ce lieu est le passage d'alignements d'arbres au développement d'une voûte végétale de pins parasols qui le couvre presque totalement. Le contraste entre cette végétation, actuellement de dimension moyenne inférieure à 8 mètres et une estimation dans laquelle cette voûte végétale culminerait à une vingtaine de mètres est saisissant (Figure 106 [Stefulesco 1993]) et mérite d'être souligné.

Le deuxième point qui subit une modification importante est le microclimat. En effet, les écoulements aérauliques vont être modifiés. Les zones à l'ombre vont devenir plus nombreuses, les apports solaires vont par conséquent être considérablement amoindris par ce filtre végétal. Les températures de surface vont également baisser induisant une atténuation des températures d'air.

Enfin, le dernier point qui nous intéresse concerne les conditions de confort en espace extérieur qui résultent des changements microclimatiques mentionnés précédemment.

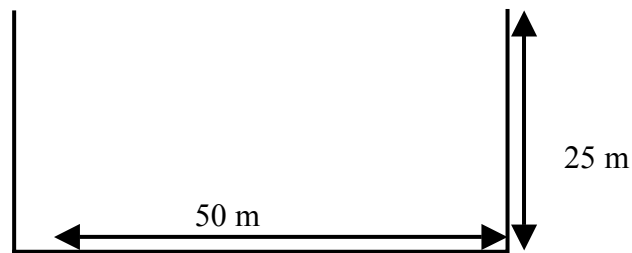


Figure 104 : Coupe de la place dans la situation vide

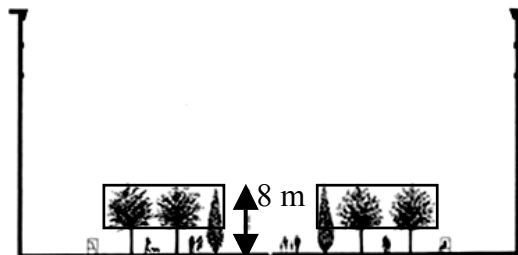


Figure 105 : Coupe de la place dans la situation actuelle [Stefulesco 1993]

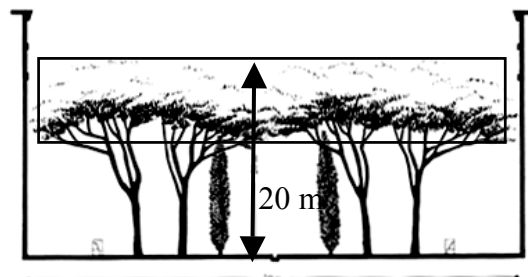


Figure 106 : Coupe de la place dans la situation future [Stefulesco 1993]

Dans le cadre d'études paramétriques, il est intéressant de se reporter à une situation de référence. Ainsi, nous avons envisagé le cas où cet espace est sans aucune végétation (période préliminaire à l'achèvement du projet ou cas hypothétique où les arbres seraient enlevés, Figure 104) de manière à pouvoir bien saisir les conséquences dues à la végétation sur la situation actuelle (Figure 105) et sur une situation future (Figure 106). Dans les trois illustrations présentées ci-dessus, que nous qualifions dans la suite du texte par les dénominations de « vide, actuelle et future », nous avons mentionné les dimensions principales de la place vue en coupe, la longueur de la rue étant d'environ 150 mètres et nous avons indiqué à l'aide de rectangles les zones relatives aux couronnes végétales prises en considération pour les simulations ultérieures.

9.3 Analyse des données météorologiques

Les données météorologiques concernant la région de Montpellier proviennent de la station de Météo France Mauguio basée à l'aéroport Montpellier-Frejorgues. Les informations géographiques utiles aux simulations sont la latitude qui est de 43°34' nord et la longitude qui est de 3°57' est. L'altitude étant de 3 mètres par rapport au niveau de la mer, nous n'avons pas à en tenir compte pour d'éventuels ajustements de paramètres climatiques.

Les conditions météorologiques du site considéré sont soumises au climat méditerranéen. Les situations qui nous intéressent correspondent aux journées chaudes (Figure 107) où le seuil de confort thermique risque d'être dépassé. Ainsi, pour cette étude de cas, nous avons retenu une journée chaude et ensoleillée de l'été 1998, le dimanche 5 juillet 1998.



Figure 107 : La « Place du Millénaire » en été

9.3.1 Température de l'air

Dans le graphique suivant nous avons tracé l'évolution de la température de l'air mesurée sous abri au niveau de la station météorologique (Figure 108) .

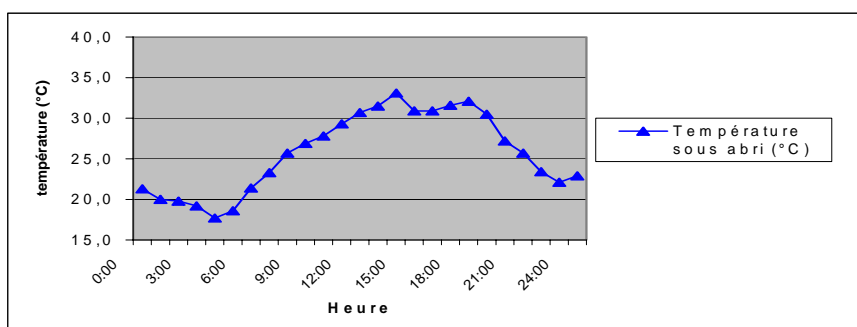


Figure 108 : Température de l'air sous abri à la station météorologique

La température maximale est de 33.1 °C à 15h00 et la température minimale est de 17.7 °C à 4h00, pour une température moyenne sur l'ensemble de la journée de 25 °C. Cette dernière valeur nous intéresse dans la mesure où elle correspond à la température de référence que nous imposons à une profondeur d'un mètre dans le sol.

A titre indicatif, nous indiquons les valeurs horaires moyennes relevées entre 7h00 et 18h00 pour le mois de juillet (Figure 109).

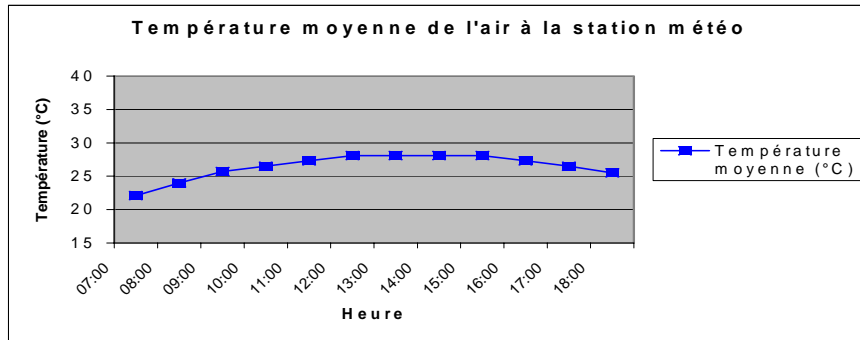


Figure 109 : Températures moyennes sur le mois de juillet

La maximale des valeurs moyennes étant de 28,1 °C, nous pouvons affirmer que le jour que nous avons retenu pour les simulations correspond bien à un épisode chaud.

9.3.2 Condition d'ensoleillement

La date retenue est caractérisée par une condition de ciel clair et un très fort niveau d'ensoleillement, comme peut l'attester l'évolution du rayonnement global au niveau de la station météorologique (Figure 110),

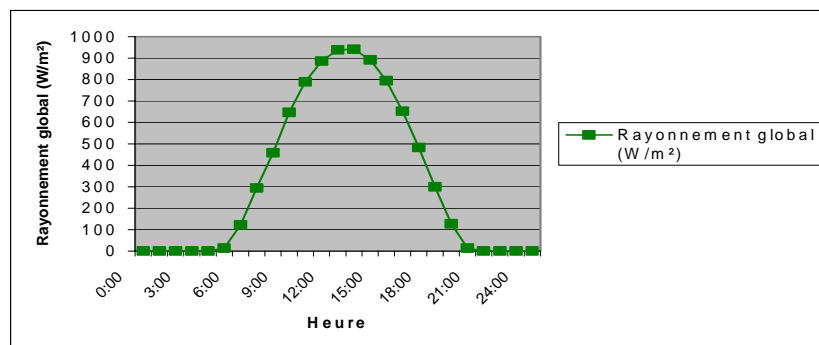


Figure 110 : Rayonnement global à la station météorologique

A partir des données astronomiques, de la localisation du site et de la journée considérée nous obtenons que l'heure théorique du lever du soleil est de 4h12 et l'heure du coucher est de 19h48 grâce au logiciel SOLENE.

Le niveau d'ensoleillement est important sur l'ensemble de la journée avec des valeurs supérieures à 900 W/m² à 12h00 et à 13h00. Par comparaison les moyennes horaires au mois de juillet indiquent des valeurs d'environ 800 W/m² pour les mêmes heures

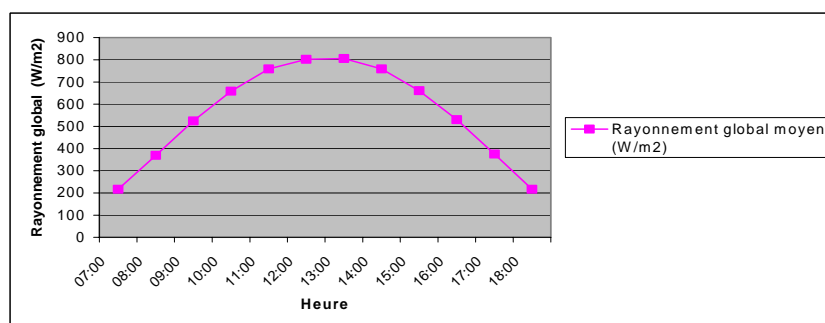


Figure 111 : Rayonnement global moyen pour le mois de juillet

9.3.3 Régime de vent

La rose des vents relative aux données météorologiques de Montpellier (Figure 112) indique que les vents dominants proviennent soit de la direction nord-ouest (300°), la Tramontane induisant des vitesses de vent supérieures à 1 m/s dans 27 % des situations, soit du nord-nord-est (20°), le Mistral générant des vitesses de vent supérieures à 1 m/s dans 26,2 % des situations [Hernandez 1987].

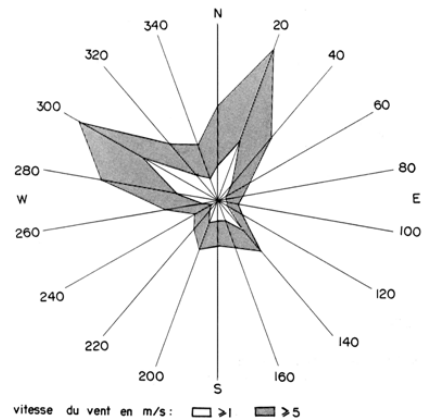


Figure 112 : Rose des vents pour la région de Montpellier [Hernandez 1987]

Pour la journée qui nous intéresse (Figure 113), nous retrouvons bien ces deux directions principales (300-320° et 0-20°). Nous devons donc envisager ces deux orientations principales dans les simulations que nous souhaitons réaliser.

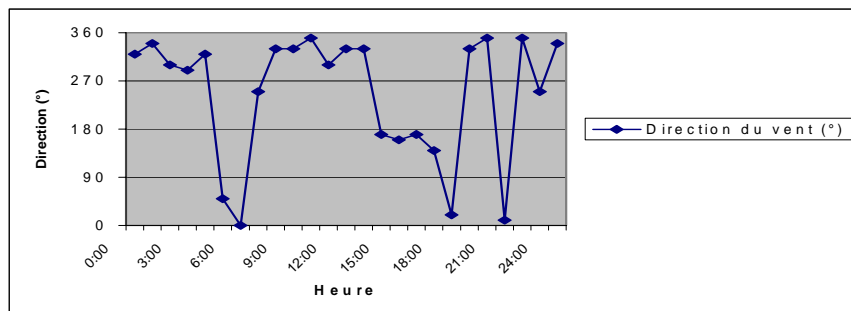


Figure 113 : Direction du vent à la station météorologique

La vitesse du vent est par nature fluctuante. Les valeurs mesurées à une hauteur de 10 mètres par rapport au sol à la station météorologique oscillent entre 0 et 5 m/s (Figure 114), une valeur moyenne sur l'ensemble de la journée peut être évaluée à 2.5 m/s. Pendant l'après-midi, nous pouvons constater que la valeur élevée de 5 m/s est atteinte à plusieurs reprises.

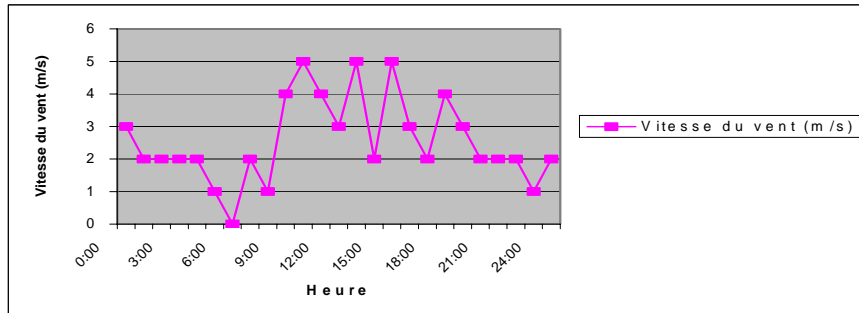


Figure 114 : Vitesse du vent à la station météorologique

9.3.4 Humidité de l'air

La courbe de l'évolution de la tension de vapeur d'eau mesurée à la station météorologique varie faiblement autour d'une valeur moyenne de 137 Hpa (Figure 115).

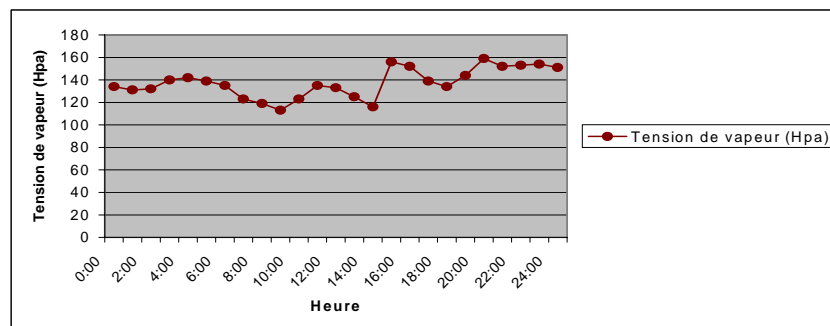


Figure 115 : Tension de vapeur d'eau à la station météorologique

Cette donnée est intégrée directement dans les modèles de confort, les variations de tension de vapeur d'eau entre la station étant généralement faibles entre la station météorologique et le site urbain.

9.4 Simulations thermo-aérauliques

Les paramètres relatifs aux données géographiques, temporelles et météorologiques étant présentés, il nous est désormais possible de passer à la simulation des transferts de chaleur en milieu urbain, en reprenant les étapes décrites dans le chapitre sur le couplage thermo-aéraulique. Ainsi, nous présentons les différentes modélisations géométriques retenues pour les traitements dans SOLENE et dans N3S. Nous retraçons les étapes préliminaires aux calculs des températures de surface. Puis nous abordons le traitement des écoulements aérauliques en deux et en trois dimensions. Dans les différentes simulations, les hypothèses relatives au comportement des arbres face aux échanges radiatifs et au vent sont utilisées et correspondent aux traitements précédemment décrits. Enfin grâce au couplage thermo-aéraulique, les interactions entre les différents phénomènes physiques de transferts de chaleur et de masse sont prises en considération.

9.4.1 Modélisation géométrique

9.4.1.1 Modélisation géométrique dans l'environnement SOLENE

Une modélisation numérique de la géométrie du site en 3D est réalisée (Figure 116) à l'aide du logiciel Arc+ et est importée avec une vérification des normales pour chaque face dans SOLENE. La maquette géométrique est positionnée de manière à ce que l'axe de la place du Millénaire soit orienté nord-ouest sud-est. Elle est discrétisée au niveau de la place du Millénaire pour les trois situations évoquées précédemment. Un maillage quadrangulaire lâche est proposé pour les trois types de géométries (Figure 117 à Figure 119) pour des raisons d'économie de temps de calcul et de simplicité des enveloppes des volumes rencontrés. Les volumes végétaux sont approchés par l'enveloppe externe de la masse foliaire.

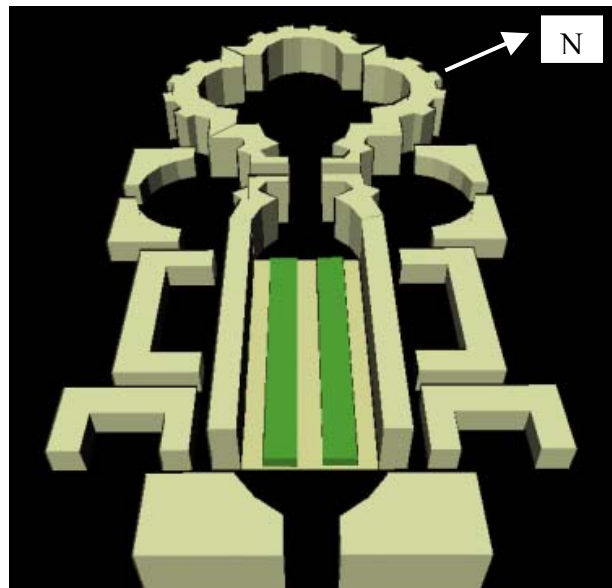


Figure 116 : Modélisation du quartier Antigone dans SOLENE

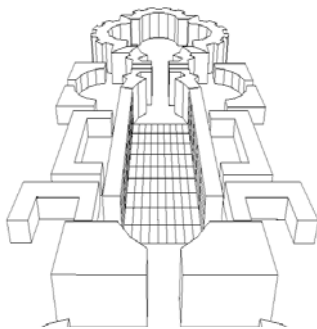


Figure 117 : Situation vide

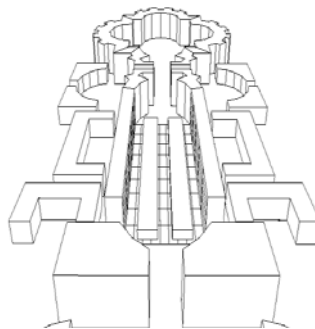


Figure 118 : Situation actuelle

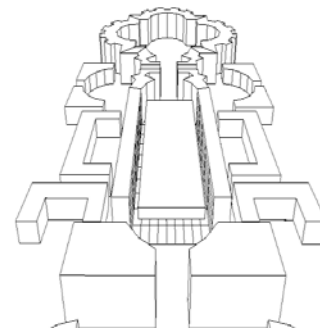


Figure 119 : Situation future

9.4.1.2 Modélisation géométrique dans l'environnement N3S

Le maillage réalisé pour le logiciel N3S est obtenu à partir du mailleur SIMAIL. Deux situations de vent sont à considérer (Figure 120). Il est donc nécessaire de positionner convenablement la scène par rapport à la veine aéraulique. Le vent entre par le coté gauche de la

veine et en ressort par le coté droit. Un raffinement du maillage est appliqué au niveau de la scène, notamment à la jonction des parois et du sol (Figure 121).

