



N° d'ordre : .....

Série : .....



**MEMOIRE**  
**POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MAGISTER**  
**OPTION : ARCHITECTURE BIOCLIMATIQUE**

Présenté par : **ZEMOURA Zineddine**

**THEME**

**IMPACT DE LA VEGETATION SUR LE MICROCLIMAT URBAIN**  
**ET LE CONFORT THERMIQUE EXTERIEUR**  
**« Cas des Allées Ben boulaïd à Batna »**

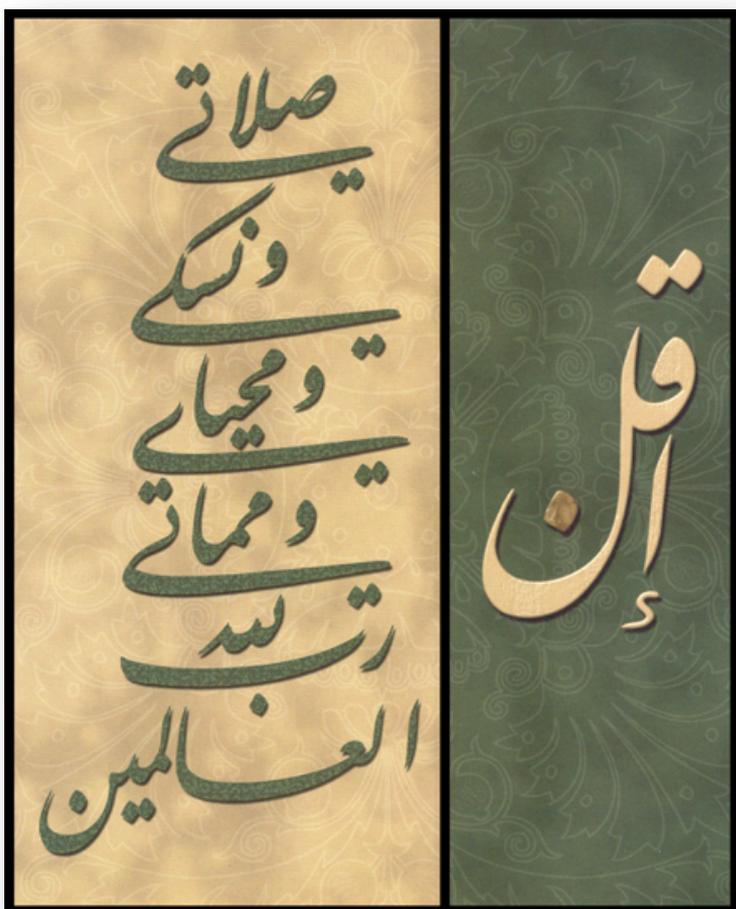
Sous la direction de : **Pr. BOURBIA Fatiha**

**Jury d'examen :**

Dr. ABDOU Saliha	Président	Maître de conférences	Université de Constantine
Dr. BOUCHAHM Yasmina	Membre	Maître de conférences	Université de Constantine
Dr. DEBACHE Samira	Membre	Maître de conférences	Université de Constantine
Pr. BOURBIA Fatiha	Rapporteur	Professeur	Université de Constantine

Soutenue le ..../..../2009







عن أنس بن مالك عن النبي صلوات الله عليه وسلم قال :  
«إز قامت الساعة وفي يد أحدكم  
فسيلة، فإن استطاع أن لا تقوم حتى  
يغرسها فليغرسها»



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## Tables des matières :

---

<b>Introduction générale</b>	
<b>Chapitre I :</b>	
<b>Le confort thermique extérieur</b>	
<b>I.1-Introduction</b> .....	09
<b>I.2-Les paramètres du confort thermique</b> .....	10
I.2.1-Paramètres relatifs à l'environnement.....	10
I.2.2-Paramètres relatifs à l'individu.....	11
I.2.3-Confort en régime transitoire, acclimatation et inertie thermique du corps.....	17
<b>I.3-Les échanges thermiques</b> .....	18
I.3.1-Les échanges radiatifs.....	18
I.3.2-Les échanges convectifs.....	20
I.3.3-Pertes par respiration.....	22
I.3.4-Pertes par diffusion d'humidité à travers la peau.....	23
I.3.5-Pertes thermiques par sudation.....	23
<b>I.4-Les indices de confort thermique</b> .....	25
I.4.1-Les inconforts locaux.....	25
I.4.2-Les indices de confort ou de stress thermique en espace intérieur.....	28
I.4.3-Les indices de confort ou de stress thermique en espace extérieur.....	35
<b>I.5-Conclusion</b> .....	47
<b>Chapitre II :</b>	
<b>L'impact de la végétation sur le microclimat urbain et le confort thermique extérieur</b>	
<b>II.1-Introduction</b> .....	50
<b>II.2-La végétation et la ville</b> .....	51
II.2.1-Dimensions symboliques et esthétiques.....	51
II.2.2-Qualités associées à la végétation.....	52
II.2.3-Dimensions structurelles et composition urbaine.....	54
II.2.4-L'utilisation des arbres dans le projet.....	58
<b>II.3-La végétation comme solution microclimatique</b> .....	61

---

II.3.1-Modification des échanges radiatifs en présence de végétation.....	64
II.3.2-Température de surface des végétaux.....	70
II.3.3-Impact de la végétation sur les températures d'air et de surface.....	72
II.3.4-Impact de la végétation sur les économies d'énergie.....	74
II.3.5-Les effets de la végétation sur les écoulements aérauliques.....	76
II.3.6-Evapotranspiration ; définitions et applications.....	79
II.3.7-Simulation de l'impact des arbres en microclimatologie urbaine.....	91
<b>II.4 Conclusion.....</b>	<b>92</b>
<b>Chapitre III :</b>	
<b>investigation</b>	
<b>III.1-Introduction.....</b>	<b>95</b>
<b>III.2-Situation de la ville de Batna.....</b>	<b>95</b>
<b>III.3-Contexte climatique.....</b>	<b>96</b>
<b>III.4-Présentation du site d'investigation.....</b>	<b>98</b>
III.4.1-Géométrie.....	100
III.4.2-Pollution.....	101
III.4.3-Matériaux.....	102
III.4.4-Typologie végétale.....	103
III.5-Instruments de mesures utilisés.....	106
III.6-Compagne de mesures.....	107
III.6.1-Déroulement de l'investigation.....	109
III.7-Analyse et discussion des résultats obtenus.....	110
III.7.1-Température de l'air.....	110
III.7.2-Humidité relative.....	117
<b>III.8-conclusion.....</b>	<b>122</b>
<b>Chapitre IV</b>	
<b>Simulation</b>	
<b>IV.1-Introduction.....</b>	<b>125</b>
<b>IV.2.Présentation du logiciel Envi-met.....</b>	<b>125</b>

---

IV.2.1.L'architecture du model.....	126
IV.2.2.A quoi sert l'Envi-met?.....	127
IV.2.3. Données d'entrée (Inputs).....	128
IV.2.4. Les sorties (Outputs).....	137
<b>IV.3.Simulation de l'axe étudié.....</b>	<b>138</b>
<b>IV.4.Etude comparative entre les différents paramètres mesurés et ceux simulés.....</b>	<b>141</b>
IV.4.1.Température de l'air.....	142
IV.4.2.Humidité relative.....	151
IV.4.3.PMV.....	160
<b>IV.5-Conclusion.....</b>	<b>171</b>

---

**Conclusion générale**

---

## Liste des figures :

N° de la figure	Titre	
<b>Chapitre I</b>		
<b>Figure I.1.1</b>	Les différents types d'échanges thermiques.....	19
<b>Figure I.1.2</b>	Les pertes thermiques du corps humain.....	19
<b>Figure I.2</b>	Asymétrie du rayonnement et insatisfaction.....	26
<b>Figure I.3</b>	Zone de confort pour la nouvelle Température Effective.....	30
<b>Figure I.4</b>	Correspondance entre le PMV et le PPD.....	33
<b>Figure I.5</b>	Diagramme de confort relatif au PMV.....	35
<b>Figure I.6</b>	Conditions de confort pour un piéton au soleil d'après Penwarden.....	36
<b>Figure I.7</b>	Conditions de confort pour un piéton à l'ombre d'après Penwarden.....	36
<b>Figure I.8</b>	Diagramme de Givoni.....	43
<b>Chapitre II</b>		
<b>Figure II.1</b>	L'Alhambra de Grenade « Paradis ELARIF ».....	50
<b>Figure II.2</b>	Un arbre à différentes saisons.....	51
<b>Figure II.3</b>	Les différents effets de la végétation.....	53
<b>Figure II.4</b>	Autres effets de la végétation.....	53
<b>Figure II.5</b>	Ports d'arbre en ville.....	55
<b>Figure II.6</b>	Dimensions de neufs arbres communs.....	56
<b>Figure II.7</b>	Modification de l'espace grâce à l'espacement entre les arbres.....	57
<b>Figure II.8</b>	Modification de l'espace grâce à la forme des arbres.....	58
<b>Figure II.9</b>	Transmission solaire d'après akbari et al.....	65
<b>Figure II.10</b>	Zones végétales isothermes à 27, 28 et 29°C.....	70
<b>Figure II.11</b>	Modification des transferts de chaleur au tour d'un arbre.....	74
<b>Figure II.12</b>	Economie d'énergie due aux effets directs et indirects des arbres dans trois villes américaine...75	
<b>Figure II.13</b>	Impact microclimatique.....	92
<b>Chapitre III</b>		
<b>Figure III.1</b>	Situation géographique de la ville de Batna.....	96
<b>Figure III.2</b>	Situation de la ville Batna par rapport à la zone climatique d'hiver.....	97
<b>Figure III.3</b>	Situation de la ville Batna par rapport à la zone climatique d'été.....	97
<b>Figure III.4</b>	Situation du cas d'étude dans la ville Batna.....	98
<b>Figure III.5</b>	Localisation du cas d'étude dans le tissu colonial de la ville Batna.....	99

<b>Figure III.6</b>	Vue générale à vol d'oiseau sur le cas d'étude (Axe Nord-Ouest).....	99
<b>Figure III.7</b>	Vue général à vol d'oiseau sur le cas d'étude (Axe Sud-Est).....	100
<b>Figure III.8</b>	Géométrie du cas d'étude.....	101
<b>Figure III.9</b>	Types d'arbres du cas d'étude.....	103
<b>Figure III.10</b>	Troène de Japon.....	104
<b>Figure III.11</b>	Feuillage du Troène.....	105
<b>Figure III.12</b>	Lilas des indes.....	106
<b>Figure III.13</b>	Feuillage du Lilas des indes.....	106
<b>Figure III.14</b>	Appareil de mesures.....	107
<b>Figure III.15</b>	Les différentes stations de mesures.....	109
<b>Figure III.16</b>	Situation de la station météorologique par rapport au cas d'étude.....	110
<b>Figure III.17</b>	Vue aérienne détaillée dur la station « A ».....	112
<b>Figure III.18</b>	Vue aérienne détaillée sur la station « B ».....	113
<b>Figure III.19</b>	Vue aérienne détaillée sur la station « C ».....	114
<b>Figure III.20</b>	Vue aérienne détaillée sur la station « D ».....	115
<b>Chapitre IV</b>		
<b>Figure VI.1</b>	Schéma du programme Envi-met 3.0.....	126
<b>Figure VI.2</b>	Schéma de base des entrées et des sorties du logiciel.....	128
<b>Figure VI.3</b>	Fichier éditeur de l'axe étudié.....	130
<b>Figure VI.4</b>	Modèle d'un fichier de données de base de végétation.....	132
<b>Figure VI.5</b>	Modèle d'un fichier de données de base pour sol.....	135
<b>Figure VI.6</b>	Fichier de configuration de l'axe étudié.....	136
<b>Figure VI.7</b>	Dessin de l'axe étudié avec l'indication des différentes stations.....	139
<b>Figure VI.8</b>	Positionnement des différentes stations (simulées et mesurées) dans l'axe étudié.....	141
<b>Figure VI.9</b>	Le parcours des températures à 2h.....	145
<b>Figure VI.10</b>	Le parcours des températures à 4h.....	145
<b>Figure VI.11</b>	Le parcours des températures à 6h.....	146
<b>Figure VI.12</b>	Le parcours des températures à 8h.....	146
<b>Figure VI.13</b>	Le parcours des températures à 10h.....	147
<b>Figure VI.14</b>	Le parcours des températures à 12h.....	147
<b>Figure VI.15</b>	Le parcours des températures à 14h.....	148

---

<b>Figure VI.16</b>	Le parcours des températures à 16h.....	148
<b>Figure VI.17</b>	Le parcours des températures à 18h.....	149
<b>Figure VI.18</b>	Le parcours des températures à 20h.....	149
<b>Figure VI.19</b>	Le parcours des températures à 22h.....	150
<b>Figure VI.20</b>	Le parcours des humidités spécifique à 2h.....	154
<b>Figure VI.21</b>	Le parcours des humidités spécifique à 4h.....	154
<b>Figure VI.22</b>	Le parcours des humidités spécifique à 6h.....	155
<b>Figure VI.23</b>	Le parcours des humidités spécifique à 8h.....	155
<b>Figure VI.24</b>	Le parcours des humidités spécifique à 10h.....	156
<b>Figure VI.25</b>	Le parcours des humidités spécifique à 12h.....	156
<b>Figure VI.26</b>	Le parcours des humidités spécifique à 14h.....	157
<b>Figure VI.27</b>	Le parcours des humidités spécifique à 16h.....	157
<b>Figure VI.28</b>	Le parcours des humidités spécifique à 18h.....	158
<b>Figure VI.29</b>	Le parcours des humidités spécifique à 20h.....	158
<b>Figure VI.30</b>	Le parcours des humidités spécifique à 22h.....	159
<b>Figure VI.31</b>	Interface du PMV Tool 2.0.....	160
<b>Figure VI.32</b>	Le parcours du PMV à 2h.....	165
<b>Figure VI.33</b>	Le parcours du PMV à 4h.....	166
<b>Figure VI.34</b>	Le parcours du PMV à 6h.....	166
<b>Figure VI.35</b>	Le parcours du PMV à 8h.....	167
<b>Figure VI.36</b>	Le parcours du PMV à 10h.....	167
<b>Figure VI.37</b>	Le parcours du PMV à 12h.....	168
<b>Figure VI.38</b>	Le parcours du PMV à 14h.....	168
<b>Figure VI.39</b>	Le parcours du PMV à 16h.....	169
<b>Figure VI.40</b>	Le parcours du PMV à 18h.....	169
<b>Figure VI.41</b>	Le parcours du PMV à 20h.....	170
<b>Figure VI.42</b>	Le parcours du PMV à 22h.....	170

---

## Liste des tableaux :

N° du tableau	Titre	
<b>Chapitre I</b>		
Tableau I.1	Métabolisme thermique et énergie mécanique.....	14
Tableau I.2	Valeurs des résistances propres $I_{cl}$ de quelques vêtements.....	16
Tableau I.3	Valeurs moyennes (hommes et femmes) des $I_{cl}$ .....	17
Tableau I.4	Echange par convection d'après.....	22
Tableau I.5	Correspondance entre SET sensation et état physiologique.....	29
Tableau I.6	Débit sudoral, mouillure cutanée et confort.....	31
Tableau I.7	Indices DISC.....	32
Tableau I.8	Echelle de Beaufort.....	38
Tableau I.9	Fréquence de nuisance liée à l'activité.....	39
Tableau I.10	Coefficient des vêtements de l'I.C.T.....	41
Tableau I.11	Coefficients $K_{pe}$ .....	42
Tableau I.12	Exemples de PET pour différents scénarios.....	46
<b>Chapitre II</b>		
Tableau II.1	Relations urbanisme-végétation.....	60
Tableau II.2	Coefficient d'extinction pour différentes distributions angulaires des feuilles.....	66
Tableau II.3	Coefficients radiatifs pour des arbres en forêt d'après.....	67
Tableau II.4	Taux de transmission au rayonnement solaire pour différents arbres.....	69
Tableau II.5	Porosité visuelle et aéraulique.....	78
Tableau II.6	Comparaison des évapotranspirations annuelles cumulées.....	88
Tableau II.7	Transpiration d'arbres au-dessus de deux surfaces.....	89
Tableau II.8	Valeurs du coefficient k.....	90
<b>Chapitre III</b>		
Tableau III.1	Récapitulatif des matériaux utilisés dans le site d'investigation.....	103
Tableau III.2	Quelques méthodes de mesures concernant l'étude de l'usage des espaces urbains et la sensation thermique).....	108
<b>Chapitre IV</b>		
Tableau IV.1	Les différents paramètres introduits à l'axe simulé.....	140

**Nomenclature :**

$a$  : Diffusivité thermique [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]

$A$  : Amplitude

$A_{Du}$  : Aire de Dubois [ $m^2$ ]

$c_p$  : Chaleur massique à pression constante [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$C_d$  : Coefficient de perte de charge

$C_., C_{.1}, C_{.2}$  : Constantes du modèle de turbulence  $k - \epsilon$  standard

$d$  : Distance [m]

$D_{.}$  : Diffusivité hydraulique [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]

$e$  : Epaisseur [m]

$e(T)$  : Tension de vapeur saturante à la température  $T$  [Pa]

$E_a$  : Capacité évaporative de l'air [ $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ]

$f$  : 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

$F_{ij}$  : Facteur de forme entre la surface  $i$  et la surface  $j$

$F_{ciel}$  : Facteur de vue du ciel

$F_{cl}$  : Facteur d'isolation des vêtements

$h$  : Hauteur angulaire du soleil [ $^\circ$ ]

$H$  : Hauteur [m]

$h_c$  : Coefficient d'échange par convection [ $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$ ]

$h_e$  : Coefficient d'échange par évaporation [ $W \cdot m^{-2} \cdot Pa \cdot C^{-1}$ ]

$h_r$  : Coefficient d'échange par rayonnement [ $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$ ]

$I_{air}$  : Isolation due à la couche limite de l'air [ $m^2 \cdot ^\circ C/W$ ]

$I_{cl}, R_v$  : Isolation due aux vêtements [ $clo, m^2 \cdot ^\circ C/W$ ]

$j$  : Numéro du jour dans l'année

- $k$  : Energie cinétique turbulente [ $m^2 \cdot s^{-2}$ ]
- $K$  : Coefficient de conductivité totale [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]
- $K_{cl}$  : Coefficient relatif à la vêtture
- $K_f, K_*$  : Conductivité hydraulique [ $m \cdot s^{-1}$ ]
- $K_H$  : 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
- $L$  : Chaleur latente de vaporisation [ $J \cdot kg^{-1}$ ]
- $L$  : Longueur, Longueur de Monin-Obukov [m]
- $M_a$  : Masse molaire de l'air [ $kg \cdot mol^{-1}$ ]
- $p$  : Coefficient relatif à la vêtture
- $p_{ssk}$  : Pression de vapeur saturante au niveau de la peau [Pa]
- $p_v$  : Pression partielle de vapeur [Pa]
- $P$  : Terme de production de •
- $P_a$  : Pression atmosphérique [Pa]
- $Pr, Pr_T$  : Nombre de Prandtl et de Prandtl turbulent
- $q$  : Humidité spécifique [ $kg \cdot kg^{-1}$ ]
- $R$  : Constante des gaz parfaits [ $J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$ ]
- $R_a$  : Résistance aux transferts dans l'atmosphère [ $s \cdot m^{-1}$ ]
- $R_c$  : Résistance aux transferts dans le couvert végétal [ $s \cdot m^{-1}$ ]
- $R_i$  : Nombre de Richardson
- $R_n$  : Rayonnement net [ $W \cdot m^{-2}$ ]
- $R_s$  : Résistance stomatale [ $s \cdot m^{-1}$ ]
- $S$  : Surface [ $m^2$ ]
- $t$  : Temps [s]
- $T$  : Période [s]
- $u, v, w$  : Composantes de la vitesse du vent [ $m \cdot s^{-1}$ ]

$U$  : Module de la vitesse du vent [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

$U_{\text{sol}}$  : Coefficient de chauffage dû au soleil

$v_{ij}$  : Fonction de visibilité entre une surface  $i$  et une surface  $j$

$V$  : Volume molaire [ $\text{m}^3\cdot\text{mol}^{-1}$ ]

$W$  : Largeur (Width) [m]

$y_+$  : distance adimensionnelle

$z_d$  : Profondeur d'amortissement [m]

$Z$  : Altitude [m]

$Z_0$  : Longueur de rugosité [m]

### Températures :

$T_{\text{air}}$  : Température de l'air [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_{\text{ciel}}$  : Température du ciel [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_{\text{cl}}$  : Température des vêtements [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_{\text{confort}}$  : Température de confort [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_{\text{corps}}$  : Température interne du corps [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_f$  : Température moyenne des feuilles [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_{\text{eq}}$  : Température de surface équivalente au soleil [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_{\text{ext}}$  : Température extérieure [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_{\text{in}}$  : Température à l'entrée du domaine [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_{\text{int}}$  : Température intérieure [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_{\text{météo}}$  : Température de l'air à la station météorologique [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_{\text{mrt}}$  : Température radiante moyenne [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_{\text{perm}}$  : Température en régime permanent [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_{\text{rs}}$  : Température résultante sèche [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_s$  : Température de surface [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_{\text{sk}}$  : Température de la peau [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$T_+$  : Température adimensionnelle

### **Flux :**

$D \bullet$  : Irradiation solaire diffuse reçue par une surface horizontale [ $\text{W.m}^{-2}$ ]

$L \bullet$  : Rayonnement de la voûte céleste vers le sol [ $\text{W.m}^{-2}$ ]

$L \bullet$  : Rayonnement du sol vers la voûte céleste [ $\text{W.m}^{-2}$ ]

$M$  : Métabolisme [ $\text{W.m}^{-2}$ ]

$M_{th}$  : Métabolisme thermique [ $\text{W.m}^{-2}$ ]

$S \bullet$  : Irradiation solaire directe reçue par une surface horizontale [ $\text{W.m}^{-2}$ ]

$W$  : Métabolisme mécanique [ $\text{W.m}^{-2}$ ]

$\bullet_{conv}$  : Densité de flux convectif [ $\text{W.m}^{-2}$ ]

$\bullet_{cond}$  : Densité de flux conductif [ $\text{W.m}^{-2}$ ]

$\bullet_{evap}$  : Densité de flux évaporatif (LE) [ $\text{W.m}^{-2}$ ]

$\bullet_{GLO}$  : Densité de flux par rayonnement GLO [ $\text{W.m}^{-2}$ ]

$\bullet_{res}$  : Densité de flux lors de la respiration [ $\text{W.m}^{-2}$ ]

$\bullet_{CLO}$  : Densité de flux par rayonnement CLO [ $\text{W.m}^{-2}$ ]

$\bullet_{trans}$  : Densité de flux de rayonnement transmis [ $\text{W.m}^{-2}$ ]

$\bullet$  : Flux [W]

#### Evapotranspiration :

$E$  : Evaporation [ $\text{g.s}^{-1}$ ]

$E_{sk}$  : Evaporation réelle de la peau [ $\text{W.m}^{-2}$ ]

$E_{max}$  : Evaporation maximale [ $\text{W.m}^{-2}$ ]

$E_d$  : Evaporation par diffusion (perspiration) [ $\text{W.m}^{-2}$ ]

$E_{res}$  : Evaporation lors de la respiration [ $\text{W.m}^{-2}$ ]

$E_{rsw}$  : Evaporation de la sueur régulatrice [ $\text{W.m}^{-2}$ ]

$EP$  : Evaporation potentielle [ $\text{g.s}^{-1}$ ]

$EP^*$  : Evaporation potentielle théorique [ $\text{g.s}^{-1}$ ]

$ET$  : Evapotranspiration [ $\text{g.s}^{-1}$ ]

$ETP$  : Evapotranspiration potentielle [ $\text{g.s}^{-1}$ ]

$ETPc$  : Evapotranspiration potentielle climatique [ $\text{g.s}^{-1}$ ]

ETR : Evapotranspiration réelle [ $\text{g.s}^{-1}$ ]

ETR<sub>m</sub> : Evapotranspiration réelle maximale [ $\text{g.s}^{-1}$ ]

Symboles grecs et latins :

- : Azimut solaire [ $^{\circ}$ ]
- <sub>cl</sub> : Albédo solaire des vêtements
- <sub>sk</sub> : Albédo solaire de la peau
- <sub>sol</sub> : Albédo solaire de la surface
- ' : Coefficient d'excentricité
- : Rapport de Bowen
- : Constante psychrométrique [ $\text{Pa.K}^{-1}$ ]
- : Déclinaison (coordonnée équatoriale) [ $^{\circ}$ ]
- : Pente moyenne de la courbe de tension de vapeur saturante
- T : Ecart de température [ $^{\circ}\text{C}$ ]
- : Emissivité de la surface
- : Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente [ $\text{m}^2.\text{s}^{-3}$ ]
- <sub>th</sub> : Efficacité thermique
- : Constante de Von Karman
- : Conductivité thermique [ $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ]
- : Longueur d'onde [m]
- , •<sub>e</sub>, •<sub>t</sub> : Viscosité dynamique, efficace et turbulente du fluide [ $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ]
- <sub>t</sub> : Viscosité turbulente [ $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ ]
- : Humidité volumétrique [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]
- : Latitude [ $^{\circ}$ ]
- : Masse volumique [ $\text{kg.m}^{-3}$ ]
- <sub>cl</sub> : Coefficient de transmission solaire des vêtements
- : Constante de Stefan-Boltzmann [ $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ ]
- : Ecart-type, turbulence absolue
- <sub>k</sub>, •• : Constantes du modèle de turbulence k - • standard

- : Angle [°]
- : Angle horaire (coordonnée équatoriale) [°]
- : Mouillure cutanée
- : Potentiel hydrique [Pa]

Indices de confort :

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

CIE : Commission Internationale de l'Eclairage

CFD : Computational Fluid Dynamics

CLO : Courte Longueur d'Onde

CLS : Couche Limite de Surface

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



# Introduction générale

✓ **Introduction générale :**

**1-Introduction :**

Aujourd'hui, les modifications climatiques amorcées au XX e siècle deviennent de plus en plus sensibles. Face aux dangers qu'elle représente, l'opinion publique et les décideurs politiques commencent à prendre conscience de la nécessité de protéger le milieu naturel. Aborder l'urbanisme et l'architecture selon une approche respectueuse de l'environnement est une des réponses aux problèmes soulevés lors des sommets internationaux.

En juin 1996, pendant la conférence Habitat II d'Istanbul, les professionnels ont défini ce que pouvait être l'application du développement durable au secteur du bâtiment. Parallèlement, la médiatisation des sommets internationaux et les scandales liés au risques présenté par certains matériaux de construction, tel l'amiante, on suscité l'intérêt croissant de l'opinion publique pour la préservation de l'environnement naturel et la création d'un cadre de vie sain et confortable [Gauzin-Müler 2001].

Le défi majeur de l'urbanisme pour les prochaines décennies, est de trouver un compromis entre le développement inévitable des villes et un environnement urbain de grande qualité [Ali-Toudert 2001].

L'espace public est essentiel dans la qualification de l'espace urbain, la composition urbaine fait de celui-ci un composant fondamental de la ville, les rues et les places sont les lieux où s'expose l'architecture et où se déroule la vie quotidienne des citoyens [Saidouni 2000].

Les espaces publics paysagés, présentent encore d'autres avantages écologiques : Parcs, jardins, arbres et autres offrent en été l'ombrage et rafraîchissent les rues, les cours intérieures et les bâtiments. Sachant que la température des villes est généralement plus élevée d'un ou deux degrés que celle de la campagne, l'effet général d'un paysagisme riche est de réduire les excès de chaleur des villes, et de manière quantifiable le besoin d'air conditionné. Les plantes atténuent les niveaux de bruits et filtrent la pollution, refroidissent l'air ambiant, absorbent le dioxyde de carbone et produisent de l'oxygène – autant

de facteurs qui réduisent le besoin d'air conditionné pour approvisionner en air frais les bâtiments dans des zones urbaines qui, sinon, seraient chaudes et polluées. Les espaces urbains paysagés absorbent la pluie, réduisent le flot des eaux de pluies et d'orages. Le paysage joue un rôle psychologique important dans la ville et peut accueillir une très grande diversité de faune et de flore urbaines [Rogers 2000].

L'espace urbain est à la fois un espace convergeant ayant des éléments internes susceptibles d'attirer les citoyens et un espace divergeant qui impose une certaine relation aux structures urbaines des alentours.

La densité de la fréquentation va dépendre beaucoup plus de son confort "climatique". Peu importe le dessin au sol, le cheminement que les utilisateurs vont créer, obéissent à une logique toujours semblable : au plus court ou plus confortable ou plus agréable. Dans certains cas l'aménagement conçu est adopté alors que dans d'autres, seul un consensus spontané s'établit, on mettant ainsi la trace pré-établie. Ces logiques piétonnières se croisent évidemment avec celles des véhicules qui empruntent les voies qui leur sont réservées, avec leurs points d'arrêt, de stationnement, etc. [Bertrand et al. 1984].

Les espaces urbains, comme les bâtiments, génèrent des ambiances thermiques spécifiques. Ces ambiances peuvent donc être plus ou moins favorables au confort thermique des usagers de la ville. Une conception maîtrisée doit se donner les moyens de contrôler ces ambiances en fonction des usages programmés, et de ne pas confier cela au hasard.

## **2-Problématique :**

La question du confort thermique des espaces urbains n'est pas essentiellement liée au contexte climatique de la ville, mais aussi à la conception urbaine et architectural qui dans la plus part du temps ne s'adapte pas au climat. C'est pourquoi on doit intégrer la notion du microclimat dans chaque opération de conception ou de rénovation.

Ces espaces sont déterminés selon deux plans : Le plancher et les murs, c'est une architecture sans toit, ils s'adaptent aux conditions climatiques grâce aux différents matériaux minéraux et végétaux.

Les paramètres climatiques tels que, la température de l'air, pression atmosphérique, l'humidité relative et les conditions de vent changent en fonction de la structure urbaine de l'espace public ainsi que ces composantes :

L'humidité dépend de l'interaction entre la température de l'air et la température des surfaces qui composent l'espace urbain : les surfaces absorbent la chaleur, l'émettent, la température de l'air augmente (convection) l'humidité relative diminue par la suite à cause de l'évaporation.

Les surfaces exposées aux radiations solaires.

La répartition de zones ombrées et ensoleillées.

L'impact de la végétation qui offre des zones ombrées, introduit des échanges thermiques « latents » susceptibles de modifier la température de l'air ou celle des surfaces, la végétation absorbe efficacement les radiations de longues longueurs d'ondes grâce à ses feuilles.

La qualité thermique est influencée par l'albédo des matériaux qui constituent l'espace urbain (pouvoir d'absorber ou de réfléchir les rayons solaires)

La géométrie de l'espace influe sur la ventilation de ces espaces, l'éclairage ainsi que l'effet radiatif et thermique.

Le comportement thermique est aussi influencé par l'inertie thermique des

parois qui constituent l'espace urbain. L'eau humidifie l'air ainsi réduit la température de l'espace.

Par conséquent, la forme urbaine, la nature des matériaux ainsi que les composants (végétation et eau) influent directement sur la combinatoire microclimatique qui en résulte. La conception des espaces urbains doit intégrer tous ces facteurs d'ambiances. Dans ce cas, Est-ce que les espaces urbains actuels ont réussi cette combinaison ?

Ces espaces souffrent de problèmes de surchauffe estivale très sensibles, surtout dans les climats chauds. Des recherches l'expliquent par le facteur de minéralisation généralisée des zones. Mais, est-ce que c'est le seul facteur ?

Le climat urbain peut être modifié à un niveau du microclimat depuis la densité des constructions, revêtement du sol, hauteur des constructions, orientation, largeur des rues, situation et la présence d'eau.

Comme il peut être modifié grâce à la végétation (ombre, refroidissement, obstruction vent). Malgré le grand rôle de cette dernière on la trouve généralement seulement sous forme de tâches vertes sur les plans de masse. Sa définition son implantation non jamais eu le moindre attention et si on les aborde on se contente de leur rôle esthétique.

Pour démontrer l'impact de la végétation sur la modération du microclimat urbain et le confort thermique, le présent travail prendra les Allées Ben boulaïd comme cas d'étude. Espace urbain (situé dans la ville de Batna, ville de l'Est Algérien), caractérisé par une importante masse végétale. Il abrite certaines activités commerciales et de service. De part sa disposition il représente le noyau de la ville de Batna.

Alors qu'elle est l'apport de la végétation sur le microclimat et le confort thermique de cet espace ?

Qu'elle est l'impact de leurs répartitions et leurs espèces ?

Est-ce qu'il y'a une corrélation entre la densité de fréquentation et la

disposition des arbres ?

### **3-Hypothèses de la recherche :**

Beaucoup de recherches ont démontré le rôle des grandes surfaces vertes dans la modération du climat des villes mais peu sont celles qui ont traité le rôle de la végétation à l'échelle d'un espace urbain. Certains chercheurs pensent que l'effet de la végétation est vraiment considérable lorsque qu'il s'agit d'une surface importante. D'autres pensent qu'avec un seul arbre on peut modifier la température de l'air. Par conséquent nos hypothèses sont les suivantes :

1. Le microclimat urbain est généré à partir des paramètres climatiques génériques, la forme et les composants de l'espace urbain.
2. Le degré de confort peut être aperçu à partir de la densité de la fréquentation.
3. La végétation joue un grand rôle dans l'amortissement des excès de chaleur et la modération du microclimat.
4. Grâce à l'amortissement des radiations solaires et le processus d'évaporation l'arbre joue un rôle dans l'atténuation des températures.
5. La performance de l'arbre est liée à plusieurs paramètres tel que : l'espèce, la densité et l'implantation.
6. A côté des paramètres microclimatiques, le confort thermique est influencé par le facteur adaptation.

### **4-Les objectifs :**

L'espace urbain public est le support des activités citadines, lieu d'échange et de rencontre, moyen d'équilibre physique et psychologique. Sans importance autant qu'élément structurant de la ville exige une disposition de certaines qualités de confort thermiques qui puissent attirer les citoyens. Dans ce sens ce travail convoite les objectifs suivants :

- La revalorisation des espaces urbains en améliorant leurs qualités.
- Faire ressortir les paramètres susceptibles de créer un microclimat confortable dans les espaces urbains.

- Démontrer l'importance de la végétation dans la modération du microclimat et l'amélioration des ambiances thermiques extérieures.
- Le traitement de la question du confort thermique extérieur.
- Les résultats obtenus peuvent être utiles pour les architectes, les urbanistes et paysagistes dans la conception des espaces offrant une meilleure qualité de confort et d'agrément pour les usagers.

## **5-Méthodologie :**

Premièrement, une familiarisation avec les différents concepts propres à l'urbanisme bioclimatique et à notre objet d'étude. Cette première phase sera développée en deux chapitres. Le premier chapitre consiste en une approche théorique sur la notion du confort thermique extérieur et les différentes recherches menées dans cet axe.

Les caractéristiques et le rôle de la végétation urbaine dans la ville vont être développés au cours du deuxième chapitre.

Après avoir acquis toutes les notions élémentaires au cours de la partie théorique la deuxième partie comprendra le troisième chapitre qui consiste en un travail sur terrain qui comporte la prise des mesures relatives aux différents paramètres climatiques.