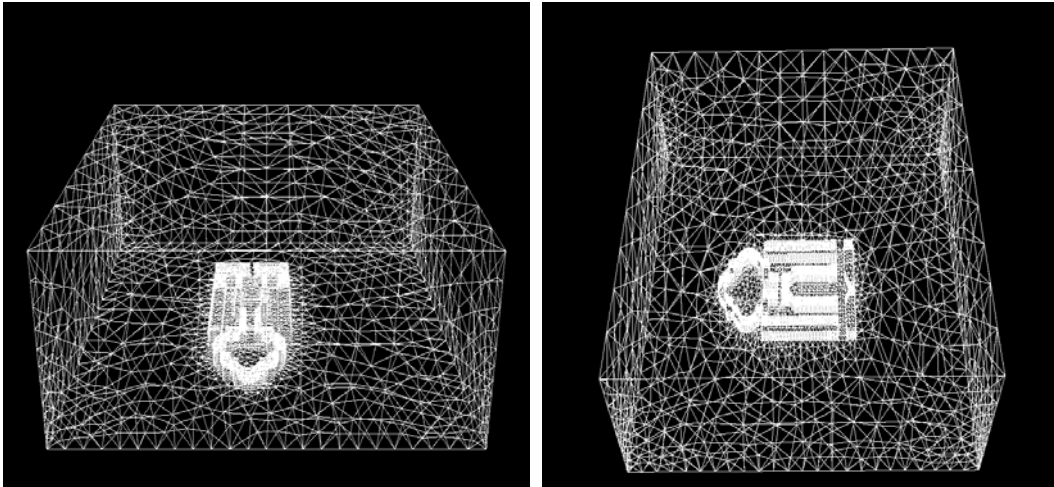


Figure 120 : Modélisation 3D du site dans sa veine aéraulique dans N3S (vent de nord-nord-est à gauche et nord-ouest à droite)

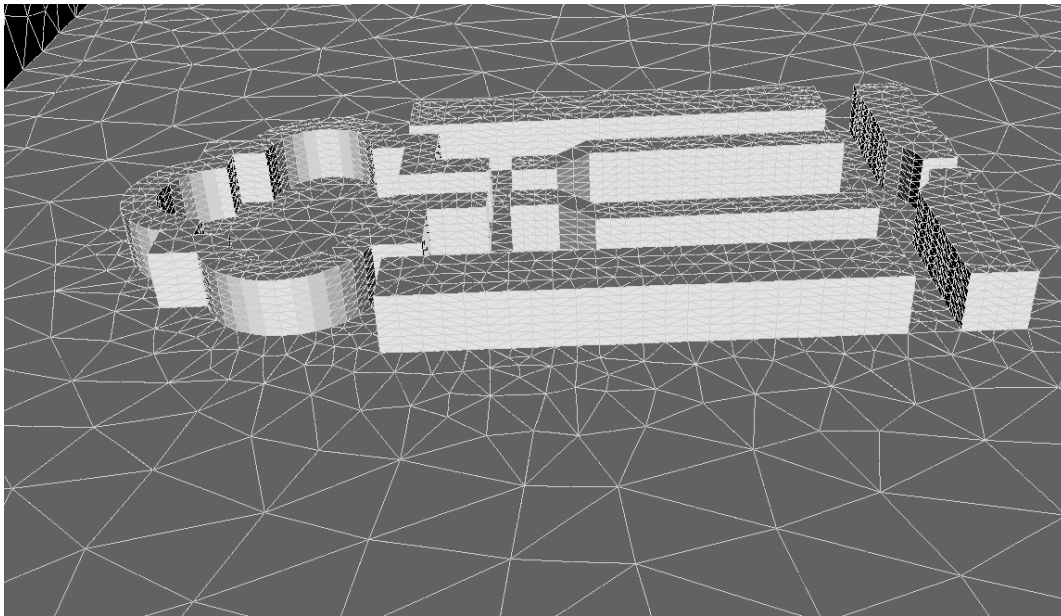


Figure 121 : Détail du maillage d'Antigone dans N3S

9.4.2 Calculs préliminaires

Certaines étapes doivent être réalisées avec le logiciel SOLENE avant de pouvoir passer au couplage thermo-aéraulique. Nous devons dans un premier temps effectuer les tracés d'ensoleillement pour toutes les heures de manière à pouvoir déterminer les zones à l'ombre et au soleil (Figure 122).

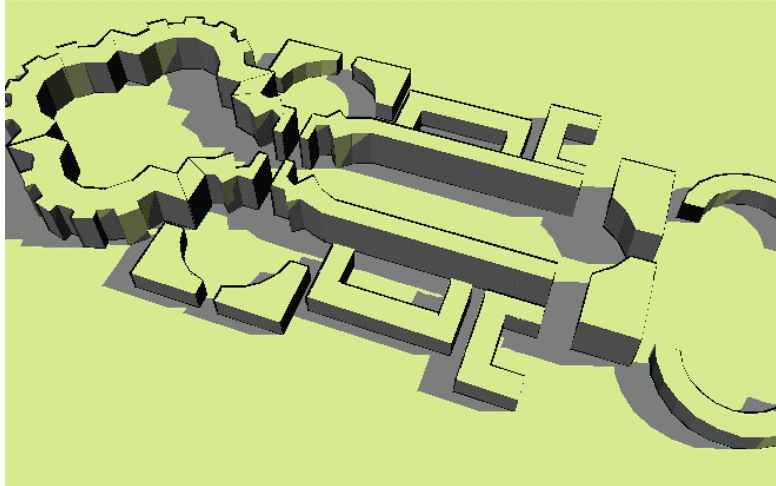


Figure 122 : Ensoleillement du quartier Antigonish à 8h

Le calcul des flux solaires directs et diffus, par condition de ciel clair, est alors possible pour la période considérée au niveau d'un plan horizontal dégagé (Figure 123).

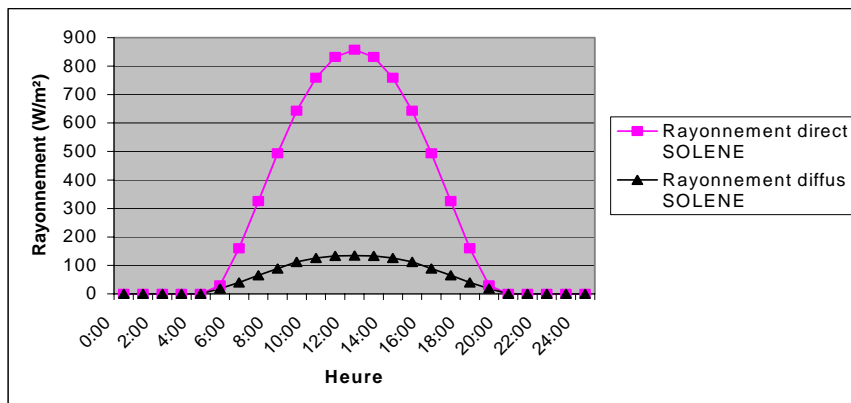


Figure 123 : Rayonnements direct et diffus calculés dans SOLENE

Une comparaison entre les valeurs de rayonnements globaux obtenus par simulation et au niveau de la station météorologique est présentée ci-dessous (Figure 124) :

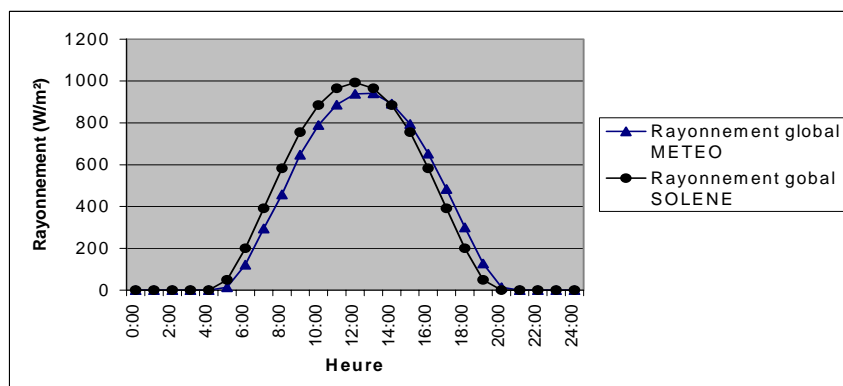


Figure 124 : Comparaison entre les rayonnements globaux mesurés et simulés

Nous pouvons constater une bonne correspondance au niveau de l'allure des courbes avec une légère surestimation des simulations par rapport aux mesures. L'écart relatif maximal est égal à

10 %. Le déphasage entre les courbes est dû au fait que les mesures à la station météorologiques sont effectuées en temps universel (TU) et que les calculs dans SOLENE sont en temps solaire vrai (TSV).

Les flux solaires transmis à travers la végétation prennent en compte le fait que la masse foliaire des arbres présents dans la scène ne laissent passer que 10 % de l'énergie incidente.

Enfin, il ne faut pas oublier le calcul des facteurs de forme. La géométrie simplifiée de la scène permet de réaliser cette opération de manière très rapide.

Avant de modéliser les écoulements aérauliques, un recalage du vent dans Antigone est nécessaire de manière à établir une relation entre la vitesse du vent sur le site et celle mesurée à la station météorologique. En considérant que le profil de vent suit une loi en puissance il est possible d'exprimer la vitesse à une hauteur z dans le site en fonction des épaisseurs de couche limite (270 m à la station météorologique et 330 m dans le site) et des exposants du gradient vertical (0.14 à la station météorologique et 0.25 dans le site) Ainsi, nous pouvons écrire [Hernandez 1987] :

A la station météorologique :

$$\frac{\bar{U}_{10\text{météo}}}{\bar{U}_{ref}} = \left(\frac{10}{270} \right)^{0.14} \quad (177)$$

Dans Antigone :

$$\frac{\bar{U}_z}{\bar{U}_{ref}} = \left(\frac{z}{330} \right)^{0.25} \quad (178)$$

Soit, une vitesse dans Antigone :

$$\bar{U}_z = 1.586 \times U_{10\text{météo}} \times \left(\frac{z}{330} \right)^{0.25} \quad (179)$$

9.4.3 Ecoulements aérauliques en 2D

Les écoulements aérauliques peuvent être précisément étudiés grâce au logiciel N3S. La situation considérée ici correspond à un régime de vent de nord-nord-est (Mistral). Ce type de vent est dominant pour le site étudié et aborde la place du Millénaire perpendiculairement à la direction de son axe. Les dimensions de cet espace permettent, dans une première approche de réaliser la simulation aéraulique en deux dimensions en considérant que le vent arrive au-dessus des toits du bâtiment amont, circule dans la place et ressort au niveau des toits du bâtiment aval, si on se place en coupe. Pour être plus exact, il faut signaler que les écoulements obtenus ne devraient pas être trop éloignés d'une situation réelle au centre de la place, mais ne peuvent en aucun cas être proposés pour l'analyse d'une zone en début ou en fin de rue, les effets de bords entraînant de sérieuses modifications des écoulements.

Cette approche simplifiée est fréquemment utilisée dans les études sur la rue canyon comme cela a été déjà signalé. L'intérêt est de pouvoir réaliser des simulations avec un nombre de point

du maillage important mais raisonnable. Dans notre cas, les 14000 nœuds relatifs au cas de référence et les 18000 nœuds relatifs aux cas avec végétation sont nécessaires à une bonne discrétisation des zones de cisaillement de recirculation dans le domaine d'étude mais offrent l'opportunité de réaliser des calculs avec des temps de calcul de quelques heures. Les pas de temps utilisés sont fixés à 10^{-2} secondes, de manière à garantir un nombre de courant convenable. Le coefficient de perte de charge des blocs végétaux, C_d , est imposé à la valeur de 0.20.

Les conditions aux limites imposées sur la face d'entrée correspondent au profil de vitesse précédemment décrit. Le modèle turbulence utilisé est le modèle k- ϵ standard. Afin d'obtenir un niveau de turbulence caractéristique d'une couche limite atmosphérique établie, l'énergie cinétique turbulente est imposée en entrée à 0.3 % de la vitesse de référence à savoir celle mesurée à 10 mètres à la station météorologique et le taux de dissipation de cette énergie cinétique turbulente est donné par une relation relevée dans la littérature [Sini et al. 1996] :

$$k_{\text{entrée}} = 0.003 \overline{U}_{10\text{météo}}^2 \quad (180)$$

$$\epsilon_{\text{entrée}} = \frac{C_{\mu}^{3/4} k_{\text{entrée}}^{3/2}}{\kappa z} \quad (181)$$

Au niveau de la sortie, nous imposons sur toutes les variables une condition de Neumann homogène (gradient des variables nul), de manière à laisser l'écoulement s'établir sans forçage numérique et au niveau du plafond du domaine de calcul nous appliquons une condition de symétrie.

Certains des résultats présentés ici ont été réalisés en collaboration avec Franck Raymond et sont détaillés dans un rapport interne [Raymond 1999] et dans un article [Vinet et al. 2000b]. Dans les trois simulations suivantes (Figure 125 à Figure 127), respectivement relatives aux situations vide, actuelle et future, la vitesse de vent à l'entrée de la veine aéraulique correspond au profil indiqué précédemment dans lequel la vitesse mesurée à la station météo à une hauteur de 10 mètres est de 5 m/s.

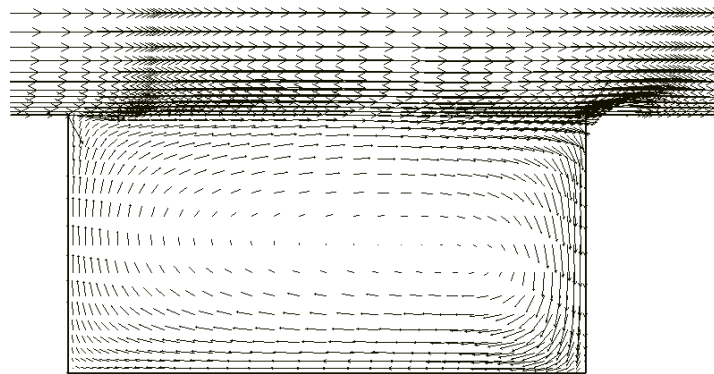


Figure 125 : Ecoulement aéraulique en 2D dans la "Place du Millénaire" (cas sans végétation)

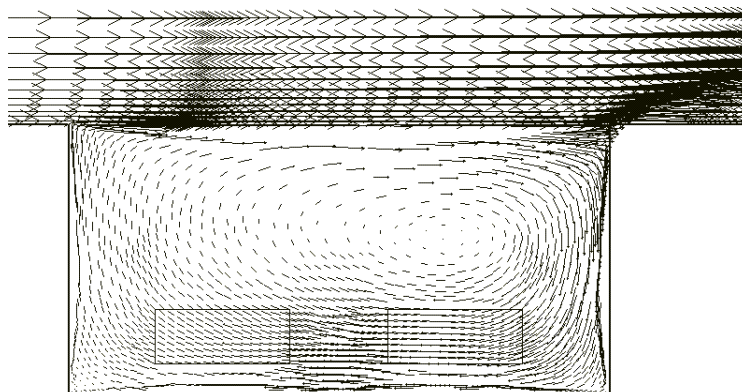


Figure 126 : Ecoulement aéraulique en 2D dans la “Place du Millénaire” (cas végétation actuelle)

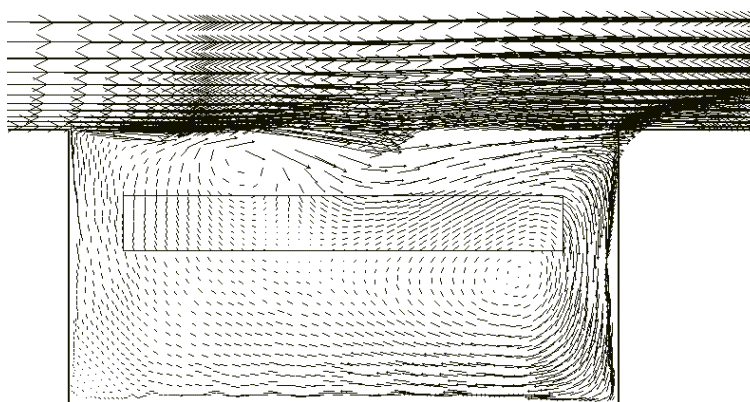


Figure 127 : Ecoulement aéraulique en 2D dans la “Place du Millénaire” (cas végétation future)

La situation vide (Figure 125) est caractérisée par l’existence d’un seul tourbillon, ce qui est conforme au résultat présenté dans [Oke 1987], le rapport d’aspect de la géométrie considérée ici étant égal à $L/H = 2$. L’écoulement conserve sa structure dans la situation actuelle (Figure 126), le centre du tourbillon étant légèrement situé plus haut que dans la situation de référence : tout se passe comme si la profondeur « efficace » du canyon était réduite par la présence de la végétation. La faible hauteur entre les blocs végétaux et le sol empêche la formation d’une structure plus complexe et explique sans doute ce comportement. La situation est plus complexe pour le dernier cas (Figure 127) : le bloc végétal est situé plus haut et agit comme un frein à la pénétration de l’écoulement à l’intérieur du canyon. On constate la création d’une perturbation au-dessus de la végétation, ainsi que la présence d’un tourbillon d’intensité relativement faible sous cette zone. Enfin, il semble que l’espace situé entre le bloc végétal et le mur aval du canyon soit le lieu d’une augmentation de l’amplitude des vitesses.

La réduction des vitesses due à la présence de la végétation est assez importante en deux dimensions. En effet, avec ce type de configuration, le vent est ralenti en traversant cette masse végétale en raison des pertes de charge. Dans le graphique suivant (Figure 128), nous avons tracé la vitesse du vent à un mètre au-dessus du sol en partant du mur amont vers le mur aval. Cette traversée de la place est réalisée en différents points de simulation sur cette ligne, représentés par la mesure de la distance d les séparant du mur amont. Des écarts de vitesse apparaissent nettement dans les situations sans végétation et avec végétation actuelle. Une vitesse généralement plus élevée de l’ordre de 0.5 m/s est constatée dans le cas sans végétation et de l’ordre de 0.2 m/s dans le cas actuel. La vitesse du vent au centre de la place est au moins divisée par deux dès que la végétation est présente. La situation future n’apporte que peu de

changement avec une légère réduction pour la première moitié de la place et un profil un peu décalé vers la droite pour la seconde moitié, effet dû à l'engouffrement du vent le long de la façade aval.

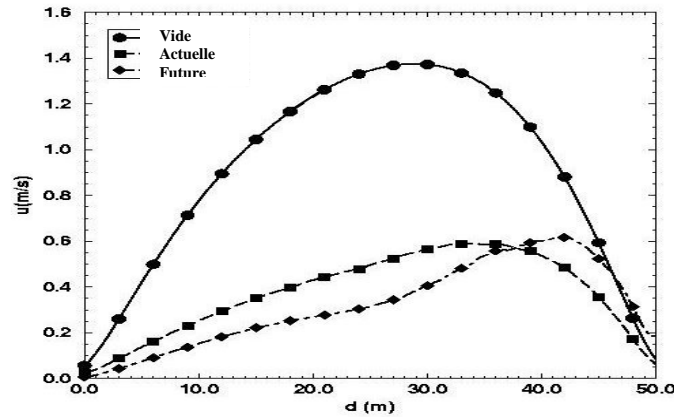


Figure 128 : Impact de la végétation sur les vitesses de vent simulées à 1 mètre au-dessus du sol

9.4.4 Ecoulements aérauliques en 3D

La rose des vents relative aux données météorologiques de Montpellier indique que les vents dominants sont orientés nord-ouest (la Tramontane) et nord-nord-est (le Mistral). Nous avons testé l'impact de ces deux directions de vent au niveau des écoulements aérauliques dans Antigone.

Les profils de vent, de turbulence et les conditions limites imposées correspondent aux informations données dans le paragraphe précédent et sont étendus à la troisième dimension. Ainsi, dans la veine aéraulique, nous ajoutons deux conditions de symétrie au niveau des deux bords latéraux.