Le quatrième chapitre comprendra la simulation. L'utilisation d'un logiciel de simulation pour avoir le plus de paramètres et de données. Le logiciel utilisé est l'Envi-met 3.0 conjugué à d'autres programmes qu'on va voir ultérieurement. L'utilisation du logiciel permettra d'étendre la marge de la recherche et de compléter la première phase.

Cette partie implique une corrélation entre les données mesurées ou simulées afin de comprendre l'apport de la végétation sur le microclimat de notre cas d'étude et le confort thermique. L'objectif de cette partie est l'aboutissement à des recommandations utiles à l'intégration de la végétation dans la conception urbaine et architecturale. Ces recommandations vont donner les moyens de contrôle des

ambiances thermiques et de ne pas les laisser au hasard afin d'améliorer la qualité de ces composants urbains.



# Chapitre I

## Le confort thermique extérieur

## **I.1-Introduction :**

Avant de définir la notion de confort thermique 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 1993].

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 investigation, apporter une analyse comparative sur l'impact de l'espaces étudié sur le niveau du confort thermique de l'utilisateur.

## **I.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.

### **I.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.

## **I.2.2-Paramètres relatifs à l'individu :**

### **I.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/m<sup>2</sup>) [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/m<sup>2</sup> [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 35 °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 :

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

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/m<sup>2</sup>. °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 ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  : désodification), alors que la perspiration n'engendre qu'une perte d'eau [Lemaire 1966].

### **I.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 » ( $W$ ) :

$$M = M_{th} + W$$

Le rendement mécanique ( $\bullet_w = W/M$ ) n'excède pas 0,2. Des valeurs du métabolisme sont répertoriées pour différentes activités (Tableau I.1), pour un sujet standard (70 kg et surface de corps  $S_D$  : 1,8 m<sup>2</sup>) [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
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 I.1 : 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 :

$$A_{Du} = 0.202 P^{0.425} H^{0.725}$$

Avec,

P : poids de l'individu [kg]

H : taille de l'individu [m].

L'aire est d'environ 1.8 m<sup>2</sup> 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/m<sup>2</sup> (métabolisme moyen d'une personne assise au repos). L'activité lorsqu'elle est exprimée en met s'écrit parfois « act » dans les bilans.

### **I.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 ( $t_i$  ou  $R_v$ ) est souvent exprimée dans une unité que l'on note clo (1 clo = 0.155 m<sup>2</sup>.KW). 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] :

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

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

On retrouve une formule simplifiée dans la norme ASHRAE55-81 :

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

Les valeurs des isolations thermiques de la plupart des vêtements sont données (Tableau I.2) ainsi que les valeurs moyennes de l'ensemble des vêtements dans des situations courantes (Tableau I.3) [Depecker et al. 1989].

Vêtements d'hommes	I <sub>cl.</sub> 104	Vêtements de femmes	I <sub>cl.</sub> 104
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	sandaes	30
Chaussures	/	escarpins	60
sandaes	30	bottes	125
mocassins	60	/	/
bottes	125	/	/

Tableau I.2 : Valeurs des résistances propres  $l_{cl}$  de quelques vêtements [Depecker *et al.* 1989]

Été $R_v$ ( $m^2 \cdot C/W$ )	Printemps – Automne $R_v$ ( $m^2 \cdot C/W$ )	Hiver $R_v$ ( $m^2 \cdot C/W$ )
0.08	0.109	0.158
0.166	0.213	0.225

Tableau I.3 : Valeurs moyennes (hommes et femmes) des  $l_{cl}$  [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] :

$$E_{\text{vêtu}} = F_{pcl} \cdot E_{nu}$$

$$F_{pcl} = 1 / (1 + 0.143 h_c l_{cl})$$

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] :

$$F_{cl} = 1 + 0.77 I_{cl}$$

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]

### **I.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 m<sup>2</sup>, le taux d'élévation de la température moyenne du corps (en K/s) est défini en fonction du taux de stockage de chaleur (S):

$$\frac{dT_{\text{corps}}}{dt} = 7.4 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{S}$$

Ainsi, la température de corps augmente de 1 K en 1 heure avec un taux de stockage de 38 W/m<sup>2</sup> [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].

### **I.3-Les échanges thermiques :**

#### **I.3.1-Les échanges radiatifs :**

Les échanges thermiques entre l'individu et son environnement (Figure I.1.1 et Figure I.1.2) 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).

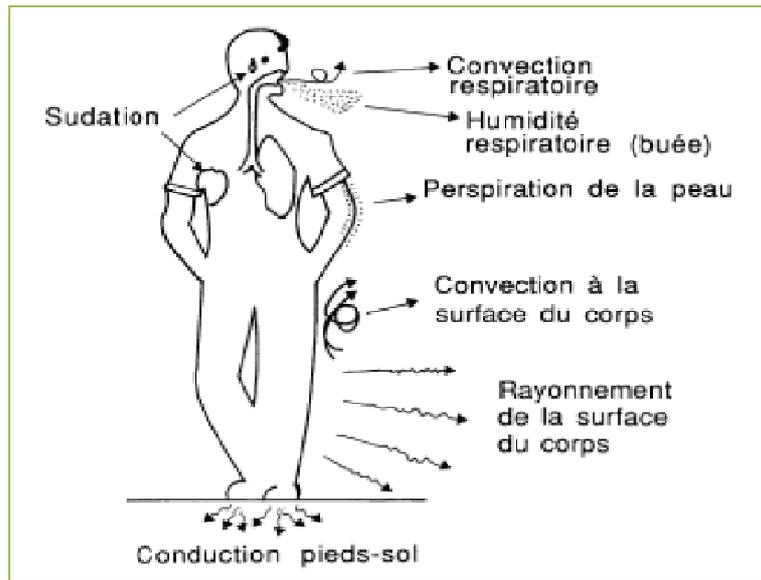


Figure I.1.1 : Les différents types d'échanges thermiques [Depecker et al. 1989]

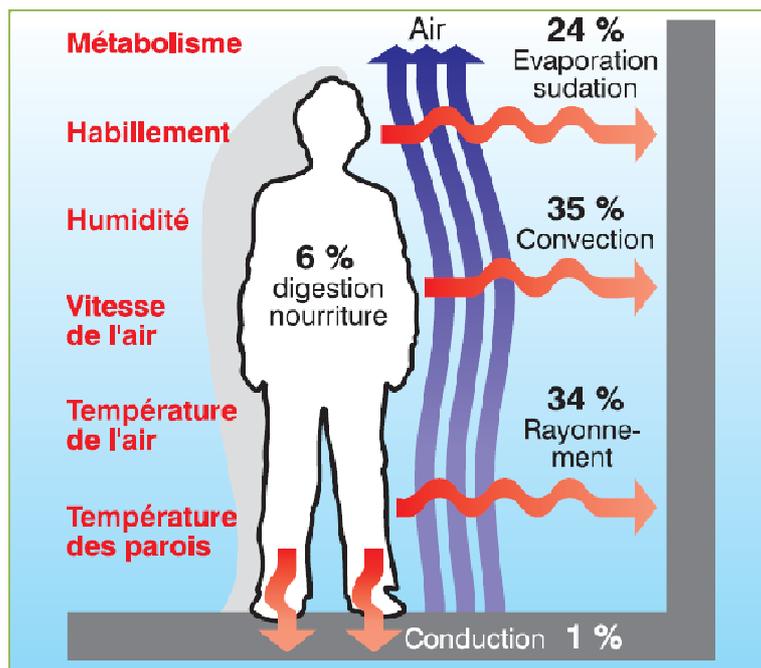


Figure I.1.2 : Les pertes thermiques du corps humain [Liébard et al. 2005]

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

$$M = \varphi_{\text{CLO}} - \varphi_{\text{conv}} - \varphi_{\text{GLO}} - E_{\text{dif}} - \varphi_{\text{res}} - E_{\text{res}} - E_{\text{rsw}}$$

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

### **I.3.2-Les échanges convectifs :**

#### **I.3.2.1-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 :

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

Dans cette équation  $F_{\text{eff}}$  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,  $\varepsilon$  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  $t_{\text{mrt}}$  équivaut à 22 °C, les pertes par rayonnement sont égales à 18 W/m<sup>2</sup> [Hofmann 1994].

#### **I.3.2.2-Rayonnement de courte longueur d'onde :**

Ce flux de chaleur inclut la fraction de l'énergie du rayonnement solaire incident ( $S$ ) qui est directement absorbée par la peau :

$$\varphi_{\text{CLO}} = ((1 - \alpha_{\text{sk}}) * \tau_{\text{cl}} * S_{\downarrow}) / F_{\text{cl}}$$

Avec  $\tau_{\text{cl}}$  le coefficient de transmission du vêtement,  $\alpha_{\text{sk}}$  l'albédo solaire de la peau et  $F_{\text{cl}}$  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.

### **I.3.2.3-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 :

$$\Phi_{\text{conv}} = f_{cl} h_c (T_{cl} - T_{\text{air}})$$

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

$$\text{En convection naturelle : } h_c = 2,28 (T_{cl} - T_a)^{0,25}$$

$$\text{En convection forcée : } h_c = 12,1 U^{0,5}$$

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 I.4 [Penicaud 1978]).

Vitesse de vent (U en m.s <sup>-1</sup> )	U < 0.1	0.1 < U < 2.4	2.4 < U
Echange par convection (W.m <sup>2</sup> )	2.05 f <sub>cl</sub> (T <sub>cl</sub> - T <sub>a</sub> ) 1,25	10.4 f <sub>cl</sub> V <sup>0,5</sup> (T <sub>cl</sub> - T <sub>a</sub> )	8 f <sub>cl</sub> V <sup>0,8</sup> (T <sub>cl</sub> - T <sub>a</sub> )

Tableau I.4 : 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.

### **I.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 m<sup>2</sup>. 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.

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

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

Avec, M en W/m<sup>2</sup>, T<sub>air</sub> et HR<sub>a</sub> la température sèche et l'humidité relative de l'air, et Pv(T<sub>air</sub>) la pression de vapeur d'eau à la température Ta exprimée en kPa

### **I.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] :

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

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]

### **I.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. La

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 % la 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 :

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

Le coefficient d'échange thermique par évaporation  $h_e$  ( $W/m^2.Pa$ ) 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 :

$$h_e = Lr \cdot h_c$$

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» ( $E_{dif} + E_{rs}$ ), s'écrit :

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

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

$$\omega = E_{sk} / E_{max}$$

#### **I.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).

##### **I.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.

#### **I.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 I.2), l'asymétrie de rayonnement est liée 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.

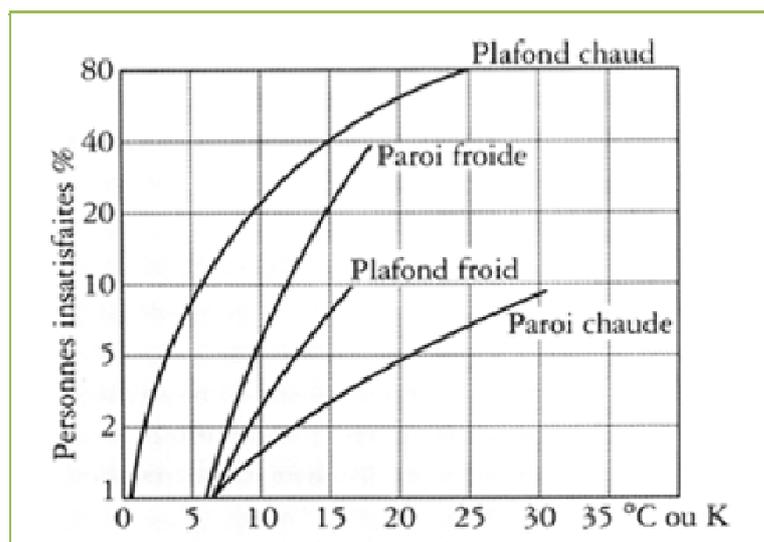


Figure I.2 : Asymétrie du rayonnement et insatisfaction

### **I.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].

### **I.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].

### **I.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 [Chemillier 1986]. Dans la norme ISO 7730-93, une équation relie le pourcentage d'insatisfaits (PD) aux caractéristiques du courant d'air [Hoffmann 1994] :

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

Avec :

$T_{\text{air}}$  : température d'air

$U$  : vitesse moyenne de l'air

- : 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.

#### **I.4.2-Les indices de confort ou de stress thermique en espace intérieur:**

##### **I.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 :

$$T_{rs} = \frac{T_{mrt} + T_{air}}{2}$$

Lorsque l'air s'écoule à une vitesse  $U$ , d'au moins 0,1 m/s, l'expression devient [Hofmann 1994]:

##### **I.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 I.3) 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 I.5) [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 I.5 : 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].

$$I_{cl} = \frac{1.33}{M - W + 0.74} - 0.095$$

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.

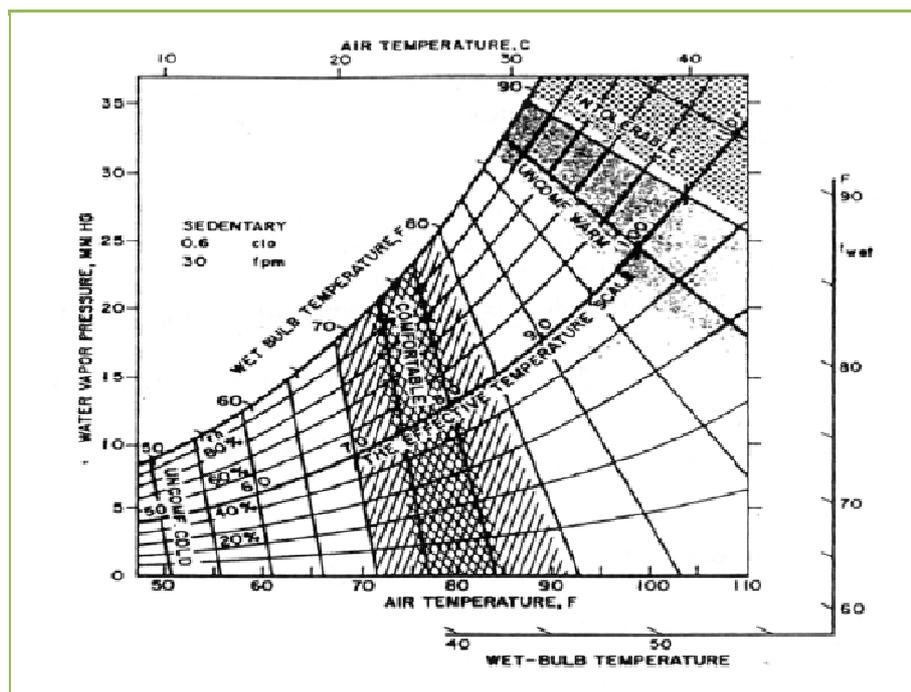


Figure I.3 : Zone de confort pour la nouvelle Température Effective [Hofmann 1994]

### I.4.2.3-Les indices DISC :

Parmi les indices de stress thermique basés sur la mouillure cutanée ( $\omega$ ) 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] :

$$DISC = 5 \frac{\omega - \omega_0}{\omega_{crit} - \omega_0}$$

L'inconfort est mesuré sur une échelle allant de 0 à 5 : 0 à la neutralité (celle-ci correspondant à une mouillure  $\omega_0$  qui n'est voisine de 0 qu'au repos et qui augmente avec le métabolisme), 5 quand la mouillure atteint le point critique  $\omega_{crit}$  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 I.6 d'après [Sangkertadi 1994]) :

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

Tableau I.6 : 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 I.7 d'après [Pignolet 1996])

Auteurs	Met	Clo	Equations
Gonzalez (1978)	3	0.5	DISC = 2.4 • - 0.1
Berglund (1984)	1	0,4 – 0.9	DISC = 4.13 • + 0.013
Cunningham (1985)	1	0,4 – 1.2	DISC = 5.06 • + 0.09
Hoeppe (1985)	1 et 5	0,64	DISC = 3.6 • + 0.25
Sangkertadi (1994)	1,1	0,5	DISC = 3.938 • + 0.0158 Esd – 0.3348

Tableau I.7 : 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].

#### **I.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 :

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

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

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).

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 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  $\pm 2$  ou  $\pm 3$  sur l'échelle de 7 points de l'ASHRAE (Figure I.4).

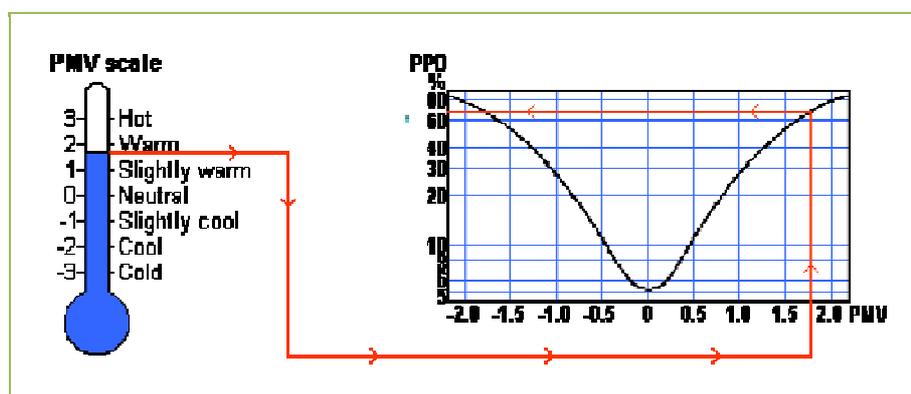


Figure I.4 : Correspondance entre le PMV et le PPD (d'après <http://www.innova.dk/books/thermal/thermal.htm>)

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 I.5). 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.

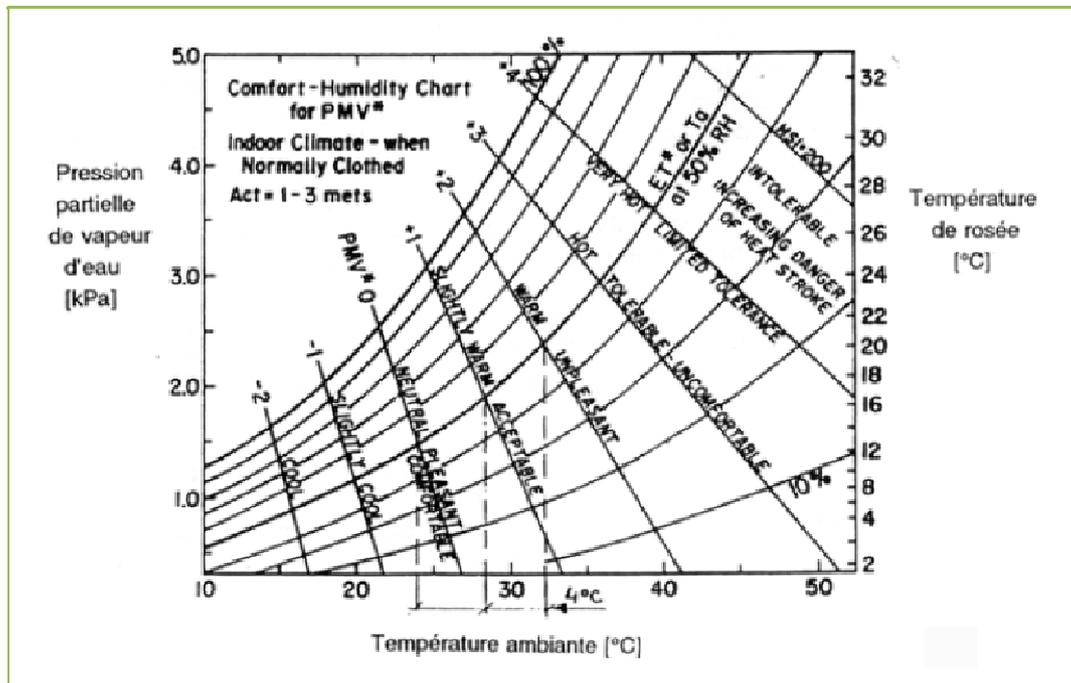


Figure I.5 : Diagramme de confort relatif au PMV [Hofmann 1994]

#### **I.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 I.6 et Figure I.7) [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].

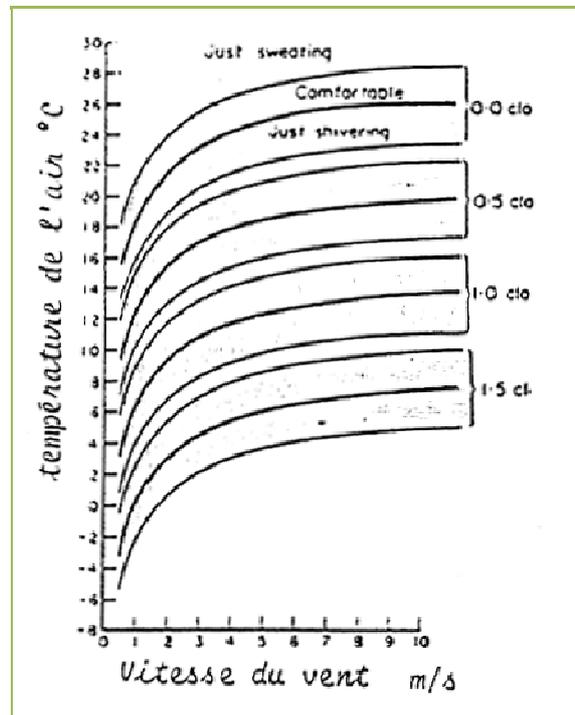


Figure I.6 : Conditions de confort pour un piéton au soleil d'après Penwarden [Sacré 1983]

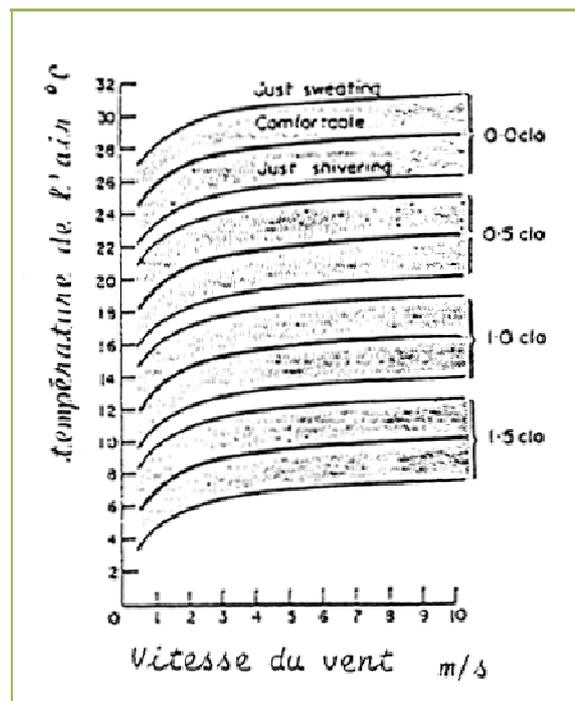


Figure I.7 : Conditions de confort pour un piéton à l'ombre d'après Penwarden [Sacré 1983]

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.

#### **I.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 I.8) 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 I.8 : 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 ( $\bullet$ ), 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] :

$$v = \bar{U} + \sigma$$

Le seuil de nuisance communément admis à 1.5 m du sol est de 6 m/s

$$(\bar{U}_s = 5 \text{ m/s}, \sigma_s = 1 \text{ m/s})$$

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,  $v > U_s$ . Dans sa forme générale, le groupement nuisance lié à l'action dynamique du vent prend la forme :

$$v = \overline{U} + \gamma \sigma$$

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  $\gamma = 3,5$ . Il y a nuisance « sécurité » chaque fois que  $v > U_s$  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 I.9). La fréquence  $F$  peut s'exprimer en pourcentage du temps (durée pendant laquelle le niveau  $v$  dépasse le seuil de nuisance  $U_s$ ) 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 I.9 : Fréquence de nuisance liée à l'activité [Gandemer *et al* 1976].

### **I.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 ( $\phi_{net}$  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:

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

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

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  $L \cdot$  le rayonnement atmosphérique GLO reçu sur un plan horizontal [Penicaud 1978] :

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

### **I.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 :

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

Avec :

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

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

Le flux convectif ( $\bullet_{conv}$ ) s'exprime ici en kcal/h,  $\bullet$  est un coefficient sans dimension fonction de la tenue vestimentaire (Tableau I.10), 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			
	$\bullet$	$K_{cl}$	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 I.10 : 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 :

$$R = S_{\downarrow} \sinh K_{pe} K_{cl} [1 - a (U^{0.2} - 0.88)]$$

Avec :

$S_{\bullet}$  : intensité solaire en kcal/h

$K_{pe}$  : coefficient dépendant de la position et du site (Tableau I.10);

$K_{cl}$ ,  $a$ : coefficients dépendant de la tenue vestimentaire (Tableau I.11);

$U$  : 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 I.11 : Coefficients  $K_{pe}$  [Givoni 1978]

Le diagramme de Givoni (Figure I.8) 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.

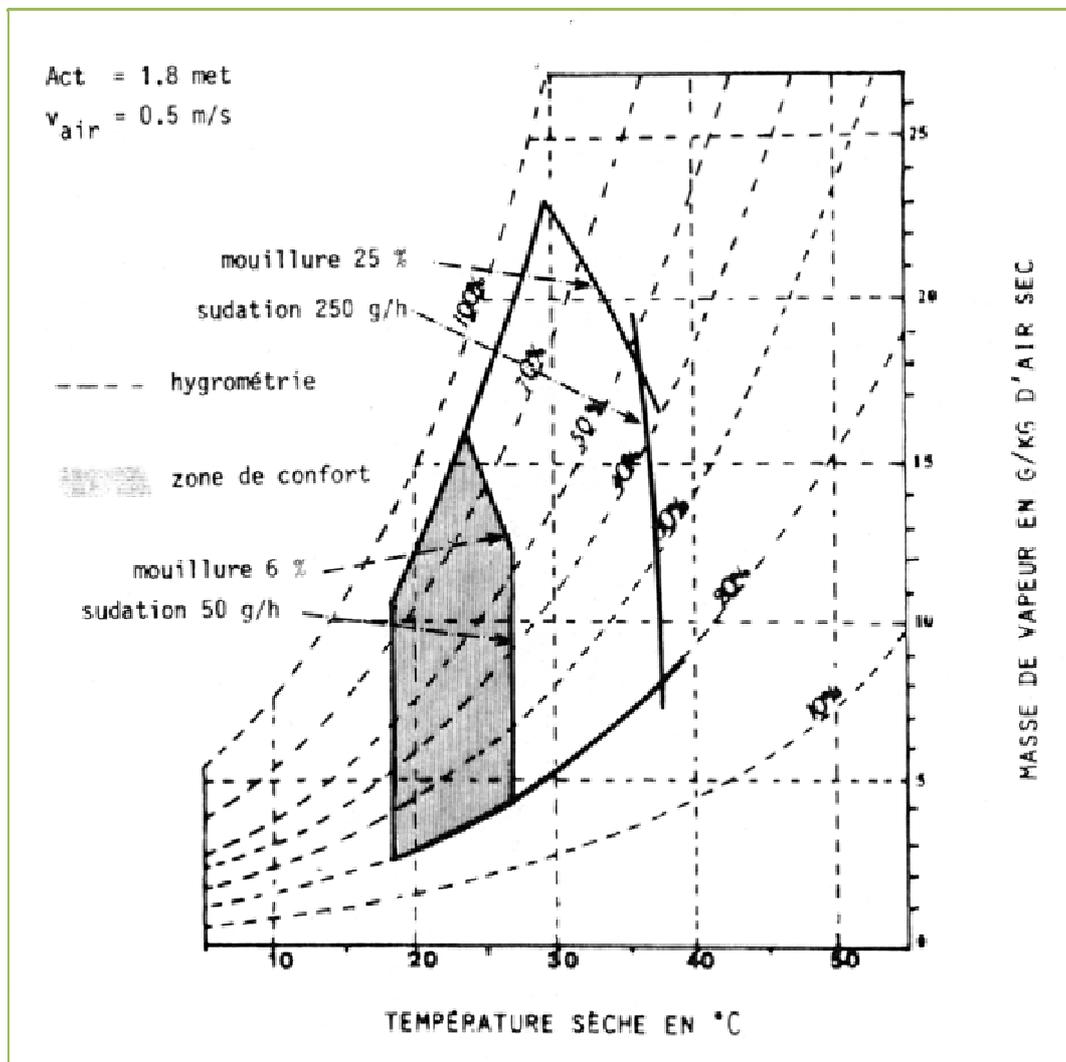


Figure I.8 : Diagramme de Givoni

La limite inférieure de  $1/f$  est 1.0. Ainsi, la peau est sèche aussi longtemps que le rapport  $\bullet = E/E_{\max}$  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 :

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

#### I.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 ( $\phi$ ), 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  $\bullet$  PMV la variation de PMV due à la présence d'apport solaire  $\bullet$  :

$$\Delta PMV = A' \frac{\phi}{1 + Coef1 + Coef2}$$

Avec :

$$Coef1 = 1.875 F_{cl} \sqrt{U} I_{cl}$$

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

$$A' = 0.303 \cdot e^{-0.36M} + 0.028$$

L'auteur donne un exemple de modification du PMV, en considérant un homme debout ( $F_{eff} = 0,95$ ), au repos ( $M = 70 \text{ W/m}^2$  soit  $A' = 0,0524$ ), en tenue d'été ( $I_{cl} = 0,5 \text{ clo}$  soit  $f_{cl} = 1,1$ ,  $\bullet = 0.9$ ), dans une ambiance à  $27 \text{ }^\circ\text{C}$  et une vitesse d'air de  $0,1 \text{ m/s}$ . Il obtient :

$$\Delta PMV = 0.0295 \phi$$

Ce qui signifie que pour un flux de  $40 \text{ W/m}^2$  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]

#### I.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  $80 \text{ W}$  à ajouter au métabolisme de base, et résistance des vêtements de  $0.9 \text{ clo}$ ) 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 noeuds 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  $43^\circ\text{C}$ . Cela signifie qu'un individu dans une pièce avec une température d'air de  $43^\circ\text{C}$  atteint le même état thermique que dans ces conditions en extérieur. S'il avait à se déplacer à l'ombre le PET diminuerait de  $14^\circ\text{C}$  pour atteindre une valeur de  $29^\circ\text{C}$  (Tableau I.12).

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

Tableau I.12 : Exemples de PET pour différents scénarios [Hoppe 1999]

#### **I.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 noeuds 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 ( $\bullet$ ) 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  $\bullet$  sont fortement corrélées avec l'inconfort subjectif dans des environnements froids et chauds respectivement.

#### **I.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 :

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

Le modèle considère le corps humain à une température unique (température de la peau), c'est un modèle à un seul noeud. 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.

### **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.

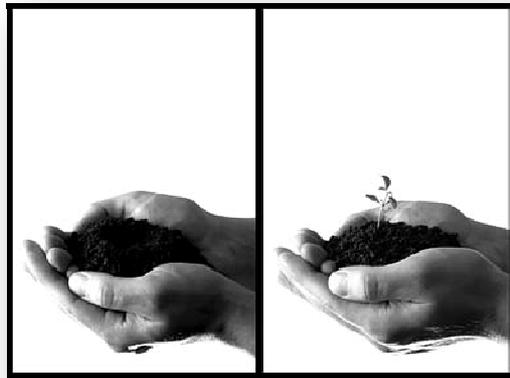
Les paramètres usuels (température de l'air, humidité, vitesse de vent, température radiante moyenne, activité, vêtements) interviennent dans les nombreux échanges thermiques entre l'individu et son environnement. L'équilibre de ce bilan conduit à la définition de certains indices, d'autres mettent en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



## Chapitre II

L'impact de la végétation  
sur le microclimat urbain et  
le confort thermique  
extérieur

## **II.1-Introduction :**

Le thème des relations 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 aux 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 végétation - ville envisage certes de rappeler ces différents points, mais vise avant tout à démontrer la capacité d'action régulatrice de cet élément naturel 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.

La représentation islamique du paradis inclut un jardin des plaisirs. A ce titre, les jardins et les palais de Grenade nous offrent une quantité de site où le rôle de la végétation abondante (Figure II.1) est conséquent sur les ambiances perçues.

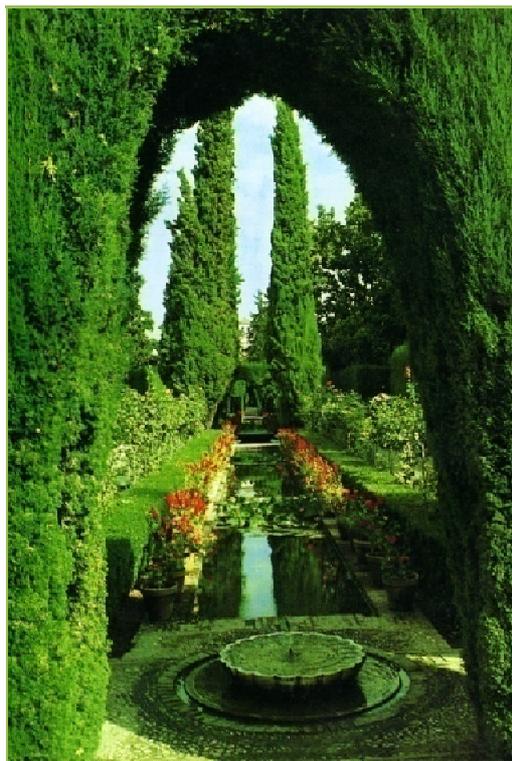


Figure II.1 : L'Alhambra de Grenade « Paradis EL ARIF » [M<sup>ed</sup> Alwarfali 1990]

## **II.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.

### **II.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 II.2). 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 II.2 : Un arbre à différentes saisons [Auteur 2008]

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.

### **II.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 (Figure II.3 et Figure II.4): 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.