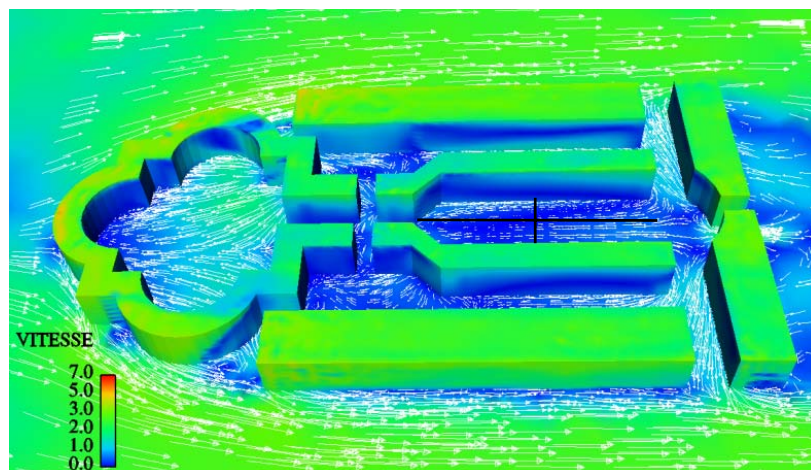


Figure 129 : Ecoulement dans Antigone à 1 mètre du sol et lignes de mesures (axe et milieu) (vent de nord-ouest, situation vide)

Avec une orientation des vents dominants nord-ouest, des effets de retombées de vent, de canalisation et de Venturi apparaissent dans la Place du Millénaire mais sont peu importants à 1 mètre du sol du fait de la forme même d'Antigone (Figure 129). En effet, il apparaît que le vent en abordant ce quartier selon cette orientation le contourne et ne pénètre que peu dans la zone que nous souhaitons étudier. La vitesse du vent simulée à un mètre du sol le long de l'axe de la place, de gauche à droite varie de 0.2 à 0.7 m/s (Figure 130). Dans le sens transversal, au milieu de la place, la vitesse varie de pratiquement 0 à 0.6 m/s (Figure 131). Les vitesses étant déjà faibles, une réduction due à la présence des arbres ne serait que peu significative. Par conséquent, nous ne retenons pas cette orientation, pour les analyses ultérieures.

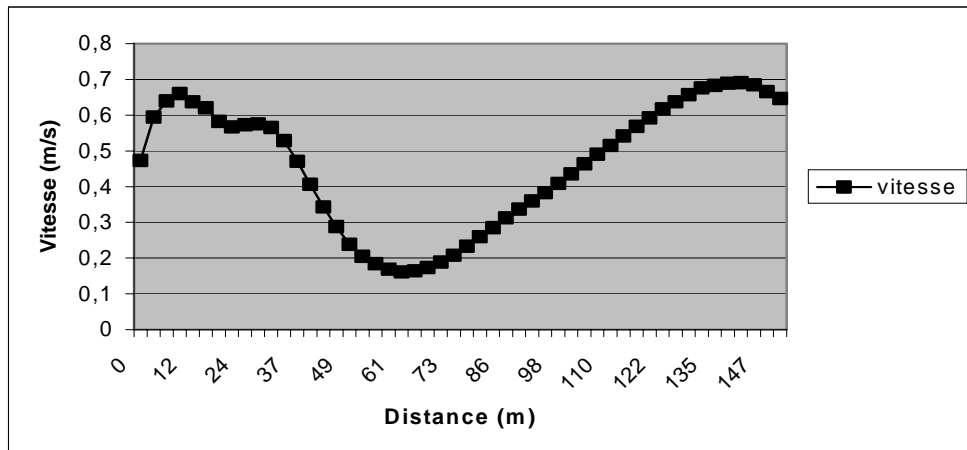


Figure 130 : Vitesse du vent dans l'axe d'Antigone (vent de nord-ouest)

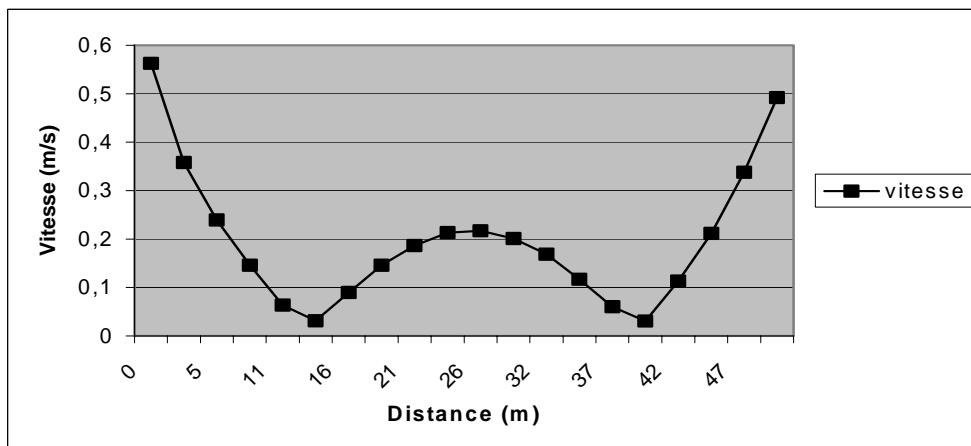


Figure 131 : Vitesse du vent au milieu de la place du Millénaire (vent de nord-ouest)

Pour la deuxième orientation significative (nord-nod-est), le vent arrive perpendiculairement à la place du Millénaire. C'est avec cette orientation que nous avons réalisé les simulations 2D.

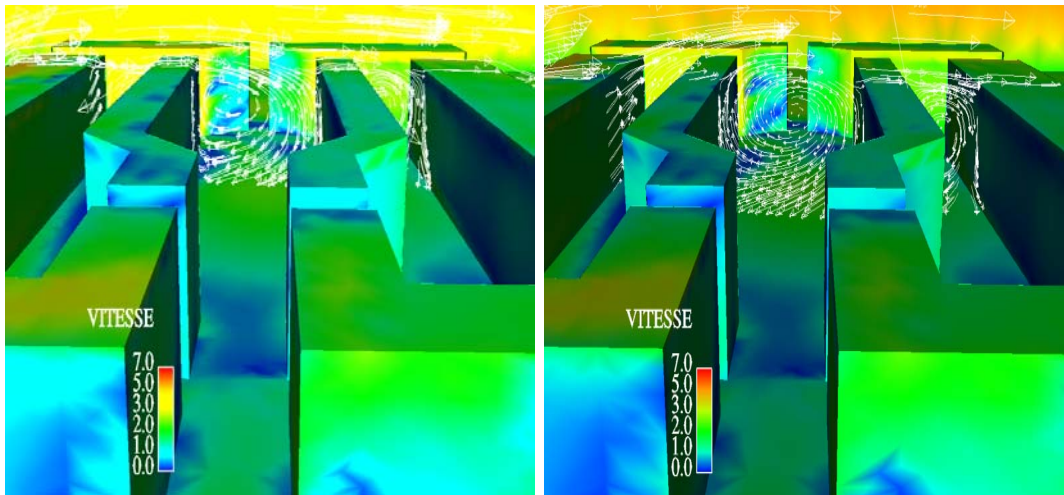


Figure 132 : Ecoulement dans Antigone (vent de nord-nord-est, situation vide)

Nous pouvons constater, qu'au centre de la place nous retrouvons le vortex obtenu en 2D avec une déformation due au caractère tridimensionnel de l'écoulement (Figure 132). Au niveau du sol, le vent a tendance à se diriger vers la place du nombre d'or (bas de l'image) et non pas à rester dans le plan médian. La déformation est nettement plus importante au niveau du bord de la place ce qui justifie la modélisation en trois dimensions du site car son traitement en tant que rue canyon est fortement abusif lorsque nous nous éloignons du milieu.

Les vitesses de vent étant supérieures avec selon cette orientation, les deux situations avec végétation sont également envisagées (Figure 133).

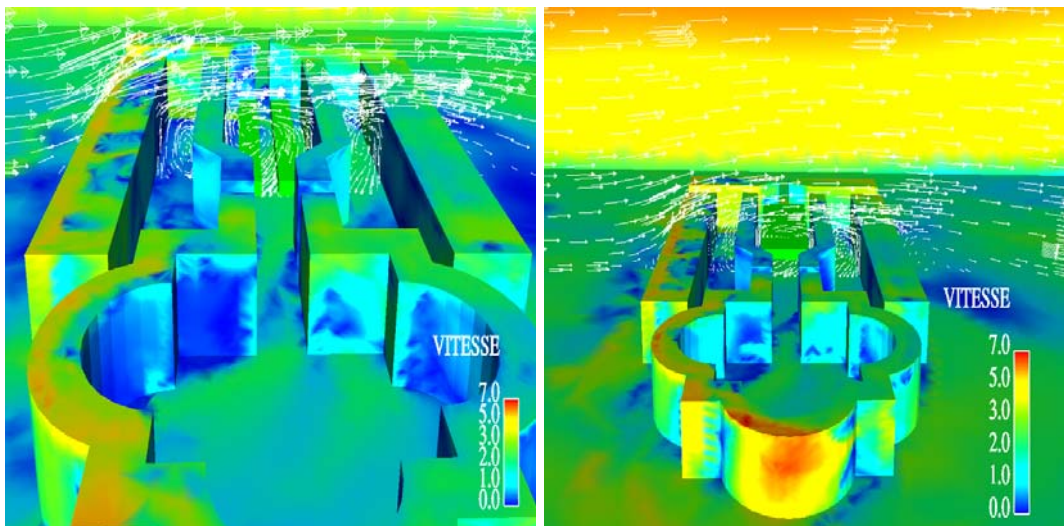


Figure 133 : Ecoulement dans Antigone (vent de nord-nord-est, situation actuelle et future)

La comparaison des vitesses de vent dans les trois situations le long de l'axe de la place en partant du début de la place (haut de l'image), vers la place du nombre d'or (Figure 134) à 1 mètre du sol montre que les trois courbes ne suivent pas le même profil et que la présence de végétation peut induire soit une réduction, soit une augmentation des vitesses de vent. Ce dernier cas de figure est notamment visible dans la deuxième moitié de la place.

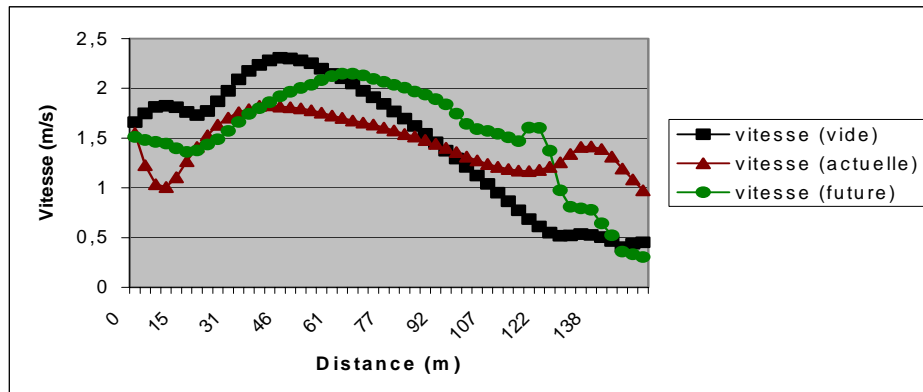


Figure 134 : Vitesses de vent le long de l'axe de la place à 1 m du sol (vent de nord-nord-est)

9.4.5 Simulation sans couplage thermo-aéraulique

Deux études, réalisées par des étudiants du laboratoire CERMA, avaient déjà essayé de caractériser les propriétés d'ensoleillement [Sanchez Pie 1987] et les problèmes aérodynamiques [Hernandez 1987] dans le quartier d'Antigone. Pour mener à bien leur recherche, l'utilisation d'une des premières versions du logiciel SOLENE avait été associée à des mesures réalisées en soufflerie au CSTB de Nantes pour délimiter 4 types de zones pour trois journées types (21 janvier, 21 mars et 21 mai) :

- Bien ensoleillé et non venté
- Bien ensoleillé et venté
- Mal ensoleillé et non venté
- Mal ensoleillé et venté

Notre démarche intégralement basée sur la simulation permet non seulement de prendre en compte ces deux éléments que sont le soleil et le vent, de manière plus précise, de grand progrès ayant été réalisé dans les simulations depuis, mais en plus, il nous est désormais possible de les étudier conjointement et d'analyser l'influence de chacun des autres paramètres microclimatiques sur les conditions de confort. Lorsque nous utilisons, l'expression « sans couplage thermo-aéraulique », cela ne signifie pas que nous étudions d'un coté le soleil et de l'autre le vent comme cela est fait dans les deux mémoires précédemment cités. Nous voulons simplement dire que le couplage entre les différents flux n'est pas parfaitement considéré en définissant le flux convectif par une relation faisant intervenir un coefficient d'échange et une température d'air. Néanmoins, le niveau de précision des informations recueillies par ce type de simulation est déjà bien supérieur à l'analyse séparée du soleil et du vent.

9.4.5.1 Température de surface en régime transitoire

Les principes et le programme ayant déjà été largement détaillés, nous indiquons dans cette partie uniquement les paramètres d'entrée nécessaires à la simulation :

- Les façades sont en béton de couleur claire : $\lambda = 0.9 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $\rho = 2300 \text{ kg.m}^{-3}$, $C_p = 960 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, épaisseur = 0.3 m, $h_{\text{int}} = 9 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, $T_{\text{int}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, $\alpha_{\text{sol}} = 0.5$, $\varepsilon = 0.9$
- Le sol de la rue est composé d'un asphalte de couleur claire : $\lambda = 0.75 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $\rho = 2100 \text{ kg.m}^{-3}$, $C_p = 870 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, épaisseur = 0.2 m, $\alpha_{\text{sol}} = 0.5$, $\varepsilon = 0.9$

- Le sous sol est composé de terre : $\lambda = 0.5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, $\rho = 1800 \text{ kg.m}^{-3}$, $C_p = 640 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, épaisseur = 0.8 m
- La température interne des bâtiments est fixée à 20 °C.
- La température de référence dans le sous-sol est fixée à la valeur moyenne de la température de l'air sur une journée : $T_{\text{ref}} (1 \text{ m}) = 25 \text{ °C}$.

9.4.5.1.1 Impact de l'orientation de la scène : cas nord-sud

De manière à facilement suivre la course du soleil nous avons dans un premier temps étudié le cas hypothétique où l'axe de la Place du Millénaire serait orienté nord-sud. Nous avons obtenu les résultats suivants pour deux types de coefficient d'échange convectif. Le premier cas (Figure 135) est relatif à une condition de vent modéré ($h = 20 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) et le second (Figure 136) à une condition de vent faible ($h = 10 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$). Trois points, placés soit au centre du mur ouest (à gauche de la rue et regardant vers l'est), soit au centre de l'axe piétonnier, soit au centre du mur est (à droite de la rue et regardant vers l'ouest) sont retenus pour traduire l'évolution des températures de surface au cours de la journée.

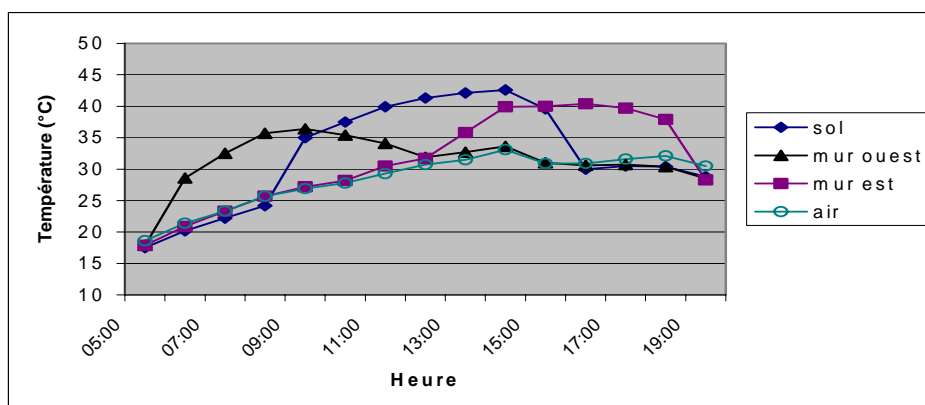


Figure 135 : Températures de surface, avec une orientation nord sud (cas $h = 20 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)

Selon cette orientation, la distinction, de l'évolution des températures de surface entre les différentes parois est bien identifiable (Figure 135). Le mur ouest bénéficie logiquement d'un apport solaire le matin et voit sa température s'élever progressivement jusqu'à 9:00 puis diminuer lentement en tendant vers la température de l'air. La température du sol évolue à la hausse de manière sensible du milieu de la matinée jusqu'au début de l'après-midi puis tend également vers la température de l'air. Enfin, le mur est n'étant exposé qu'en début d'après-midi décroche de la température d'air à partir de midi et ne la rejoint qu'au coucher du soleil.

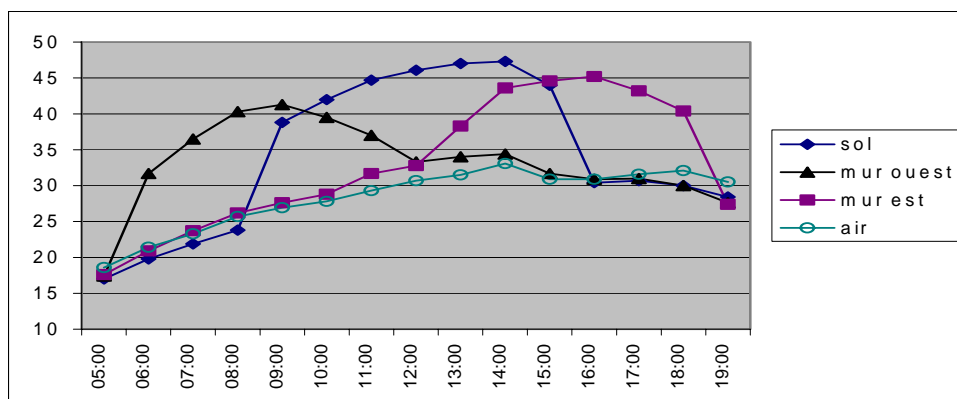


Figure 136 : Températures de surface, avec une orientation nord sud (cas $h = 10 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)

Lorsque la valeur du coefficient d'échange convectif diminue (Figure 136), les profils des courbes sont maintenus, mais les valeurs des températures de surface deviennent supérieures, l'augmentation pouvant être de 5°C en présence de soleil, les échanges convectifs ne permettant plus le refroidissement des surfaces.

9.4.5.1.2 Impact de l'orientation de la scène : cas réel, nord-ouest sud-est

Si nous repositionnons l'axe de la Place du Millénaire suivant son orientation réelle, nord-ouest sud-est, nous obtenons des profils de température de surface différents. Les résultats obtenus correspondent à une situation de vent modéré pour laquelle le coefficient d'échange convectif est fixé à $20 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Neufs points de mesure sont illustrés, ils sont tous situés dans la tranche centrale de la place et sont localisés sur les façades (au centre et en bas) et sur le sol (dans les coins, à gauche, au centre et à droite).

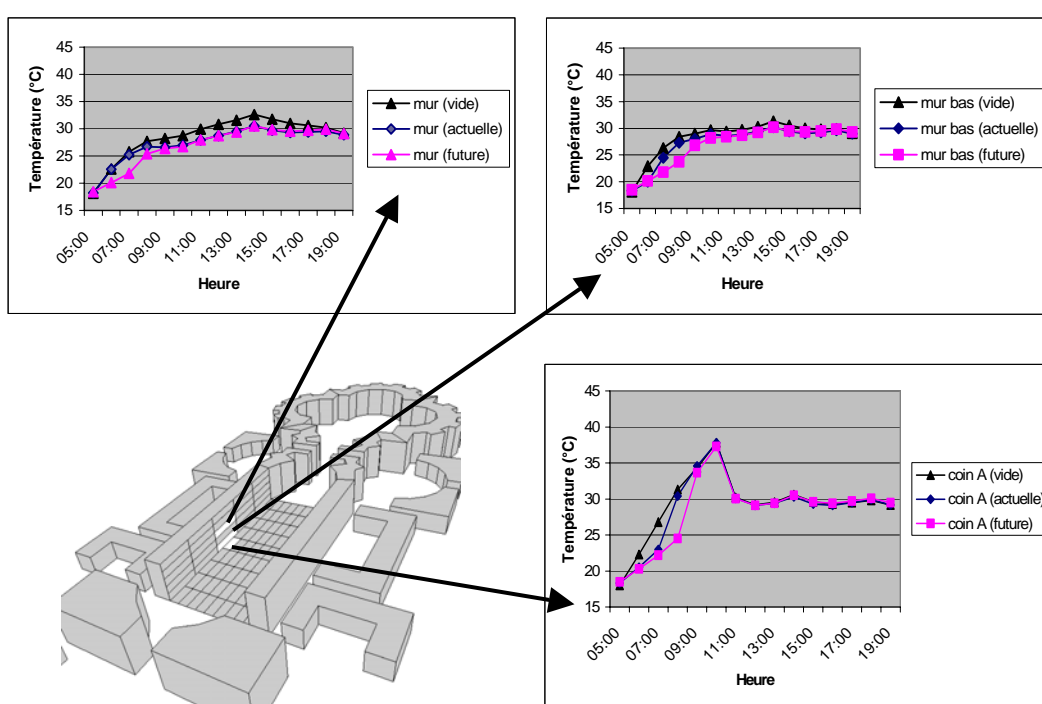


Figure 137 : Températures de surface pour trois points de simulation coté gauche

Pour les trois points du coté gauche (Figure 137), l'écart de température de surface est peu important au cours de la journée. En effet, l'orientation de la rue est telle que cette façade se trouve dans l'ombre générée par elle-même sur l'ensemble de la journée. Le coin de rue bénéficie de l'ombre du bâtiment, sauf pendant les premières heures de la matinée, d'où une atténuation envisageable des températures de surface de 5 à 7 °C pour cette période dans la situation future.

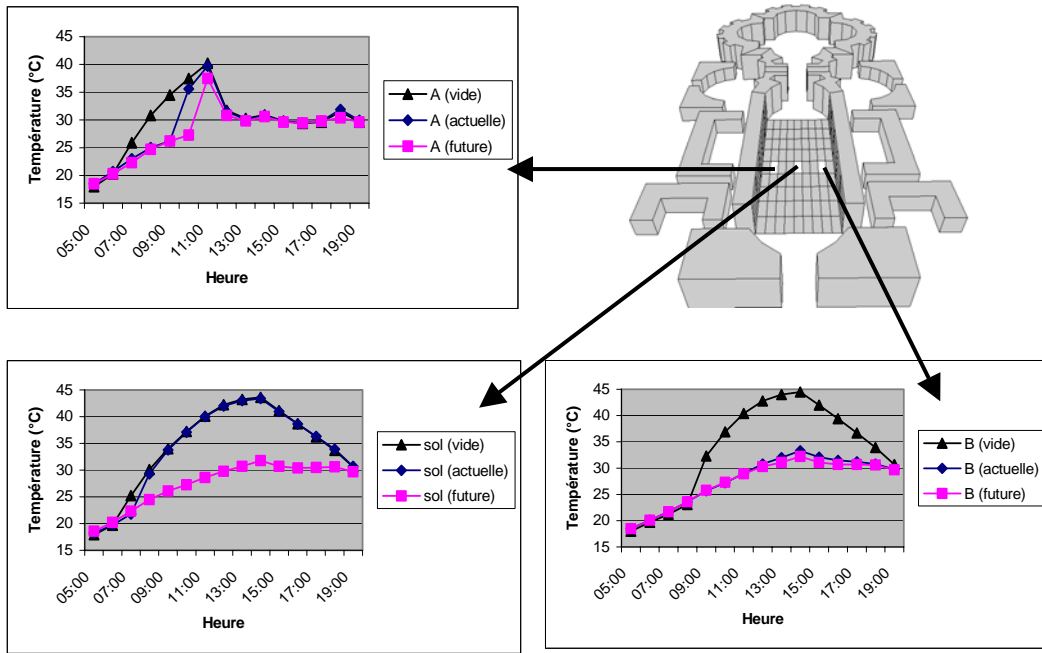


Figure 138 : Températures de surface pour trois points de simulation au centre

Ces trois points du sol (Figure 138) sont sensibles à l'ensoleillement et présentent les plus fortes variations des températures de surface en fonction du niveau du végétation considéré. La différence peut atteindre 13°C au maximum entre la situation vide et la situation future. Les courbes des valeurs actuelles peuvent soit se rapprocher du cas vide ou du cas futur selon l'emplacement du point de simulation, à savoir si celui-ci se situe déjà dans la zone de projection d'ombre des arbres ou pas.

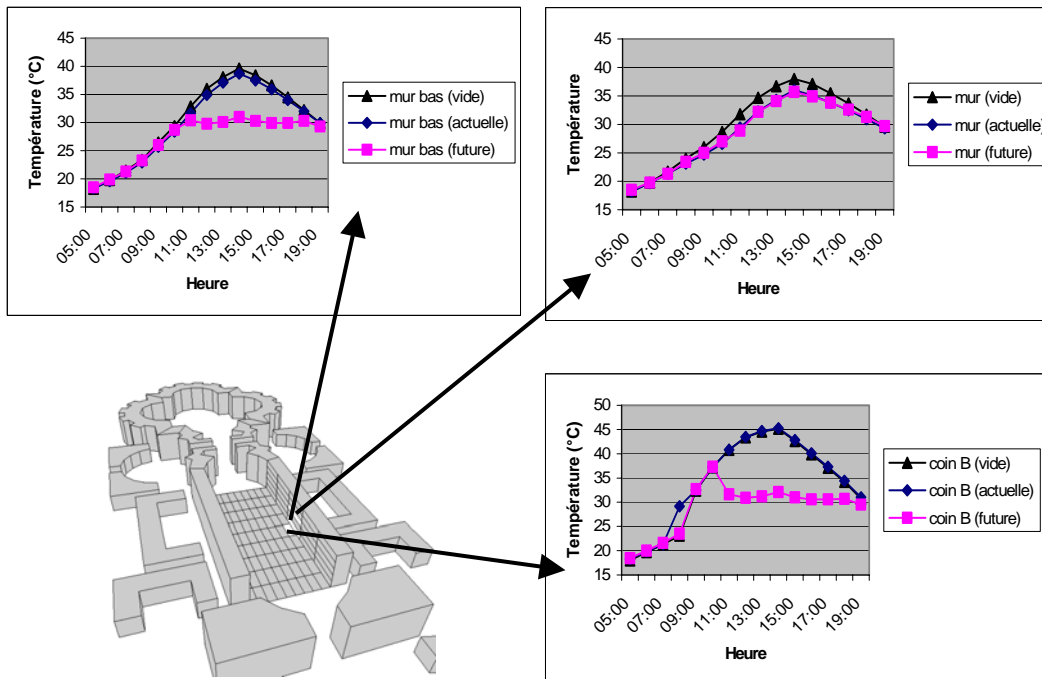


Figure 139 : Températures de surface pour trois points de simulation coté droit

Enfin, pour les trois points du côté droit (Figure 139), l'ombre induite par la présence d'arbre dans la situation future entraîne également une forte réduction des températures de surface. Le point sur le mur, étant positionné au centre de la façade, ne peut bénéficier de l'ombre des arbres à cette période de l'année où le soleil est haut dans le ciel et donc voit ses températures baisser légèrement d'environ 2°C au cours des années mais sans subir de transition importante. En revanche, le bas du mur et le coin peuvent espérer une diminution de leur température de surface d'environ 8 et 13 °C respectivement.

9.4.6 Simulation avec couplage thermo-aéraulique

Le calcul des températures de surface précédemment effectué permet désormais de lancer les procédures utiles au couplage thermo-aéraulique. Avant de détailler les itérations entre les logiciels SOLENE et N3S pour chaque pas de temps, nous nous attardons sur le rôle des températures sur les écoulements aérauliques tridimensionnels en présence de végétation.

9.4.6.1 Impact de la température sur les écoulements aérauliques

Lorsque nous avons essayé d'analyser l'impact de la prise en compte des effets thermiques sur les écoulements aérauliques, il nous est apparu que non seulement ces effets modifiaient les vitesses de vent, mais aussi que l'analyse était plus délicate à mettre en place du fait de la structure tridimensionnelle des écoulements, largement perturbés par la présence des arbres.

En effet, si nous revenons au cas 2D, le vent est amené, soit à traverser la zone végétale et à circuler dans la place, soit à ressortir. Dans le cas 3D, la structure complexe des écoulements induit des mouvements radicalement différents. En effet, le vent dans la place arrive à la fois au niveau des toits mais également par les bords de celle-ci. De plus en présence de végétation, le vent qui provient des toits est toujours ralenti en traversant la zone végétale, mais le vent provenant des bords est accéléré en s'engouffrant sous la végétation. Le résultat, en terme de vitesse est alors délicat à analyser.

Pour illustrer ceci, nous avons tracé dans le graphique suivant, les vitesses de vent obtenues à une hauteur de 1 mètre sur une ligne transversale à la place et disposée au centre de celle-ci (Figure 140). Les courbes avec des cercles correspondent aux valeurs obtenues lorsque les simulations prennent en compte les effets thermiques. Les courbes en traits pointillés courts et longs correspondent à la situation sans végétation et à la situation avec la végétation actuelle (hachures longues), les lignes continues représentent la situation où la végétation est à taille adulte.

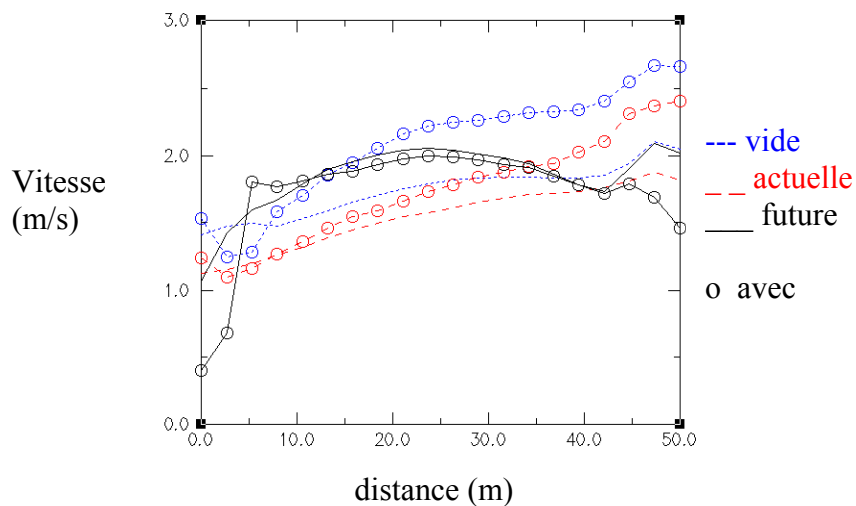


Figure 140 : Vitesses au centre de la place à 1 m du sol

Nous constatons une augmentation des vitesses entre les cas sans thermique et avec thermique pour la situation vide et la situation actuelle, d'autant plus importante que les hétérogénéités des températures existent. La situation future, du fait d'une plus grande homogénéité des températures semble ne pas être affectée par ces effets sauf au niveau des parois. Nous ne pouvons plus signaler de diminution de la vitesse de vent en fonction de la présence de végétation comme dans le cas 2D. En effet, pour cette série de mesure le niveau des vitesses est certes plus élevé dans la situation vide mais les écarts ne sont plus aussi importants. Nous retrouvons un profil équivalent pour les courbes actuelles et futures avec la séparation de la place en deux moitiés pour lesquelles le vent est plus ou moins important selon les cas. En conclusion, les effets thermiques modifient les vitesses de vent. Cependant, en trois dimensions et avec la présence de végétation cette perturbation n'est pas facilement identifiable car les phénomènes advectifs interviennent et changent la structure classique des vortex observables en deux dimensions.

9.4.6.2 Champ thermique avec couplage thermo-aéroulque

La détermination des nouvelles températures à un instant dépend du nombre d'itérations entre SOLENE et N3S, la désignation « h imposé » correspondant à l'itération numéro 0 qui est le résultat issu du calcul sans couplage thermo-aéroulque et les itérations suivantes traduisant l'influence du couplage. L'étude la convergence des résultats est illustrée ici en prenant comme exemple les résultats obtenus à 14h dans les trois situations. Les points de mesure sont situés aux centres de gravité des mailles dans SOLENE, dans la tranche centrale de la rue et numérotés de gauche à droite (Figure 141). Nous observons en premier le mur gauche (de haut en bas), puis la rue (de gauche à droite) et le mur droit (de bas en haut). Une séparation entre deux valeurs indique le passage entre le mur et la rue.

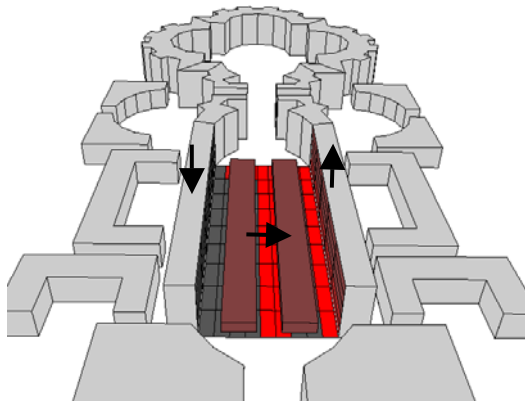


Figure 141 : Localisation des points de mesure

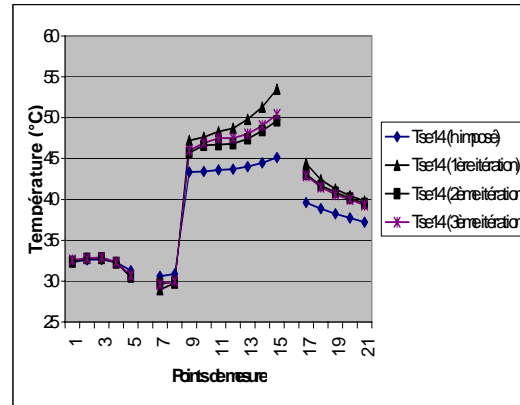


Figure 142 : Températures de surface (vide)

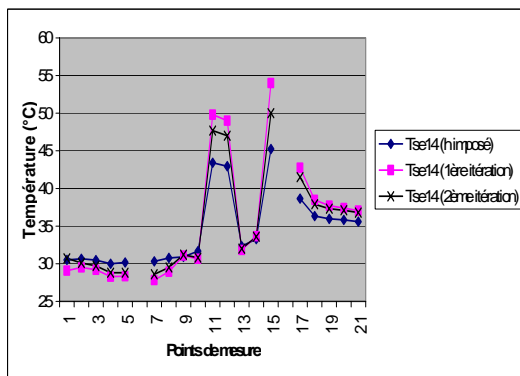


Figure 143 : Températures de surface (actuelle)

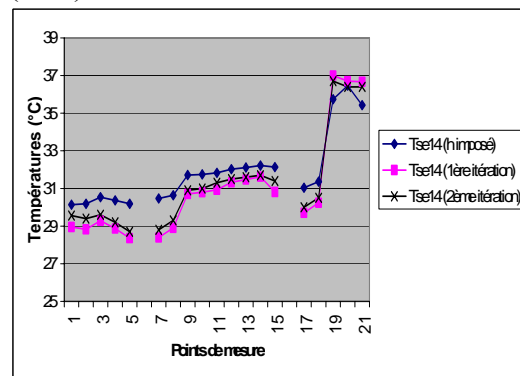


Figure 144 : Températures de surface (future)

La prise en compte du couplage thermo-aéraulique permet d'ajuster plus finement les valeurs des températures de surface. L'étude de la convergence dans la situation vide (Figure 142) a déjà été discutée dans le chapitre sur le couplage thermo-aéraulique. Nous pouvons ajouter que les conclusions sont les mêmes dans les deux autres situations avec végétation (Figure 143 et Figure 144), à savoir que les plus fortes variations apparaissent pour les zones ensoleillées, que le calcul sans couplage avec un coefficient d'échange convectif élevé sous-estime les températures de surface pour les zones au soleil et les surestime pour les zones à l'ombre et que dès la deuxième itération, les écarts de températures deviennent faibles et la convergence des résultats est quasiment atteinte. Ainsi, les nouvelles températures de surface à l'issue du couplage thermo-aéraulique sont supérieures au soleil et inférieures à l'ombre. Les écarts de températures à 14 :00 (heure la plus chaude de la journée) sont compris entre - 1 et 5.3 °C, avec une valeur moyenne de + 2.5°C dans la situation vide. Dans la situation actuelle les écarts sont compris entre - 1.4 et + 2.8 °C, avec une valeur moyenne de + 1.6 °C. Enfin, dans la situation future, les écarts sont compris entre - 1.7 et + 1 °C, avec une valeur moyenne de - 0.7 °C.

9.5 Impact de la végétation

A l'issue des simulations précédentes, l'impact de la végétation peut être quantifié à différents niveaux. En effet, les conséquences de cette présence végétale évoluant au cours du temps se répercutent à l'échelle microclimatique au niveau des quantités de rayonnement transmis, des vitesses, de l'énergie cinétique turbulente, des températures de surface et d'air.

9.5.1 Le rayonnement transmis

Nous avons considéré dans l'ensemble de nos simulations que la masse végétale ne laissait passer que 10 % des apports solaires incidents. La densification de la végétation au cours des années induit de profonds changements quant aux rayonnements solaires incidents transmis au niveau du sol et des façades. Nous illustrons ce point dans les trois situations étudiées (Figure 145). Dans le cas actuel, nous remarquons que deux zones recouvrant environ 40 % du sol sont protégées du rayonnement incident intense à cette période de la journée (14h00) et viennent s'ajouter aux 20 % de sol à l'ombre du bâtiment. Dans la situation future des différences de flux transmis peuvent dépasser les 700 W/m² par comparaison avec la situation vide. Le pourcentage de zone protégée par les arbres s'élève à environ 70 % pour le sol et de 40% pour la partie basse de la façade.

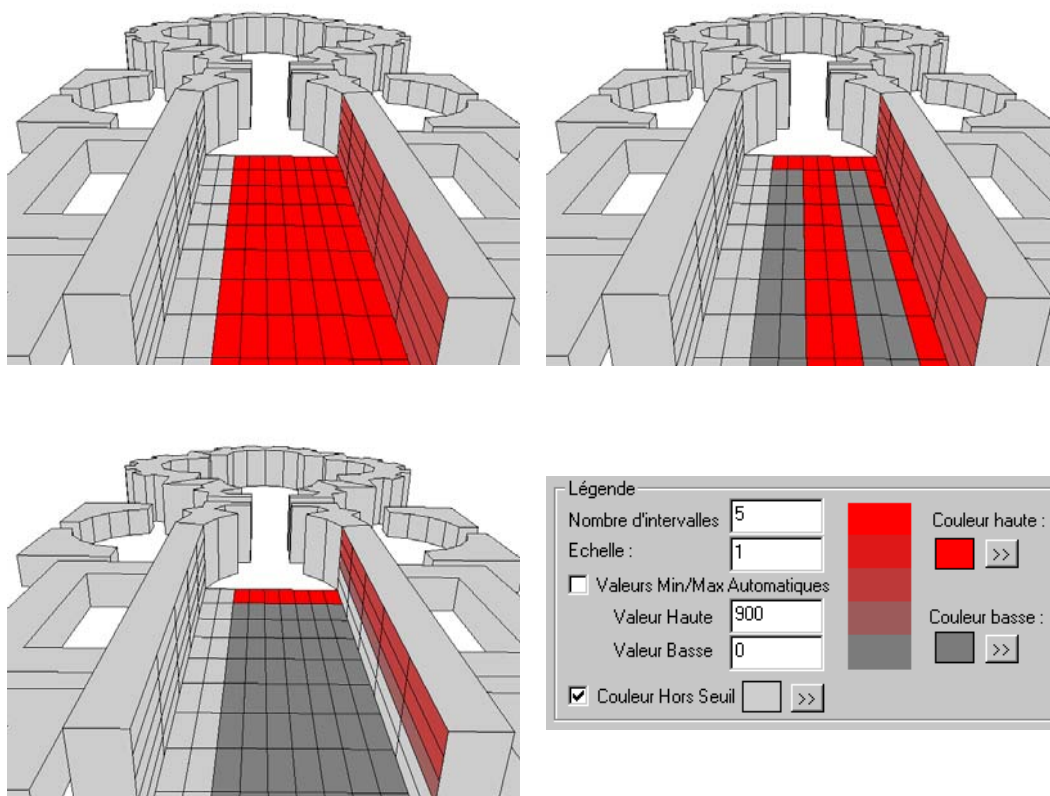


Figure 145 : Flux solaires incidents transmis la situation vide (en haut à gauche), actuelle (en haut à droite) et future (bas à gauche)

Cet impact des arbres sur le microclimat est celui qui entraîne le plus de conséquences sur la caractérisation des conditions de confort en espace extérieur comme nous le montrons un peu plus loin dans ce chapitre.