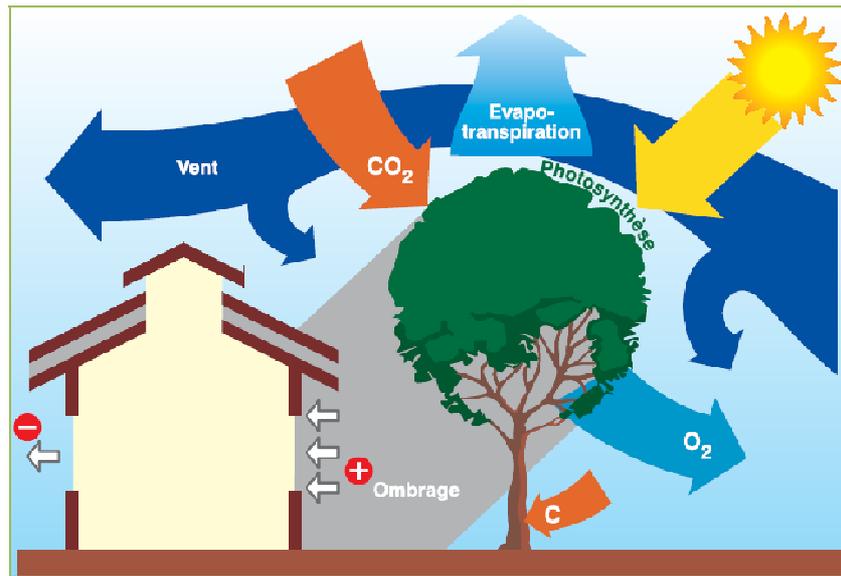


Figure II.3 : Les différents effets de la végétation [Liébard et al. 2005]

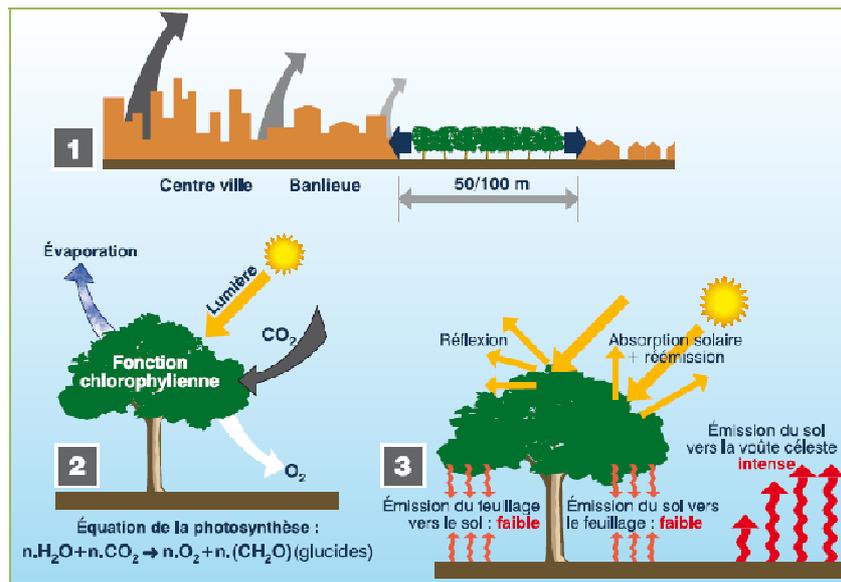


Figure II.4 : 1- Effet d'humidification : une bande de végétation suffisante peut créer une baisse de t° de 3,5 °C et une augmentation de 5 % de l'humidité relative, 2-Effet d'oxygénation, 3-Action d'absorption et de réémission du rayonnement solaire [Liébard et al. 2005]

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.

### **II.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 II.5 [Larue 1996])

:

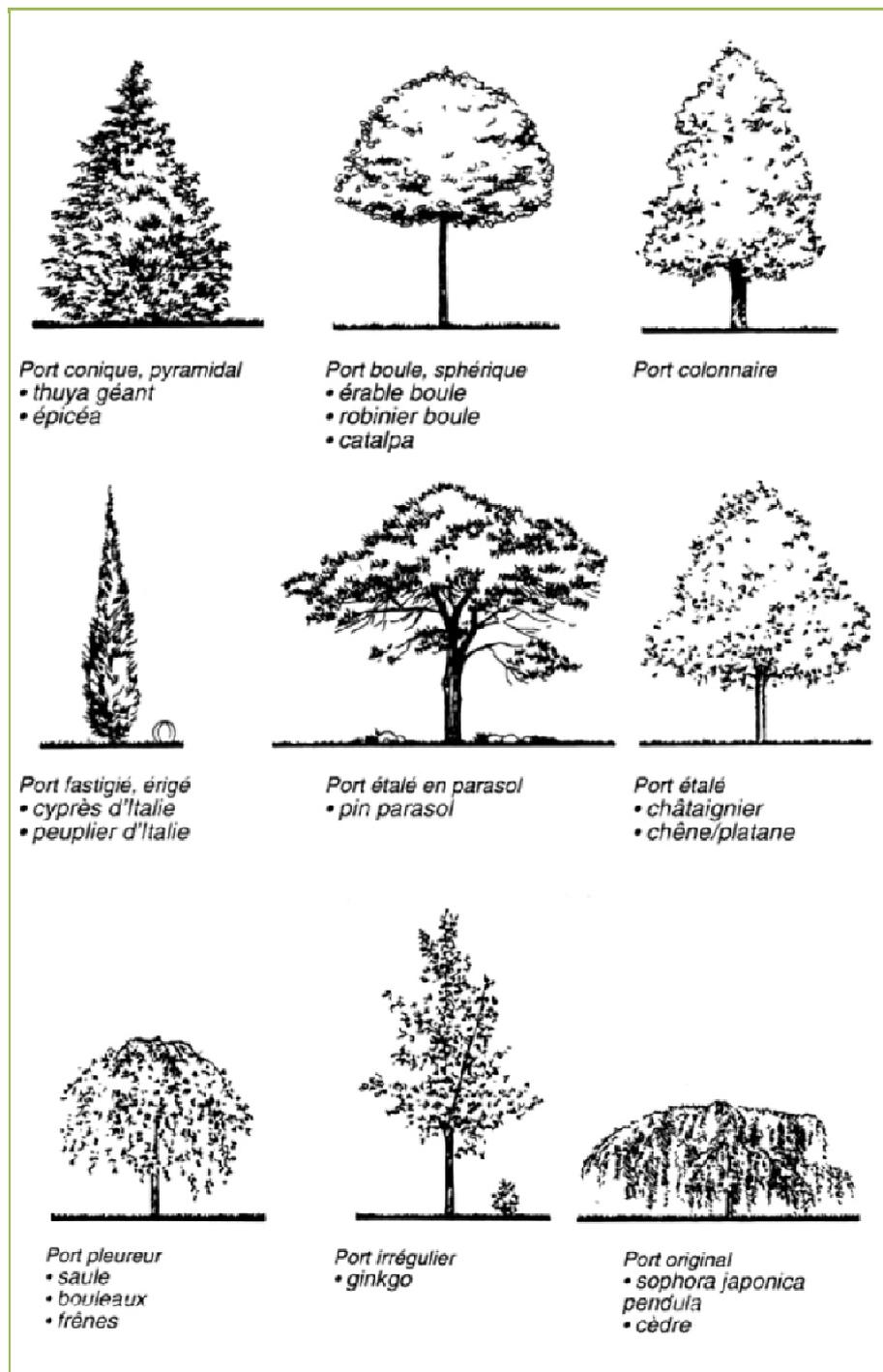


Figure II.5 : Ports d'arbre en ville [Larue 1996]

Les dimensions des arbres sont des paramètres importants 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.

Dans la figure suivante (une flèche vaut 5 mètres) à l'échelle, neufs arbres parmi les plus communs en indiquant les hauteurs maximales du tronc et l'arbre en entier à taille adulte (Figure II.6). Les dessins indiquent de plus l'image de l'arbre en été et en hiver [Coombes 1993].

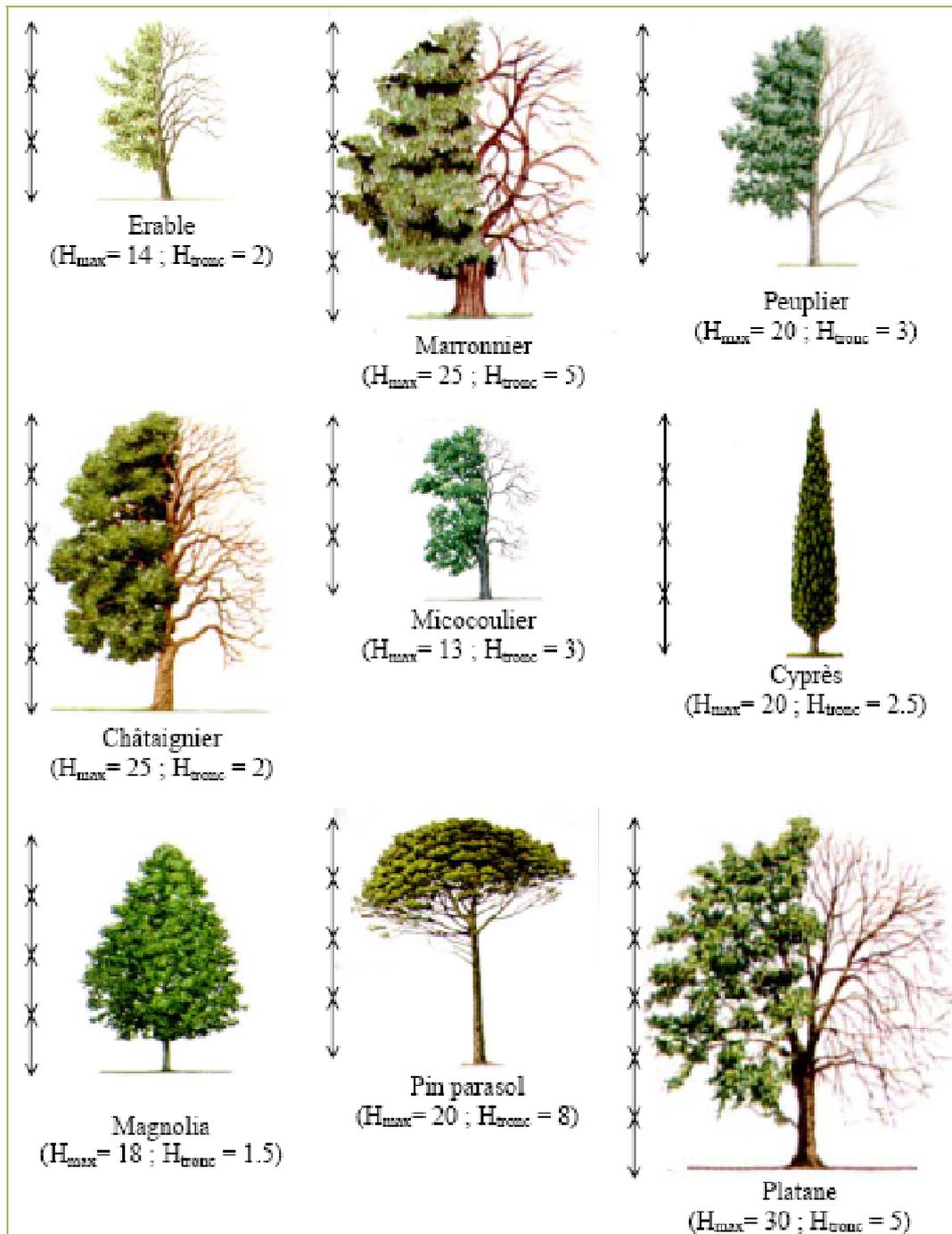


Figure II.6 : Dimensions de neuf arbres communs [Vinet 2000]

Le groupement et la composition des arbres entre eux ont parfois pour fonction de créer des effets spatiaux (Figure II.7 et Figure II.8). 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].

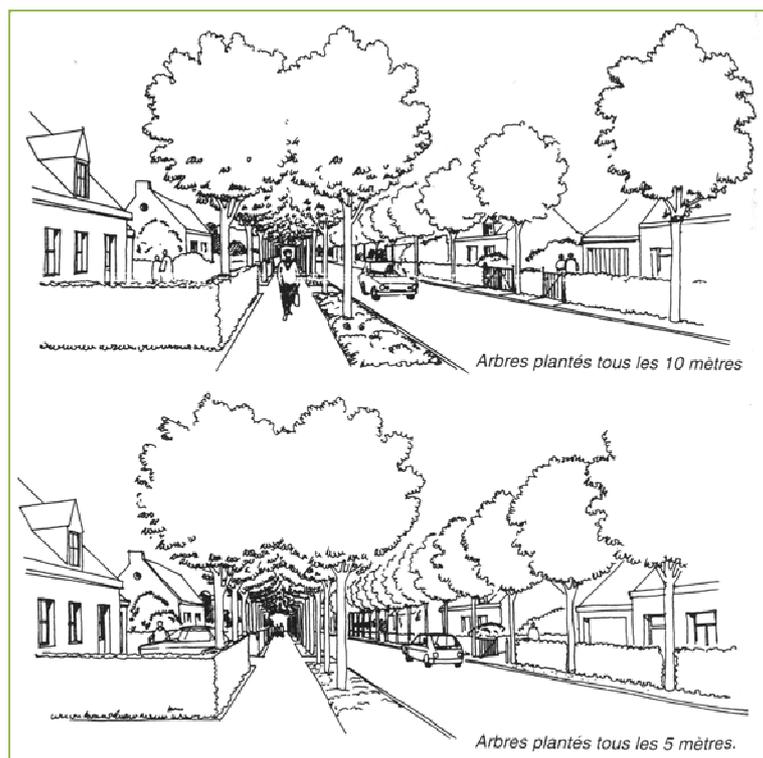


Figure II.7 : Modification de l'espace grâce à l'espacement entre les arbres [Larue 1996]

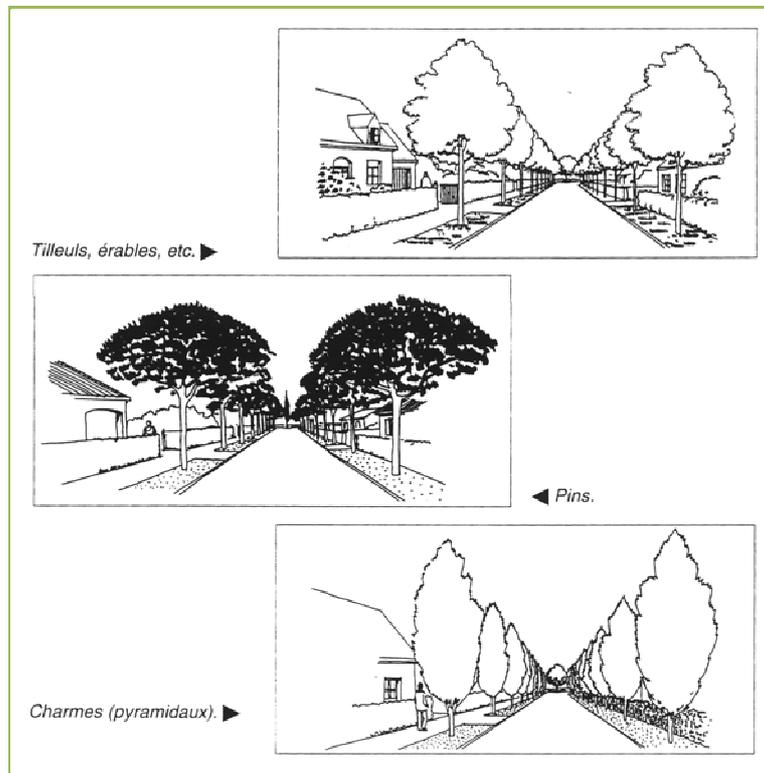


Figure II.8 : Modification de l'espace grâce à la forme des arbres [Larue 1996]

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.

#### **II.2.4-L'utilisation des arbres dans le projet :**

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<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> siècle.

Hausmann 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 remarqués 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 II.1).

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	Réseaux d'accès aux quartiers de faible densité	Végétation plus ou moins décidée, pergolas, plantes décoratives
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 terrepleins
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 II.1 : 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.

### **II.3-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.

### **II.3.1-Modification des échanges radiatifs en présence de végétation :**

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 photosynthèse. 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, •) 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 II.9) 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.

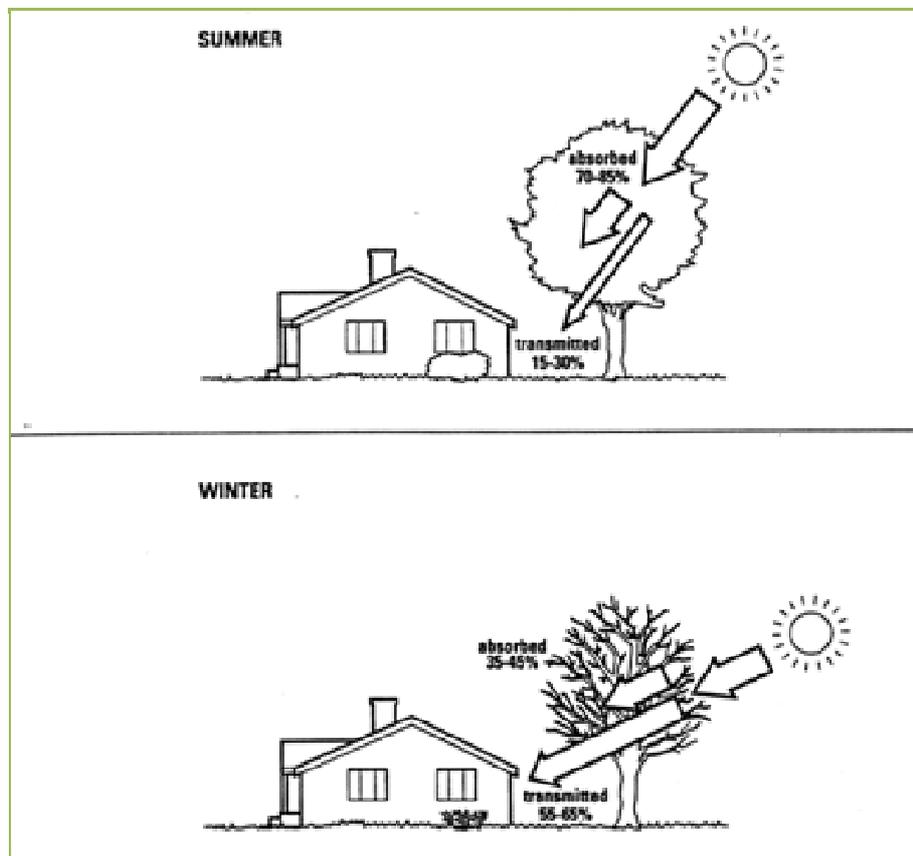


Figure II.9 : Transmission solaire d'après [Akbari et al. 1992]

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 •m] (plus de 10 %) et les infrarouges [0,7 à 1,1 •m] (plus de 50 %). Cette retransmission sélective selon les longueurs d'onde explique la dominante verte que l'œil perçoit de la forêt. Les feuilles absorbent 90 % des UV et une grande partie des infrarouges [> 2 •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 :

$$\Phi = \Phi_0 \cdot e^{-kx}$$

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 :

$$\Phi = \Phi_0 e^{-kLAI}$$

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	$k = (2 \cot \theta) / \theta$
Sphérique	$k = 1 / (2 \sin \theta)$
Ellipsoïdale	$k = (x^2 + \cot^2 \theta) / (2 \theta)$
Diahéliotropique	$k = 1 / \sin \theta$

Tableau II.2 : 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  $A \cdot (x + 1,774 (x+1,182)^{-0.733})/x$

La décomposition du rayonnement a été mesurée en site forestier pour certaines espèces d'arbre (Tableau II.3). 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 II.3 : 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 II.4). 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 (%)	Foliati on	Défoliati on	Hauteu r 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

<b>Platanus acerifolia</b>	Platane	11-17	46-64	T	M-T	30-35
<b>Populus deltoides</b>	Peuplier	10-20	68	P	M	23-30
<b>Quercus rubra</b>	Chêne	12-23	70-81	/	M	13-30

Tableau II.4 : 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 tâche 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 tâche d'ombre la part d'énergie qui atteint les surfaces.

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].

### **II.3.2-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  $465 \text{ W/m}^2$ , sont les mêmes à  $1^\circ\text{C}$  près, l'écart n'étant que de  $2^\circ\text{C}$  pour un rayonnement de l'ordre de  $930 \text{ W/m}^2$ . Dans les illustrations suivantes, nous confirmons ce résultat (Figure II.10). Les températures de surface observées dans l'infrarouge, indiquent les zones de la couronne végétale de l'arbre qui sont à  $27$ ,  $28$  et  $29^\circ\text{C}$  dans le cas où celui-ci est dans un air à  $28^\circ\text{C}$  et soumis à un ensoleillement important correspondant à celui d'une journée claire d'été [Alvarez et al. 2000].

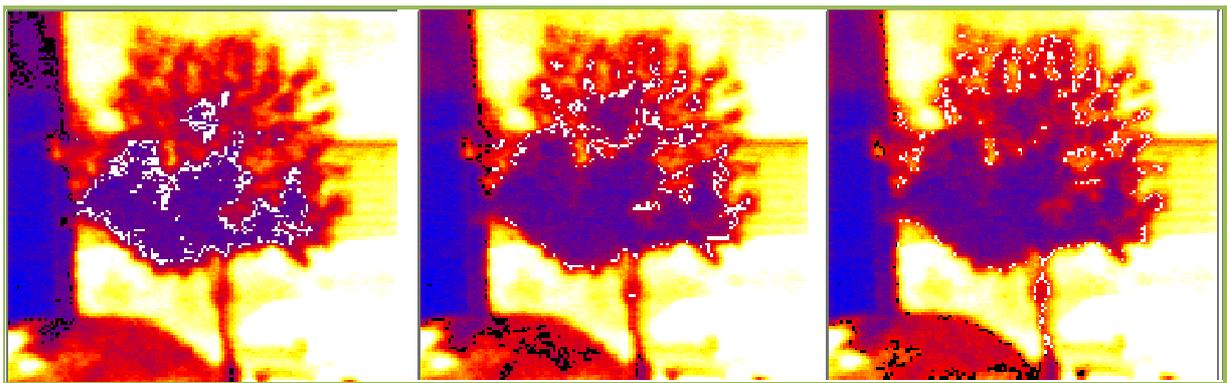


Figure II.10 : Zones végétales isothermes à  $27$ ,  $28$  et  $29^\circ\text{C}$  [Alvarez et al. 2000]

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 audessus 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<sup>-3</sup>.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].

### **II.3.3-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.

#### **II.3.3.1-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.

### **II.3.3.2-Les rues et 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, 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 [Kjelgren 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,



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 II.12). La valeur de ces économies d'énergies en rafraîchissement est alors comprise entre 100 et 250 \$ par an et par ménage.

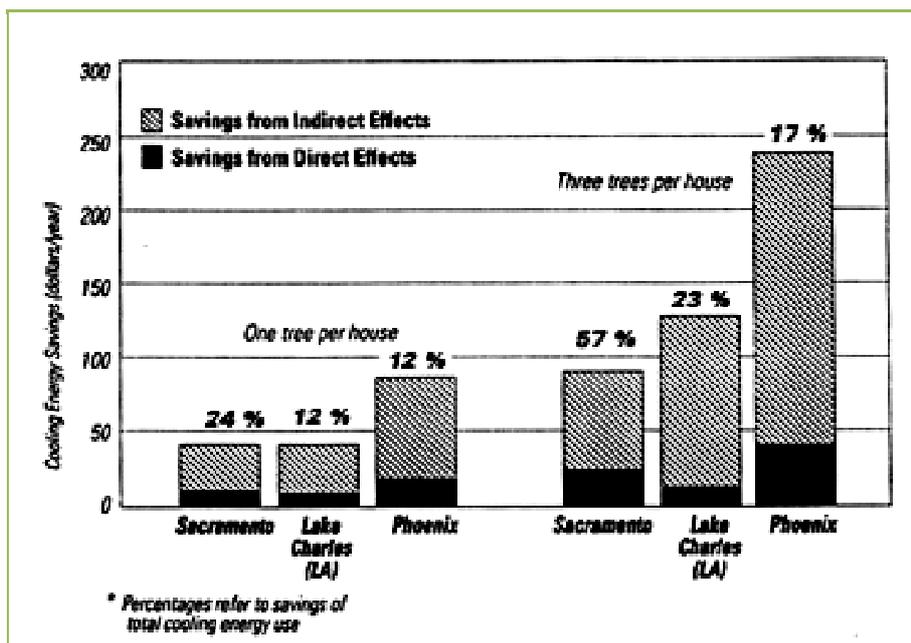


Figure II.12 : Economie d'énergie dues aux effets directs et indirects des arbres dans trois villes américaines [Akbari et al. 1992]

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.

### **II.3.5-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 oeuvre 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 % ( $\pm 5$  %) pour un vent parallèle aux rues et de 20% ( $\pm 20$  %) pour un vent en travers [Bottema 1992].

### **II.3.5.1-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 II.5). 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 II.5: Porosité visuelle et aéraulique (d'après [Gandemer *et al.* 1981])

### **II.3.5.2-Pertes de charge :**

La notion de perte de charge (Cd 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].

### **II.3.6-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 (ETR<sub>m</sub>) est la valeur de l'ETR lorsque la résistance stomatale du couvert est minimale (même lorsque les stomates des plantes sont largement ouverts, l'ETR<sub>m</sub> ne peut jamais atteindre la valeur de l'évaporation potentielle). Il existe cependant un cas particulier pour lequel l'EP est égale à l'ETR<sub>m</sub> : 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.

### **II.3.6.1-Bilan d'énergie et d'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 ( $\phi_{conv}$ ), soit reconvertis sous forme de chaleur latente ( $LE$ ) ou soit dégradés sous forme de chaleur par le sol et transmis par conduction ( $\phi_{cond}$ ) ou stocké ( $S$ ). Le principe de conservation de l'énergie appliqué à une canopée s'écrit alors :

$$R_n - \phi_{conv} - LE = M + \phi_{cond} + \Delta S$$

### **II.3.6.2-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  $W/m^2$ . Le bilan, pour une surface humide à l'équilibre peut alors s'écrire :

$$R_n = LE + \phi_{conv}$$

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 :

$$EP^* = \frac{\Delta \frac{R_n}{L} + \gamma E_a}{\Delta + \gamma}$$

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  $W/m^2$ .  $\Delta$ , 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  $T = (T_s + T_{air})/2$ . Elle est calculée grâce à l'expression suivante:

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

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 :

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

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 :

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

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

On obtient :

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

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

Il est intéressant de retenir le résultat avec cette formulation :

$$EP = \frac{EP^*}{1 + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \frac{R_c}{R_a}}$$

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 :

$$ETR = \frac{EP^*}{1 + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \frac{R_c + R_s}{R_a}}$$

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 :

$$ETR_m = \frac{EP^*}{1 + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \frac{R_c + R_{s,min}}{R_a}}$$

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 :

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

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] :

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

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] :

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

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].

### **II.3.6.3-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 (ETPc) 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'ETPc estimées à partir des formules de Thornthwaite, Blaney et Criddle, Turc, Penman et Brochet et Gerbier, aux valeurs de ETRm mesurées avec un évapotranspiromètre (Tableau II.6).

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 II.6 : 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 sousestime 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].

#### **II.3.6.4-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 II.7). 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		Érable 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 II.7 : 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 liée à l’évapotranspiration potentielle par la formule suivante :

$$E = kETP *$$

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

Végétation	Commentaires	Rapport <i>k</i>
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)

Tableau II.8: 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.

### **II.3.7-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 II.13) 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.

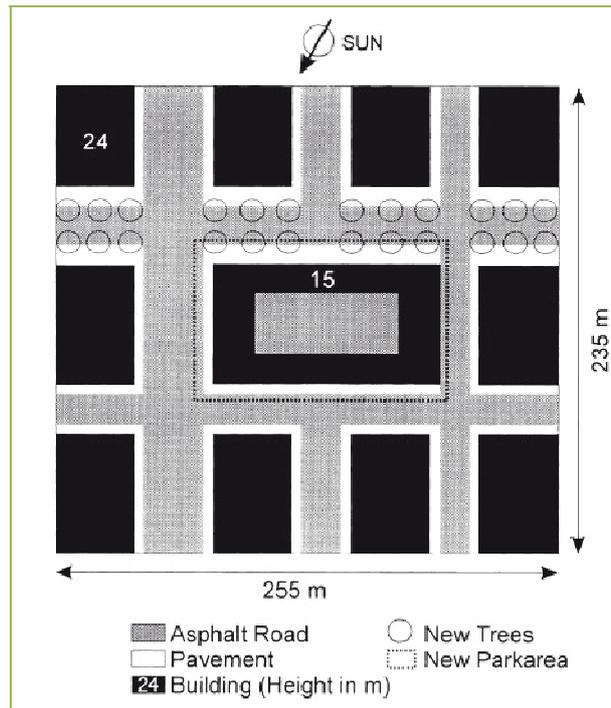


Figure II.13 : Impact microclimatique [Bruse *et al.* 1998]

#### **II.4 Conclusion :**

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.



## Chapitre III

# Investigation

### **III.1-Introduction :**

La présente recherche ayant trait à l'impact de la végétation sur le microclimat et les ambiances thermiques extérieures ne peut être consolidée qu'à travers un travail de terrain en choisissant comme site d'investigation celui qui présente les caractéristiques physiques recherchées.

Le volet pratique de ce travail sera abordé sur la base d'une investigation sur terrain dont l'objectif est d'abord d'évaluer le comportement du climat en fonction d'un élément précis qui est la végétation, pour cela, la recherche s'est accentuée sur les effets climatiques les plus perceptibles affectant directement le site choisi.

Cette investigation devra faire ressortir l'importance de la végétation urbaine vis-à-vis du bien être de l'utilisateur tout en s'insérant dans le contexte du climat semi aride d'une part , et aboutir à des résultats qui peuvent être généralisés d'autre part.

La méthodologie d'approche de cette phase de la recherche sera basée sur une campagne de mesure qui s'étale sur trois jours successifs. Un axe comportant quatre stations a fait l'objet de cette campagne.

Les instruments utilisés consistent en un thermo-hygromètre qui permet de mesurer la température de l'air et l'humidité relative.

### **III.2-Situation de la ville de Batna :**

La ville de Batna, de son vrai nom Bathna, a vu le jour sur décret du 12 septembre 1848 signé par Napoléon. Ceci est venue après que la commission consultative siégeant à Constantine a décidé de faire de Batna une future ville du fait de sa position stratégique à la croisée des axes Biskra, Tébessa, Sétif, et Constantine.

Elle est située à l'Est Algérien (au méridien 06°18 Est (longitude) et la parallèle 35°55' (latitude) (Figure III.1).

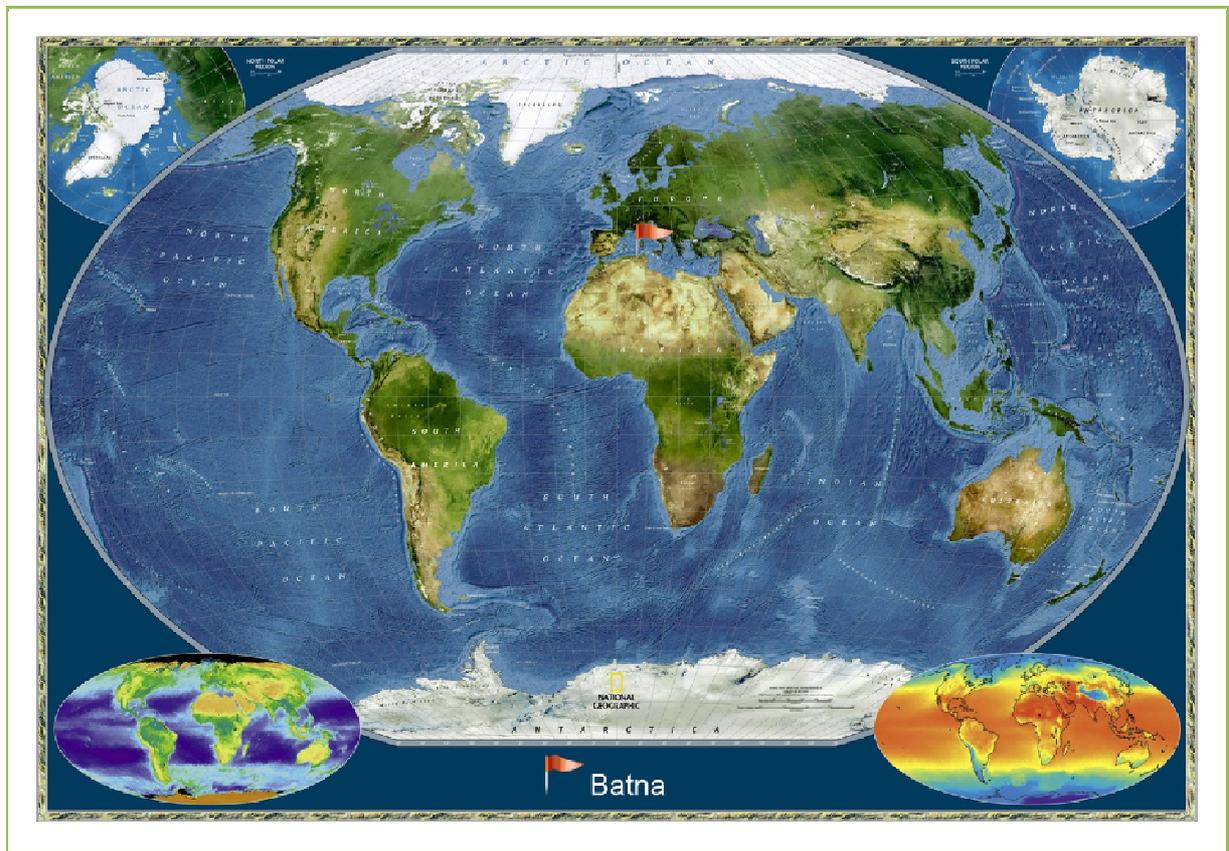


Figure III.1: Situation géographique de la ville de Batna [National Geographic Society 2006]

### **III.3-Contexte climatique :**

Selon le découpage en zones climatiques du territoire Algérien établie par le ministère de l'habitat (Figure III.2) et (Figure III.3), Batna fait parti de la zone climatique d'hiver H2a avec des hivers froids et un écart de température diurne très important, et la zone d'été E2 avec des étés chauds et moins humides, avec des écart de température importants.

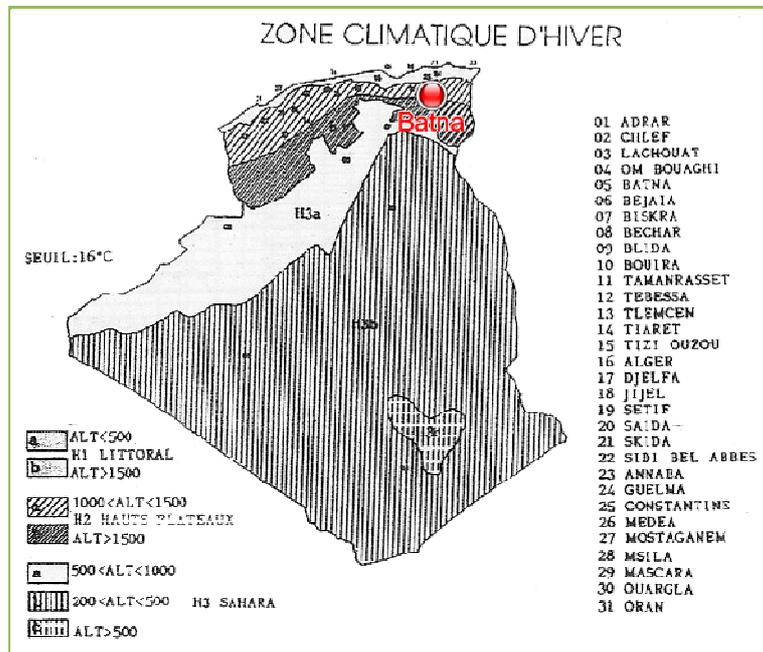


Figure III.2 : Situation de la ville Batna par rapport à la zone climatique d'hiver [Ministère de l'habitat 1993]

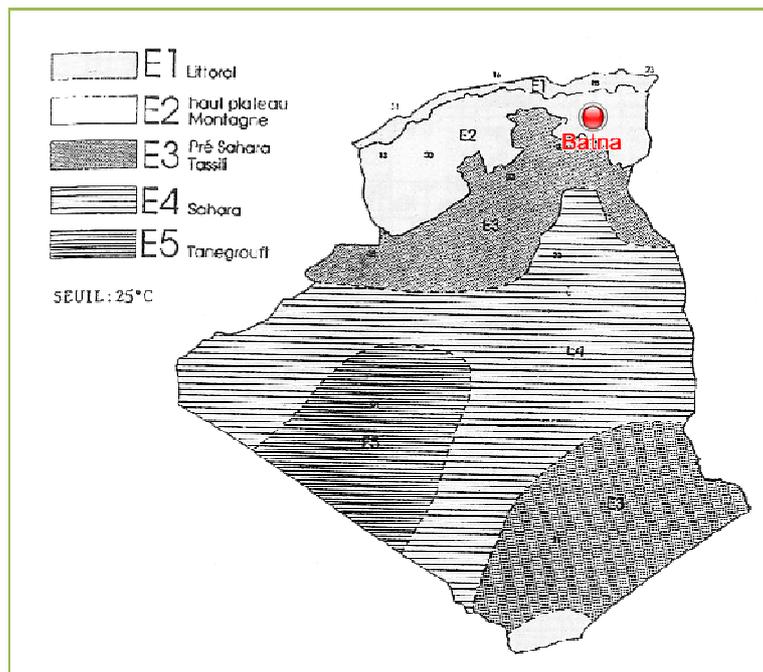


Figure IV.3 : Situation de la ville Batna par rapport à la zone climatique d'été [Ministère de l'habitat 1993]

### **III.4-Présentation du site d'investigation :**

Batna représente la cinquième ville algérienne, ville intérieure convoitée par un grand nombre de visiteurs. Elle abrite un espace public qui constitue l'élément structurant dans sa composition urbaine coloniale, lieu privilégié des Batniens et ceux qui visitent la ville (Figure IV.4).