9.5.2 Les vitesses de vent

Nous avons déjà évoqué à plusieurs reprises ce point lorsque nous avons abordé la simulation des écoulements aérauliques en deux et trois dimensions avec introduction des pertes de charge pour les zones végétales puis lorsque nous avons discuté des effets dus à la prise en compte de

la thermique. Il peut être intéressant de signaler à nouveau que dans le cas bidimensionnel uniquement des réductions de vitesse sont constatées lorsque la végétation apparaît, alors que dans le cas tridimensionnel des réductions et accélérations se partagent le domaine étudié. Les impacts thermiques existent mais demeurent délicats à caractériser, notamment si à ceux-ci viennent s'ajouter les actions des arbres et la structure complexe des écoulements dans l'espace urbain.

9.5.3 Les températures de surface

Nous avons largement détaillé ce point précédemment et nous pouvons retenir deux informations importantes :

- le couplage thermo-aéraulique permet de l'évaluer avec précision au cours d'un processus itératif faisant intervenir le logiciel SOLENE et N3S
- des écarts importants des températures de surface apparaissent lorsque la végétation augmente dans la scène étudiée. Ils peuvent atteindre environ 13 °C dans le cas du sol que nous avons simulé

9.5.4 Les températures d'air

Une remarque générale est que les variations des températures de surface des parois sont largement atténuées une fois transmises à l'air environnant. Dans les simulations réalisées en deux dimensions, les profils de température d'air mesuré sur la ligne allant d'un côté à l'autre de la place, à 1 mètre du sol (Figure 146) et au niveau des parois toujours à une distance de 1 mètre sont pratiquement plats, les variations maximales observées étant de l'ordre de 0.5 °C.

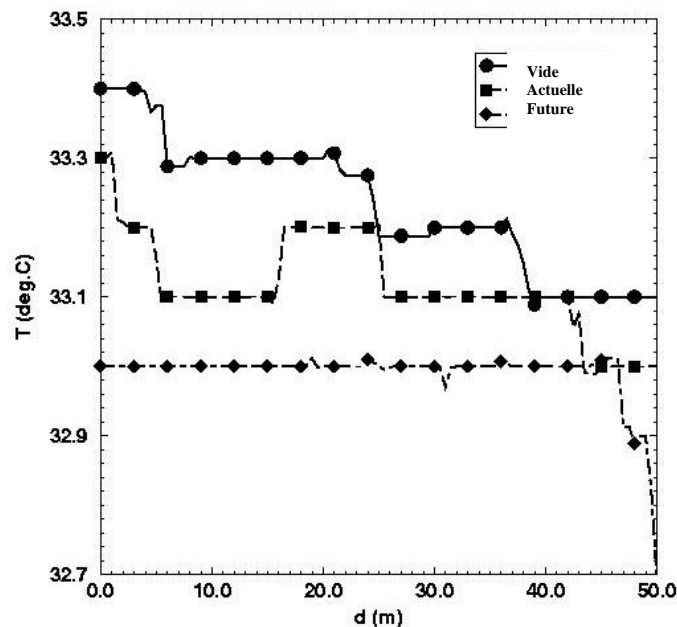


Figure 146 : Impact de la végétation sur les températures d'air simulées à 1 mètre du sol (cas 2D)

Les simulations tridimensionnelles apportent plus d'éléments d'information sur la distribution des températures d'air dans la scène. Ainsi, nous avons imposé les températures de surface obtenues grâce au couplage thermo-aéraulique sur les deux façades et sur le sol de la place du

Millénaire, le reste de la scène n'étant pas étudié est maintenu à la température de l'air ambiant. Dans les illustrations suivantes (Figure 147), nous pouvons constater dans la situation vide, les températures d'air sont influencées par les températures de surface qui sont élevées pour les zones ensoleillées. Une homogénéisation et une réduction notable des températures d'air dans la scène lorsque le niveau de végétation évolue.

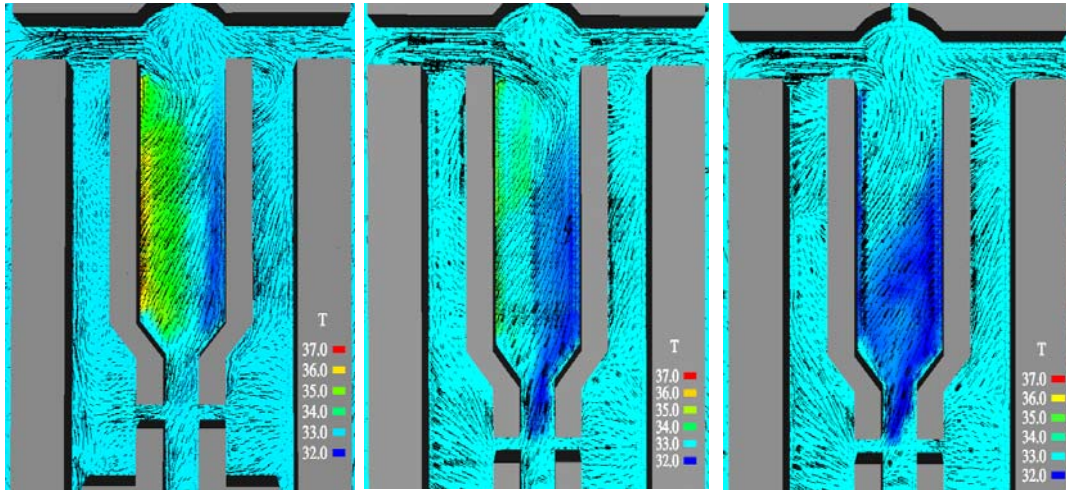


Figure 147 : Température d'air et écoulements à 1 m du sol (situation vide, actuelle et future)

Les courbes relatives aux températures d'air obtenues pour les différentes situations sont représentées dans le graphique suivant (Figure 148). Les écarts les plus importants apparaissent au niveau du coin du sol proche de la façade. Dans cette zone l'air est réchauffé à la fois par le sol et par la façade dans le cas vide, alors que dans le cas actuel la zone de sol chaud est moins importante et dans la situation future le sol et une partie de la façade sont à l'ombre. La réduction des températures d'air dues à la présence de végétation est en moyenne de 0.7 °C entre la situation actuelle et la situation vide alors qu'elle atteint une valeur moyenne de 1.3 °C entre la situation future et la situation vide.

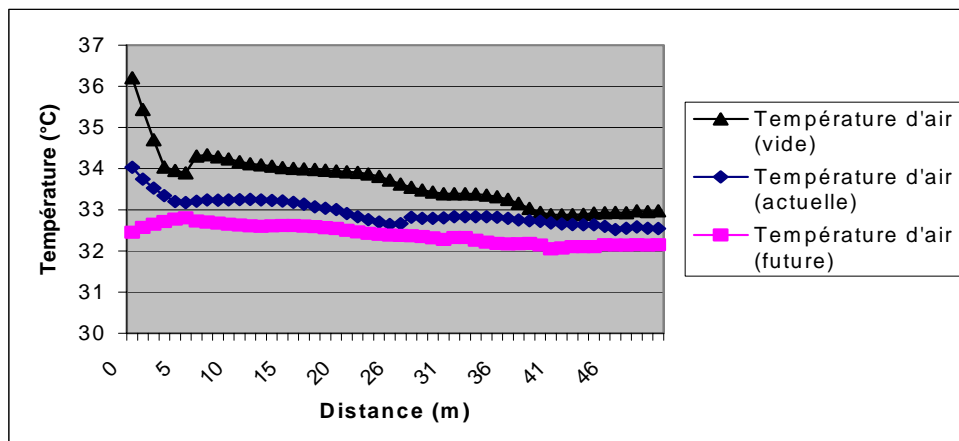


Figure 148 : Température d'air à 1 mètre du sol au milieu de la place du Millénaire

L'effet de cette variation de température est loin d'être négligeable pour différentes raisons. En effet, nous n'évoquons ici que le comportement thermique de cette place et traitons que des effets directs. L'abaissement de la température d'air permet non seulement de limiter les besoins de conditionnement d'air mais améliore également les rendements des climatiseurs, d'où économies d'énergie envisageables. De plus, si nous nous plaçons à l'échelle de la ville, les effets cumulés peuvent engendrer des atténuations importantes des températures et une

réduction de l'îlot de chaleur urbain peut être espérée grâce à la végétation. Enfin, les niveaux de confort peuvent être plus facilement atteints.

9.6 Analyse des conditions de confort

Tous les éléments sont maintenant réunis pour passer à l'analyse des conditions de confort en espace extérieur. En effet, les paramètres nécessaires à sa détermination sont obtenus à la sortie des simulations, l'humidité de l'air étant le seul paramètre fixé comme équivalent à la valeur relevée à la station météo. Les températures et les vitesses de l'air peuvent alors être associées aux températures radiantes moyennes obtenues par intégration des apports solaires et des échanges radiatifs de courtes et grandes longueurs d'onde. Des indices de confort et des bilans énergétiques peuvent alors être évalués et servir d'indicateur à la caractérisation des conditions de confort. Différents types de représentation peuvent être utilisés, comme des cartes délimitant les zones de confort dans l'espace ou des graphes représentant l'évolution des conditions de confort dans une dynamique de parcours.

9.6.1 Les indices utilisés

Pour les trois situations étudiées, nous avons cherché à déterminer les niveaux de confort à l'aide des indices présentés dans le chapitre sur le confort thermique en extérieur. Ainsi, en appliquant le programme de calcul des températures radiantes moyennes en extérieur et le programme de calcul des indices de confort il nous est possible de représenter pour chaque maille de la scène étudiée les valeurs suivantes :

- La température radiante moyenne
- Le PMV modifié par l'introduction des flux radiatifs dans la température radiante moyenne ou dans un bilan appliqué aux vêtements. Le PPD associé peut être également évalué.
- Le taux de sueur régulatrice déterminé par le bilan énergétique appliqué à l'individu.
- L'indice de stress thermique DISC

Des représentations graphiques peuvent alors être obtenues sur un période donnée ou à un instant précis sur les différentes zones. Elles peuvent informer l'aménageur sur les protections à apporter en fonction des usages souhaités.

La démarche qui nous conduit depuis le début de cette étude de cas vise, non pas à affirmer que les résultats obtenus ici sont d'une précision extrême (les hypothèses de simulation nous interdisant de préférer de tel propos), mais plutôt de travailler par comparaison et de s'intéresser à des écarts d'état. Au niveau des conditions de confort il en va de même. En effet, les travaux sur cette notion en espace extérieur demeurent récents et non validés, voire non validables, ainsi il semble plus judicieux de se préoccuper de la variation induite par un changement d'aménagement, tel que l'introduction de végétation ou la densification de celle-ci, en terme relatif.

9.6.2 Le cas d'un parcours

Le déplacement d'un homme dans l'espace urbain permet de mettre en avant les différences de situations de confort présentes dans un même lieu. En effet, la distribution des zones à fortes températures moyennes de surface dans une rue conditionne les emplacements critiques où des conditions de stress thermique apparaissent. Par ailleurs, en situation de déplacement, la

dimension dynamique du confort peut être appréciée et des analyses du confort adaptatif peuvent se justifier.

9.6.2.1 Les températures radiantes moyennes

Le « bonhomme confort » précédemment décrit est utilisé dans la détermination des températures radiantes moyennes. Celles-ci sont bien évidemment influencées de manière conséquente par les apports solaires directs, mais la proximité d'une paroi chaude peut altérer encore les résultats. Dans la simulation suivante, nous pouvons remarquer que les transitions entre les différentes zones de la place suivent les tracés d'ombre et sont accentuées par les effets des façades (Figure 149).

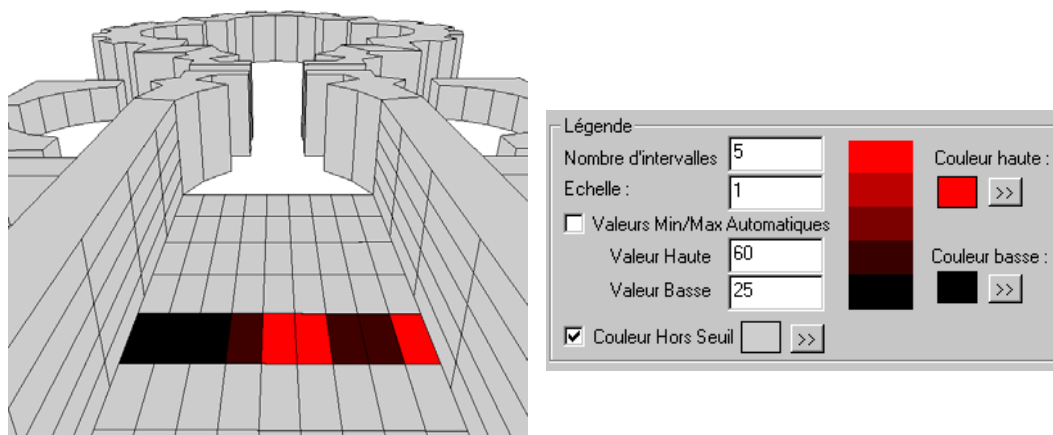


Figure 149 : Températures radiantes moyennes le long du parcours (situation actuelle à 14:00)

Ainsi, nous avons représenté, la variation des valeurs de la température radiante moyenne pour un individu qui traverse la place dans le sens de la largeur (de la façade de gauche vers celle de droite) en début d'après midi (14:00) lorsque les conditions climatiques sont les plus défavorables pour le confort de l'individu (Figure 150) dans les trois situations [Vinet et al. 2000c].

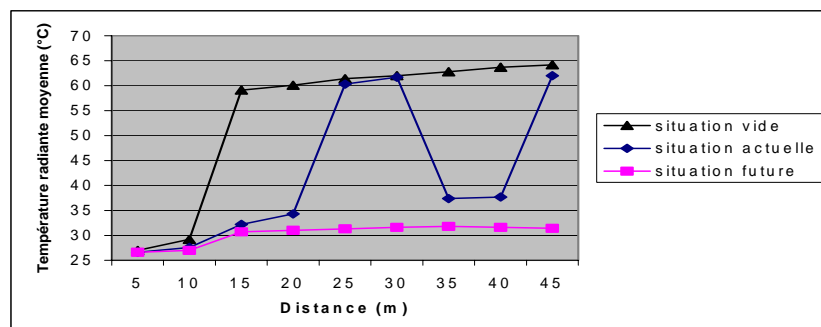


Figure 150 : Températures radiantes moyennes pendant un parcours dans les trois situations

A partir des trois courbes (Figure 150), il apparaît que seule la partie à l'ombre du bâtiment (dix premiers mètres sur la gauche) n'est pas modifiée, alors que des écarts de plus de 30 °C sont à signaler entre la situation sans végétation et celle envisagée lorsque les arbres seront à taille adulte. Dans la situation actuelle, une partie de la place est protégée mais la zone centrale reste à un niveau qui empêche toutes conditions de confort ($T_{mr} > 60$ °C).

9.6.3 Les pourcentages d'espace confortable

L'approche retenue ici est similaire à celle adoptée pour l'Exposition Universelle de Séville de 1992 [Alvarez et al. 1992]. Le critère pour un confort potentiel en espace extérieur est lié à l'activité de l'individu. Par exemple pour un individu assis, le taux de sueur régulatrice ne doit pas dépasser la valeur seuil de 60 gr/h, alors que pour un individu marchant normalement, cette valeur est fixée à 90 gr/h.

Nous avons représenté sur les courbes suivantes (Figure 151), l'évolution au cours de la journée des pourcentages d'espace correspondant à une zone où le bilan d'énergie calculé sur un individu assis permet d'obtenir un taux de sueur régulatrice inférieure à la valeur seuil de 60 gr/h [Vinet et al. 1999, 2000a].

Les calculs ont été effectués à 1 m du sol et pour un individu ayant une activité égale à 1 met et vêtu légèrement, à savoir une résistance vestimentaire de 0.6 clo.

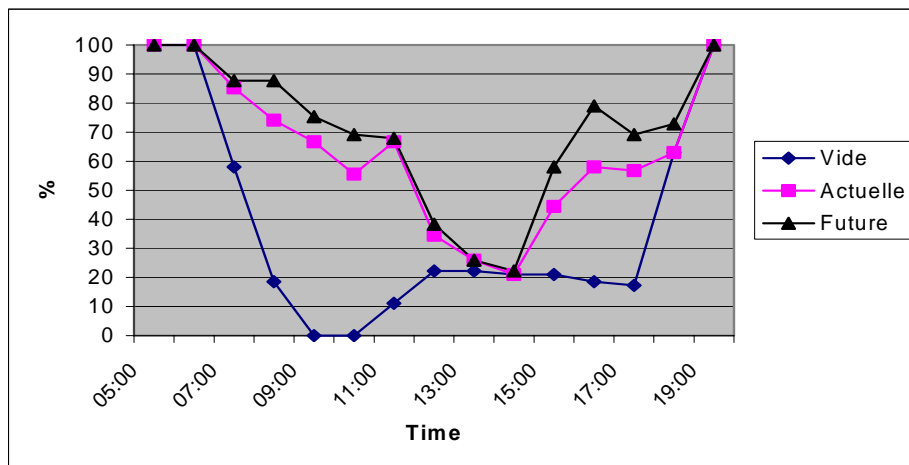


Figure 151 : Pourcentage des zones considérées confortables pour les trois situations

Les résultats sont exprimés en pourcentage de surface de sol correspondant au critère de confort pour un individu assis dans les trois situations envisagées. Cette représentation statistique des zones de confort montre que les zones de confort au cours de la journée apparaissent uniquement dans l'ombre du bâtiment pour la situation vide et s'étendent aux zones à l'ombre des arbres dans les autres situations. Les pourcentages d'espaces considérés confortables augmentent lorsque la couverture végétale s'accroît. Les valeurs moyennes pendant la période allant du lever au coucher du soleil sont de 38 % pour la situation vide, de 63 % pour la situation actuelle et de 70 % pour la situation future. A midi, les températures et les apports solaires sont trop importants pour permettre une situation de confort même à l'ombre des arbres. La situation actuelle représente déjà un impact conséquent sur les zones de confort par comparaison avec la situation vide. Les résultats sont encore meilleurs dans la situation future, augmentant notamment les pourcentages dans la matinée et dans l'après-midi.

9.7 Conclusion

L'étude de cas, relative à la Place du Millénaire du quartier d'Antigone à Montpellier, nous permet de, non seulement de développer un exemple concret de traitement de simulations thermo-aérauliques, mais apporte également un éclairage sur les capacités d'une telle procédure quant à l'analyse de l'impact de la végétation en milieu urbain.

Après avoir décrit le site dans son environnement urbain nous avons cherché à justifier le choix de ce terrain d'étude en signalant que cet espace extérieur, fréquentés par des piétons et soumis à des conditions chaudes d'un climat méditerranéen en été, peut voir son microclimat considérablement modifié par l'introduction et le développement de végétation. Trois situations ont pu être référencées sous l'appellation de vide (place sans végétation), actuelle (végétation actuelle de taille moyenne) et future (végétation à taille adulte). Nous avons ensuite présenté les données climatiques, issues des relevés à la station météorologique la plus proche, en retenant une journée particulièrement chaude, de manière à tester les conditions de confort.

La description des traitements nécessaires à la simulation avec couplage thermo-aéraulique nous a permis de préciser à nouveau les différentes étapes à enchaîner pour rendre cette opération possible. Ainsi, les différentes modélisations géométriques dans les environnements de SOLENE et de N3S ont été illustrées. Les calculs intermédiaires permettent de calculer certains paramètres d'entrée comme les flux solaires incidents transmis, les facteurs de forme et le profil du vent dans le site après recalage. Deux vents dominants sont considérés pour les écoulements aérauliques bi ou tridimensionnels. A ce niveau, le calcul des températures de surface est effectué sans couplage et permet de mettre en avant le rôle de l'orientation de la scène sur les résultats obtenus. La dernière étape qui consiste à itérer à chaque pas de temps les valeurs entre les deux logiciels, nous informe sur les conséquences et les intérêts d'envisager les simulations avec un couplage thermo-aéraulique.

Les résultats démontrent des différences sensibles dues à l'impact de la végétation au niveau de l'espace en lui-même par la création de cette voûte végétale. De plus des changements du microclimat sont conséquents sur les quantités de rayonnement transmis, sur la réduction ou l'accélération des vitesses de vent et sur les températures de surface et d'air. Enfin, les conditions de confort sont améliorées de manière quantifiable par l'évolution au cours du temps de la végétation présente comme nous avons pu le démontrer dans le cadre d'un parcours et dans l'analyse des pourcentages de zones confortables.

9.8 Références

- [Bofill 1985] BOFILL R. (1985). *Taller de Arqitectura. Die Gestaltung der Stadt Industrie und Klassizismus*. Stuttgart: Karl Krämer Verlag, 144 p.
- [Hernandez 1987] HERNANDEZ, M.G. (1987). *L'Antigone de Ricardo Bofill : étude aérodynamique*. Mémoire CEAA Energétique et Architecture Urbaine. Nantes : Ecole d'Architecture de Nantes, 21 p.
- [Oke 1987] OKE, T.R. (1987). *Boundary layer climates*. London and New York : Methuen, Second edition (first edition 1978), 435 p.
- [Raymond 1999] RAYMOND F. (1999). *Modélisation des effets de la végétation par porosité et pertes de charge dans N3S*. Nantes : CERMA, 23 p.
- [Sanchez Pie 1987] SANCHEZ PIE, R. (1987). *L'Antigone de Ricardo Bofill : forme urbaine et ensoleillement*. Mémoire CEAA Energétique et Architecture Urbaine. Nantes : Ecole d'Architecture de Nantes, 23 p.
- [SERM 1989] SERM (1989). *Antigone 1980 – 1989*. Montpellier : Société d'Equipement de la région de Montpellier (plaquette de présentation du projet), 24 p.

- [SERM 2000] SERM (2000). Montpellier ANTIGONE – 20 ans après le chef d’œuvre de Ricardo Bofill... Montpellier : Société d’Equipement de la région de Montpellier (plaquette de présentation + plan).
- [Sini *et al.* 1996] SINI, J. F., ANQUETIN, S. and MESTAYER, P. G. (1996). Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons. *Atmospheric Environment*, vol 30, n° 5, pp. 2659 – 2677.
- [Stefulesco 1993] STEFULESCO, C. (1993). L’urbanisme végétal. Paris : I.D.F., 323 p.
- [Vinet *et al.* 1999] VINET J., ANTOINE M. J., RAYMOND, F. and INARD, C. (1999). Modelling the impact of urban vegetation to analyse urban microclimate and outdoor thermal comfort. 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].
- [Vinet *et al.* 2000a] VINET J., RAYMOND F. and INARD C. (2000a). A simulation tool to assess the impact of vegetation on the urban microclimate. In : *Proceedings of International Building Physics Conference Tools for design and engineering of buildings*. September 18-21, Eindhoven, pp. 637-644.
- [Vinet *et al.* 2000b] VINET J., RAYMOND F. and INARD C. (2000b). Simulated impacts of trees on heat and wind flows in an urban open space. In : *Proceedings of Third Symposium on the urban environment*, Davis, California, 14-18 August 2000, American Meteorology Society : pp. 137-138.

10 Conclusion

Cette deuxième partie du manuscrit, en s'appuyant sur les connaissances relevées dans la synthèse bibliographique précédemment réalisée, met en avant notre contribution à la modélisation du microclimat urbain et à la caractérisation des conditions de confort en espace extérieur. Le choix de s'appuyer sur des techniques de simulation numérique nous semble tout à fait justifié dans la mesure où la comparaison d'aménagements urbains nécessite d'envisager des situations qui ne peuvent, ni être mesurées sur le terrain, ni extrapolées de situations quasi équivalentes, pour des raisons de complexité et de non-linéarité des transferts de chaleur d'un côté et d'interactions avec la géométrie du site d'autre part.

Nous avons articulé notre discours en trois phases. La première a consisté à présenter la manière dont nous avons mis en place les étapes nécessaires à la réalisation du couplage thermo-aéraulique. La seconde a apporté un certain nombre d'éléments de validation des différentes phases du traitement numérique. Enfin, la troisième a appliqué cette démarche à une étude de cas et a permis de souligner les informations qu'il est possible de recueillir en opérant de la sorte.

Dans le détail, nous avons dans le premier chapitre de cette deuxième partie présenté notre approche pour la modélisation des transferts de chaleur. La simulation des échanges radiatifs de courte et grande longueur d'onde s'insère dans l'environnement de travail du logiciel SOLENE et fait appel à de nouvelles procédures que nous avons été amenés à mettre au point. Les échanges convectifs sont calculés par le code de mécanique des fluides N3S grâce à la résolution des équations de Navier-Stokes. La turbulence est représentée par le modèle $k-\epsilon$ standard, qui peut être soumis à cautions, comme nous l'avons signalé mais apporte un niveau de modélisation suffisant. D'autres modèles peuvent être intégrés, laissant ainsi une opportunité d'améliorer les résultats. La modélisation des échanges conductifs est une des parties que nous dû intégralement reconsidérer de manière à prendre en considération le caractère transitoire du phénomène. Les points que nous avons développés concernent les traitements spécifiques du comportement thermo-aéraulique de la végétation comme sa capacité à transmettre une partie du flux solaire incident, son action sur les écoulements par la prise en compte d'un coefficient de perte de charge et son impact sur les échanges convectifs et radiatifs de grande longueur d'onde en conservant une température moyenne de feuillage proche de celle de l'air.

Ces transferts étant étroitement liés les uns aux autres, une stratégie de couplage a dû être définie. Le traitement numérique des étapes à suivre passe par la modélisation géométrique des entités urbaines et le transfert des données entre les environnements propres aux deux logiciels. La définition des bases de données et la résolution de calculs intermédiaires permettent alors de passer à la simulation en régime transitoire sans couplage dans un premier temps puis avec couplage thermo-aéraulique dans un second temps. A l'issue de ces étapes, l'ensemble des informations nécessaires à l'analyse du microclimat urbain et des conditions de confort associées est disponible.

Le deuxième chapitre concerne les éléments de validation. Cette étape importante dans l'élaboration des logiciels vise à démontrer la pertinence des résultats obtenus en s'appuyant sur les bonnes correspondances avec des travaux de référence ou avec des séries de mesures. Les différentes parties du traitement numérique ont été partiellement testées, en étudiant les comportements aérauliques simulés dans le cas d'une rue canyon (en condition isotherme et anisotherme), et en comparant les températures de surface obtenues par simulation et lors des campagnes de mesure à Athènes. Les modélisations des porosités et des pertes de charge

implémentées dans N3S ont également été mises en confrontation avec des résultats analytiques et de simulations établies par un autre code. Ce travail, bien qu'étant incomplet nous permet d'affirmer que la modélisation des différentes étapes est correctement appréhendée.

Enfin, dans le troisième chapitre un exemple de simulation, basé sur un quartier de Montpellier, a été présenté de manière à illustrer notre discours. De plus, l'évolution temporelle de la végétation présente à l'intérieur de ce site permet de tester les capacités des procédures de simulation que nous avons développées. Les données météorologiques, les modélisations géométriques de la scène et les bases de données sont les points de départ de cette étude de cas. Différents types d'écoulements et différentes orientations sont étudiés en tant qu'analyse paramétrique. Le traitement des calculs en régime transitoire avec couplage thermo-aéraulique est mené jusqu'à son terme selon une des orientations de vent dominant et en respect de l'orientation réelle de la scène. L'impact de la végétation est mis en valeur au niveau des facteurs microclimatiques importants en espace extérieur que sont les apports solaires incidents, les vitesses de vent, les températures de surface et d'air. La caractérisation des conditions de confort est obtenue dans le cas d'un parcours et dans la représentation de l'évolution au cours d'une journée chaude des zones de confort dans la scène.

Les deux logiciels utilisés pour réaliser nos études possèdent les potentialités requises ou ont été développés de telle manière à les acquérir. Cependant, la méthodologie proposée permet de remplacer ces outils numériques par des logiciels offrant des aptitudes équivalentes. De plus, si la démarche générale apporte l'ensemble des informations nécessaire à l'analyse du microclimat urbain et à l'établissement des indices de confort, elle peut être reprise dans d'autres types d'études visant à caractériser les dispersions de polluant ou à quantifier des consommations énergétiques avec une réelle prise en compte des conditions microclimatiques.

Conclusion générale et perspectives

En quelques décennies, la croissance des villes s'est accélérée aussi bien en terme de développement des limites urbaines, qu'en quantité de population. L'interaction entre le climat et la ville est logiquement devenue une des préoccupations les plus importantes. En effet, le climat urbain actuel est fortement perturbé par la structure même de la ville, par les matériaux de surface employés, par la végétation supprimée et par les activités anthropogéniques qui s'y développent. La ville en modifiant le climat agit directement sur les problèmes de santé liés à la pollution et aux vagues de chaleur, sur le confort en espace extérieur et sur la consommation d'énergie dans les bâtiments. Parallèlement, des exemples de propositions d'aménagement en parfaite intelligence avec l'environnement démontrent qu'il est possible de réguler certaines de ces nuisances. L'Exposition Universelle de Séville de 1992 en est un digne représentant qui est à l'origine de notre motivation vis-à-vis de ce type d'investigation. En effet, l'utilisation abondante de végétation et de système de jet d'eau ont permis, non seulement de rendre le cadre plus attractif mais surtout d'améliorer les conditions de visite même lorsque les contraintes climatiques étaient fortes en situations estivales.

C'est dans ce contexte, que ce travail de thèse a été initié, en s'appuyant sur les capacités du laboratoire d'accueil, fortement intéressé par l'analyse des ambiances urbaines et sur l'encadrement proposé par le directeur de thèse à dominante scientifique. A l'issue de ces trois années, un bout de chemin a été parcouru apportant des avancées intéressantes quant aux connaissances acquises sur les différents domaines envisagés de cette étude interdisciplinaire. Notre contribution a permis de développer une méthodologie et des procédures de couplage thermo-aéraulique en régime transitoire dont les applications en microclimatologie urbaine et en confort thermique des espaces extérieurs sont immédiates.

Si nous reprenons la structure du manuscrit, nous pouvons rappeler que cette recherche a nécessité deux phases d'intervention, la première est basée sur une synthèse bibliographique relative à des domaines aussi variés que la microclimatologie urbaine, l'étude des relations entre l'eau, la végétation et la ville, le confort thermique en espace extérieur et la modélisation numérique. La deuxième phase concerne plus spécifiquement notre contribution dans la mesure où nous avons dû concevoir un principe de couplage thermo-aéraulique en régime variable, basé sur deux logiciels aux structures différentes qu'il a fallu interfacer et compléter par la création de programmes. De nombreux développements ont été réalisés et des éléments de validation ont été caractérisés. Une application urbaine a permis d'illustrer notre approche.

Nous essayons dans ce qui suit de souligner une dernière fois, les éléments qui nous semblent les plus importants à retenir au travers des différents chapitres.

Dans cette étude, l'impact de la ville sur le climat a été envisagé à une échelle que nous avons qualifiée de microclimatique. En nous plaçant au niveau de la rue, du quartier, du parc ou du square, les interactions entre l'environnement bâti et le paysage urbain sont immédiates et peuvent induire des phénomènes qu'il est nécessaire de bien comprendre de manière à pouvoir faire des propositions constructives pour diminuer, voire supprimer les conséquences néfastes d'un aménagement non réfléchi. Ainsi, nous avons dû passer en revue les différents phénomènes physiques de transfert de chaleur en milieu urbain. Cette connaissance théorique, a permis de définir certaines notions et a mis en exergue la complexité des échanges présents en ville. En analysant les principaux résultats d'études menées dans le domaine de la microclimatologie urbaine, nous avons pu mettre en évidence le comportement thermo-aéraulique de certaines rues, référencées dans la terminologie anglo-saxonne de « Canyon », et relever certaines spécificités du microclimat comme l'« îlot de chaleur urbain ». Des tentatives de caractérisation de ce phénomène vise à le relier soit à la géométrie des rues soit à la

population. Ces indicateurs n'apportent qu'une vision statistique d'événements critiques et ne permettent pas d'analyser le microclimat urbain dans son ensemble. Les différentes recherches dans ce domaine s'appuient généralement soit sur des campagnes de mesure, soit sur des essais en soufflerie ou soit sur des simulations numériques. Cette dernière technique nous semble la plus intéressante et avant de présenter notre contribution à ce domaine dans la deuxième partie de ce document, nous avons cherché à recenser les outils de simulation les plus adaptés vis-à-vis de nos préoccupations. Les niveaux de complexité différents et des logiciels semblent déjà prêts à passer au stade d'analyse de projet même si de nombreuses hypothèses simplificatrices n'apportent qu'un éclairage partiel de la réalité.

Cette introduction à la microclimatologie urbaine est complétée dans le chapitre suivant, dans lequel nous insistons sur les relations qu'entretiennent la ville, l'eau et la végétation. En guise de préliminaire à la discussion sur l'impact de ces deux éléments naturels du paysage urbain, nous avons tenu à signaler que les dimensions symboliques, historiques et esthétiques soulevées par l'utilisation de ces dispositifs améliorent le cadre de vie au-delà des intérêts liés au climat et aux conditions de confort thermique. Néanmoins, ne pouvant nous attarder sur ces considérations psychologiques sociologiques ou urbanistiques, nous nous sommes concentrés sur le comportement thermo-aérodynamique des parcs, squares et rues dans lesquels l'eau et la végétation étaient présentes. De grandes étendues d'eau comme une rivière agissent fortement sur le climat alors que les sources ponctuelles d'eau n'ont qu'un faible impact sur l'amélioration du microclimat, sauf lors de l'utilisation des systèmes plus complexes de jets d'eau ou de brumisateurs tels ceux utilisés pendant certaines expositions ou dans certains aménagements spécifiques. Enfin, les ordres de grandeur des réductions dues à la végétation au niveau des températures de surface ou d'air, des vitesses de vent et des économies d'énergie ont été synthétisés à partir des nombreuses références bibliographiques étudiées et des hypothèses de travail ont pu être formulées anticipant également la partie concernant la réalisation du couplage thermo-aérodynamique des espaces urbains avec prise en compte du rôle de la végétation.

Le microclimat étant alors appréhendé dans son intégralité par les relations entre le climat, le bâti et la végétation, il était alors possible d'envisager l'interaction entre ce point et l'homme. Ainsi, l'analyse des échanges thermiques entre l'individu et son environnement a permis d'aborder le confort thermique en espace extérieur. Après une présentation des différents paramètres intervenant dans les transferts de chaleur et au niveau de mécanismes de thermorégulation de l'être humain, nous avons rappelé certains indices de confort ou de stress thermique en espace intérieur, et surtout nous avons essayé de présenter des extensions ou des pistes à suivre permettant de caractériser cette notion complexe en extérieur. L'intégration des échanges radiatifs dans la température radiante moyenne est une des possibilités sur laquelle nous avons insisté. Les différents indicateurs proposés pour la caractérisation des situations de confort en extérieur ne doivent pas être considérés comme des éléments validés qui apportent une valeur précise, mais ils doivent servir à des analyses comparatives et paramétriques permettant de mettre en correspondance plusieurs aménagements, afin de retenir celui qui est le plus intéressant.

Cette accumulation de connaissances, dans tous ces domaines, était nécessaire pour passer à l'étape suivante de cette recherche qui correspond à notre contribution. Dans cette deuxième partie du document nous avons essayé de présenter le plus simplement possible la manière dont nous avons réalisé la modélisation du microclimat urbain à l'aide de simulations basées sur un couplage thermo-aérodynamique en régime variable. Cette démarche a été partiellement validée et est illustrée sur l'exemple d'Antigone, en apportant une analyse complète de la modification du microclimat urbain lorsque la végétation évolue et en comparant les conditions résultantes de confort en espace extérieur.

La modélisation des transferts de chaleur présentée dans la première partie du document est intégrée par le développement de programmes s'inscrivant à la fois dans l'environnement d'un logiciel de simulation des échanges radiatifs SOLENE et à la fois dans celui d'un code de mécanique des fluides N3S. Les points que nous avons dû développer pour prendre en compte l'action de la végétation sont largement discutés et reposent eux aussi sur l'analyse réalisée précédemment. Une méthodologie de couplage entre les deux logiciels est proposée et la réalisation de la chaîne de traitement est explicitée étape par étape permettant ainsi à l'utilisateur de recueillir les informations qui lui sont nécessaires ou de s'arrêter à un niveau de complexité dans le couplage qui lui est suffisant.

Plusieurs éléments de validation ont ensuite été exposés. Des bonnes correspondances avec des travaux de référence ou avec des séries de mesure sont constatées pour les comportements aérauliques dans le cas d'une rue canyon (en condition isotherme et anisotherme), pour le traitement des pertes de charge en présence de végétation et pour la détermination des températures de surface. Cette étape nécessaire lors de la mise au point d'un logiciel de simulation doit bien évidemment être complétée mais souligne que certains traitements sont convenablement réalisés.

Enfin, nous avons tenu à illustrer notre démarche de simulation par une étude de cas basée sur un quartier de Montpellier. Cet exemple a été retenu car il apparaissait que des modifications microclimatiques et une amélioration du confort étaient envisageables lorsque la végétation du site allait se développer avec le temps. Pour être en cohérence avec le contexte climatique, nous avons collecté les données météorologiques et nous nous sommes focalisés sur une journée chaude d'été. Cette situation critique devant permettre de vérifier la capacité de régulation due à la végétation. Au-delà des rappels concernant les procédures à suivre pour mener à bien les différentes étapes de simulation, l'analyse des résultats démontre l'impact de la végétation au niveau des apports solaires incidents transmis, des vitesses de vent, des températures de surface et d'air. Nous avons pu ainsi vérifier certains ordres de grandeur proposés dans la littérature et mettre en avant l'intérêt de la simulation avec couplage thermo-aéraulique et en régime transitoire. A l'issue de ces traitements numériques, l'étape ultime consistait à caractériser les conditions de confort dans cet espace ouvert du centre ville. En étudiant le cas d'un parcours dans le site nous avons pu insister sur les variations importantes des températures radiantées moyennes. La représentation de l'évolution au cours de cette journée chaude des zones de confort dans la scène est un outil de représentation qui peut être intégré dans la démarche de projet et qui nous a permis de démontrer l'action des arbres sur le confort thermique en espace extérieur.

Même si de nombreux objectifs de départ sont atteints, de nombreuses améliorations peuvent être implémentées de manière à rendre encore plus précise l'analyse du microclimat urbain. Le temps de la thèse étant limité, celui des regrets est arrivé. Cependant, une recherche sur un sujet aussi vaste que celui abordé ici doit s'envisager sur le long terme et nous pouvons proposer deux types de perspectives à ce travail de thèse.