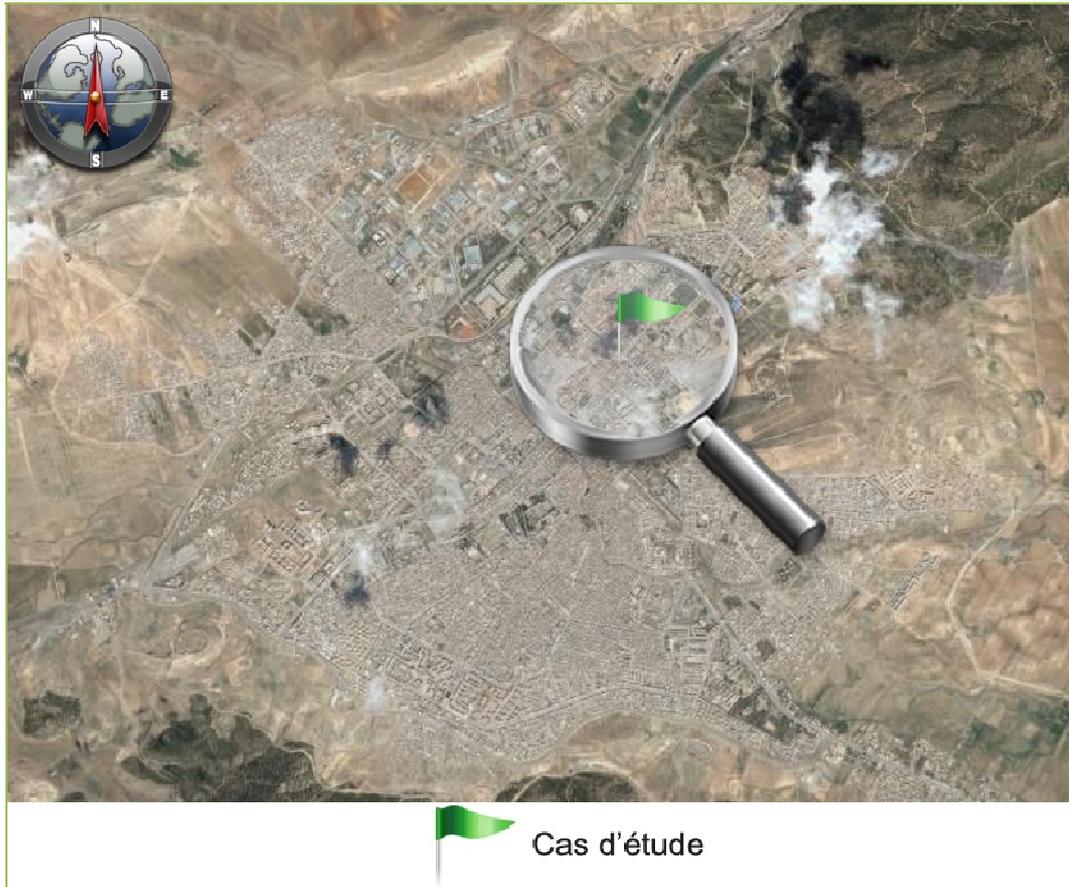


Figure III.4 : Situation du cas d'étude dans la ville Batna [Google Earth 2008]

Les allées « Ben Boulaïd » représente un élément de prestige et de richesse urbaine qui a une grande valeur morale pour les citoyens (Figure III.5).



Figure III.5 : Localisation du cas d'étude dans le tissu colonial de la ville Batna  
[Google earth 2008]

Espace urbain situé en plein centre du tissu colonial, délimité par des bâtiments de hauteur qui varie de 7 à 20 m (Figure III.6 et Figure III.7).



Figure III.6 : Vue générale à vol d'oiseau sur le cas d'étude (Axe Nord-Ouest) [Auteur 2007]



Figure III.7 : Vue général à vol d'oiseau sur le cas d'étude (Axe Sud-Est) [Auteur 2007]

#### **III.4.1-Géométrie :**

La géométrie de notre cas d'étude est linéaire, c'est un espace dégagé pour sa totalité, l'orientation dominante est Nord-Ouest Sud-Est. L'écoulement de l'air est de type rugosité isolée (Figure III.8).



Figure III.8 : Géométrie du cas d'étude [Google earth 2008]

### **III.4.2-Pollution :**

Le trafic routier dans les allées Ben boulaïd entraîne une pollution de basse altitude qui se manifeste en cas de fort ensoleillement et de stagnation d'air, donc essentiellement en été.

C'est la conjonction de ces trois éléments à savoir le trafic, le soleil et l'absence du vent qui favorise la formation d'ozone [[www.mon-environnement.com](http://www.mon-environnement.com)].

On signale que les polluants émis correspondent aux constituants de carburants plus les impuretés qu'ils contiennent tel que : le plomb et le soufre et évidemment les produits de combustion tel que : le monoxyde de carbone (CO); hydrocarbures imbrûlés, oxyde d'azotes et suies [Conseil du département d'hygiène de Paris, séance du 21 Mars 2001].

### III.4.3-Matériaux :

Comme tout espace urbain, les allées Ben boulaïd sont définies selon deux plans :

- Les murs de façades des bâtiments qui les délimitent, teintés en blanc dans la majorité.
- Sol : au centre pavé de dalle en béton. Sur les deux côtés latéraux, voie mécanique revêtue en asphalte.

Le (Tableau III.1) récapitule l'ensemble des valeurs d'albédo • et d'émissivité • rencontrées dans notre aire d'études:

Élément	Matériau	Couleur	Rugosité	Albédo	Emissivité
Chaussée	Asphalte	Noire	Rugueuse	0.05-0.20	0.95
Façades	Pierre avec peinture	Blanche et crème	Lisse à relativement rugueuse	0.50-0.90	0.85-0.95
Toitures	Carreaux de béton	Couleur naturelle du béton	Lisse à relativement rugueuse	0.10-0.35	0.71-0.90
	Gravier	Grise	Rugueuse	0.08-0.18	0.92
Ouvertures	Verre simple	Transparente	Lisse	0.08	0.87-0.94
	Persienne en bois	Bleue claire et marron	Rugueuse	0.20-0.35	0.85-0.95
Murs et sol des galeries	Pierre	Nue	Rugueuse	0.20-0.35	0.85-0.95
		Grise, marron	Lisse	0.2-0.35	0.85-0.95
		Blanche, beige		0.5-0.9	0.85-0.95
	Mosaïque	Noire, verte	Lisse à rugueuse	0.02-0.35	0.85-0.98
	Marbre	Blanche, noire, beige, grise	Lisse	0.02-0.90	0.85-0.98
	Granito	Blanche tachetée en noir, gris et	Lisse	0.02-0.90	0.85-0.95

		brique			
	Béton	Grise verdâtre	Rugueuse	0.10-0.35	0.71-0.90

Tableau III.1 : Récapitulatif des matériaux utilisés dans le site d'investigation [OKE.T.R 1978, adapté par l'auteur]

Tous ces matériaux de part leurs disposition, leurs propriétés thermiques déterminent la quantité d'énergie absorbée dissipée dans l'atmosphère ainsi que l'écoulement d'air. Par conséquence cette interaction génère un microclimat qui influence les activités exercées et la fréquentation de cet espace urbain.

#### **III.4.4-Typologie végétale :**

Les allées comprennent deux espèces d'arbres (Figure III.9) ;

- Le troène de Japon.
- Le lilas des indes (Melia).



Figure III.9 : Types d'arbres du cas d'étude [Auteur 2007]

#### **III.4.4.1-Troène de Japon :**

Arbuste s'élevant jusqu'à 6,5 m ; rameaux glabres, jeunes pousses légèrement pubescentes (Figure III.10). Feuilles persistantes, à court pétiole, entières, coriaces, ovales, de 4-10/2-5 cm, obtuses ou brièvement acuminées, glabres, à nervure médiane seule distincte, vert sombre luisant, bord rougeâtre (Figure III.11). Fleurs de juin à septembre ; petites, groupées en panicules pubescentes, pyramidales, de 10 à 20 cm de haut et de large, surtout terminales ; calice campanulé, à 4 dents ; corolle blanche, tubuleuse, à 4 lobes étalés presque aussi longs que le tube ; 2 étamage, persistante jusqu'au printemps.

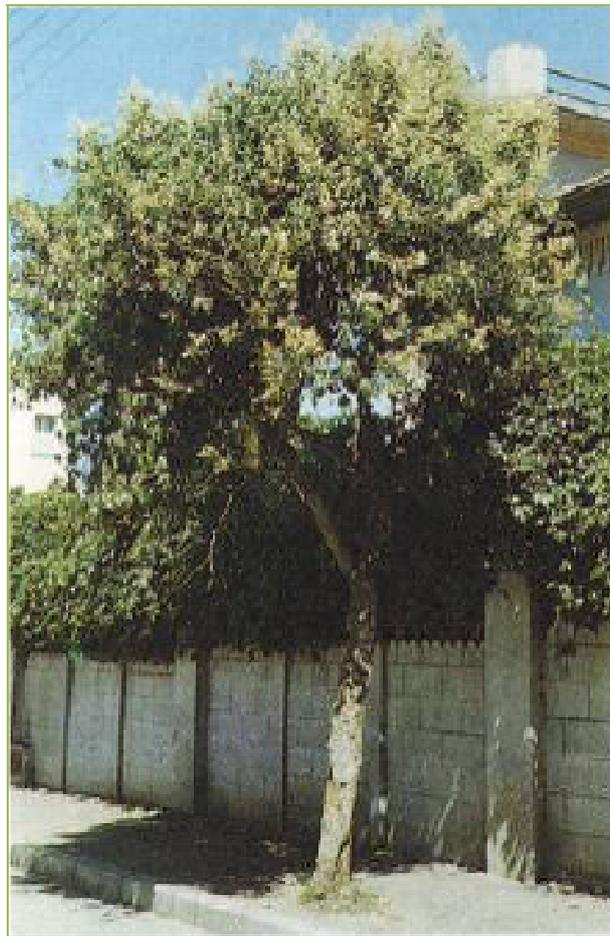


Figure III.10 : Troène de Japon [Somon 1986]

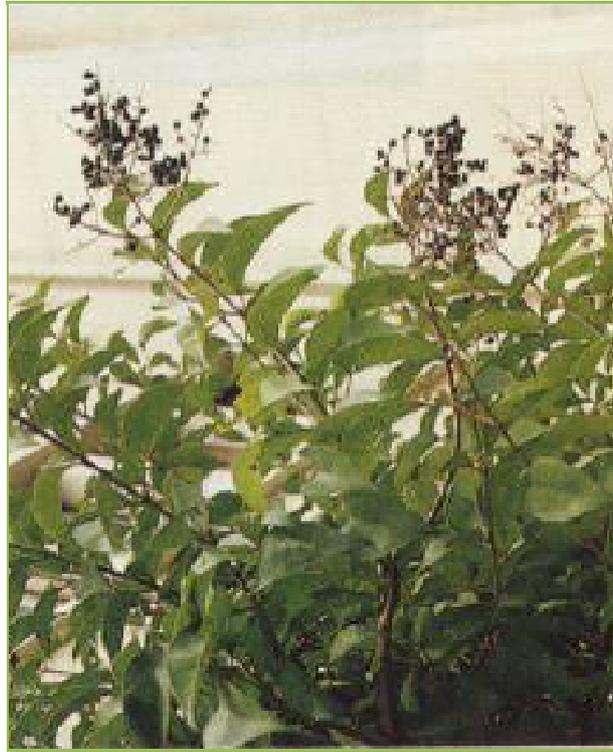


Figure III.11 : Feuillage du Troène [Somon 1986]

Originnaire de Corée et du Japon. Orne des bords de voies urbaines et de jardins dans l'Algérois. Mellifère ; pollen allergisant [Somon 1986].

#### **III.4.4.2-Lilas des indes (MELIA):**

Arbre de 10 à 15 m, à écorce lisse et feuilles caduques, de 20 à 50 cm de long, à nombreuses folioles de 2 à 5 cm de long, à odeur de lilas (Figure III.12) ; chaque fleur a un calice à 5-6 lobes, une corolle de 5-6 pétales de 3 mm de large chacun, de couleur lilas (Figure III.13), d'abord étalés sur près de 2 cm de diamètre puis décurvés, au centre un tube staminal dressé, bleu pourpre, portant 10 à 12 anthères.

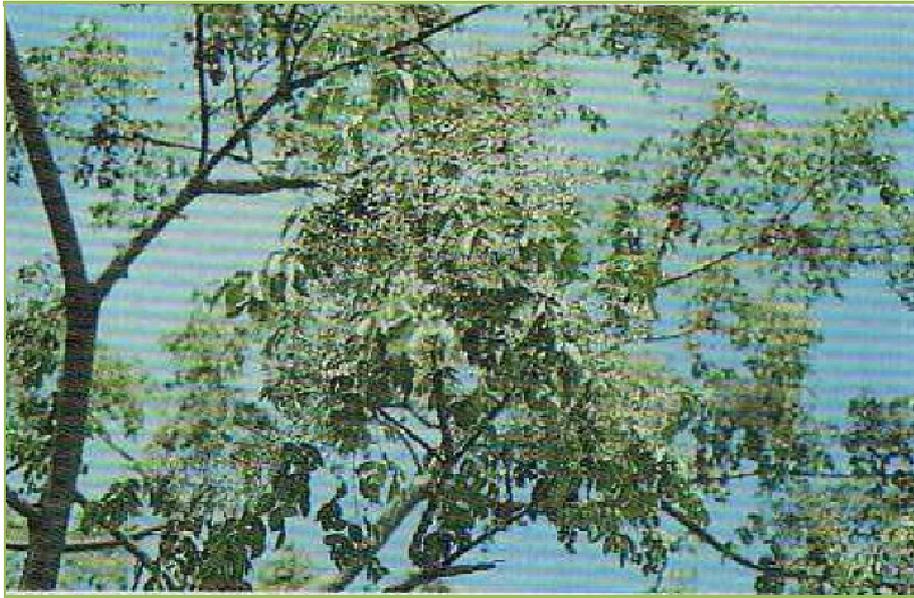


Figure III.12 : Lilas des indes [Somon 1986]



Figure III.13 : Feuillage du Lilas des indes [Somon 1986]

Ses fruits sont des drupes jaunâtres (sphero-ovoïdes d'environ 1 cm de diamètre), à noyau très dur ; ils persistent longtemps sur l'arbre. Originaire du Nord de l'Inde, et de Chine. Ornement des squares et jardins de l'Algérie[Somon 1986].

### **III.5-Instruments de mesures utilisés :**

Une centrale météo sans fil OTIO 938324 Thermotech avec 1 thermo-émetteur (Figure III.14). Elle se compose d'un émetteur et d'une centrale météo qui reçoit les

informations transmises en ondes radio par le thermomètre émetteur. Le Thermomètre a une plage de mesure de 0°C à + 50°C (+ou- 1°C).



Figure III.14 : Appareil de mesures [Auteur 2008]

### **III.6-Compagne de mesures :**

Chaque site urbain crée une perturbation dans les paramètres mésoclimatique tel que la température l'humidité et la vitesse de l'air.

Dans l'objectif de voir les transformations des paramètres climatiques données par une station météorologique et celles développés dans les allées Ben Boulaïd, cette phase consiste en la comparaison des données collectées (température de l'air et humidité relative).

Le (Tableau IV.1) suivant résume quelques méthodes des mesures employées dans des études concernant les espaces urbains ;

Auteurs années	Situation	Procédures de mesures	Comportement des mesures	Paramètres météorologiques
Zakaris et al 2001	Sept espaces extérieurs, Montréal (Canada)	Mesures en rotation entre 04 places au milieu de la journée	Utilisation de l'espace (nombre des gens présents et leurs activités)	Ta, W, Ws
Givoni et al 2003	Yokohama (japon) Tel Avive (Palestine)	Sujets qui se déplacent entre espace ombré et espace ensoleillé	Sensation thermique	Ta, W, RH, G, Ts
Sasaki et al 2000	Quatre cités au japon	Questionnaires journaliers, réponders qui vivent à côté de la station météorologique	Sensation thermique	Ta, W, RH, G, Sd
De Dear et brager 2001	Etats Unis	Station mini-met portable à côté des sujets	Sensation thermique	Ta, W, RH, G, Tg
Nikolopoulo et al 2001	Quatre places de repos, Cambridge (Grande Bretagne)	Station mini-met portable à côté des interviewés, utilisé pendant le milieu de la journée	Sensation thermique, utilisation de l'espace (nombre de gens présents)	Ta, W, RH, Tg
Nigara et al 1996	Espace piétonnier Osaka (japon)	Mesures instantanées, instruments déplacées entre les sujets	Sensation thermique	Ta, W, RH
Thorsson et al 2003	City park Göteborg (Suède)	Interviews et observation indiscretes entre 13h et 15h	Utilisation de l'espace (nombre des gens présent et leurs activités), sensation thermique	Ta, W, RH, G

Tableau III.2 : Quelques méthodes de mesures concernant l'étude de l'usage des espaces urbains et la sensation thermique [Lindberg 2004]

Avec :

Température de l'air (Ta).

Vitesse de l'air (W).

Vitesse subjective du vent (Ws).

Humidité relative (RH),

Température globale ( $T_g$ ).

Radiation globale ( $G$ ).

Température de surface ( $T_s$ ).

Durée de l'ensoleillement ( $S_d$ ).

On s'inspirant de ce tableau, les paramètres microclimatique qui vont faire l'objet de ce travail sont :

Température de l'air ( $T_a$ ).

Humidité relative (RH).

### **III.6.1-Déroulement de l'investigation :**

L'investigation a commencé par la prise des mesures de températures de l'air et d'humidités relatives selon quatre stations pendant le mois d'Aout étant donné qu'il représente le mois le plus chaud de l'année. Elle s'est déroulée pendant le : 27,28 et 29 Aout 2006.

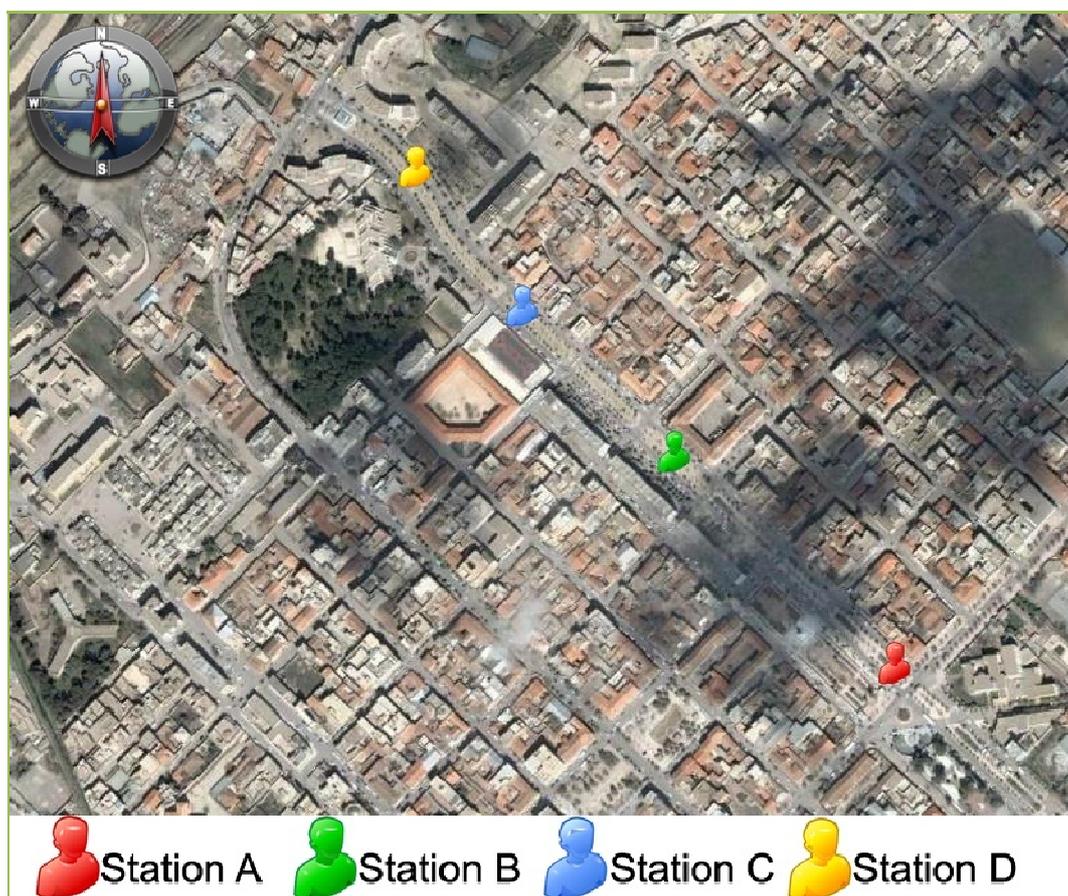


Figure III.15 : Les différentes stations de mesures [Google earth 2008 adaptée par l'auteur]

Les résultats obtenus nous ont permis de comparer les températures et les humidités relatives de l'air, relatives à notre échantillon avec celles de la station météorologique.

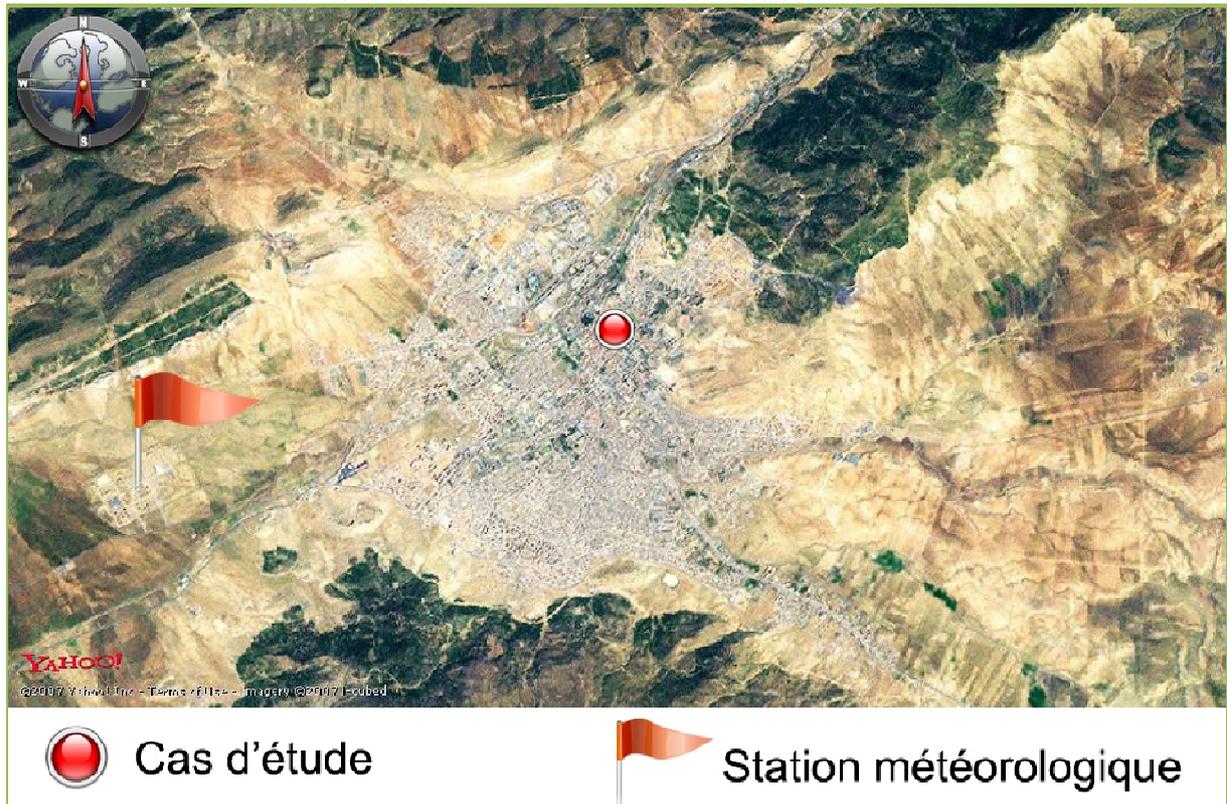
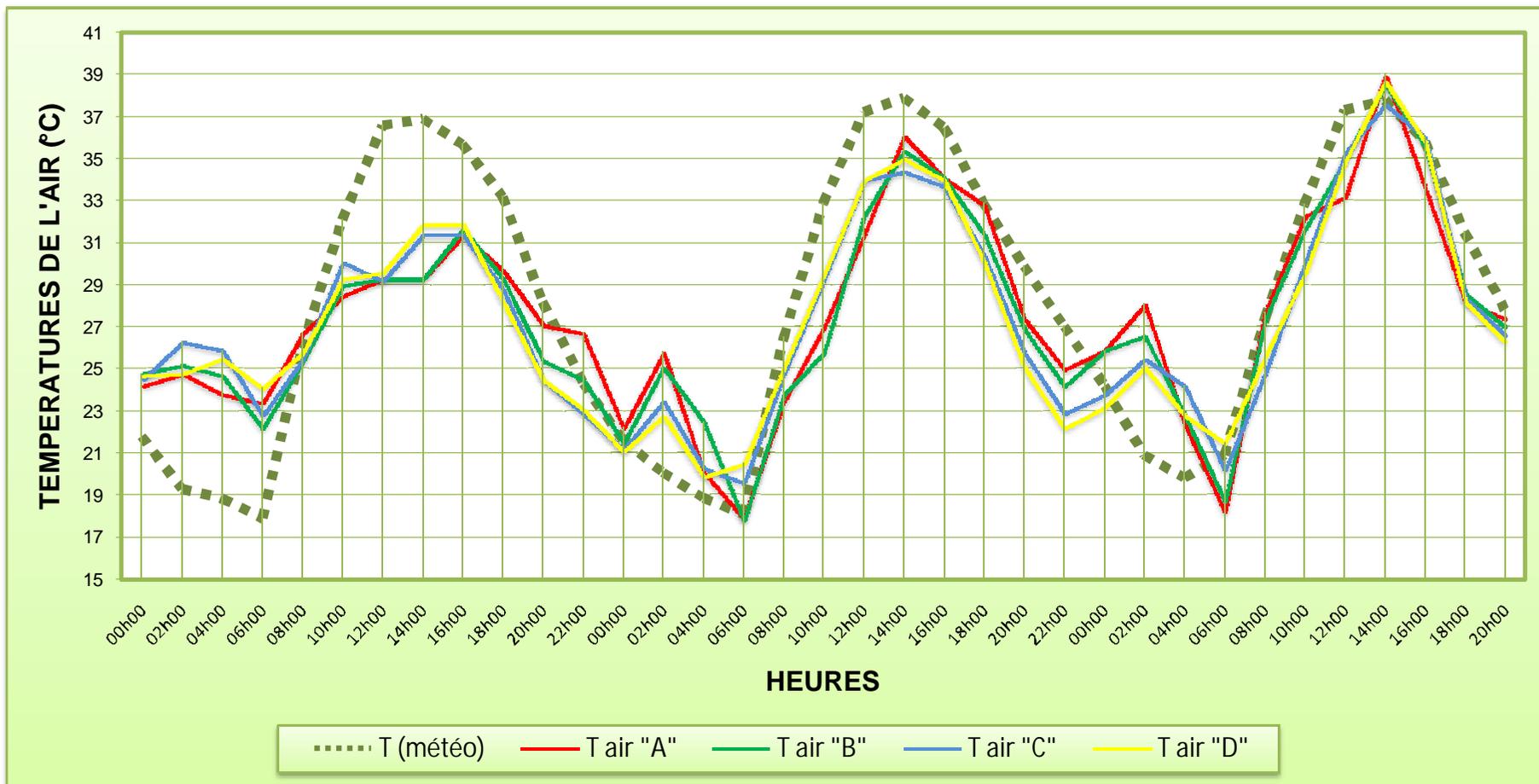


Figure III.16 : Situation de la station météorologique par rapport au cas d'étude  
[www.flashearth.com 2008, adaptée par l'auteur]

### **III.7-Analyse et discussion des résultats obtenus :**

#### **III.7.1-Température de l'air :**



Graphe III.1 : Variation de la température de l'air durant la période de mesure pour l'ensemble des stations (27,28 et 29 Aout 2006) [Auteur 2008]

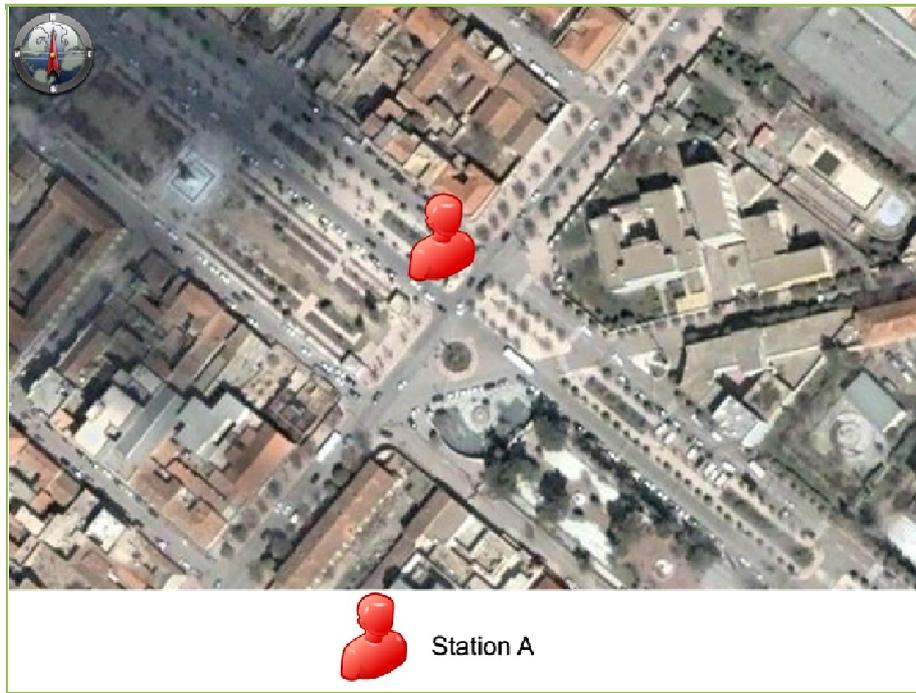
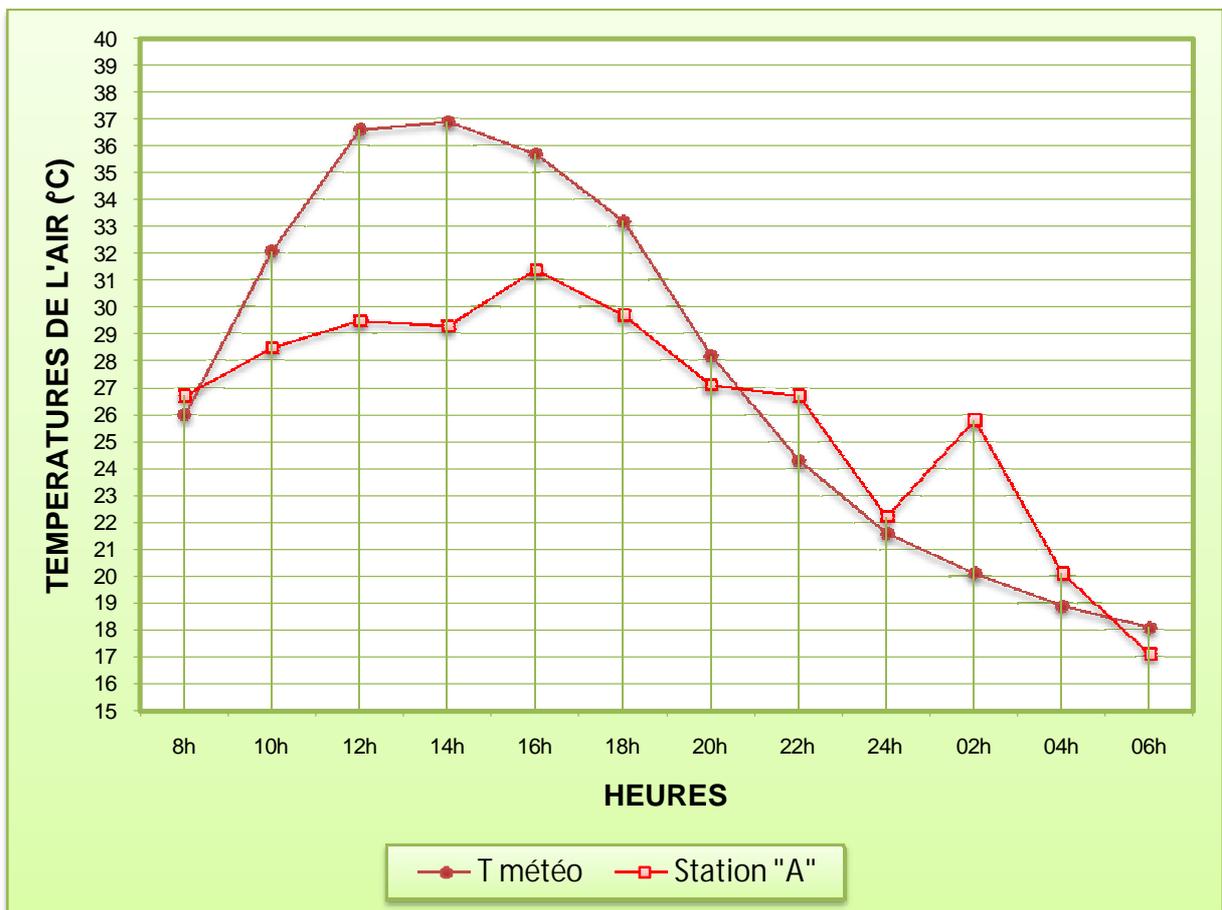


Figure III.17 : Vue aérienne détaillée dur la station « A » [Google earth 2008 adaptée par l'auteur]



Graphe III.2 : Variation de la température de l'air Station « A » [Auteur 2008]