Le premier type de perspective concerne les améliorations liées à la modélisation numérique. Parmi celles envisageables, nous recensons les points suivants relatifs à l'humidité et à la végétation :

- Prise en compte des transferts latents au niveau du sol pour les surfaces perméables
- Calcul de l'humidité relative (ou spécifique) en chaque maille de la scène
- Diffusion de la vapeur d'eau dans la scène

- Amélioration des températures de surface des feuilles avec la résolution d'un bilan énergétique
- Prise en compte des disponibilités réelles en eau dans le sol
- Calcul des résistances aux différents niveaux de l'arbre grâce à un modèle physiologique adapté selon les types d'arbre.

Le deuxième type de perspective concerne les applications envisageables :

- Des investigations systématiques et paramétriques doivent faciliter la définition et l'évaluation des critères d'efficacité de manière à élaborer un ensemble de règles expertes utiles aux acteurs du projet urbain.
-
- Application à la dispersion de polluant en espace urbain grâce aux procédures de couplage thermo-aéraulique
-
- Couplage avec un outil de calcul d'économie d'énergie comme nous avons pu avoir l'occasion de le faire dans le projet Greencode

Ces orientations représentant un travail conséquent, mais stimulant, des sujets de thèse peuvent être associés et des collaborations envisagées. La microclimatologie urbaine, est un domaine de recherche qui est en plein développement et est amené à croître à l'avenir

Bibliographie générale

ABDESSELAM M., BREJON P., CAMPANA D. *et al.* (1990). Casamo-Clim. Cahier scientifique. Paris : édition AFME.

AKBARI H., DAVIS S., DORSANO S. *et al.* (1992). Cooling our communities – a guidebook on tree planting and light colored surfacing. U.S. Environmental Protection Agency. Office of Policy Analysis, Climate Change Division. Berkeley : Lawrence Berkeley Laboratory, 217 p.

ALVAREZ D. S., CEJUDO L. J.M., GUERRA M. J.J. *et al.* (1992). Control climatico en espacios abiertos, El Proyecto Expo'92. Sevilla: Ciemat, pp.4-49.

ALVAREZ *et al.* (1989). Acondicionamiento climatico de los espacios abiertos en Expo'92. Laminas de agua. Sévlla : Universidad de Sevilla.

ALVAREZ S. *et al.* (2000). Greencode : Reglementary frame for renewable energy use in urban site through vegetation plannings ans strategic surfacing. ALTENER – DG XVII (in press).

ALVAREZ S. SANCHEZ, F. and CORONEL J. F. (1998). Techniques to improve microclimate around buildings. POLIS Final Report, Seville.

ALVAREZ S., BLANCO A., SANCHEZ F.J. *et al.* (2000). Case study X: 'Ensanche de Vallecas'. Greencode : Reglementary frame for renewable energy use in urban site through vegetation plannings ans strategic surfacing. ALTENER – DG XVII (in press).

ANTOINE M.J. 1997. Calcul des températures de parois pour les facettes du modèle géométrique d'un espace ouvert urbain. Contribution à l'établissement d'un modèle microclimatique urbain. Nantes : CERMA, 34 pages.

ANTOINE M.-J. (1999). Comparaison de deux versions d'un algorithme permettant le calcul de températures de surface externes. Contribution à l'établissement d'un modèle microclimatique (suite). Nantes : CERMA, 21 p.

ANTOINE M.-J. and GROLEAU D. (1998). Assessing solar energy and environmental variables in urban outdoor spaces: a simulation tool. In : Proceedings of EuroSolar, 5th European conference on solar energy in architecture and urban planning, Bonn 27 may . Bonn: EUROSOLAR Verlag, pp 108-110.

ARNFIELD, J. *et al.* (1998). A numerical investigation of urban canyon energy budget variations. In : Proceedings of second urban environment symposium and 13th conference on biometeorology and aerobiology, November, 2 – 6. Albuquerque: American Meteorology Society, pp. 2 - 5.

ASHDOWN I. (1994). Radiosity: a programmer's perspective. New York : Wiley.

ASHRAE (1993a). Handbook of Fundamental. Atlanta : ASHRAE, 8.1-8.29.

ASHRAE (1993b). Physiological principles and thermal comfort. ASHRAE handbook of fundamental. Atlanta : ASHRAE, 8.1-8.29.

AVISSAR, R. (1996). Potential effects of vegetation on the urban thermal environment. *Atmospheric Environment*, Vol 30, n 3, pp. 437-448.

BAIK Jong-Jin and KIM Jae-Jin (1999). A numerical study of flow and pollutant dispersion characteristics in urban street canyon. *Journal of Applied Meteorology*, Vol 38, N°9, pp.1249-1261.

BAKER, N. and RATTI, C (1999). Simplified urban climate models from medium-scale morphological parameters. 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].

BELARBI, R. and ALLARD, F. (1998). Atlas of natural cooling techniques in Southern Europe application to evaporative cooling systems. In : *Proceedings of EPIC'98, 2nd European conference on energy performance and indoor climate in buildings and 3rd International conference on indoor air quality, ventilation and energy conservation in buildings*, November 19-21. Lyon : ENTPE, pp. 763 –768.

BERGER, X. (1993) Vêtement et micro-climat : gestion dynamique et modèles d'interfaces. In : *Journées d'études S.F.T 12 mai*, Paris : SFT.

BERGER, X. (1998). Human thermal comfort at Nîmes in Summer heat. In : *proceedings of EPIC'98, 2nd european conference on energy performance and indoor climate in buildings and 3rd international conference on indoor air quality, ventilation and energy conservation in buildings*, November 19-21. Lyon : ENTPE, pp. 201-206.

BOFILL R. (1985). *Taller de Arquitectura. Die Gestaltung der Stadt Industrie und Klassizismus*. Stuttgart: Karl Krämer Verlag, 144 p.

BOTTEMA, M. (1992). *Wind climate and urban geometry*. Eindhoven: University of Technology, 212 p.

BOTTEMA, M. (2000). A method for optimisation of wind discomfort criteria. *Building and Environment* 35, pp. 1-18.

BRINDEL-BETH, S. et TRICAUD, P. (1998). *Isolation thermique et acoustique en résidentiel*. Paris : CFE, 328 p.

BROWN, R. D. and GILLESPIE, T. J. (1995). *Microclimatic Landscape design. Creating thermal comfort and Energy Efficiency*. New york : Wiley J. and Sons, 193 p.

BRUSE, M. and FLEER, H. (1998). Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software*, Vol 13, Issue 3-4, pp. 373-384.

CABANEL, J. In STEFULESCO, C (1993). *L'urbanisme végétal*. Paris : I.D.F., 323 p. (avant-propos, p 9).

CANDAS, V., HERMANN, C. et HOEFT, A. (1991). Le vêtement : écran thermique et outil climatique nécessaire au confort thermique. *Revue générale de thermique* n° 356, p. 359.

CHABARD J.P. and POT G. (1989). An efficient finite element technique for computation of 3D turbulent flows. Paris : Electricité de France (EDF), département Laboratoire National d'Hydraulique.

CHEMILLIER, P. Sciences et Bâtiment, la démarche scientifique appliquée à la construction. Paris : Presses de l'ENPC, CSTB, 447 p.

COOMBES A. J. (1993). Les arbres. Paris : Bordas, 320 p. Collection L'œil Nature. Traduction Isabelle Delvallée.

COWAN I. R., CASTRO I. P. and ROBINS, A. G. (1997). Numerical considerations for simulations of flow and dispersion around buildings. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 67&68, pp. 535-545.

CSTB (1995a). Climatologie générale. Nantes : CSTB, 50 p.

CSTB (1995b). Climatologie urbaine. Nantes : CSTB, 40 p.

De La TORRE, J. M. O. and SERRA, R. (1998). Microclimatic analysis of some urban scenarios. In : proceedings of PLEA 98, Lisbon, Portugal, June 98. London: James & James, pp. 159 – 162.

De SABLET, M. (1988). Des espaces urbains agréables à vivre – Places, rues, squares et jardins. Paris : Moniteur. La végétation urbaine, pp. 127-135

DELAROFF S. et RAZAFINDRAKOTO E. (1994) Projet N3S de Mécanique des Fluides : Description du module de porosité, pertes de charges. Chatou : Département Laboratoire National d'Hydraulique, Groupe Etudes et Recherches en Thermodynamique, EDF. Note HE-41/94/0.23.

DELENNE B. and POT G. (1993). Modelling of the turbulent thermal boundary layer implemented in CFD code N3S and application to flows in heated rooms. Chatou : EDF, HT-32/93-03-A, 14 p.

DELENNE, B (2000). Projet N3S de Mécaniques des Fluides: Modification et étape de validation du modèle de couche limite thermique turbulente dans N3S 3.0. Chatou : EDF, HT-32/92-06A, 8 p.

DEPECKER, P *et al.* (1989). Qualité thermique des ambiances. Paris : AFME, 67 p. Collection cahiers pédagogiques Thermique et Architecture.

DESTOBBELEIRE, G. and IZARD, J-L. (1998). Rôle de la végétation dans le microclimat urbain : utilisation de la thermographie. In : Proceedings of EPIC'98, 2nd European conference on energy performance and indoor climate in buildings and 3rd International conference on indoor air quality, ventilation and energy conservation in buildings, November 19-21. Lyon : ENTPE, pp. 749 – 755.

DUPAGNE A. and TELLER J. (1998). Spherical projections as a communication instrument for morphological decision-making in urban design. In : Proceedings of International workshop on Groupware for urban planning, Lyon, February 4-6.

- EQUIPE ARTOPOS (1997). Morphologie, végétal et microclimats urbains. Cas d'Aix-en-Provence et de Nîmes. Tome 1, le contexte, analyse urbaine. Plan urbain, Ministère de l'Équipement, 52 p (+ fiches).
- ESCOURROU, G. (1981). Climat et environnement, Les facteurs locaux du climat. Paris : Masson, 182 p.
- ESCOURROU, G. (1991). Le climat et la ville. Paris : Nathan, pp. 63-65.
- FANGER, P. O. (1970). Thermal Comfort. New York : Mc Graw Hill.
- FERNANDES E. O., ALMEIDA F. and CARDOSO P. (1998). Energy and environment at EXPO'98 Lisbon. In proceedings of PLEA 98. Environmentally Friendly Cities, Lisbon, Portugal, June 1998. London : James & James, pp. 7 – 12.
- GADILHE A., JANVIER L. and BARNAUD G. (1992) Numerical and experimental modelling of the three dimensional turbulent wind flow through an urban square. In : First International Symposium on Computational Wind Engineering 92. Tokyo : Japan Association for Wind Engineering, pp. 231-236.
- GADILHE A., JANVIER L. and BARNAUD G. (1993). Numerical and experimental modelling of three dimensional wind flow through an urban square. Journal of Wind Eng. And Industrial Aerodynamics 1993, 46&47, pp. 755-763.
- GAGGE, A. P., FOBELETS, A. P. and BERGLUNG, L. G. (1986). A standard predictive index of human response to the thermal environment. Transaction ASHRAE n° PO-86-14, vol. 92-2B, p. 405.
- GALEOU, M., GRIVEL, F. et CANDAS, V. (1989). Le confort thermique : aspects physiologiques et psychosensoriels. Étude bibliographique. Strasbourg : CNRS, 113 p.
- GANDEMER, J. et GUYOT, A. (1976). Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti, Guide méthodologique et conseils pratiques. Paris : Ministère Équipement, 130 p.
- GANDEMER, J et GUYOT, A. (1981). La protection contre le vent. Paris : CSTB, 132 p.
- GAO, W. SUGIYAMA, H. and OJIMA, T. (1995). Field study of effect of street and its trees on thermal environment of sidewalks. Journal of Architecture and Planning Environment Engineering, n° 469, pp. 53-64.
- GIVONI, B. (1976). Man Climate and Architecture. London : Applied Science Publishers, second edition.
- GIVONI, B. (1978). L'homme, l'architecture et le climat. Paris : édition du Moniteur, 460 p. Traduction de J. L. IZARD.
- GIVONI, B (1991). Impact of planted areas on urban environmental quality : a review. Atmospheric Environment Vol n°3, pp. 289-299.
- GLOCKNER S., CALTAGIRONE J.P et MOREL P. (1999). Modélisation des écoulements dans les espaces urbains. Int J. Therm. Sci, 38 pp. 703-711.

- GOMEZ, F. *et al.* (1998). The green zones in bioclimatic studies of the Mediterranean city. In : proceedings of PLEA 98, Lisbon, Portugal june 98. London : James & James, pp. 207 – 210.
- GRIMAL, P. (1990). Un urbanisme de l'eau à Rome. In : Le grand livre de l'eau. Paris : La Cité des Sciences, 15 p.
- GROLEAU, D. et MARENNE, C. (1992). Évaluation géométrique des facteurs de forme dans une scène avec prise en compte des masques et de l'ensoleillement. In : journée d'étude SFT, sur les méthodes de calcul des échanges radiatifs, Paris, 25 mars, 14 p.
- GROLEAU, D. et MARENNE, C. (1992). Simulation numérique des l'ensoleillement dans les projets urbains. In : Séminaire inter chercheur RRIA –1, RRIA – 2. Paris, 8 décembre 1992 et 28 janvier 1993, 13p.
- GROLEAU, D. and MARENNE, C. (1995). Environmental specificities of the urban built forme. In : Proceedings of Rebuild – Rebuild the European city – Integration of renewable energies in established urban structures. Corfou, July 1995, 8 p.
- GROLEAU D., DEGUCHI K. and MARENNE, C. (1997) Evaluation of natural ventilation in traditional japanese dwellings and its possibilities of transposition. In : PLEA 97, Kushiro, January 8-10. Tokyo : PLEA japan committee, vol. 2, pp. 15-20.
- GROLEAU D. (1998). SOLENE – Logiciel de simulation d'ensoleillement et de rayonnement – Guide d'utilisation. Nantes : CERMA, 62 p.
- GROLEAU D. (2000). SOLENE, un outil de simulation des éclairagements solaires et lumineux dans les projets architecturaux et urbains. In : Colloque Artepa, Rouen, février 2000, 8p.
- GROSS, G. (1987). A numerical study of the air flow within and around a single tree. *Boundary-Layer Meteorology*, 40, pp. 311-327.
- GROUPE ABC (1997). Morphologie, végétal et microclimats urbains. Cas d'Aix-en-Provence et de Nîmes. Tome2, les mesures. Plan urbain, Ministère de l'Équipement, pp. 131 - 133.
- GUERRA *et al.* (1994). Control climatico en espacios abiertos: evaluacion del proyecto Expo'92. Sevilla : Grupo de Termotecnia, Universidad de Sevilla.
- GUERRA J. J., ESTEBAN C. J. and MOLINA J. L. (1996). Detailed Modelling of Roof Ponds Including Sprays and Covering. In : Meeting at CIEMAT, Madrid (Spain), December.
- GUILLERME, A. (1983). Les temps de l'eau. Paris : Chauvillon, 263 p.
- GUILLERME, A. (1994). La disparition des saisons dans la ville, les années 1830-1860. Les annales de la recherche urbaine n°61, pp.8-13. Titre du numéro : Les saisons dans la ville
- GUYOT, A. (1988). L'arbre élément du confort vivant. In : actes du colloque : Vivre dehors, confort des espaces publics, Manosque, pp. 71 – 80.
- GUYOT, G. (1996). Climatologie de l'environnement - De la plante aux écosystèmes. Paris : Masson, 505 p.
- HADDAD, Y. (1997). Les arbres d'alignement urbains, un enjeu pour les partenaires multiples. *Les Annales de la Recherche Urbaine*, n°74, pp. 113-118. Titre du numéro : Natures en Villes

HEISLER, G. M (1989). Mean windspeed below building height in residential neighborhoods. In : Proceedings of the workshop on saving energy and reducing atmospheric pollution by controlling Summer heat islands. Berkeley: Applied Science Division LBL, pp. 256 – 272.

HERNANDEZ, M.G. (1987). L'Antigone de Ricardo Bofill : étude aérodynamique. Mémoire CEEA Énergétique et Architecture Urbaine. Nantes : École d'Architecture de Nantes, 21 p.

HESCHONG, L. (1981). Architecture et volupté thermique. Paris : Parenthèses, 93 p.
Traduction : GUILLAUD, H

HOFMANN, J. B. (1994). Ambiances climatisées et confort thermique. COSTIC, 120 p.

HÖPPE, P. (1984). Die Energiebilanz des Menschen, Wiss. Mitt. Meteor. Inst. Univ. München, Nr. 49.

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].

HOUGHTEN, F. C. and YAGLOU C. P. (1923). Determining lines of equal comfort. AHSVE Transaction, Vol 29, p 163.

HOYANO, A (1988). Climatological uses of plants for solar control and the effects on the thermal environment of a building. Tokio Institute of Technology, Japan. Energy and Buildings, 11, pp. 181 - 199.

HUANG, Y. J. *et al.* (1987). The potential of vegetation in reducing Summer cooling loads in residential buildings. Berkeley: University of California, 32 p.

HUMPHREYS, M.A and NICOL J. F. (1998) . Understanding the adaptative approach to thermal comfort. To be published in ASHRAE Transactions.

HUNTER, L. J., JOHNSON, G. T. and WATSON, I. D (1992). An investigation of the three-dimensional characteristics of flow regimes within the urban canyon. Atmospheric Environment, vol 26b, n° 4, pp. 425 – 432.

INARD, C. (1988). Contribution à l'étude du couplage thermique entre un émetteur de chauffage et un local. Etudes expérimentales en chambre climatique. Lyon : Thèse de l'INSA de Lyon, N° d'ordre 88 ISAL 0042, 449 p.

INARD C., DEPECKER P. et Roux J-J. (1997). Un modèle simplifié pour la prédiction du champ de température dans les bâtiments. Revue Générale de Thermique, n° 36, pp. 113-123.

IZARD, J. L. et GUYOT, A. (1979). Archi Bio. Parenthèse, 135 p.

JAYAMAHA *et al.* (1996). Measurement of heat transfer coefficient for walls. Building and environment, vol 31, N°5, pp. 399-407.

JONES, H. G. (1992). Plants and microclimate : A quantitative approach to environmental plant physiology. 2nd Edition. Cambridge : Cambridge University Press, 428 p.

- KANDA *et al.* (1997). Environmental effect of Meiji-Shrine forest as a sink of energy and pollutant – field observation and numerical Simulation by SPAM3. In : Proceedings of International on monitoring and management on urban heat island. Editor: Toshiaki Ichinose. Fujisawa, pp. 69-83.
- KIM Jae-Jin and BAIK Jong-Jin (1999). A numerical study of thermal effect on flow and pollutant dispersion in urban street canyon. *Journal of Applied Meteorology*, Vol 38, N°9, pp. 1249-1261.
- KJELGREN, R. and MONTAGUE, T. (1996). Isolated tree water use in various surfaces. In : Proceedings of the International conference on evapotranspiration and irrigation scheduling, San – Antonio, pp. 250-256.
- KJELGREN, R. and MONTAGUE, T. (1998). Urban tree transpiration over turf and asphalt surfaces. *Atmospheric Environment*, Vol 12, n°1, pp. 35-41.
- KLITSIKAS N., GEORGAKIS C. and SANTAMOURIS M. (2000). Greek case study : the National Park of Athens. Greencode : Reglementary frame for renewable energy use in urban site through vegetation plannings ans strategic surfacing. ALTENER – DG XVII (in press).
- KOBAYASHI, M. H. *et al.* (1994). Numerical study of the turbulent flow over and in a model forest on a 2d hill. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 53, pp. 357-374.
- LARUE, D. (1996). *L'arbre dans la ville*. Paris : édition Sang de la terre et Foncier Conseil, 168 p. Collection écologie urbaine.
- LAVEDAN, P et HUGUENEY, J. (1966). *Histoire de l'urbanisme, Antiquité*. Paris : Laurens, p 63.
- LEMAIRE, R. (1966). Contribution à l'étude du rôle de l'eau dans les échanges thermiques de thermolyse – mécanisme de l'adaptation à la chaleur. Bordeaux, 146 p.
- LEVINSON, R. M. (1997). Near-ground cooling efficacies of trees and high-albedo surfaces. Ph. D. Thesis. Berkeley: Department of Mechanical Engineering, University of California and Environmental Energy Technologies Division, LBNL, 148 p.
- LIU *et al.* (1996). Modelling of turbulent air flow downwind of a model forest edge. *Boundary-Layer Meteorology*, 77, pp. 21-44.
- MAILLET, L. et BOURGERY, C (1993). *L'arboriculture urbaine*. Paris : édition I.D.F., 320 p. Collection Mission du Paysage.
- MALVERTI, X. et PICARD, A. (1994). Les saisons dans la rue. Paris : Les annales de la recherche urbaine, n° 6, , pp. 114-120. Les saisons dans la ville
- MARENNE C. et GROLEAU D. (1992). SOLENE système de simulation et d'interrogation solaire. Nantes : CERMA, 1992.
- MATZARAKIS, A. and MAYER, H. (1998). Investigations of Urban Climate's thermal Component in Freiburg, Germany. In : Proceedings of the Second Urban Environment Symposium and 13th Conference on Biometeorology and Aerobiology, November, 2 – 6. Albuquerque, New Mexico : American Meteorology Society, pp 140 - 143.