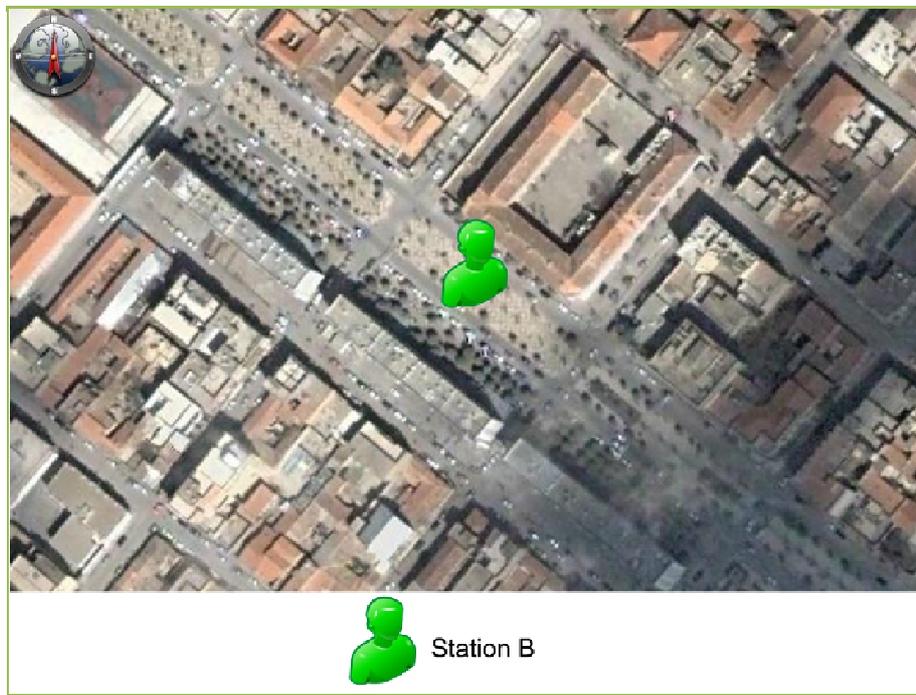


Figure III.18 : Vue aérienne détaillée sur la station « B » [Google earth 2008 adaptée par l'auteur]



Graph 3.3 : Variation de la température de l'air Station « B » [Auteur 2008]

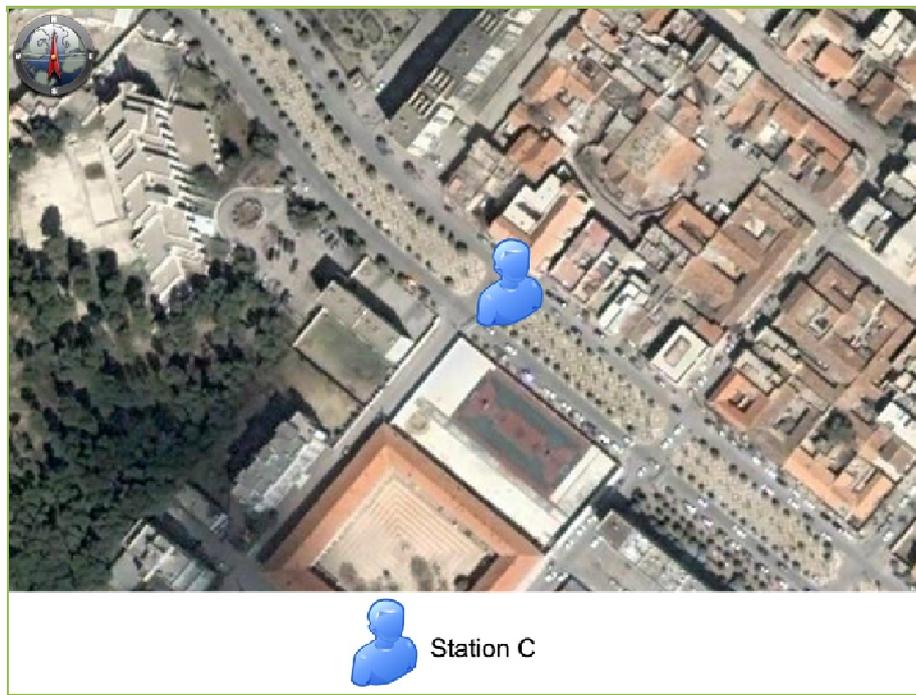
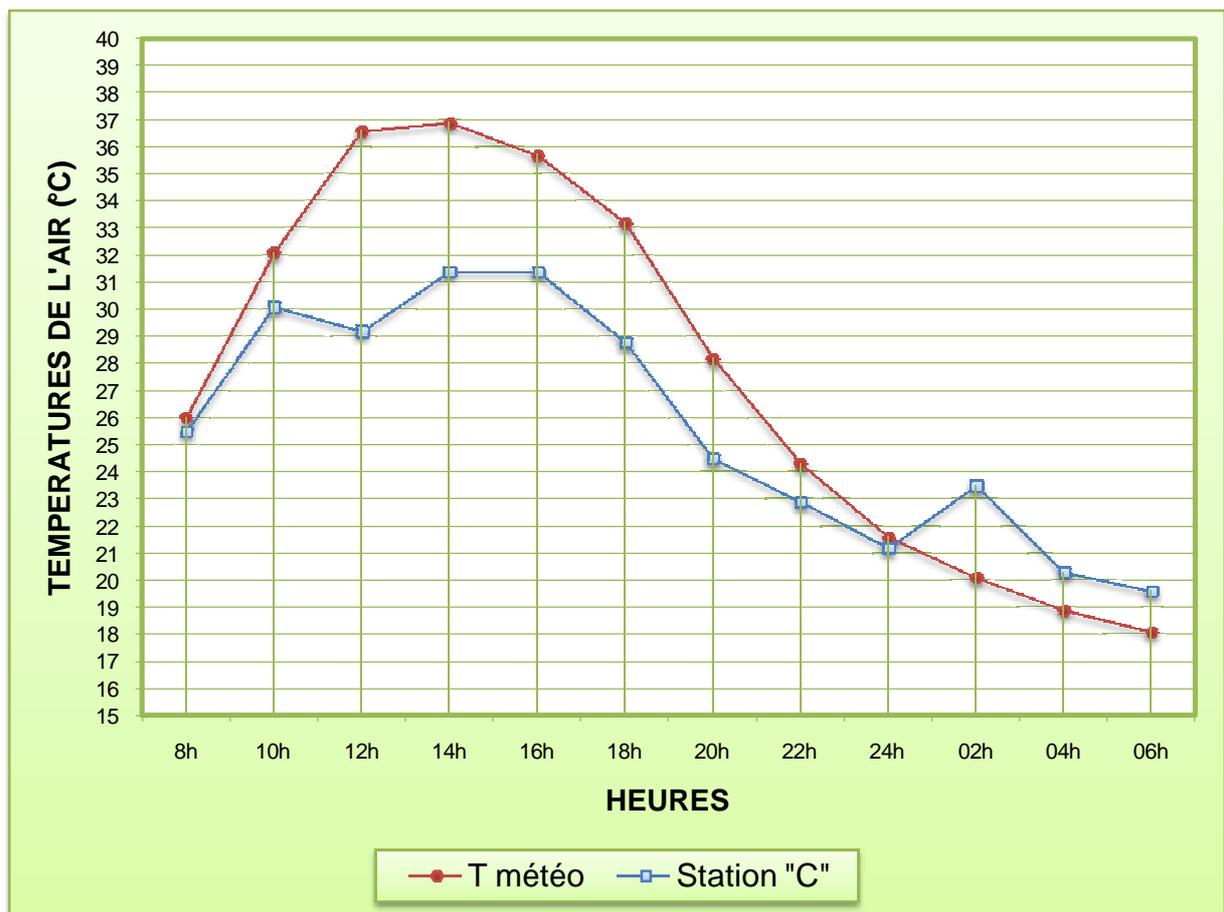


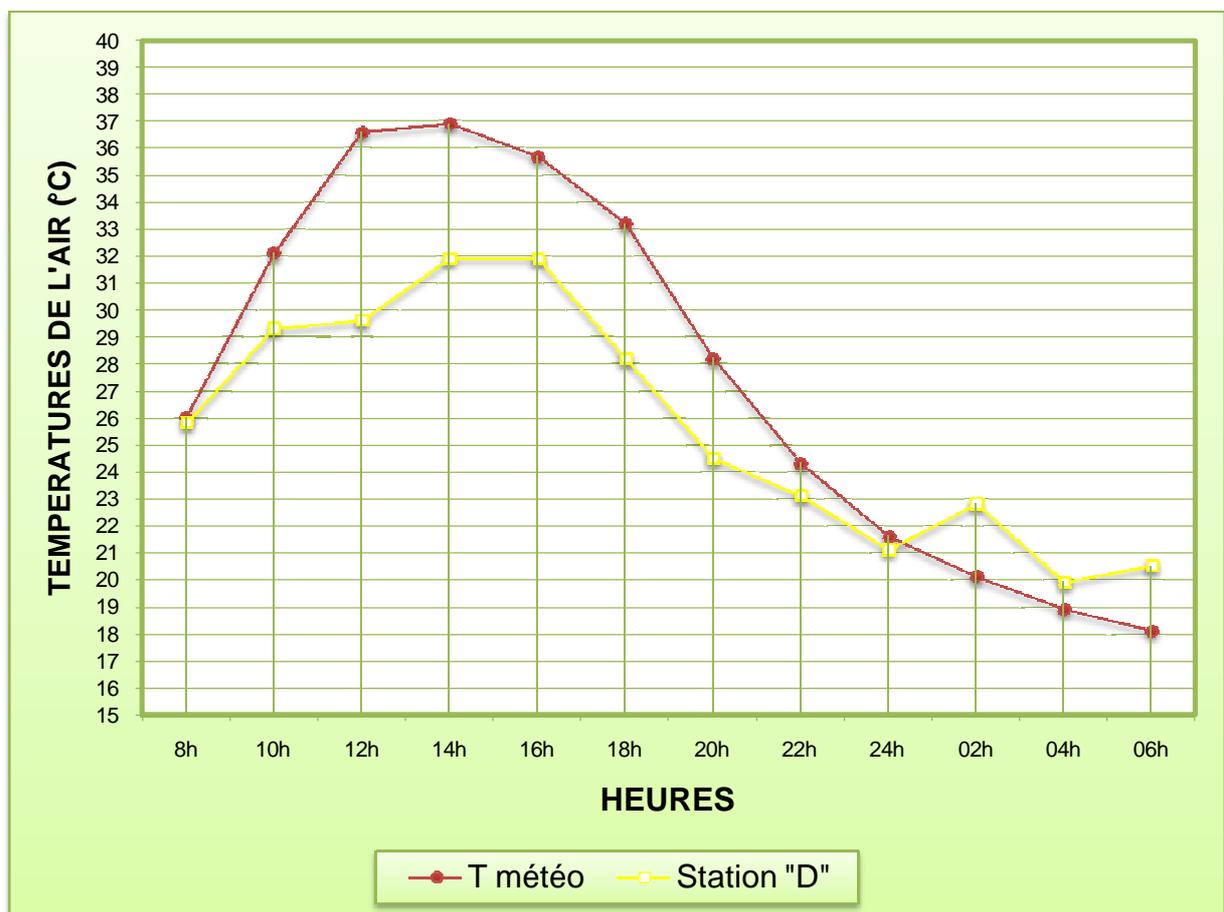
Figure III.19 : Vue aérienne détaillée sur la station « C » [Google earth 2008 adaptée par l'auteur]



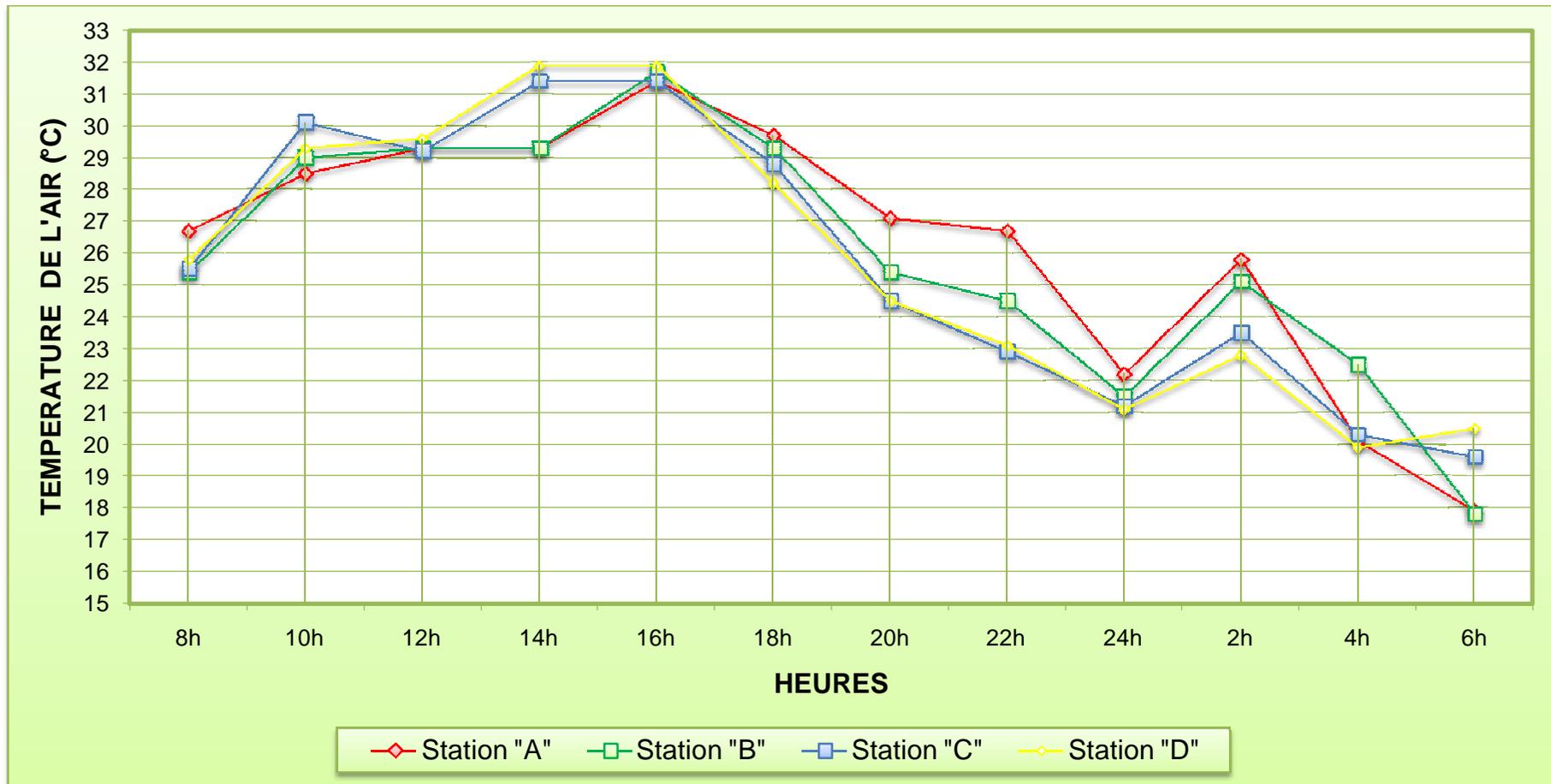
Graphe III.4 : Variation de la température de l'air Station « C » [Auteur 2008]



Figure III.20 : Vue aérienne détaillée sur la station « D » [Google earth 2008 adaptée par l'auteur]



Graphe III.5 Variation de la température de l'air Station « D » [Auteur 2008]



Grphe III.6 : Comparaison entre la variation de la température de l'air dans les 04 stations de mesures [Auteur 2008]

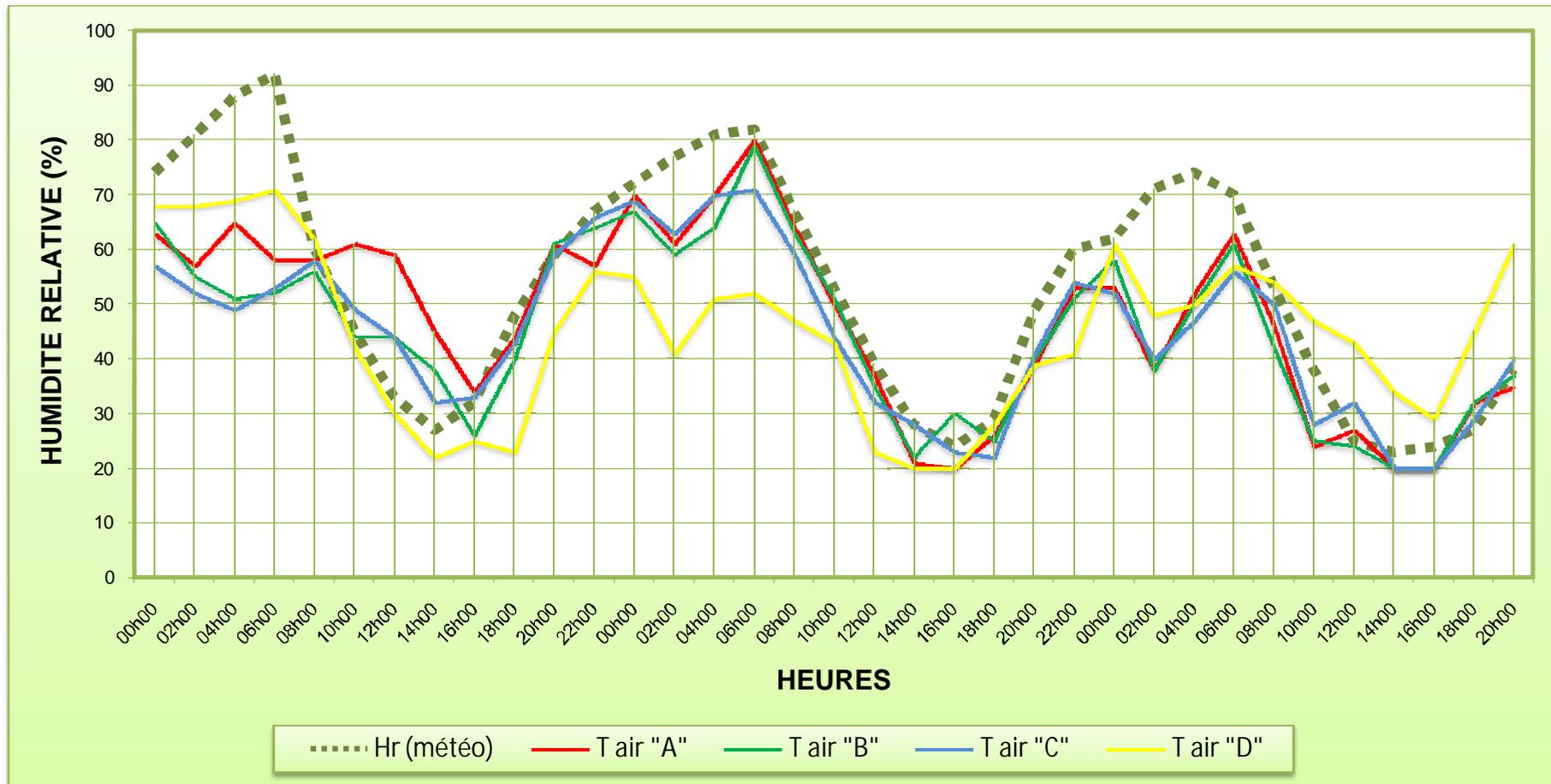
Les graphes de (Graphe VI.1) jusqu'à (Graphe VI.6) démontrent une différence perceptible entre les températures de l'air mesurées dans les allées et celles de la station météorologique. Cette différence n'est pas stable, elle varie pendant la journée.

Les températures de la station météorologique sont bien plus élevées que celles des allées avec une différence qui varie entre 1°C et 5°C de 08h à 24h. Cette différence s'inverse de 01h à 06h, où les températures des allées deviennent plus élevées que celles de la station météo. On enregistre entre 2.5°C et 6°C de différence à 02h du matin.

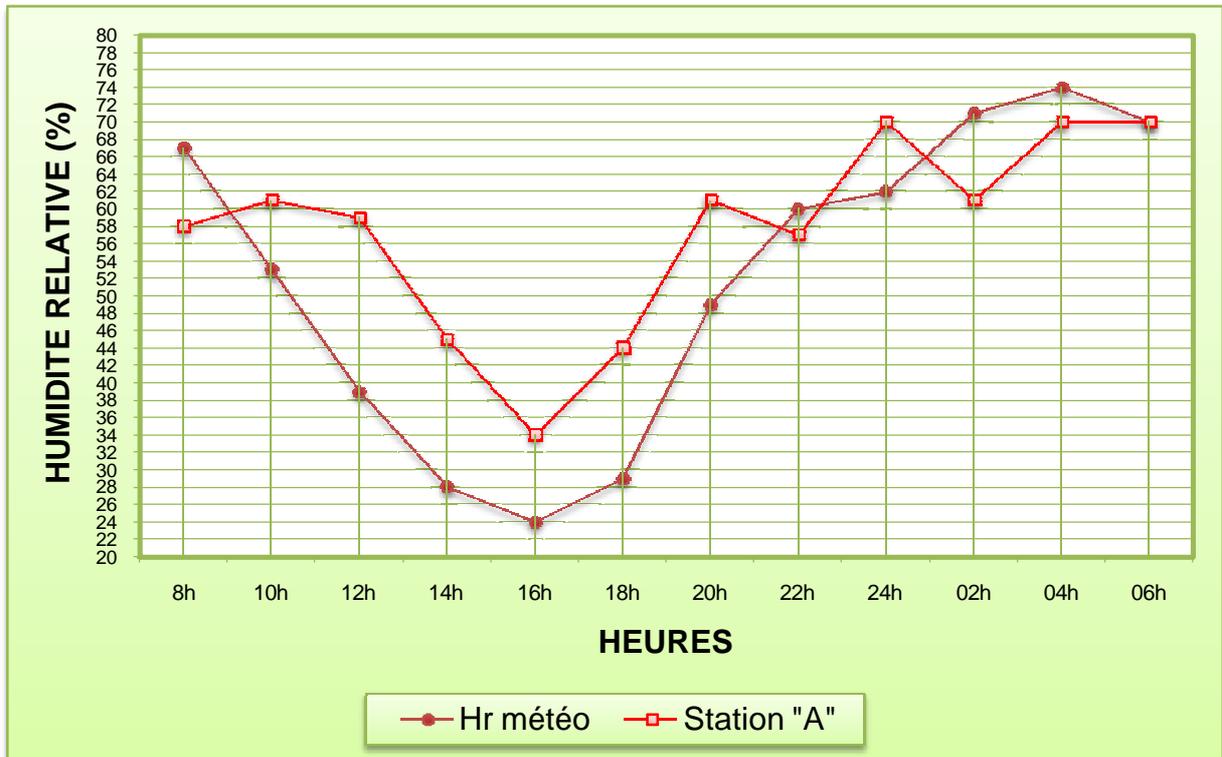
Comme l'espace urbain est plus dense, il contient plus de surfaces qui interceptent les radiations solaires. Avec une vitesse de vent moins importante le processus du transfert de chaleur est un peu ralenti et par la suite le refroidissement.

Cependant on peut déduire que les allées développent des températures inférieures à celles de la station au début de la journée. Mais cette situation s'inverse pendant l'après midi.

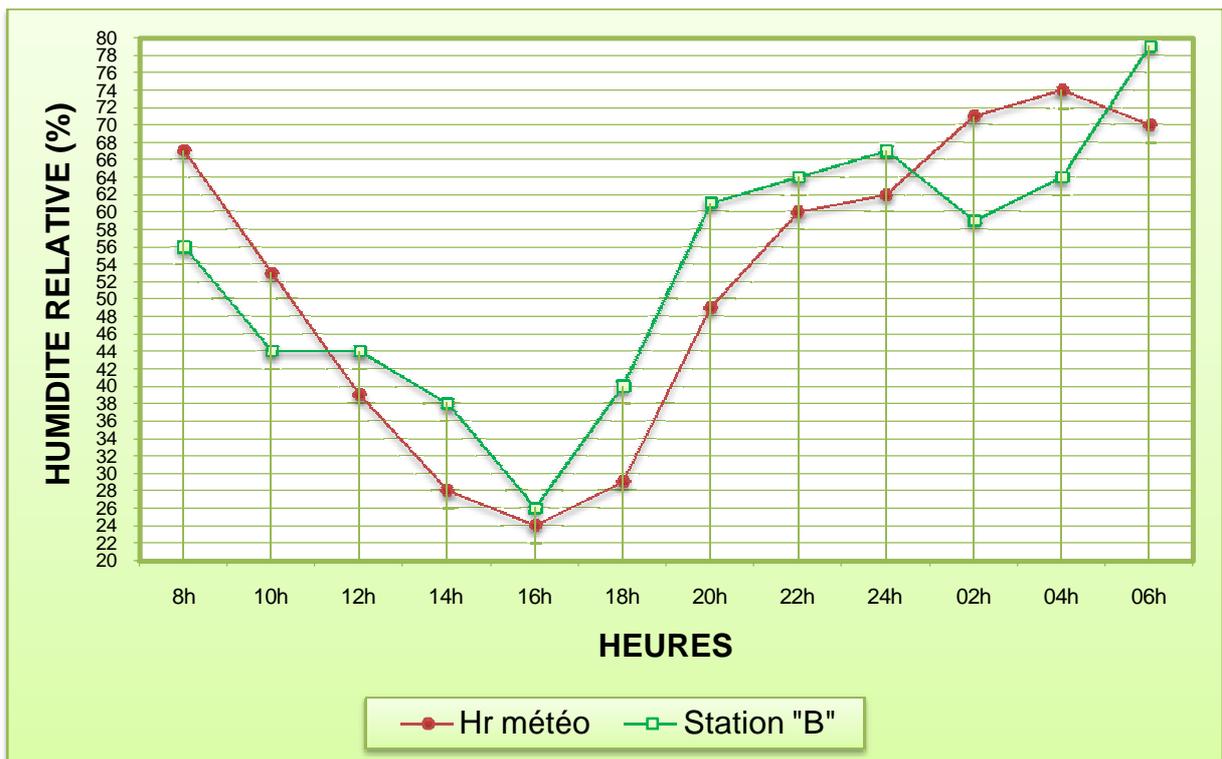
### **III.7.2-Humidité relative :**



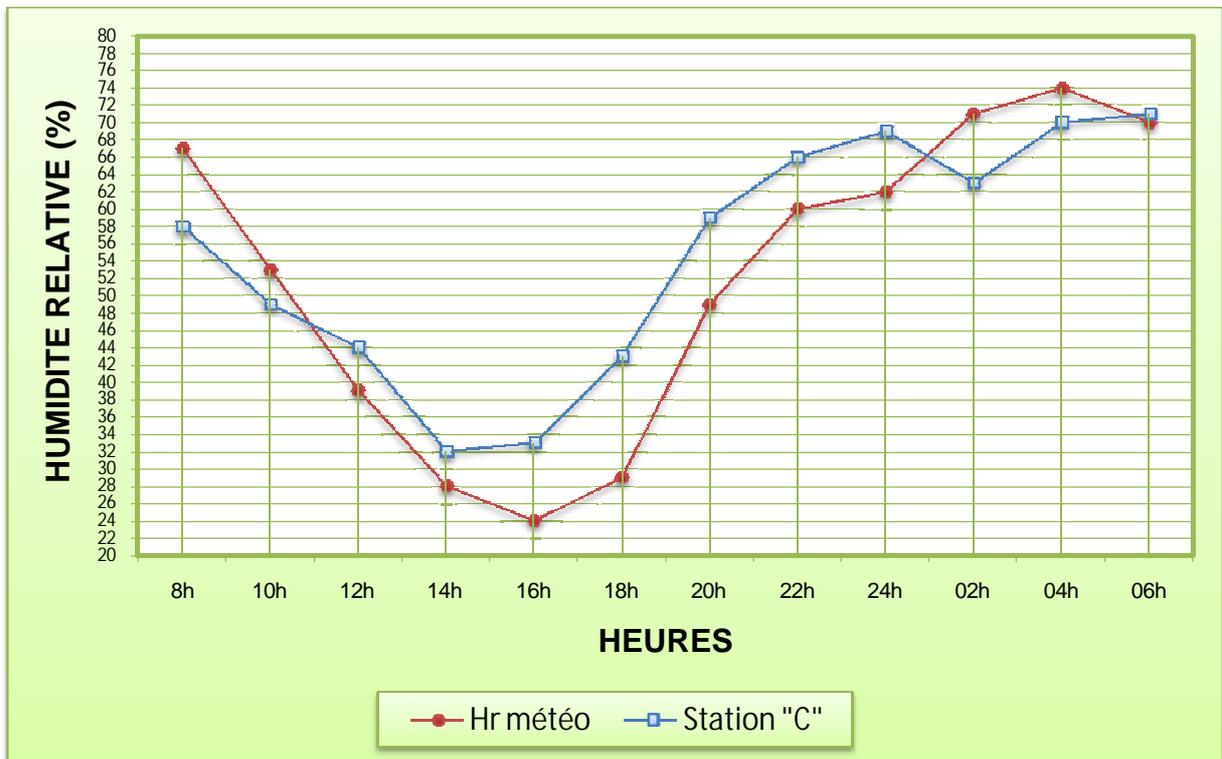
Graphe III.7 Variation de l'humidité relative durant la période de mesure pour l'ensemble des stations (27,28 et 29 Aout 2006) [Auteur 2008]



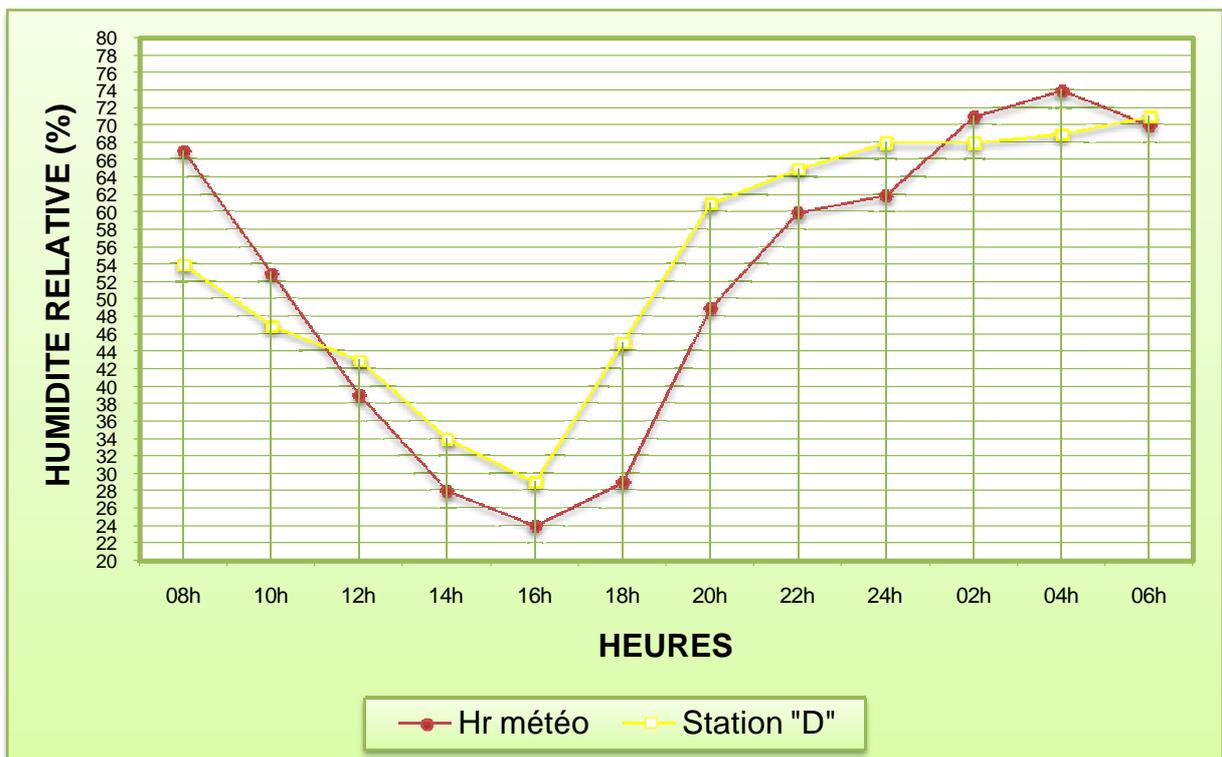
Graphe III.8 : Variation de l'humidité relative de Station «A» [Auteur 2008]



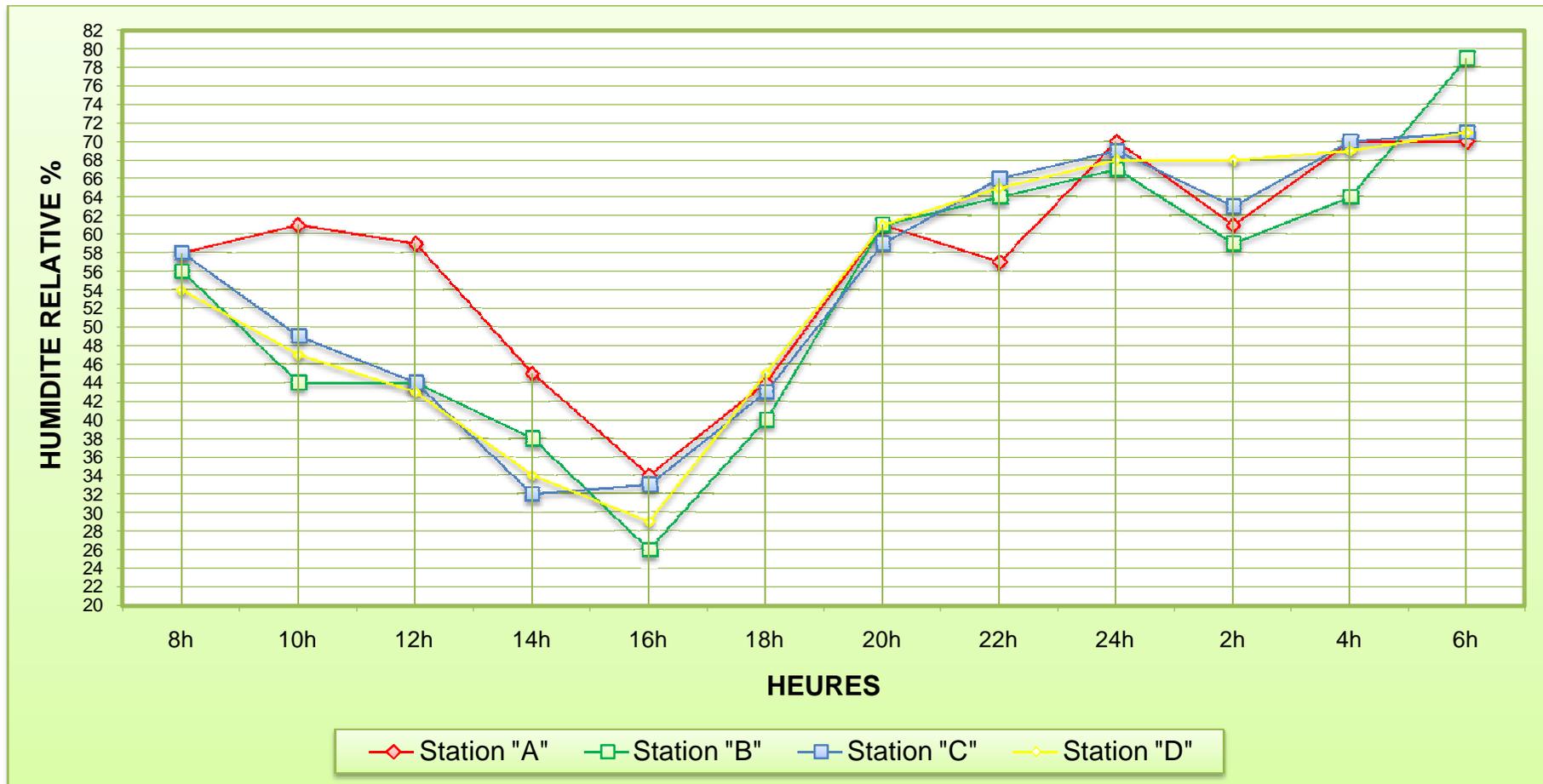
Graphe III.9 : Variation de l'humidité relative de Station «B» [Auteur 2008]



Graphes III.10 : Variation de l'humidité relative de Station «C » [Auteur 2008]



Graphes III.11 Variation de l'humidité relative de Station «D » [Auteur 2008]



Grphe III.12 : Comparaison entre la variation de l'humidité relative dans les 04 stations de mesures[Auteur 2008]

L'humidité relative dépend de la température et de la quantité d'eau contenue dans l'air. Lorsque la température baisse, l'humidité relative augmente.

D'après les graphes du (Graphe VI.7) jusqu'au (Graphe VI.12) on remarque une corrélation inverse entre les humidités relatives et les températures, lorsque les températures de la station météo sont inférieures à celles mesurées dans les allées, les humidités dans la station météo deviennent plus élevées que celles du cours et vice-versa.

Cette comparaison démontrent une différence perceptible entre les données tirées des stations météorologiques et celles mesurées. C'est pourquoi une étude sur le microclimat urbain ne peut se basé sur des données météorologiques.

### **III.8-Conclusion :**

Malgré que les mesures étaient limitées à la prise des températures et des humidités, l'investigation nous a ramenée à conclure que le microclimat généré est très spécifique au allées « Ben Boulaïd » il est le résultat de l'interaction entre les différents sollicitations climatiques et sa structure urbaine. C'est pourquoi le traitement du confort des espaces urbains publics dépend essentiellement d'une évaluation attentive de l'apport de chaque composant sur les ambiances générées. A côté des températures, les humidités relatives de l'air d'autres paramètres doivent être évalués tel que: les radiations et la vitesse du vent.

L'évaluation du vent joue un grand rôle parce qu'elle détermine les différents processus des échanges thermiques à savoir convection et advection.

Malgré que les effets de radiation et du vent sont évidents les effets des variations dans les humidités et les températures peuvent aussi être très apprécies lorsqu'il s'agit de grandes surfaces d'espaces verts [Roset.J et al 1998].

Cette partie pratique de notre recherche englobe l'investigation qui consiste en la prise bi-horaire des températures et des humidités relatives de l'air pendant le mois d'Août. Puis la comparaison des résultats obtenus par des données tirées de la station météorologique qui se trouve dans un espace dégagé à côté de l'aéroport de la ville de Batna.

La première phase de l'étude a démontré que les allées Ben boulaïd développent un microclimat bien distingué par rapport à la ville. Cependant l'étude du microclimat et du confort thermique généré ne peut se limiter à la température et l'humidité relative de l'air, d'autres paramètres interviennent tel que: la vitesse du vent et la température radiante moyenne.

La progression linéaire des températures et des humidités relatives ont démontré l'importance de la densité d'arbre dans l'amélioration du microclimat.

La bonne exploitation de la végétation réside dans le bon choix du type d'arbre et le type du sol. Les feuilles jouent un grand rôle dans l'interception des radiations solaires. La quantité d'eau contenue dans le sol détermine la quantité de vapeur émise par évapotranspiration.



# Chapitre IV

## Simulation

#### **IV.1-Introduction :**

L'évaluation du confort thermique extérieur au moyen de simulation numérique est devenue un sujet d'actualité. Les programmes de simulation divers ouvrent des axes de recherches assez impressionnants et permettent de vérifier et d'évaluer les théories les plus anciennes et celles les plus récentes ayant trait à la bioclimatique urbaine et architecturales.

La présente recherche s'est basée sur le programme de simulation ENVI-met 3.0, un logiciel déjà testé et exploité dans plusieurs travaux de recherche.

L'objectif de ce chapitre est d'abord de prouver les résultats de la campagne de mesure détaillée dans le chapitre précédent, puis de les compléter par l'évaluation du confort thermique au niveau des deux axes concernés, et enfin de procéder au changement des paramètres supposés avoir un impact considérable sur le confort extérieur.

ENVI-met 3.0 permet l'évaluation du confort thermique sur la base de l'indice de confort PMV ou vote moyen prévisible. Cet indice initialement développé pour les milieux intérieurs fût adapté aux espaces extérieurs.

#### **IV.2.Présentation du logiciel Envi-met :**

C'est un model en 3D conçu pou la modélisation numérique du microclimat urbain. Un parmi les premiers modèles qui cherche à reproduire la majorité des processus atmosphériques qui influent sur le microclimat sur des bases physiques bien défini (Loi fondamentale de la thermodynamique et la dynamique des fluides). Il calcule l'écoulement d'air autour des structures urbaines aussi bien que le processus du bilan atmosphérique (calcul transfert de la turbulence, réflexion, évapotranspiration des plantes... etc.) [[www.indiana.edu](http://www.indiana.edu)].

Envi-met présente plusieurs avantages:

1. Simulation de toutes les dynamiques du microclimat.
2. Il permet le traitement de plusieurs structures urbaines: Constructions de plusieurs tailles et de différentes formes et hauteurs accompagnés avec les

moindres détails tel que: galeries et auvents. La végétation chez Envi-met n'est pas seulement un simple obstacle poreux aux vents et aux radiations solaires, mais aussi il inclut les processus d'évapotranspiration et de la photosynthèse. Plusieurs types de végétation peuvent être utilisés, le sol est considéré comme un volume composé de plusieurs couches de plusieurs types.

3. Une grande résolution spatiale et temporelle.
4. Il demande un nombre limité des entrées et donne un nombre illimité de sorties [Ali-Toudert 2005].

#### IV.2.1.L'architecture du model :

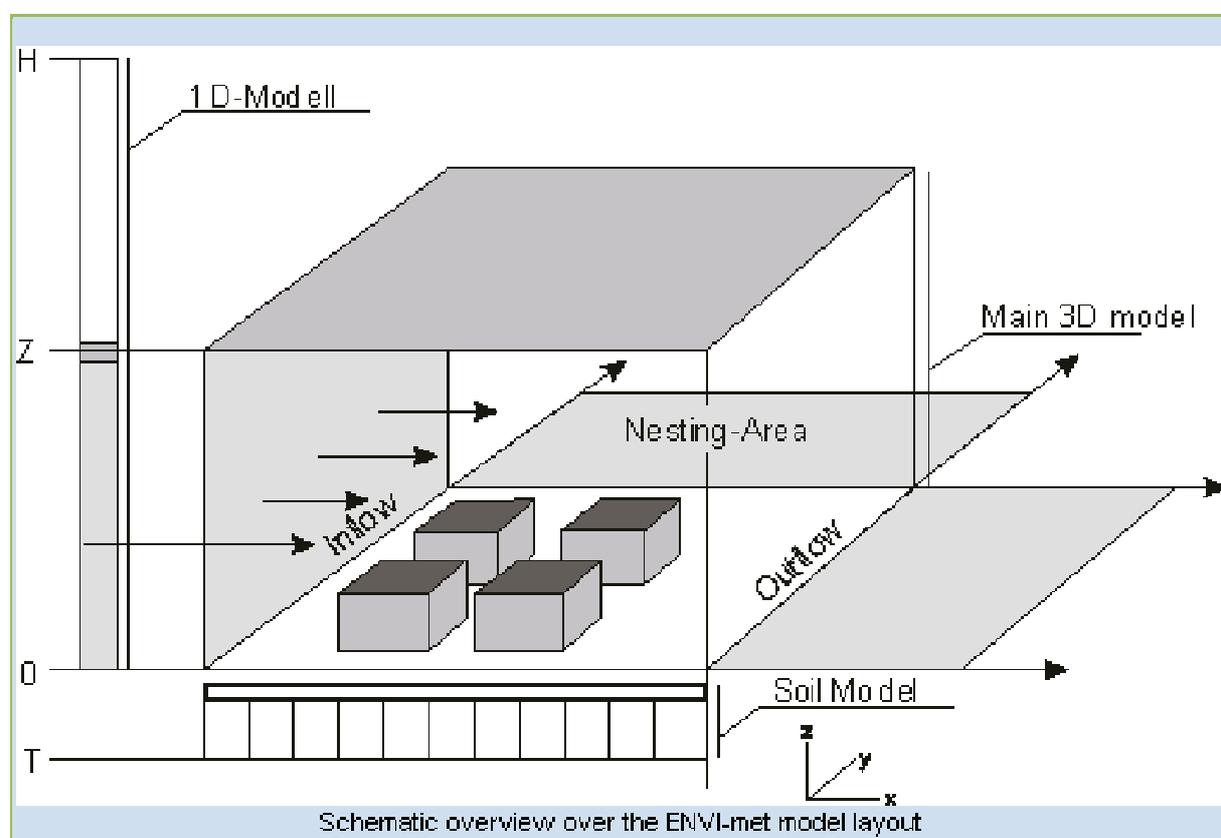


Figure IV.1 : Schéma du programme Envi-met 3.0 (architecture du modèle) [Manuel d'Envi-met 3.0]

Ce schéma décrit la composition de base primitive d'un model microclimatique comme Envi-met. Cette composition est générale elle n'est pas spécifique à l'Envi-met. Elle est utilisée pour tous les models numérique en 3D [Figure IV.1].

Envi-met est composé d'un corps en 3D (2 dimensions horizontales (x) et (y) et une verticale (z)). A l'intérieur de ce modèle, l'élément typique qui représente les surfaces d'intérêt sont : Les constructions, la végétation. Elles sont réduites sous forme de cellules d'une grille. Comme il est composé d'un modèle ID qui permet l'extension de la limite du modèle simulée jusqu'à 2500 m sans avoir besoin d'étaler le modèle complet. La hauteur Z est déterminée en fonction de la hauteur maximale du modèle à simuler  $H_{max}$  dont  $Z = 2 \cdot H_{max}$ .

La grille nesting est la surface qui entoure le corps du modèle, elle permet le déplacement de la limite du modèle au-delà du corps simulé.

Le modèle sol permet le calcul du transfert de la chaleur surfacique à l'intérieur du sol et vice-versa. La partie hydrologique permet le calcul d'eau disponible dans le sol. Ces données sont nécessaires pour calculer la transpiration maximale de la végétation ainsi que la quantité d'eau condensée au-dessus de sa surface.

#### **IV.2.2.A quoi sert l'Envi-met? :**

Envi-met est un modèle tridimensionnel qui permet le calcul de :

- Courte et longue longueur d'onde de radiation avec le respect de l'ombre, la réflexion et la radiation dissipée depuis les bâtiments et la végétation.
- Transpiration, Evaporation et la chaleur sensible émise par la végétation avec évaluation complète de tous les paramètres physiques propres aux plantes (taux de la photosynthèse).
- Température surfacique de chaque point de la grille.
- Eau et échange de chaleur à l'intérieur du sol.
- Le calcul des paramètres bioclimatiques tel que la température radiante moyenne ( $T_{mrt}$ ) et la valeur du PMV selon le modèle de Fangers (1972) adapter aux espaces extérieurs par Jendritzky (1993) .
- Dispersion des gaz et des particules intérieurs en incluant la sédimentation des particules de surfaces des feuilles de plantes.

Constructions, végétations, sol/surfaces et les sources de polluants peuvent être placés à l'intérieur du model. A côté des surfaces naturelles et artificielles le model peut ajouter les surfaces d'eau.

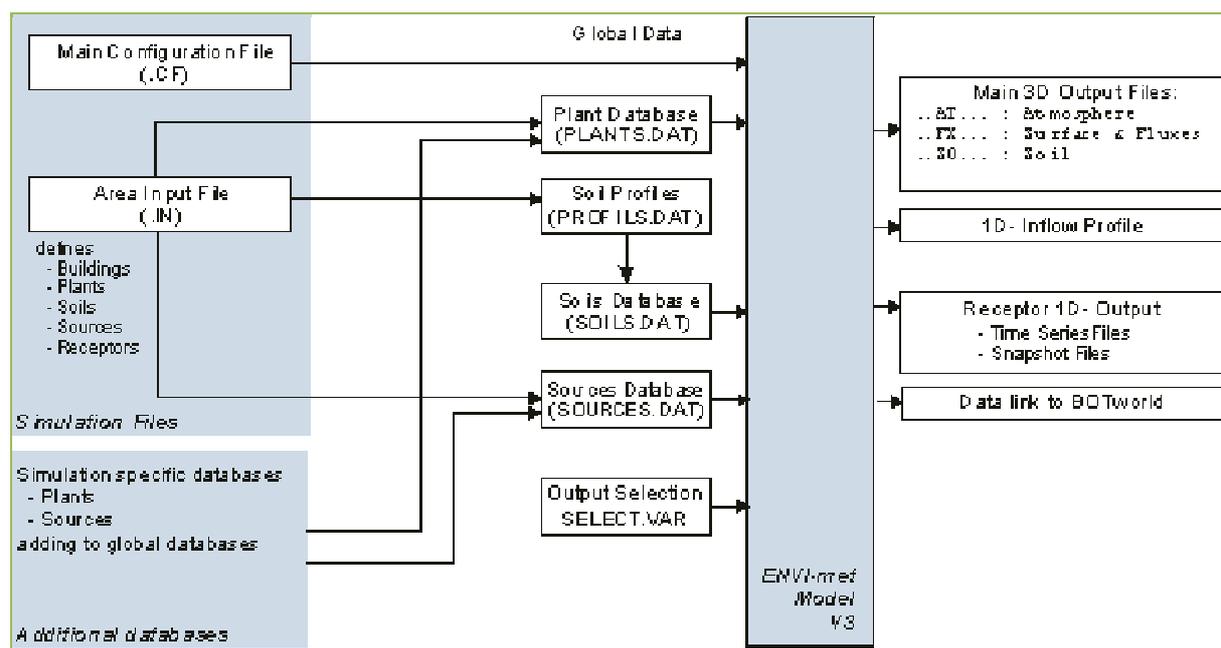


Figure IV.2 : Schéma de base des entrées et des sorties du logiciel  
[Manuel d'Envi-met 3.0]

### **IV.2.3. Données d'entrée (Inputs) :**

**1.1. Fichier Editeur (\*.in) :** Programme qui permet d'introduire la structure urbaine dans le logiciel. Il se présente sous forme d'une surface de dessin qu'on peut délimiter en fonction du model qu'on veut simuler.

Il contient la définition de :

#### **(1) Editeur construction/végétation :**

Grâce à cet éditeur on peut projeter les constructions en déterminant leurs hauteurs ainsi que tous les éléments saillants. La sélection et la projection des différents types de plantes existantes.

Pour Envi-met les plantes ne sont pas de simples obstacles physiques face au vent et aux radiations solaires. Se sont des corps biologiques qui interagissent avec l'environnement par des échanges thermiques et évaporatifs.

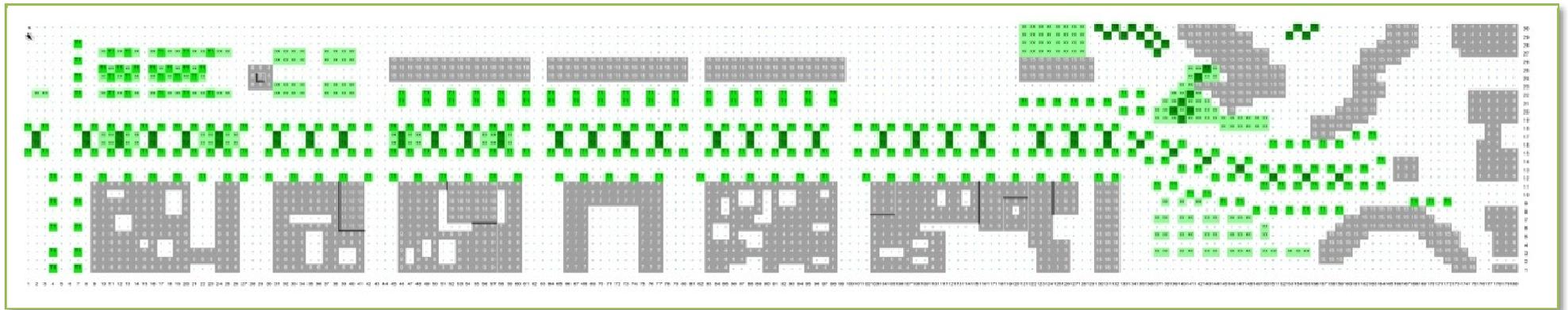


Figure IV.3 : Fichier éditeur de l'axe étudié [Auteur 2008]

La végétation est schématisée comme une colonne en 1D avec une hauteur  $Z_p$ , la profondeur des racines est  $Z_r$ . Chaque colonne est composée de 10 espacements égaux, de même pour les racines.

Pour chaque calque correspondent une densité de la surface foliaire (LAD) et la densité de la surface des racines (RAD). Cette décomposition est employée pour chaque type de végétation rangeant de l'herbe aux grands arbres. D'autres paramètres physiologiques comme la résistance des stomates, la nature des plantes (caduques ou persistantes), l'albédo des feuilles, l'émissivité est constante [Ali-Toudert 2005].

Toutes ces données sont stockées dans un fichier donné PLANTS.DAT.



La [Figure IV.4] recense les données de base des espèces de végétation contenues dans le model Envi-met 3.0, à ces types on peut ajouter d'autres en fonction des manuels propres à ce logiciel.

**ID:** Référence propre à chaque espèce. Ces ID sont utiles pour Envi-met pour ne pas confondre la végétation avec les constructions.

**C?:** Définition de la plante en fonction de la capacité de fixation du CO<sub>2</sub>.

**TY:** Type de plante, 01 pour caduque, 02 pour les conifères et 03 pour les herbes.

**rs\_min:** Résistance minimale des stomates : Considérée 400 pour les arbres et 200 pour herbe.

**a\_f:** Albédo de la feuille considéré 0.2 (peut être modifié s'il s'agit des types bien spécifiques)

**HH.HH:** La hauteur de la plante.

**TT.TT:** Profondeur des racines.

**LAD1 et LAD10:** La densité de la surface de la feuille en m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> de LAD1 jusqu'à LAD10.

**RAD1 et RAD10:** La densité de la surface des racines m<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> de RAD1 jusqu'à RAD10.

Pour LAD1 et RAD1  $Z/H = 0.1$  jusqu'à  $Z/H = 1$  (LAD10 et RAD10) où Z est la hauteur du LAD et où RAD et H est la hauteur de la plante où la profondeur des racines.

**NAME :** Donne un nom à la plante.

**(2) Sol :** La sélection du type de sol est similaire aux plantes, toutes les propriétés des sols sont définies dans un fichier d'entrée : PROFILES.DAT

ID	V	ns	nfc	nwilt	matpot	h <sub>yr</sub>	CP	b	Hcn	Name.....(20 z)....	ENVI-met Datafile
ss	0	0.451	0.240	0.155	-0.478	7.0	1.212	5.39	0.00	Default soil (Loam)	(c)mbn 97
sd	0	0.395	0.135	0.0068	-0.121	176.0	1.463	4.05	0.00	Sand	
ls	0	0.410	0.150	0.075	-0.090	156.3	1.404	4.38	0.00	Loamy Sand	
sl	0	0.435	0.195	0.114	-0.218	34.1	1.320	4.90	0.00	Sandy Loam	
sll	0	0.485	0.255	0.179	-0.786	7.2	1.271	5.30	0.00	Silt Loam	
le	0	0.451	0.240	0.155	-0.478	7.0	1.212	5.39	0.00	Loam	
ts	0	0.420	0.255	0.175	-0.299	6.3	1.175	7.12	0.00	Sandy Clay Loam	
tl	0	0.477	0.322	0.218	-0.356	1.7	1.317	7.75	0.00	Silty Clay Loam	
lt	0	0.475	0.325	0.250	-0.630	2.5	1.225	8.52	0.00	Clay Loam	
st	0	0.426	0.310	0.219	-0.153	2.2	1.175	10.40	0.00	Sandy Clay	
ts	0	0.492	0.370	0.283	-0.490	1.0	1.150	10.40	0.00	Silty Clay	
to	0	0.482	0.367	0.286	-0.405	1.3	1.089	11.40	0.00	Clay	
tf	0	0.863	0.500	0.395	-0.356	8.0	0.836	7.75	0.00	Peat	
zb	1	0.00	0.000	0.000	0.00	0.0	2.083	0.00	1.63	Cement Concrete	
mb	1	0.00	0.000	0.000	0.00	0.0	1.750	0.00	2.33	Mineral Concrete	
ak	1	0.00	0.000	0.000	0.00	0.0	2.214	0.00	1.16	Asphalt (with Gravel)	
ab	1	0.00	0.000	0.000	0.00	0.0	2.251	0.00	0.90	Asphalt (with Basalt)	
gr	1	0.00	0.000	0.000	0.00	0.0	2.345	0.00	4.61	Granite	
ba	1	0.00	0.000	0.000	0.00	0.0	2.386	0.00	1.73	Basalt	
ww	2	0.00	0.000	0.000	0.000	0.0	0.000	0.000	0.00	Water	

Figure IV.5 : Modèle d'un fichier de données de base pour sol [Manuel d'Envi-met 3.0]

La [Figure IV.5] résume les différents types de sols inclus dans cette version d'Envi-met 3.0 :

**ID** : Ces deux lettres relient le sol aux données du fichier PROFILES.DAT

**V**: Type de sol, 0: Pour un sol normal, 1: matériaux étanche (aucun échange d'eau), 2: eau profonde.

**ns**: Volume d'eau de saturation [ $\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ]

**nfc**: Volume d'eau contenu dans le champs de capacité en [ $\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ]

**nwilt**: Le volume d'eau pour le point de rosé (pour les models avec végétation) [ $\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ]

**matpot** : Matrice du Potentiel de saturation en [m]

**hydr:** Conductivité hydraulique pour le point de saturation.

**CP :** Volume de la capacité thermique.

**b:** Constante de Clapp et Hornberger

**HCN:** Conductivité thermique du matériau [ $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ]

**Name:** Nom donné pour identification.

**(3) Sources :** Définir les différentes sources qui se trouvent tel que : "CO", "CO<sub>2</sub>", "NO", "NO<sub>2</sub>", "SO<sub>2</sub>", "NH<sub>3</sub>", "H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>".

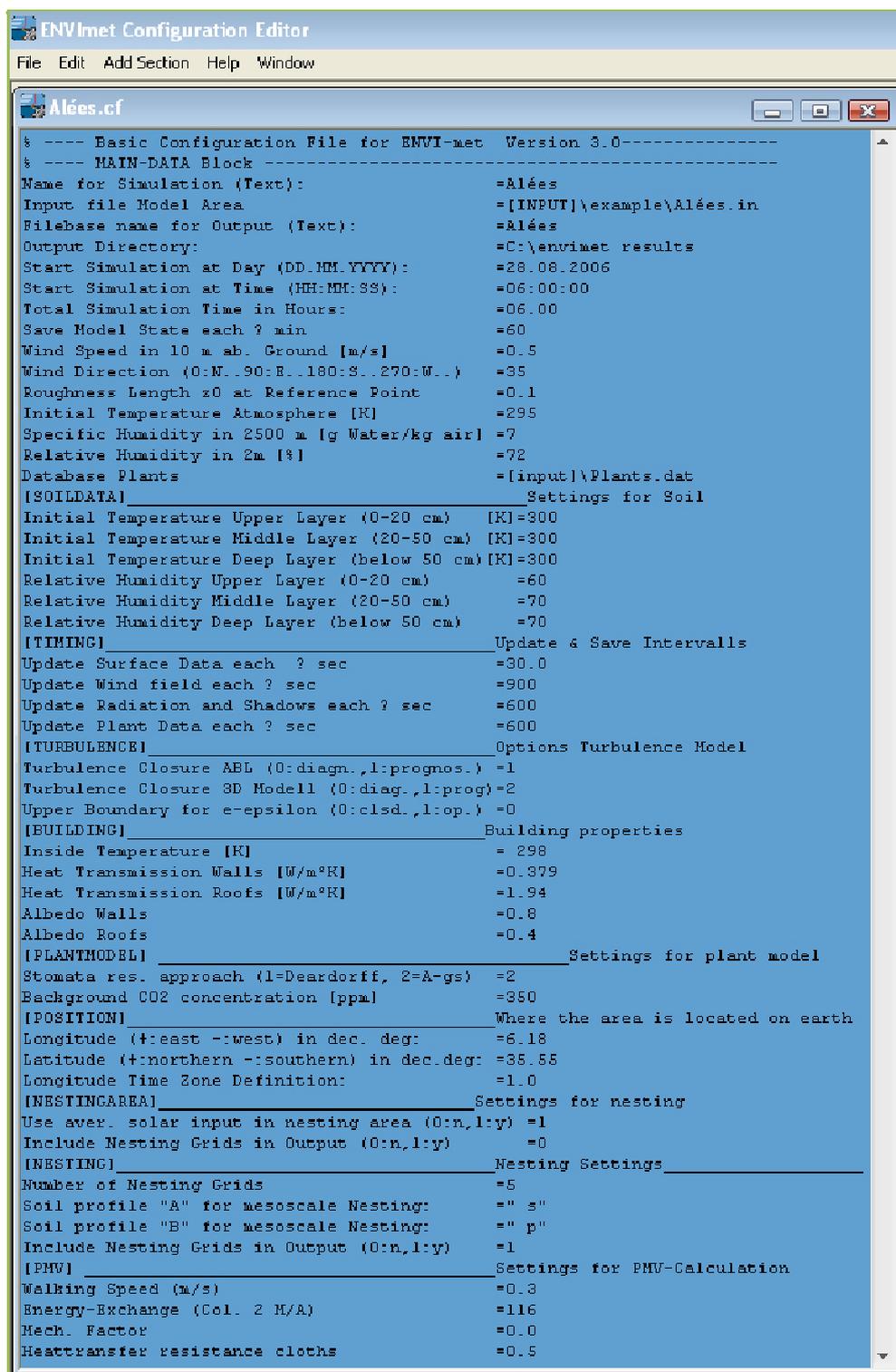
**(4) Récepteur :** Envi-met peut projeter jusqu'à 100 récepteurs. Se sont des points qui donnent les paramètres d'un point à l'intérieur du model simulé de  $Z=0$  jusqu'à  $Z$  max.

### 1.2. Fichiers de configurations C.F (\*.cf) :

Ce sont des fichiers textes qui décrivent les caractéristiques principales de la simulation :

- Nom de la simulation.
- Noms des fichiers entrées/sorties.
- La date et la durée de la simulation, l'intervalle de temps.
- Les paramètres climatiques : Température atmosphérique initiale, humidité spécifique, humidité relative.
- Adresse du fichier des données PLANTS.DAT
- Données propres à l'espace urbain simulé:
  - La position (longitude, latitude)
  - L'intervalle du temps pour la mise à jour des paramètres microclimatiques.
  - Turbulence
  - Caractéristiques physiques des constructions.
  - Caractéristiques physiques du sol.

Comme on peut ajouter aussi d'autre données tel que : données propre au sol, position, construction, temps de simulation... etc.



```

ENVI-met Configuration Editor
File Edit Add Section Help Window

Alées.cf

% ---- Basic Configuration File for ENVI-met Version 3.0-----
% ---- MAIN-DATA Block -----
Name for Simulation (Text):                =Alées
Input file Model Area                     =[INPUT]\example\Alées.in
Filebase name for Output (Text):          =Alées
Output Directory:                         =C:\envimet results
Start Simulation at Day (DD.MM.YYYY):     =28.08.2006
Start Simulation at Time (HH:MM:SS):      =06:00:00
Total Simulation Time in Hours:           =06.00
Save Model State each ? min               =60
Wind Speed in 10 m ab. Ground [m/s]:     =0.5
Wind Direction (0=N..90=E..180=S..270=W..)=95
Roughness Length z0 at Reference Point    =0.1
Initial Temperature Atmosphere [K]:       =295
Specific Humidity in 2500 m [g Water/kg air]=7
Relative Humidity in 2m [%]:              =72
Database Plants                           =[input]\Plants.dat
[SOILDATA]                                 Settings for Soil
Initial Temperature Upper Layer (0-20 cm) [K]=300
Initial Temperature Middle Layer (20-50 cm) [K]=300
Initial Temperature Deep Layer (below 50 cm) [K]=300
Relative Humidity Upper Layer (0-20 cm)   =60
Relative Humidity Middle Layer (20-50 cm) =70
Relative Humidity Deep Layer (below 50 cm) =70
[TIMING]                                   Update & Save Intervals
Update Surface Data each ? sec            =30.0
Update Wind field each ? sec              =900
Update Radiation and Shadows each ? sec   =600
Update Plant Data each ? sec              =600
[TURBULENCE]                              Options Turbulence Model
Turbulence Closure ABL (0:diag.,1:prognos.) =1
Turbulence Closure 3D Modell (0:diag.,1:prog)=2
Upper Boundary for e-epsilon (0:clsd.,1:op.) =0
[BUILDING]                                 Building properties
Inside Temperature [K]:                   = 298
Heat Transmission Walls [W/m²K]:           =0.379
Heat Transmission Roofs [W/m²K]:          =1.94
Albedo Walls:                             =0.8
Albedo Roofs:                             =0.4
[PLANTMODEL]                               Settings for plant model
Stomata res. approach (1=Deardorff, 2=A-gs) =2
Background CO2 concentration [ppm]:       =350
[POSITION]                                 Where the area is located on earth
Longitude (+:east -:west) in dec. deg:    =6.18
Latitude (+:northern -:southern) in dec.deg: =35.55
Longitude Time Zone Definition:            =1.0
[NESTINGAREA]                             Settings for nesting
Use aver. solar input in nesting area (0:n,1:y) =1
Include Nesting Grids in Output (0:n,1:y) =0
[NESTING]                                  Nesting Settings
Number of Nesting Grids                   =5
Soil profile "A" for mesoscale Nesting:   =" s"
Soil profile "B" for mesoscale Nesting:   =" p"
Include Nesting Grids in Output (0:n,1:y) =1
[PMV]                                       Settings for PMV-Calculation
Walking Speed (m/s):                     =0.3
Energy-Exchange (Col. 2 M/A):             =116
Mech. Factor:                             =0.0
Heattransfer resistance cloths             =0.5

```

Figure IV.6 : Fichier de configuration de l'axe étudié [Auteur 2008]

#### **IV.2.4. Les sorties (Outputs) :**

Envi-met peut générer une multitude de paramètres sous plusieurs répertoires les plus importants sont :

##### **IV.2.4.1. Fichier de sortie en 3D :**

Il Contient les fichiers atmosphère, surface et sol. Les résultats sont stockés sous un format binaire. Dans ce travail ils sont visualisés grâce à un autre logiciel LEONARDO 3.5.

##### **IV.2.4.2. Fichier des récepteurs :**

Ces fichiers permettent la définition des récepteurs à l'intérieur du model et de les voir de plus en plus en détail. Se sont de simples fichiers qui peuvent être visualisés avec un simple programme tel qu'Excel, Bloc-notes et Wordpad.

##### **IV.2.4.3.1D fichier model :**

Contient les données du profil vertical du model unidimensionnel d'Envi-met dans un format ASCII. Ces fichiers sont généralement utilisés pour la vérification et la résolution des problèmes qui peuvent figurer pendant la simulation [Bruse 2004]

La perception du confort thermique extérieur est influencée par plusieurs paramètres microclimatiques.

La vitesse du vent, radiation solaire et la température de l'air sont les paramètres les plus importants pour évaluer le confort thermiques pour les hautes latitudes [Zrudlo 1988 in Lindberg 2003].

Les indices thermo physiologiques sont largement utilisés pour évaluer l'impact du climat sur le confort intérieur et extérieur. Ces indices combinent les différents paramètres microclimatiques avec le bilan d'énergie thermique. Ceux qui sont souvent utilisés:

PET : Température Effective Physiologique

PMV : Vote Moyen Prévisible [Lindberg 2003].

### **IV.3.Simulation de l'axe étudié:**

L'axe choisi, qui est orienté Nord Ouest-Sud Est, a été dessiné en choisissant une échelle convenable pour arriver à le schématisé tout entier et pouvoir refléter la réalité du terrain, les dimensions des différentes constructions ainsi que les hauteurs sont respectés et soigneusement reportés selon deux échelles distinctes, une planimétrique pour dessiner le plan, et l'autre altimétrique pour reporter les hauteur en élévation, on obtient alors le fichier dessin nommé pour notre cas « Allées.in », qui est le suivant [Figure IV.7].

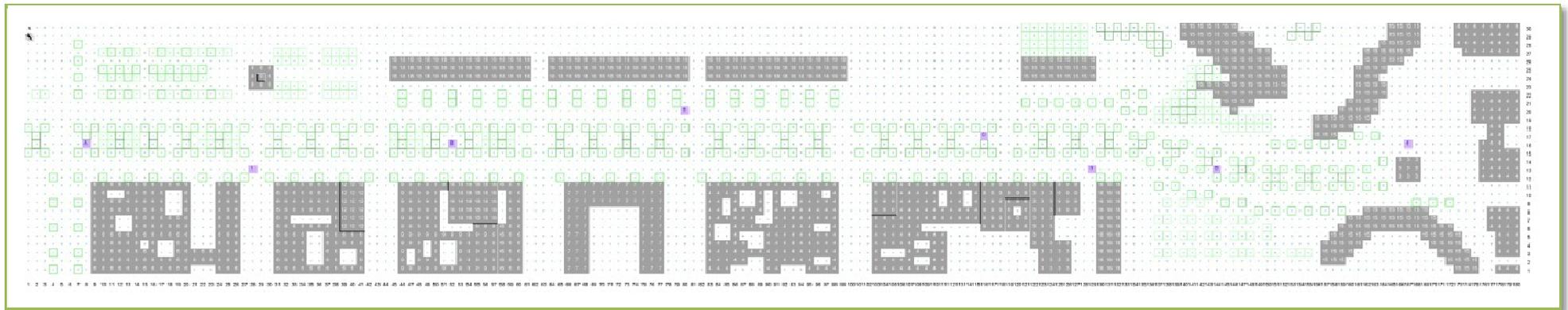


Figure IV.7 : Dessin de l'axe étudié avec l'indication des différentes stations [Auteur 2008]

Après le dessin de l'axe, on procède à le configurer dans un fichier \*.cf, pour pouvoir lui attribuer les caractéristiques voulues, afin d'aboutir aux résultats qui peuvent guider cette recherches aux objectifs visés et pouvoir confirmer ou infirmer nos hypothèses tracées.