MAYER, E. (1985). Untersuchungen von Zeigerscheinungen mit Hilfe physikalischer Messmethoden. *Gesundh.*, n°2, pp. 65-112

MAYER, H. and MATZARAKIS, A (1997). The urban heat island seen from the angle of human-biometeorology. In : Proceedings of International symposium on monitoring and management of urban heat island. Fujisawa, pp. 84 – 95.

MAZRIA, E. (1981). *Le guide de l'énergie solaire passive*. Paris : édition Parenthèse, 333 p. Traduction BAZAN, P, illustrations BALL, R.

MC INTYRE, D. A. (1980). *Indoor Climate*. Londres : Applied Science Publishers.

MEEROW, A. W. and BLACK R.J. (1993). *Enviroscaping to conserve energy: a guide to microclimate modification*. Florida: University of Florida, 9 p.

MESTAYER, P. G. and ANQUETIN, S. (1994). Climatology of cities. In : *Diffusion and Transport of Polluants in Atmosphéeric Mesoscale Flow Fields*. Atmospheric Sciences Library, Kluwer Academic Publishers, pp. 165 - 189.

MIGUET F., GROLEAU D., MARENNE C. (1996). A combined sunlight and skylight tool for microclimatic analysis in urban architectures. In : *Proceedings of the 4th European conference on solar energy in architecture and urban planning*, Berlin, pp. 338-345.

MIGUET F. (1996) *Eclairéments énergétiques et lumineux en milieu urbain*. Nantes : CERMA, 67 p.

MIGUET F. (2000). *Paramètres physiques des ambiances architecturales : Un modèle numérique pour la simulation de la lumière naturelle dans le projet urbain*. Thèse de doctorat de l'Université de Nantes. Nantes : Université de Nantes, octobre 2000, 360 p.

MILLS, G. M. (1993). Simulation of the energy budget of an urban canyon – I. Model structure and sensivity test. *Atmospheric Environment*, Vol. 27 B, n° 2, pp. 157-170.

MILLS, G. M. and ARNFIELD, J. A. (1993). Simulation of the energy budget of an urban canyon – II. Comparison of model results with measurements. *Atmospheric Environment*, Vol. 27 B, n° 2, pp. 171-181.

MISSENARD, A. (1972). Neutralité thermique physiologique. *Thermique et Aéraulique* n°8.

MONTEITH J.L. and UNSWORTH M.H. (1991). *Principles of environmental physics*. New York : Edward Arnold, 291 p.

MOREAU, S. (1999). *Caractérisation et développements aérodynamiques de l'espace intermédiaire en climat tropical humide : Conception d'une architecture de confort adaptée à la contrainte cyclonique*. Thèse de doctorat de l'Université de Nantes, Sciences pour l'ingénieur option architecture, 294 p.

MURET, J. P. *et al.* (1987). *Les espaces urbains – concevoir, réaliser, gérer*. Paris : édition du Moniteur, 364 p.

MUSY, A. et SOUTTER, M (1991). *La physique du sol*. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 335 p. Collection Gérer l'environnement.

- NEVEU A. (1984). Etude d'un code d'évolution théorique d'une enveloppe de bâtiment (MINERVE). Thèse de doctorat, juin 1984.
- NICHOLSON S.E. (1975). A pollution model for street-level air. *Atmospheric Environment*, vol 9, pp. 19-31.
- NISHI, Y. and GAGGE, A. P. (1970). Moisture perméation of clothing – a factor governing thermal equilibrium and confort. *Trans. ASHRAE n° 2135*, vol 80/1, p 120.
- NUNEZ, M. and OKE, T.R (1977). The energy balance of an urban canyon. *Journal of Applied Météorologie*, Vol 16, n 1, January, pp. 11-19.
- OKE, T.R. (1987). *Boundary layer climates*. London and New York : Methuen, Second edition (first edition 1978), 435 p.
- OKE, T.R. (1988). Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Building*, 11, pp. 103-113.
- PARKER, J. H. (1989). The impact of vegetation on air conditioning consumption. In : *proceedings of workshop on saving energy and reducing atmospheric pollution by controlling Summer heat islands*. Berkeley: Applied Science Division LBL, pp. 45 – 52.
- PENEAU, J.P. (1989). SOLENE : un outil au service de l'architecture et de l'urbanisme. *Bâtiment et Énergie*, 57, pp. 30-32.
- PENEAU, J.P. (1991). Some problems relating to the numerical simulation of urban ambient environments. *Environment and Planning B: Planning and design*, 1991, volume 18, pp. 107-117.
- PENICAUD, H. (1978). *Microclimats urbains étudiés sous l'angle du confort à l'extérieur des bâtiments*. Paris : Plan construction, RAUC.
- PENWARDEN, A. D. (1974). Acceptable wind speed in towns. *Building Research Establishment, Current Paper*, 8 p.
- PERRIN de BRICHAMBAUT, Ch. et VAUGE, Ch. (1982). *Le gisement solaire – Evaluation de la ressource énergétique*. Paris : Lavoisier, Tec & Doc, 222 p.
- PICKUP, J and de DEAR, R. 1999. An outdoor thermal comfort index (OUT-SET*). 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].
- PIGNOLET - TARDAN, F. (1996). *Milieu thermique et conception urbaine en climat tropical humide, modélisation thermo - aéraulique globale*. Thèse de l'INSA de Lyon, 246 p (+Annexes).
- PIROTTE A. F., RENOTTE N. (1994). *Etude d'insolation et effet d'ombre, Expo'98 Lisboa, Etude du vent, de l'ensoleillement et des ambiances urbaines*. Liège : LEMA, Université de Liège.
- PRESS W. H., TEUKOLSKY S. A., VETTERLING W. T. *et al.* (1993). *Numerical Recipes in C : The Art of Scientific Computing*. Cambridge: Cambridge University, 2nd edition, 994 p.

- RAESSI, S. and TAHERI, M. (1999). Energy saving by proper tree plantation. *Building and Environment* 34, pp. 565-570.
- RAYMOND, F. (1998a). Etude aérodynamique d'un bâtiment solaire site de Plan-Les-Ouates. Nantes : CERMA, 1998, 36 p.
- RAYMOND, F. (1998b). Introduction d'un modèle de comportement thermique de paroi dans N3S. Nantes : CERMA, 17 p.
- RAYMOND, F. (1999). Modélisation des effets de la végétation par porosité et pertes de charge dans N3S. Nantes : CERMA, 23 p.
- RAYMOND, F. ; MARENNE, C. and GROLEAU D. (1998). Numerical simulation of the air cooling by natural ventilation inside the " Maison Ronde " of Botta. In : Proceedings of EPIC'98, 2nd European conference on energy performance and indoor climate in buildings and 3rd International conference on indoor air quality, ventilation and energy conservation in buildings, November 19-21. Lyon : ENTPE, pp 807-812.
- RAYMOND F., BRANCO G. and LACHAL B. (1999). Numerical simulation of the wind flow on a low energy building. *Wind Engineering into the 21st Century*, Larsen, Larose & Livesey, Balkema, Rotterdam, pp. 1329-1335.
- ROBINETTE, G. (1972). *Plants / people / and environmental quality*. Washington, D. C., Department of the Interior, 140 p.
- ROODBARAKY, H.J *et al.* (1994). Experimental observation of the aerodynamic characteristic of urban trees. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 52, pp. 171-184.
- SACADURA, J. F. (1982). *Initiation aux transferts thermiques*. Paris : Technique et Documentation, 445 p.
- SACRE C. (1983). *Le confort dans les espaces extérieurs : analyse microclimatique*. Nantes : CSTB, 138 p.
- SACRE, C. et GANDEMER, J. (1994). Caractérisation microclimatique des espaces extérieurs, du point de vue du vent et de la température. *Les Annales de la Recherche Urbaine*, n° 61, Les saisons dans la ville.
- SAILOR *et al.* (1992). *Measured impact of neighborhood tree cover on microclimate*. Berkeley: Energy & Environment Division, LBL, University of California, 19 p.
- SAILOR, D. J. (1998). Simulations of annual degree day impacts of urban vegetative augmentation. *Atmospheric Environment*, Vol 32, No 1, pp. 43 – 52.
- SANCHEZ PIE, R. (1987). *L'Antigone de Ricardo Bofill : forme urbaine et ensoleillement*. Mémoire CEAA Energétique et Architecture Urbaine. Nantes : Ecole d'Architecture de Nantes, 23 p.
- SANGKERTADI (1994). *Contribution à l'étude du comportement thermo-aéraulique des bâtiments en climat tropical humide. Prise en compte de la ventilation naturelle dans l'évaluation du confort*. Thèse de l'INSA de Lyon, 275 p.

- SANTAMOURIS M., PAPANIKOLAOU N., KORONAIIS I., *et al.* (1999). Thermal and air flow characteristics in a deep pedestrian canyon under hot weather conditions. *Atmospheric Environment*, vol 33, pp. 4503-4521.
- SAUGIER, B (1996). *Végétation et atmosphère*. Paris : Dominos, Flammarion, p 149.
- SCHIESTEL, R. (1993). *Modélisation et simulation des écoulements turbulents*. Paris : édition HERMES, 442 p.
- SCUDO, G. *et al.* (1998). Microclimatic effect of vegetation in urban squares. Cases studies in Milan. In : *Proceedings of Rebuild*, Florence, April, pp 129 – 132.
- SEGUIN, B (1975). Etude comparée des méthodes d'estimation D'ETP en climat méditerranéen du sud de la France (région d'Avignon). *Annales Agronomiques*, INRA, pp. 671-691.
- SERM (1989). *Antigone 1980 – 1989*. Montpellier : Société d'Equipement de la région de Montpellier (plaquette de présentation du projet), 24 p.
- SERM (2000). *Montpellier ANTIGONE – 20 ans après le chef d'œuvre de Ricardo Bofill...* Montpellier : Société d'Equipement de la région de Montpellier (plaquette de présentation + plan).
- SERRES, L. (1997). *Etude de l'impact d'une perturbation thermique locale de type tache solaire. Influence sur le confort thermique*. Thèse de L'INSA de Toulouse, 148 p.
- SIMPSON, J. R. and Mc PHERSON, E. G. (1998) Simulation of tree shade impacts on residential energy use for space conditioning in Sacramento. *Atmospheric Environment*, Vol 32, No 1, pp. 69 – 74.
- SIMULOG (1997). *Manuel théorique version 3 et 4*. EDF – SIMULOG, 155 p.
- SINI, J. F., ANQUETIN, S. and MESTAYER, P. G. (1996). Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons. *Atmospheric Environment*, vol 30, n° 5, pp. 2659 – 2677.
- SIRET, D. (1997). *Proposition pour une approche déclarative des ambiances dans le projet architectural. Application à l'ensoleillement*. Thèse de doctorat de l'université de Nantes. Nantes : Université de Nantes, juin 1997, 323 p.
- SPRAGUE, C. H. and MUNSON, D. M. (1974). A composite ensemble method for estimating thermal insulating values of clothing. *Trans. ASHRAE*, n° 2299, vol 80/1, p 120.
- STATHOPOULOS, T. *et al.* (1994). Wind shielding effects of trees on low buildings. *Building and Environment*, 29, 2, pp. 141-150.
- STEFULESCO, C. (1993). *L'urbanisme végétal*. Paris : I.D.F, 323 p.
- STOLWIJK, J and HARDY, J. D. (1966). Partitional calorimetric studies of responses of man to thermal transients. *Journal of Applied Physiology*, Vol 21, p. 967.
- SWAID H, Bar-El M. and HOFFMAN M.E. (1993). A Bioclimatic Design Methodology for Urban Outdoor Spaces. *Theoretical and Applied Climatology* 48, pp. 49 – 61.

TELLER J. (1998), "Design tools for outdoor comfort assessment", In : Proceedings of EPIC'98, 2nd European conference on energy performance and indoor climate in buildings and 3rd International conference on indoor air quality, ventilation and energy conservation in buildings, November 19-21. Lyon : ENTPE, 8p.

TELLER J., AZAR S., (1999), "TOWNSCOPE II - A computer system to support solar access decision-making", to be published in Solar Energy Journal.

TIRAOUÏ, L. (2000). Proposition pour une analyse radiative thermique des espaces urbains. Thèse de doctorat de l'Université de Nantes. Nantes : Université de Nantes, mai 2000, 326 p.

TURBELIN G. (1999). Modélisation de la turbulence atmosphérique en vue de l'étude de l'action du vent sur les structures. Choix d'un modèle de turbulence. In : 14^{ème} congrès français de mécanique, 29 août - 3 septembre, Toulouse.

UPMANIS, H. (1998). Daytime Summer temperature differences between a green area and its build-up surroundings in a high latitude city. In : Proceedings of the second urban environment symposium and 13th conference on biometeorology and aerobiology, November, 2 – 6. Albuquerque: American Meteorology Society, pp. 210 - 211.

UPMANIS, H. *et al.* (1998). The influence of green areas on nocturnal temperatures in a high latitude city (Göteborg, Sweden). International Journal of Climatology, 18, pp. 681 – 700.

VIAN, C *et al.* (1983). L'Alhambra de Grenade. Paris : Atlas, 80 p.

VILAIN, M (1993). La production végétale. Deuxième édition, vol 1. Paris : édition Lavoisier, 438 p. Collection Agriculture d'aujourd'hui.

VINET J., ANTOINE M. J., RAYMOND, F. and INARD, C. (1999). Modelling the impact of urban vegetation to analyse urban microclimate and outdoor thermal comfort. 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].

VINET J., RAYMOND F. and INARD C. (2000a). A simulation tool to assess the impact of vegetation on the urban microclimate. In : Proceedings of International Building Physics Conference Tools for design and engineering of buildings. September 18-21, 2000, Eindhoven, pp. 637-644.

VINET J., RAYMOND F. and INARD C. (2000b). Simulated impacts of trees on heat and wind flows in an urban open space. In : Proceedings of Third Symposium on the urban environment, Davis, California, August 14-18, American Meteorology Society : pp. 137-138.

VINET, J. et GROLEAU, D. (2000c). La modélisation des transferts radiatifs dans le logiciel Solene. Applications au microclimat urbain et au confort thermique en espace ouvert. In : 2^{ème} Conférence IBPSA France 2000, Sophia Antipolis, 26 et 27 octobre 2000, pp. 29-35.

VITRUVÉ (1990). Les dix livres de l'architecture. Livre 1. Paris : Les Belles Lettres, traduction de FLEURY, P.

VU THANH CA *et al.* (1998). A numerical model for the urban climate. In : Proceedings of second urban environment symposium and 13th conference on biometeorology and aerobiology, November, 2 – 6. Albuquerque: American Meteorology Society, pp. 6 – 9.

WATANABE, T. (1994). Bulk parametrization for a vegetated surface and its application to a simulation of nocturnal drainage flow. *Boundary-Layer Meteorology* 70, pp. 13-35.

WINSLOW, C.-E. A, HERRINGTON, L. P. and GAGGE, A. P. (1937). Relation between atmospheric conditions, physiological reactions and sensations of pleasantness. *Am. J. Hygiene* 26, pp. 103-115.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (1996). *Climate Urban Development*. Geneva : WMO, n° 844, 24 p.

RESUME en français

Les grandes villes, en période estivale, développent de plus en plus fréquemment certains problèmes liés au phénomène d'« îlot de chaleur urbain », comme les pics de pollution et la surconsommation énergétique due à la climatisation. La minéralisation des villes, en remplaçant la végétation et les zones humides par du béton et de l'asphalte contribue à ces nuisances.

Notre objectif est alors de déterminer l'impact de la végétation et des bassins ou jets d'eau sur le microclimat urbain et sur les situations de confort thermique ressenties par un individu. Cette étude fait appel aux techniques de modélisation numérique.

Dans la première partie, une importante synthèse bibliographique permet de faire le point sur des domaines aussi variés que la microclimatologie urbaine, la simulation, l'urbanisme, l'arboriculture et le confort thermique en espace extérieur. Ces informations sont utiles lors de la mise en œuvre et de l'interprétation des simulations envisagées.

Dans la deuxième partie, nous détaillons la réalisation d'un couplage thermo-aéroulque, basé sur deux outils numériques, SOLENE (logiciel d'ensoleillement et de thermique développé par le CERMA) et N3S (code de mécanique des fluides, développé par EDF). Ce couplage nécessite le développement de programmes spécifiques et de procédures d'interfaçage. Des éléments de validation sur des études de cas référencées, ainsi qu'une comparaison avec des mesures *in-situ* sont présentés.

L'application de cette démarche à une étude de cas urbaine, la Place du Millénaire du quartier Antigone à Montpellier, permet d'analyser l'impact de la végétation sur le microclimat urbain et les conditions de confort en espace extérieur. La comparaison de trois situations, l'une sans végétation, l'autre avec la végétation actuelle et la dernière avec une végétation à taille adulte, démontre une évolution notable au cours des années des conditions microclimatiques et une amélioration sensible des situations de confort.

TITRE en anglais

A contribution to the thermal and aerodynamical modelling of the urban microclimate. Analysis of the water and vegetation impact on the comfort conditions in outdoor spaces.

RESUME en anglais

In summer, temperatures in cities may rise, thereby inducing the so-called « urban heat island » and tremendous consequences on outdoor comfort, health risks, pollutant emission and energy consumption. Replacing vegetation and moist surfaces by concrete or asphalt may enhance these problems

Therefore, the aim of this thesis is to quantify the impact of vegetation and water on urban microclimate and comfort through numerical modelling.

In the first part, a scientific literature review considers various topics applied to our problem such as urban microclimate, simulations, urbanism, urban forestry and outdoor thermal comfort. This information is relevant to define and interpret further numerical modelling.

Numerical simulations based on the coupling of the SOLENE thermal program and the N3S CFD code are proposed to model wind flow, air and surface temperatures. The theoretical principles, hypothesis and coupling methodology are presented here. This set of numerical tools is combined in order to help urban or landscape planners, architects and engineers, to analyse the impacts of different projects on microclimate and on outdoor thermal comfort, under hot summer conditions.

To illustrate this approach, an open space in Montpellier (southern France) called the "Place du Millénaire" and designed by Ricardo Bofill is studied, considering various cases (no vegetation, actual vegetation and vegetation in 30 years). The comparative results demonstrate improvements of urban form, microclimate and outdoor thermal comfort.

DISCIPLINE

Mécanique, Thermique et Génie Civil

MOTS-CLES

Microclimat urbain, végétation, modélisation numérique, couplage thermo-aéroulque, confort thermique.

INTITULE ET ADRESSE DU LABORATOIRE

CERMA, UMR CNRS 1563, rue Massenet, 44300 Nantes, France