Le tableau ci-dessous (Tableau IV.1), présente les principaux paramètres introduits au fichier \*.cf par les données inputs, qui servent avantageusement pour pouvoir aboutir à d'autres paramètres visés qui nous seront utiles, afin de pouvoir expliquer les phénomènes étudiés dans notre cas, et qui seront obtenus plus tard par les outputs. Ce sont les conditions générales dans lesquelles la simulation a été élaborée.

<b>Situation</b>	Allées Ben Boulaïd, Batna, Algérie Longitude: 6.8 Est Latitude: 35.55 Nord  Altitude: 1100 m
<b>Type de climat</b>	Climat semi-aride: chaud et sec en été
<b>Journée de l'investigation</b>	Journée chaude typique d'été, le 28 Aout 2006.
<b>Durée de l'investigation</b>	De 02.00 à 00.00h (24.00heures)
<b>Vitesse du vent</b>	0.5m/s
<b>Direction du vent</b>	Nord

Tableau IV.1 : Les différents paramètres introduits à l'axe simulé [Auteur 2008]

Après le lancement de la simulation pour des périodes qui couvrent toute la journée, c'est à dire 24 heures, en la démarrant chaque six heures successives, on a pu avoir des résultats qui pourront être lu par le programme Léonardo, en choisissant un intervalle bi-horaire.

**IV.4. Etude comparative entre les différents paramètres mesurés et ceux simulés:**

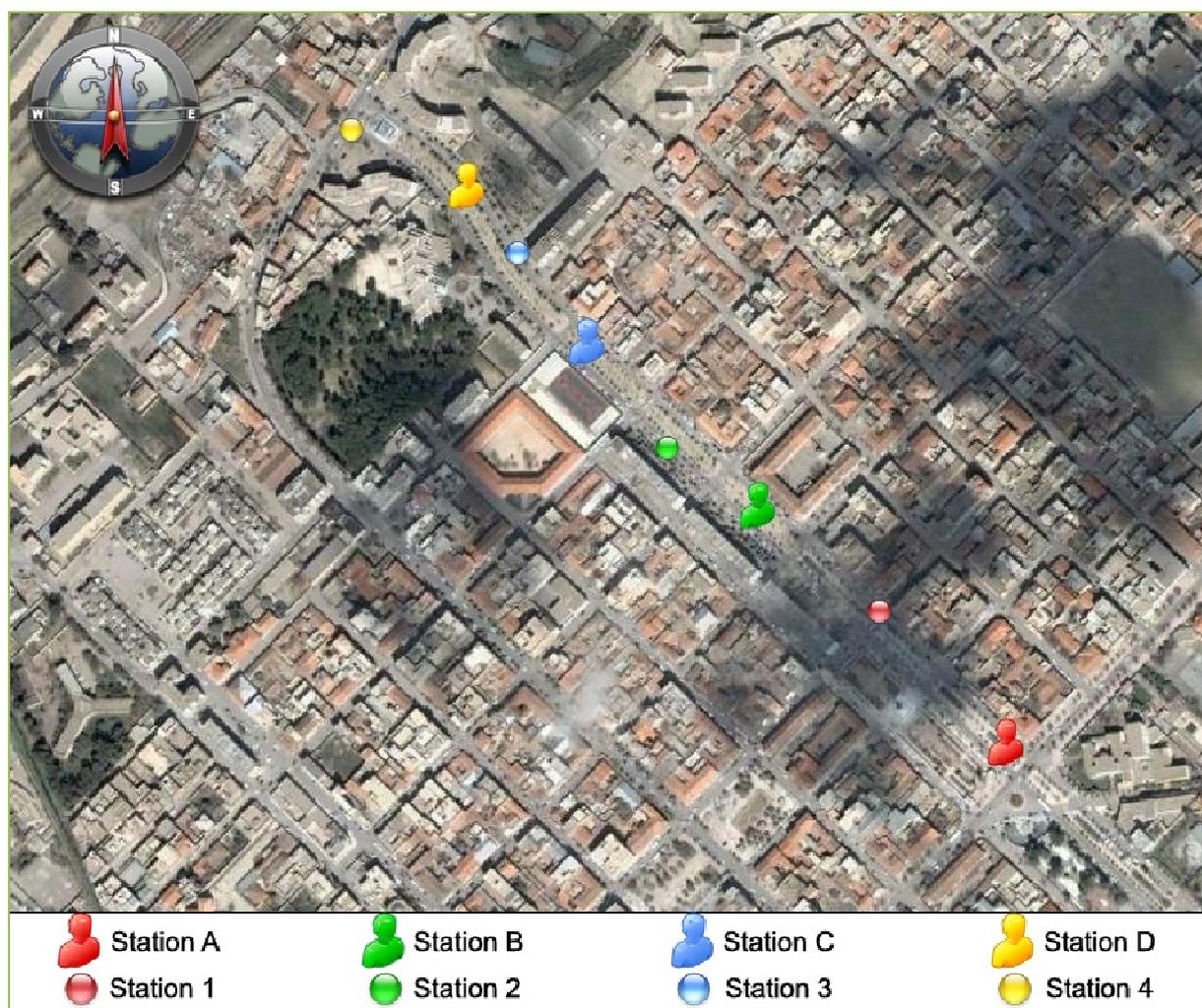
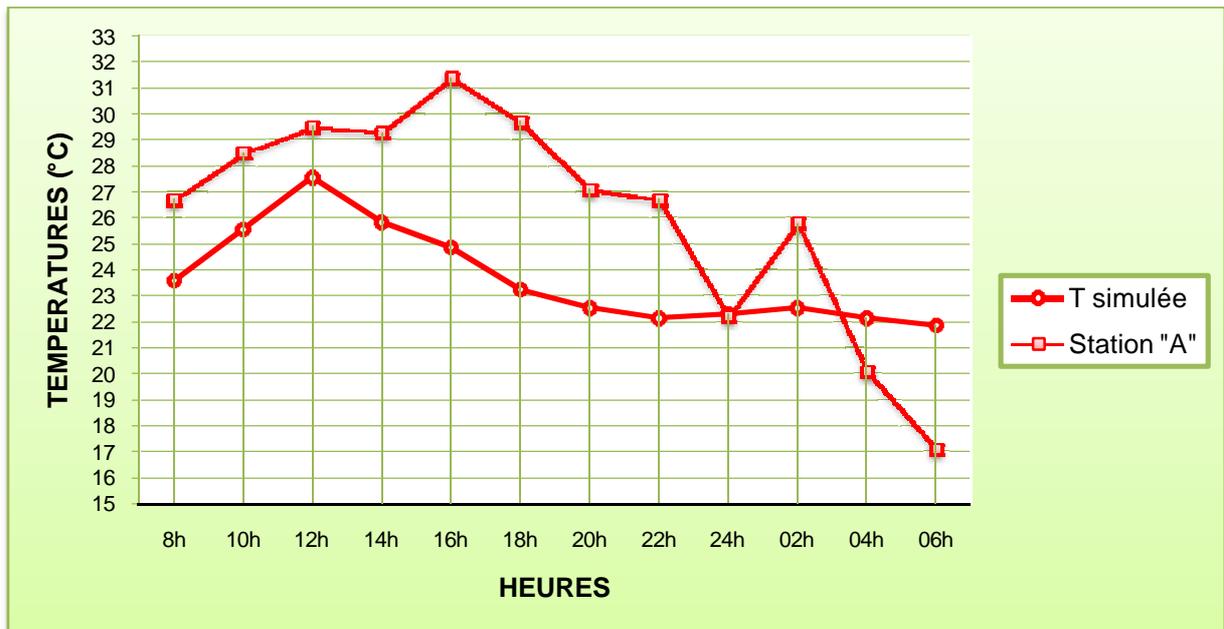
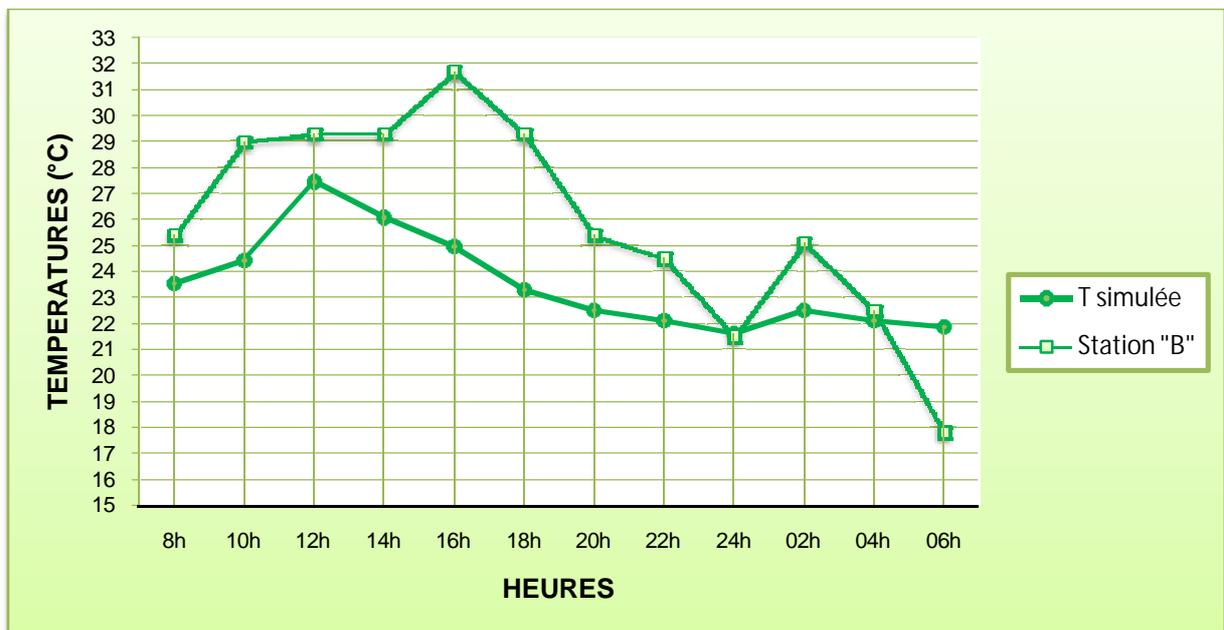


Figure IV.8 : Positionnement des différentes stations (simulées et mesurées) dans l'axe étudié [Google earth 2008, adapté par l'auteur]

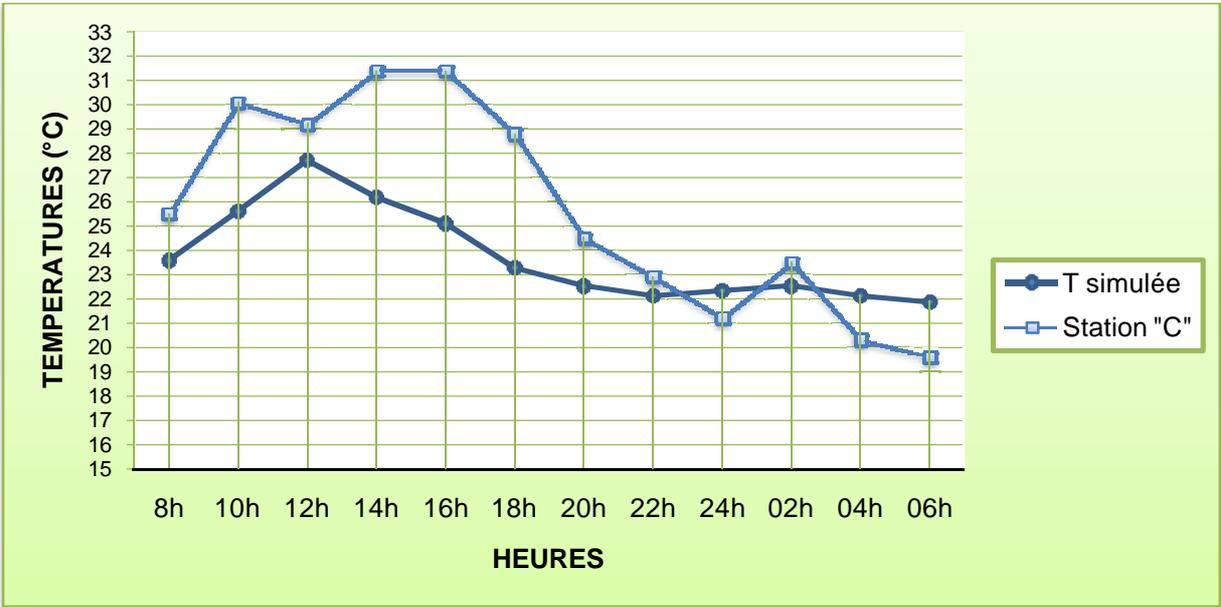
#### IV.4.1. Température de l'air:



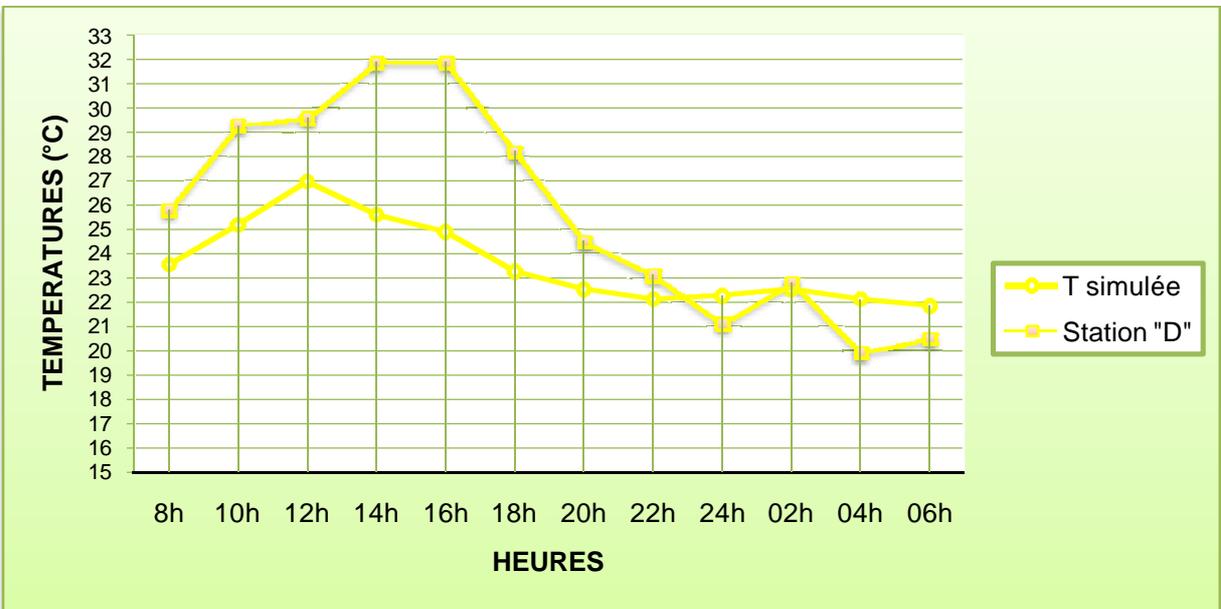
Graphe IV.1 : Comparaison entre la T simulée la T mesurée au niveau de la station A



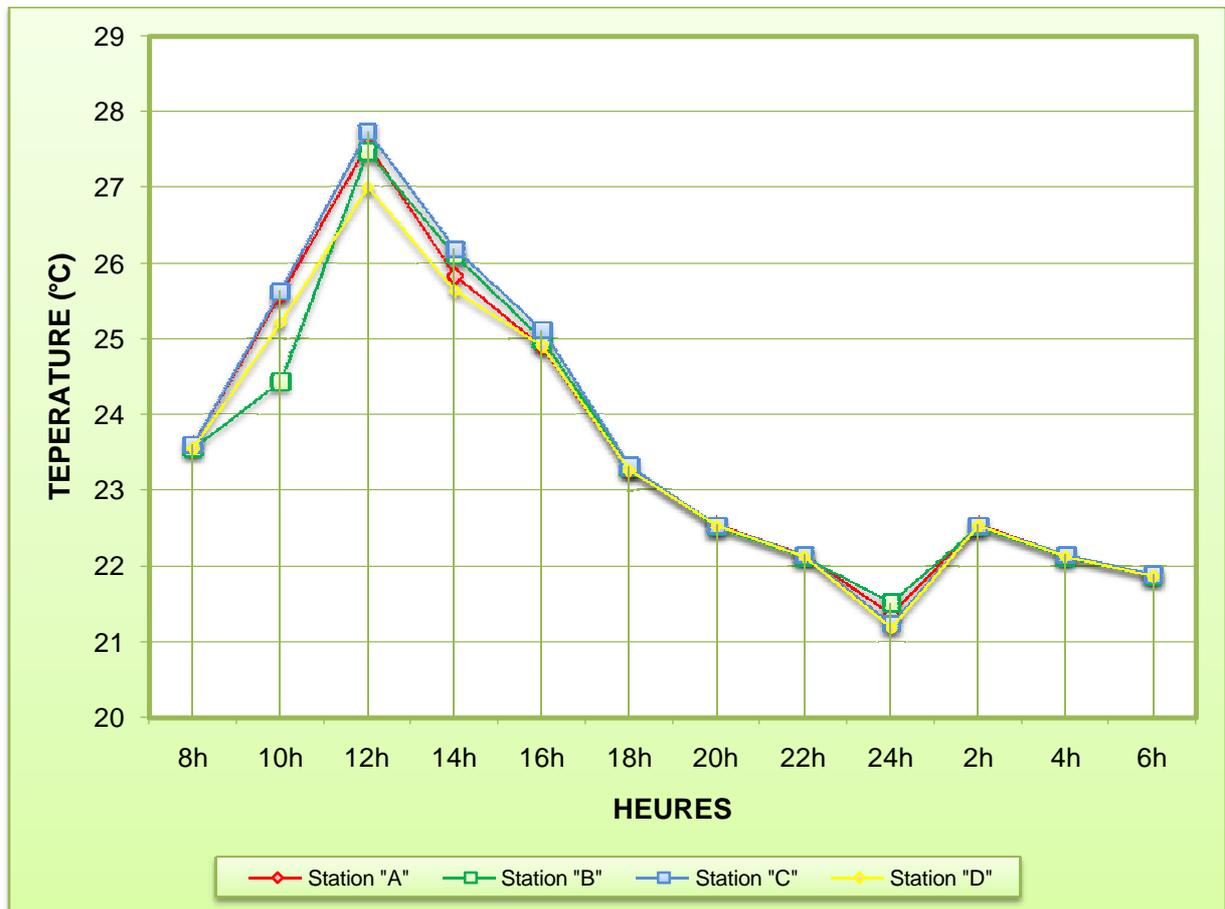
Graphe IV.2 : Comparaison entre la T simulée la T mesurée au niveau de la station B



Graphe IV.3 : Comparaison entre la T simulée la T mesurée au niveau de la station C



Graphe IV.4 : Comparaison entre la T simulée la T mesurée au niveau de la station D



Graphes IV.5 : Comparaison entre les températures simulées au niveau des 04 stations (A, B, C et D)

Les valeurs des températures simulées sont les moyennes des températures des mêmes stations décrites précédemment.

Lorsque, les températures simulées et mesurées sont comparées on observe une certaine différence pendant la matinée allant de 8h jusqu'à 22h ceci se traduit par une augmentation des températures mesurées par rapport à celles simulées, on enregistre 3°C de différence à 8h, heure de pointe. Cela est dû essentiellement à l'augmentation de la chaleur anthropique générée par la circulation mécanique des véhicules, alors que le logiciel n'a pas pris ce facteur en considération.

Pour le reste de la journée cet écart se réduit, les températures simulées deviennent un peu plus élevées que celles mesurées de 23h jusqu'à 01h (on enregistre une différence de 1 °C à 00h). Cela peut être expliqué par l'effet d'échauffement lié à la circulation des véhicules.

#### **IV.4.1.1. Parcours des températures de l'air :**

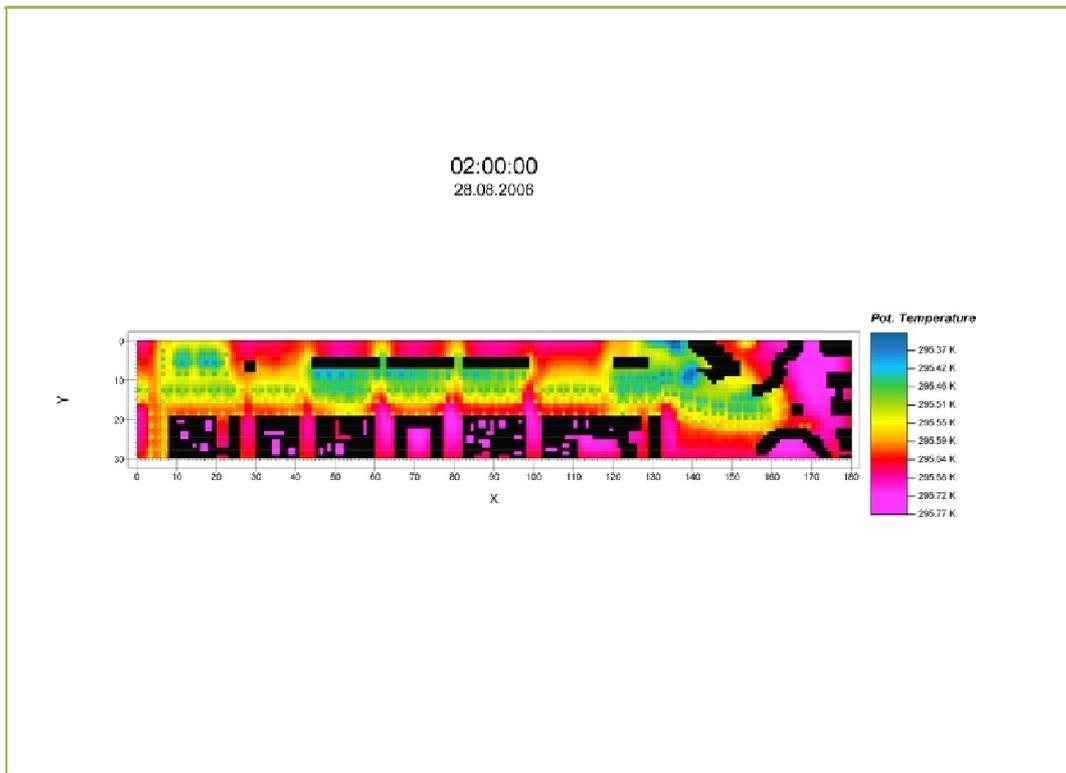


Figure IV.9 : Le parcours des températures à 2h

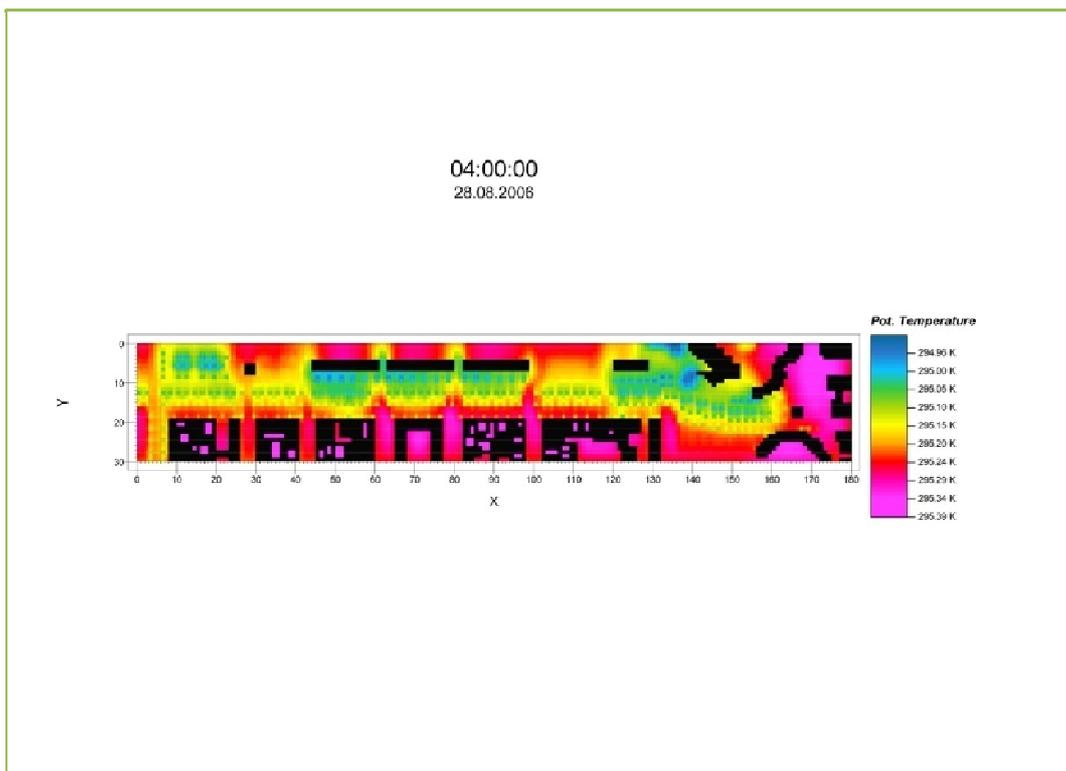


Figure IV.10 : Le parcours des températures à 4h

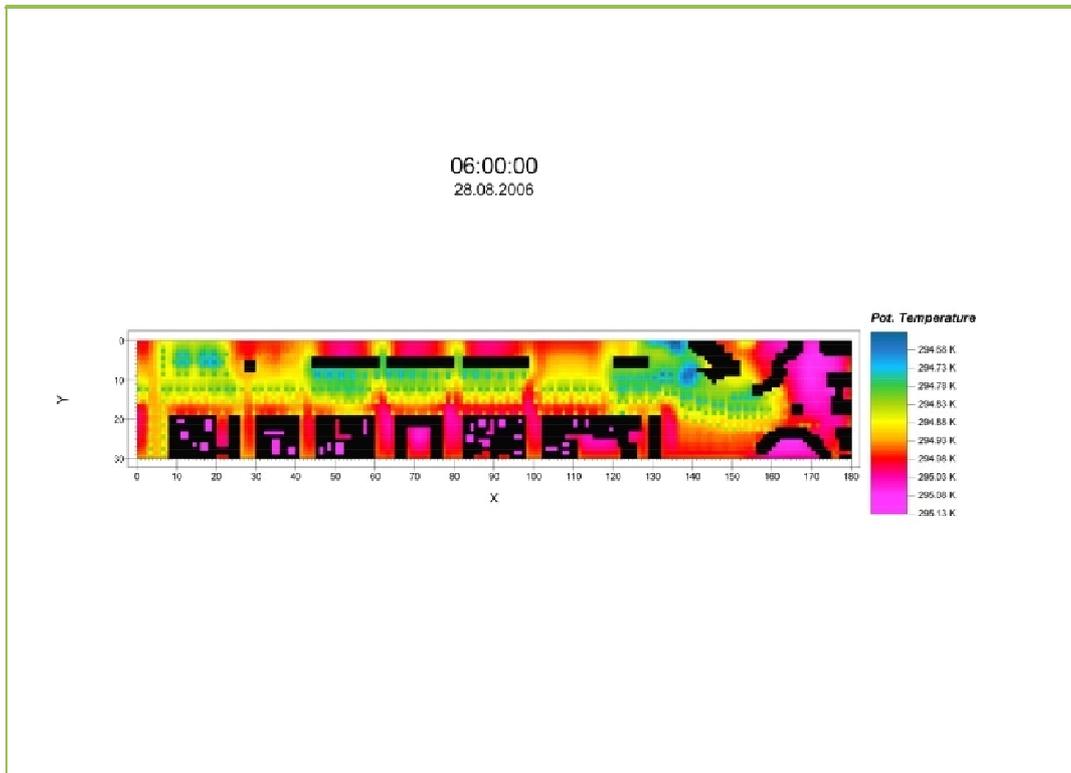


Figure IV.11 : Le parcours des températures à 6h

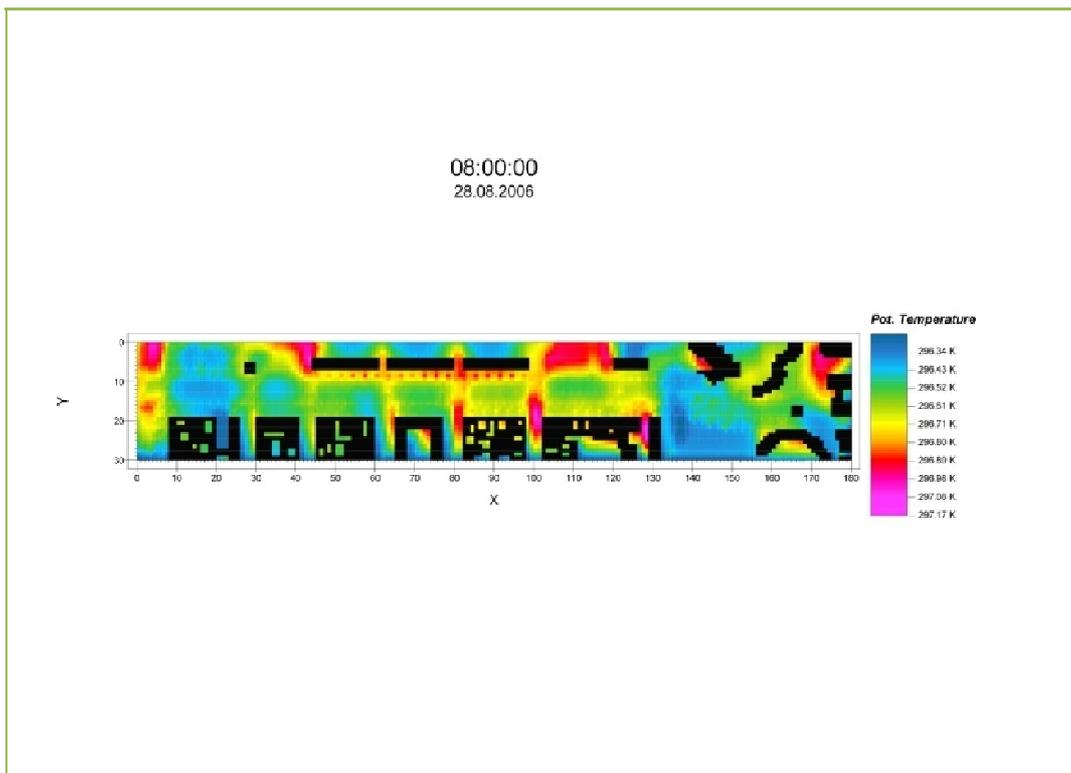


Figure IV.12 : Le parcours des températures à 8h

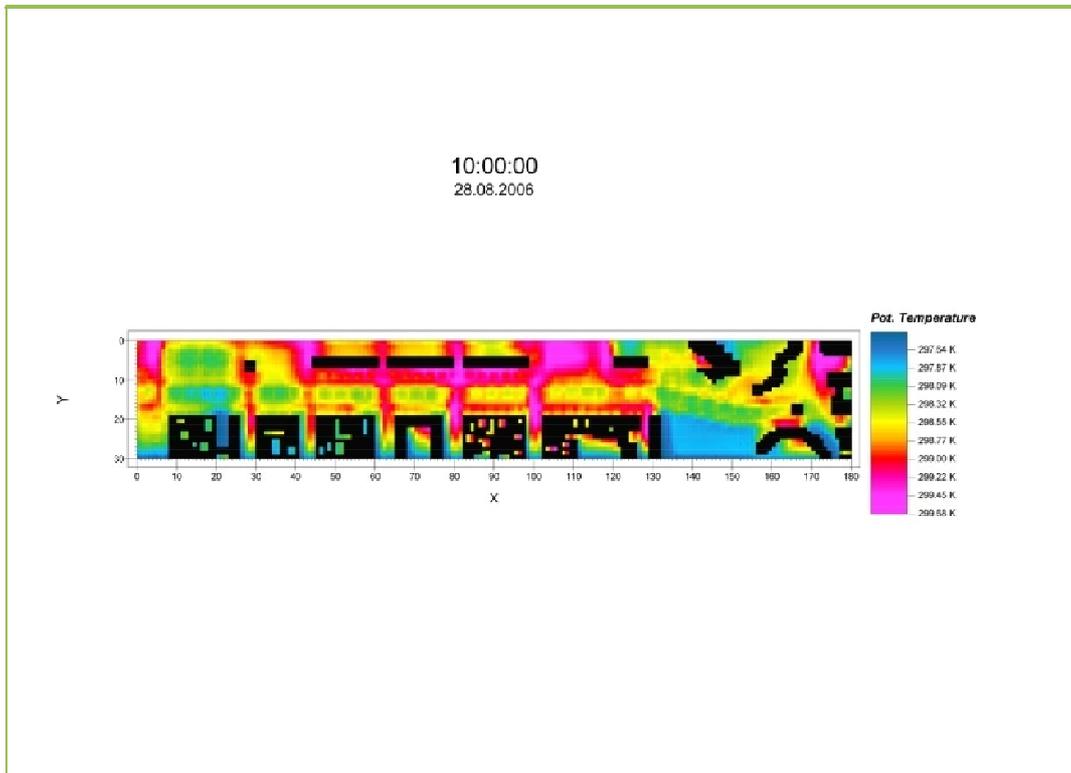


Figure IV.13 : Le parcours des températures à 10h

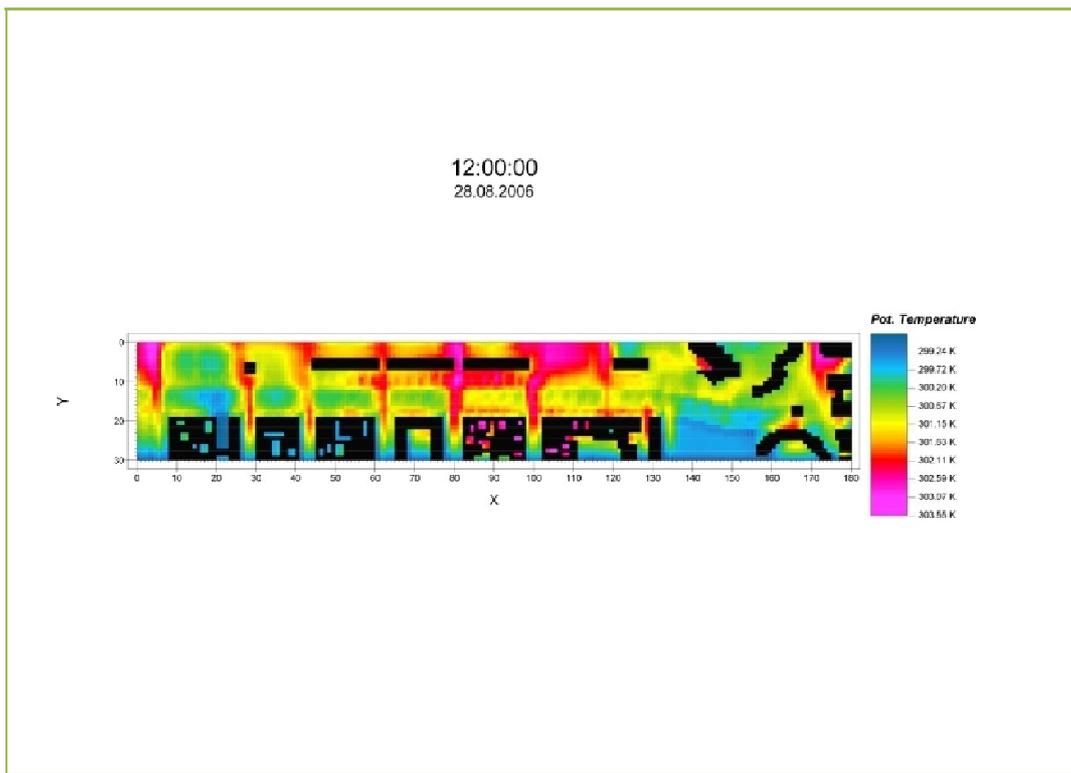


Figure IV.14 : Le parcours des températures à 12h

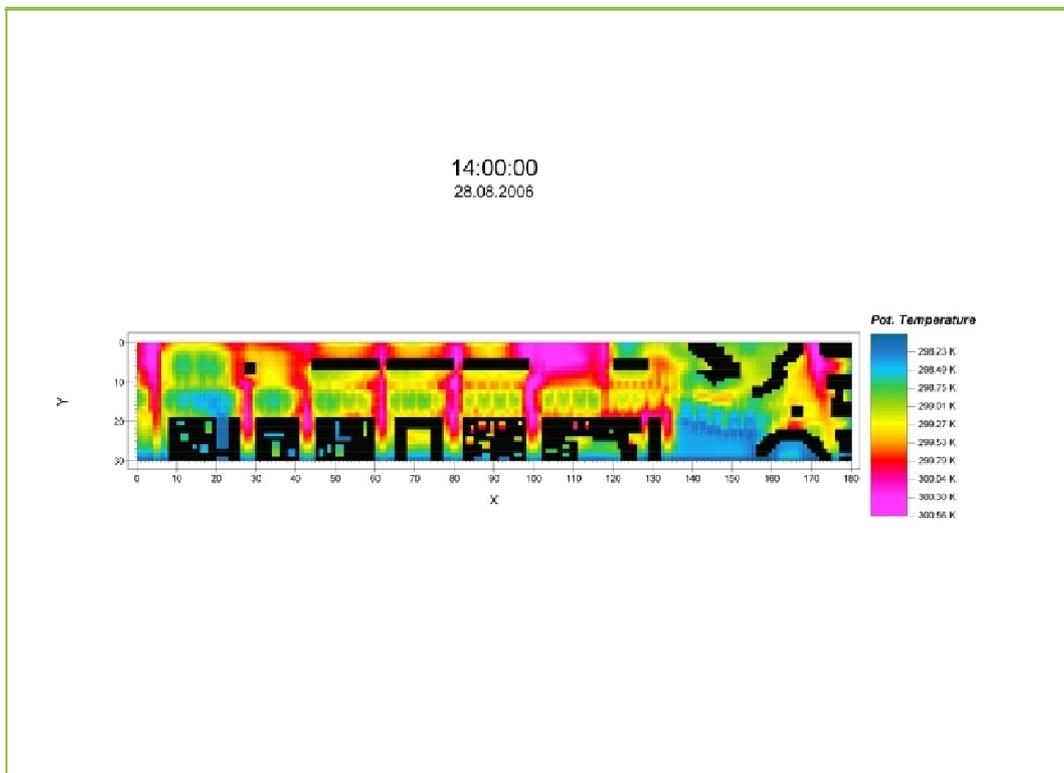


Figure IV.15 : Le parcours des températures à 14h

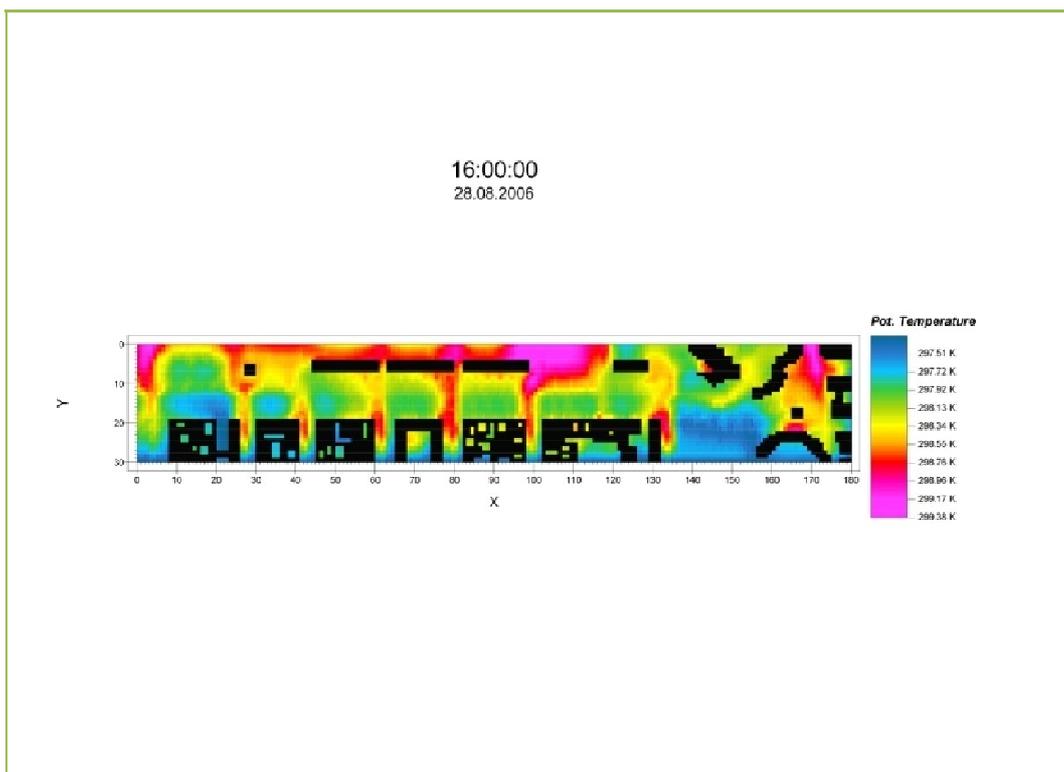


Figure IV.16 : Le parcours des températures à 16h

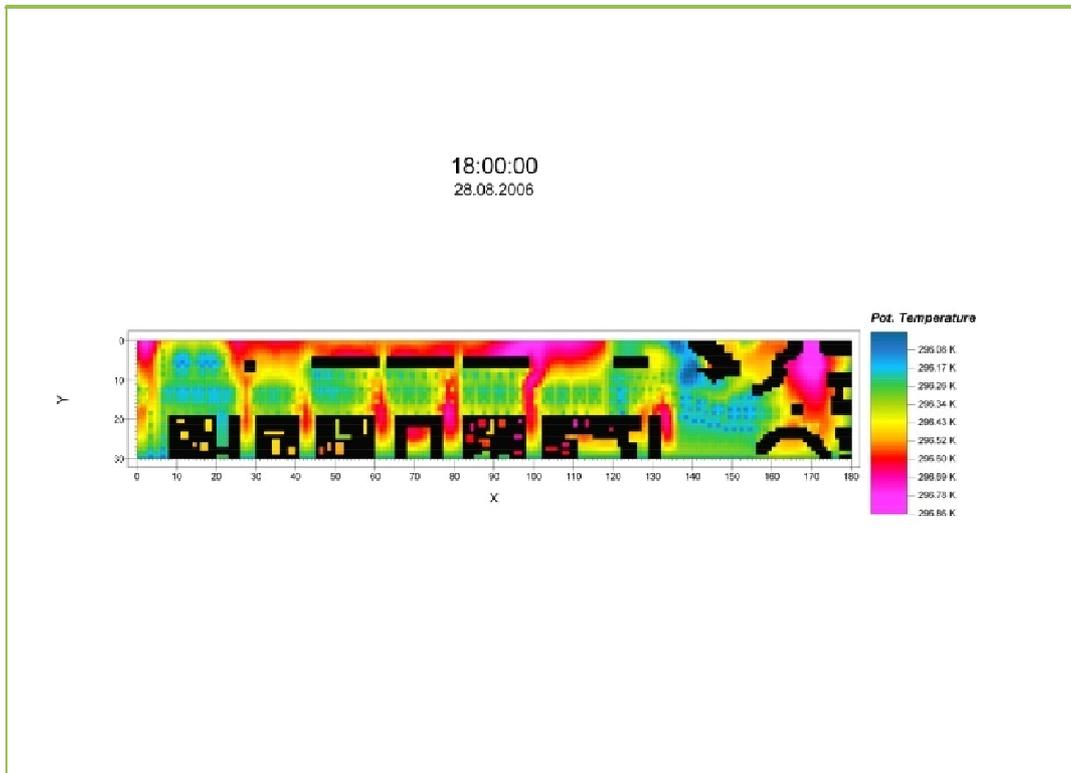


Figure IV.17 : Le parcours des températures à 18h

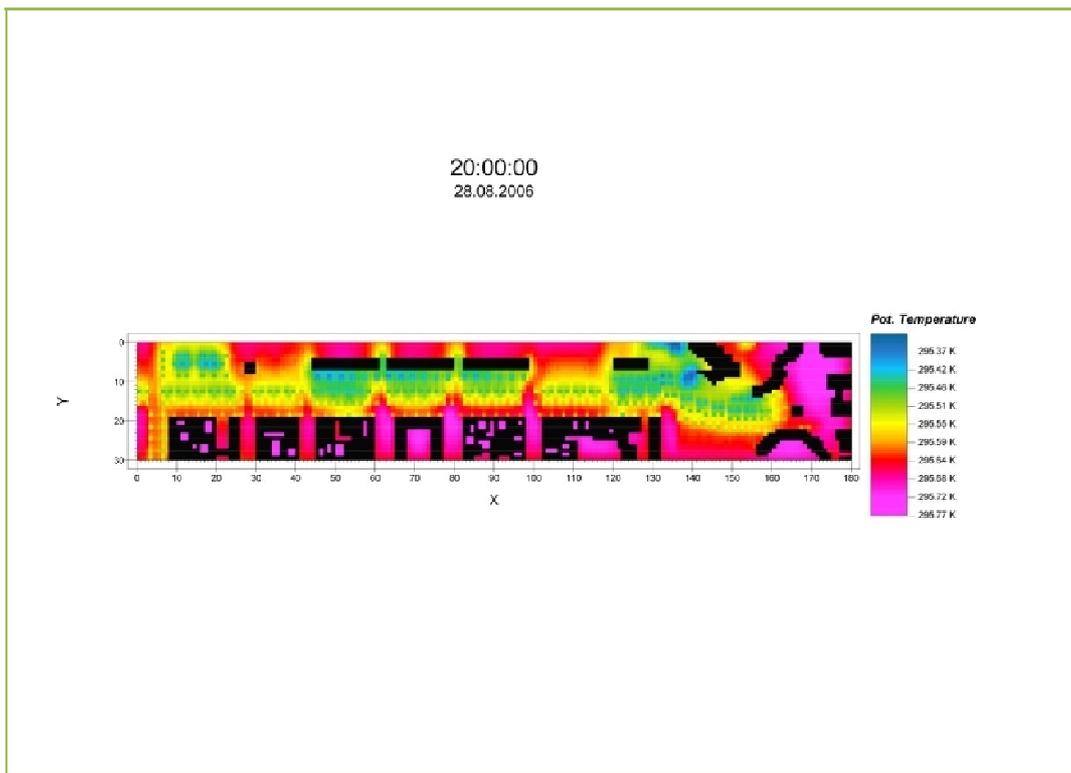


Figure IV.18 : Le parcours des températures à 20h

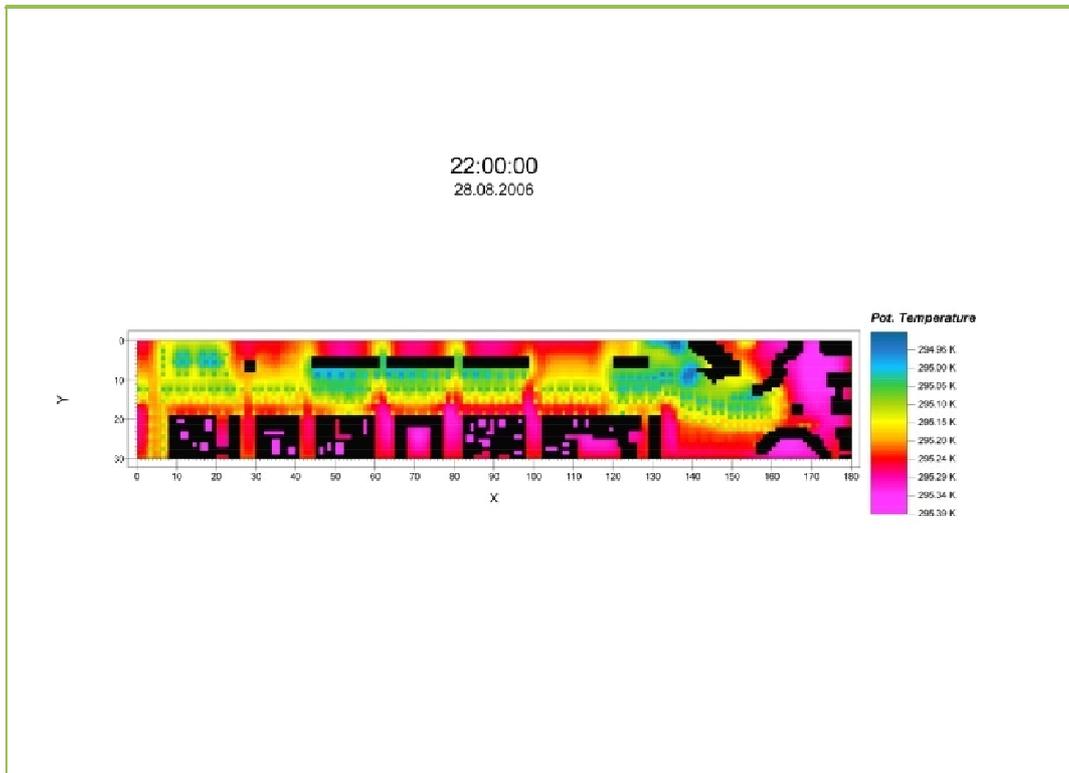
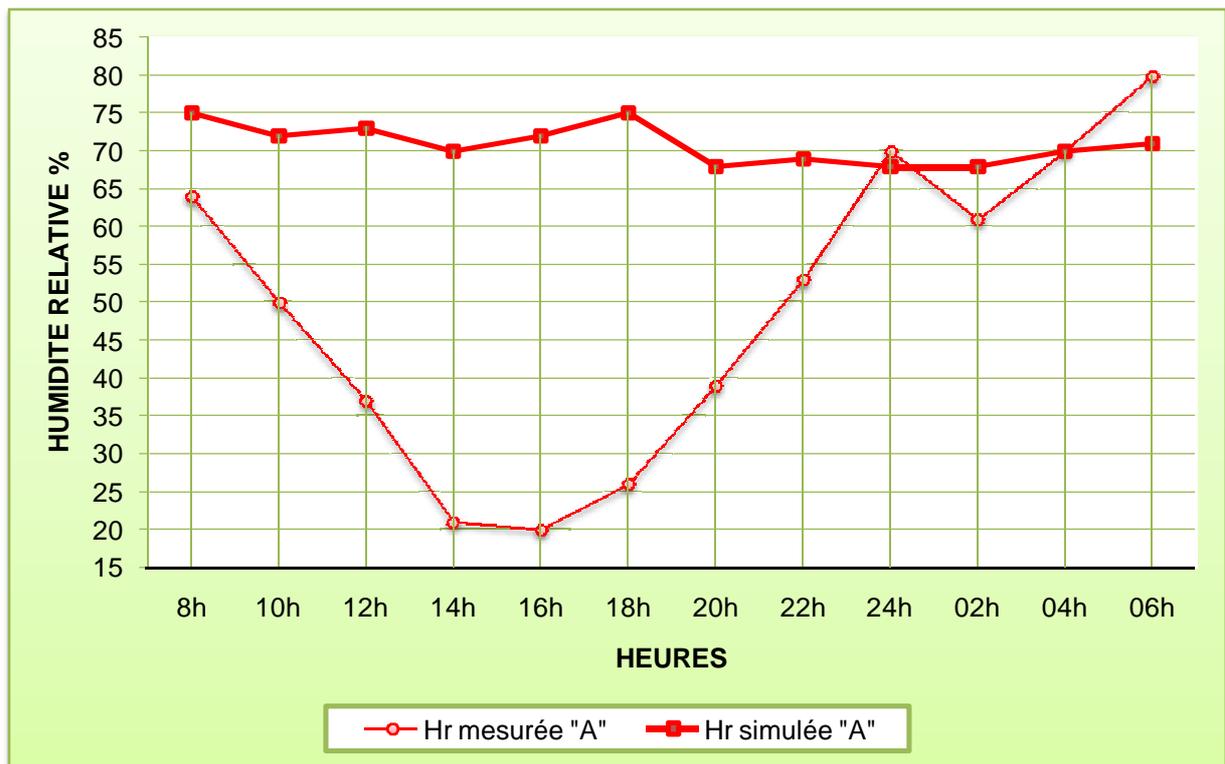


Figure IV.19 : Le parcours des températures à 22h

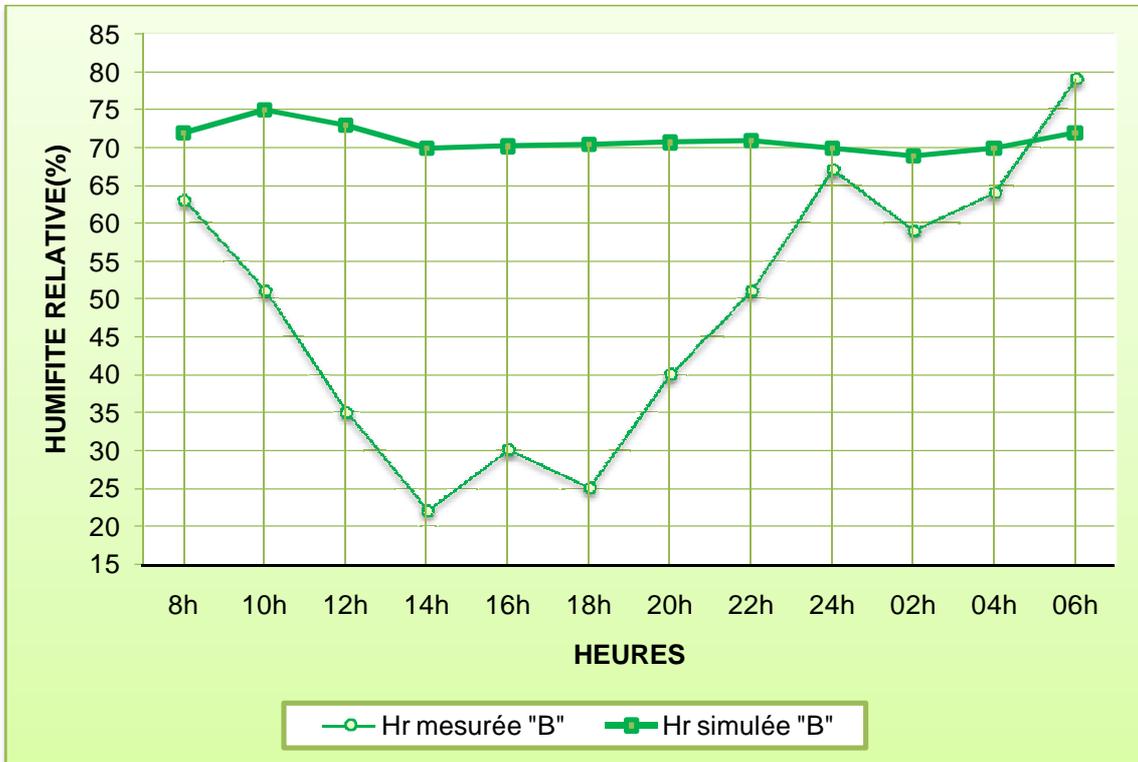
Le parcours est décrit selon les figures. La dégradation des couleurs illustre la progression des températures en fonction d'un axe allant de la partie Sud vers la partie Nord des allées. On remarque que la couleur bleu qui correspond à la température minimale enregistrée (inférieure à 21°C) dans la partie Nord, alors que températures les plus élevées sont enregistrées dans les autres parties découvertes des allées où on remarque une couleur rose qui correspond à une température supérieure à 30°C. On déduit que les meilleures températures sont enregistrées dans la partie dense.

#### IV.4.2.Humidité relative :

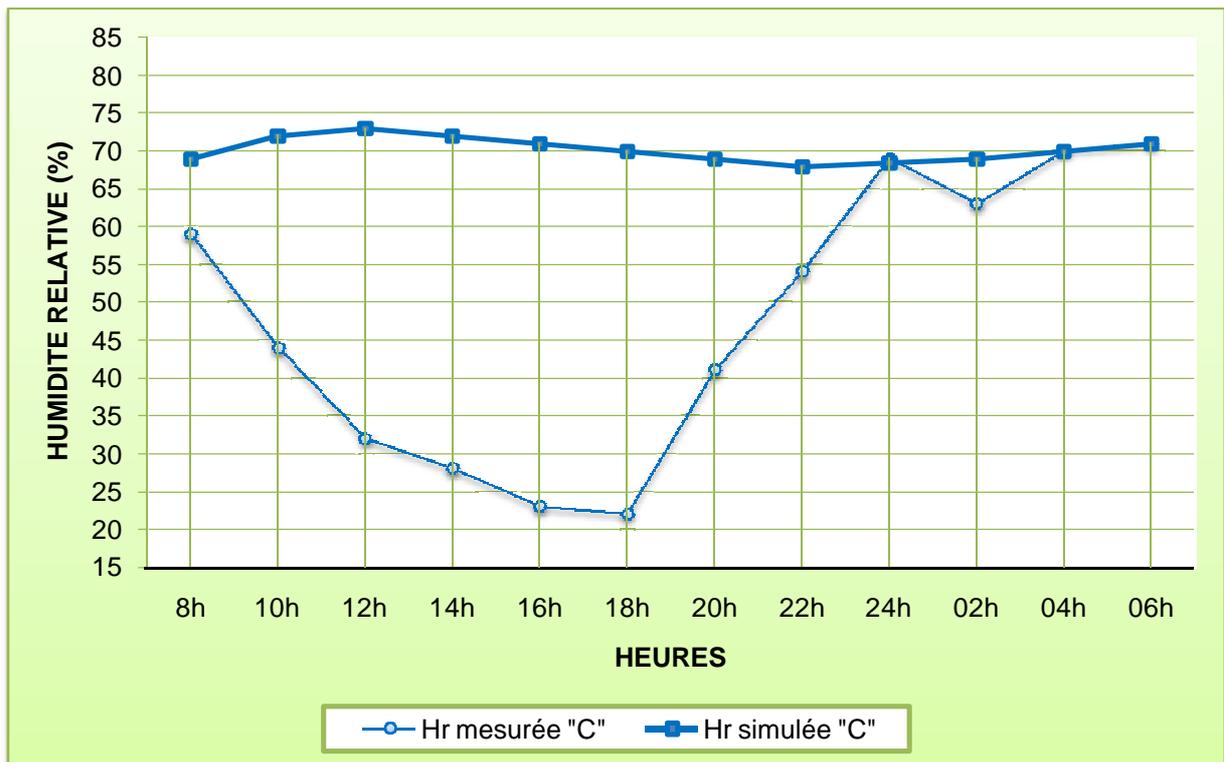
Envi-met calcul l'humidité spécifique exprimée en g/kg, les valeurs obtenues de la simulation sont converties à des humidités relatives grâce au diagramme (H, x) de l'air humide.



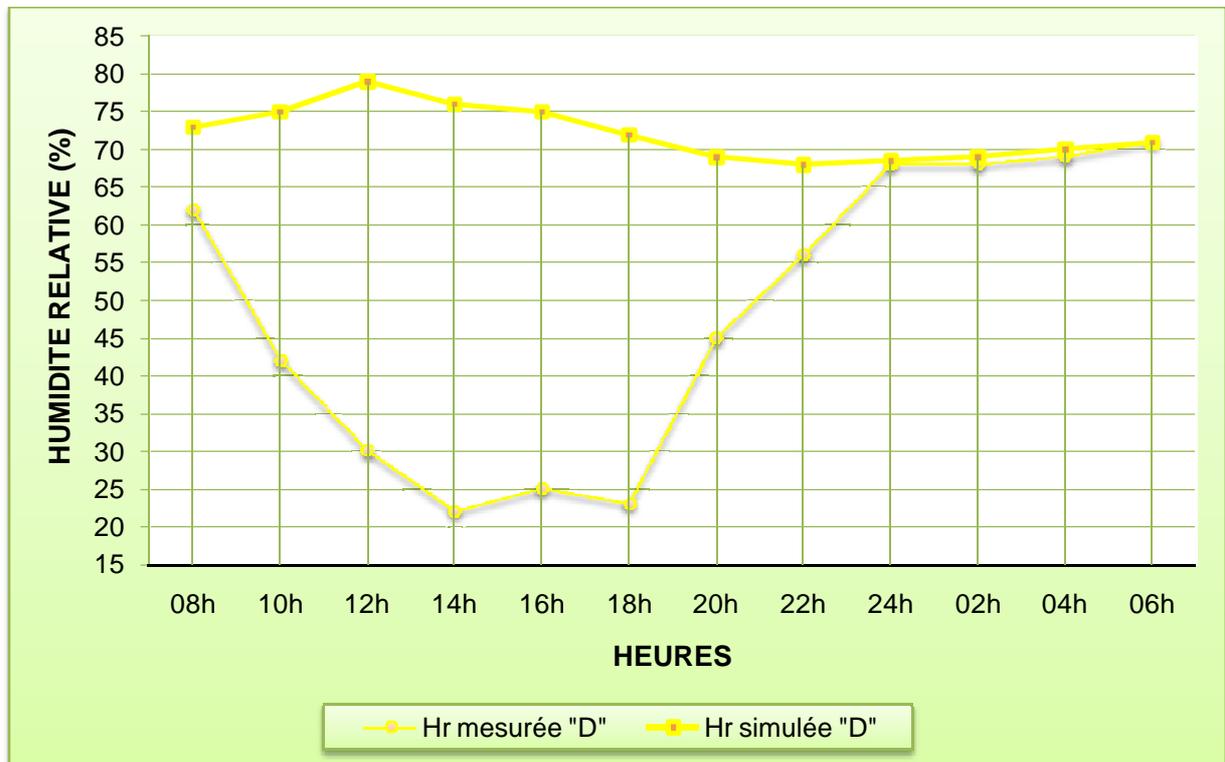
Graphe IV.6 : Comparaison entre la Hr simulée et la Hr mesurée au niveau de la station A



Graphe IV.7 : Comparaison entre la Hr simulée et la Hr mesurée au niveau de la station B



Graphe IV.8 : Comparaison entre la Hr simulée et la Hr mesurée au niveau de la station C



Graphe IV.9 : Comparaison entre la Hr simulée et la Hr mesurée au niveau de la station D

Les variations dans les humidités relatives sont étroitement liées aux variations dans les températures.

Avec l'augmentation des températures mesurées par rapport à celles simulées on enregistre une augmentation dans les valeurs des humidités relatives simulées par rapport à celles mesurées pendant toute la journée (de 8h jusqu'à 00h) et une petite de 4h à 6h pendant la matinée.

Pendant les heures de fréquentation maximale on enregistre un écart important de 50 %. Cela est dû à la circulation mécanique des véhicules.

On conclut que la comparaison entre les données de températures de l'air et humidités relatives mesurées et celles simulées montre une grande différence. Les écarts enregistrés sont justifiés par des scénarios qui n'ont pas été pris en considération dans la simulation.

Le recours au logiciel permet l'obtention de plusieurs paramètres qui vont servir à traiter la problématique du confort dans l'espace urbain.

#### IV.4.2.1. Parcours des humidités spécifiques :



Figure IV.20: Le parcours des humidités spécifiques à 2h

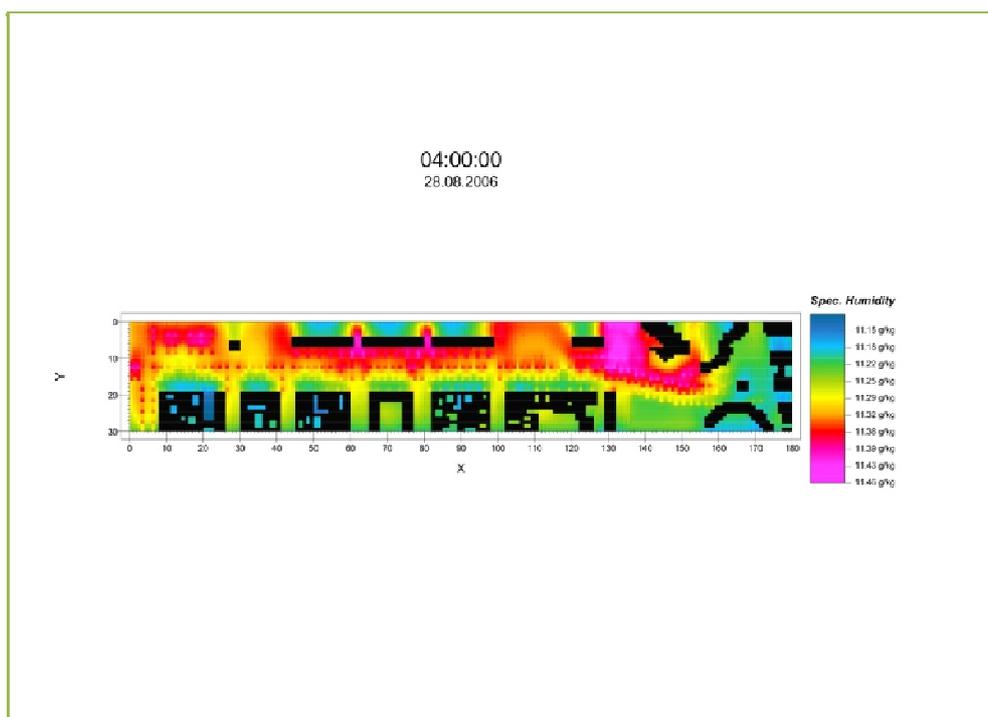


Figure IV.21: Le parcours des humidités spécifiques à 4h

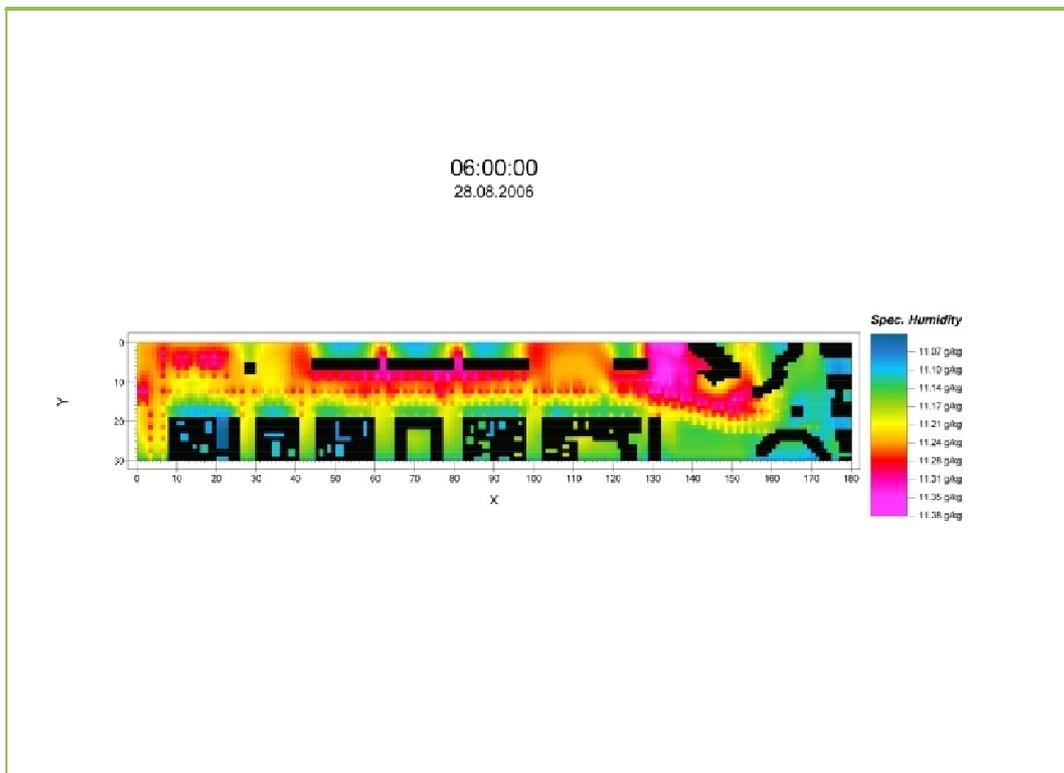


Figure IV.22 : Le parcours des humidités spécifiques à 6h

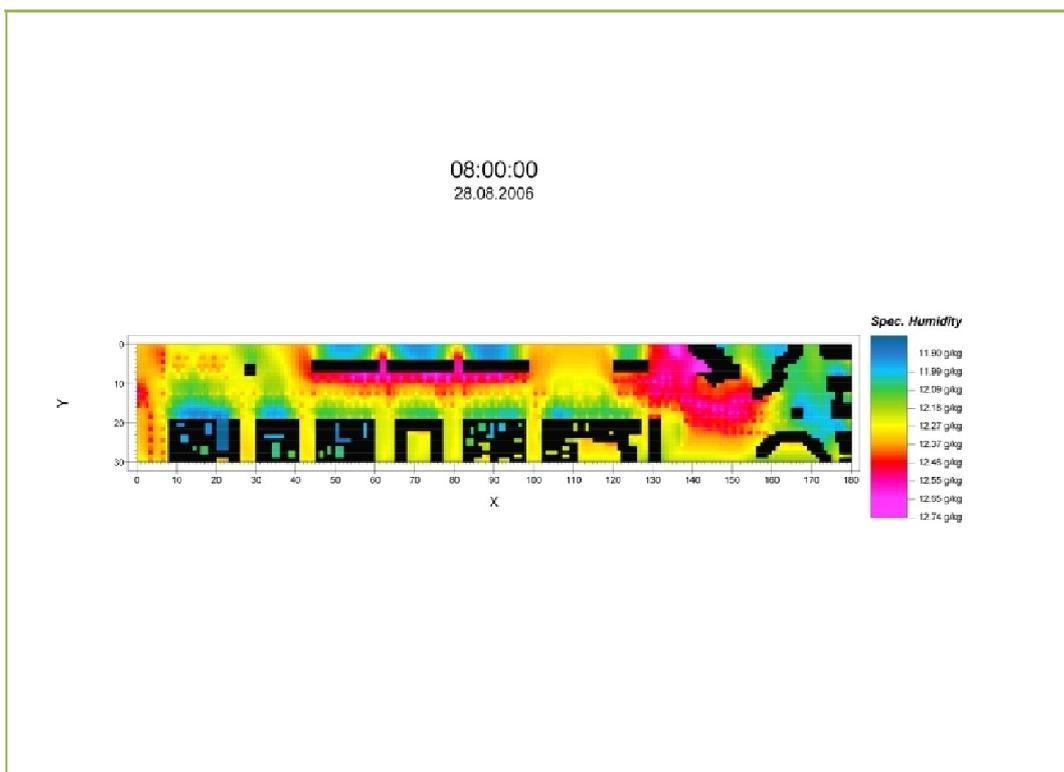


Figure IV.23 : Le parcours des humidités spécifiques à 8h

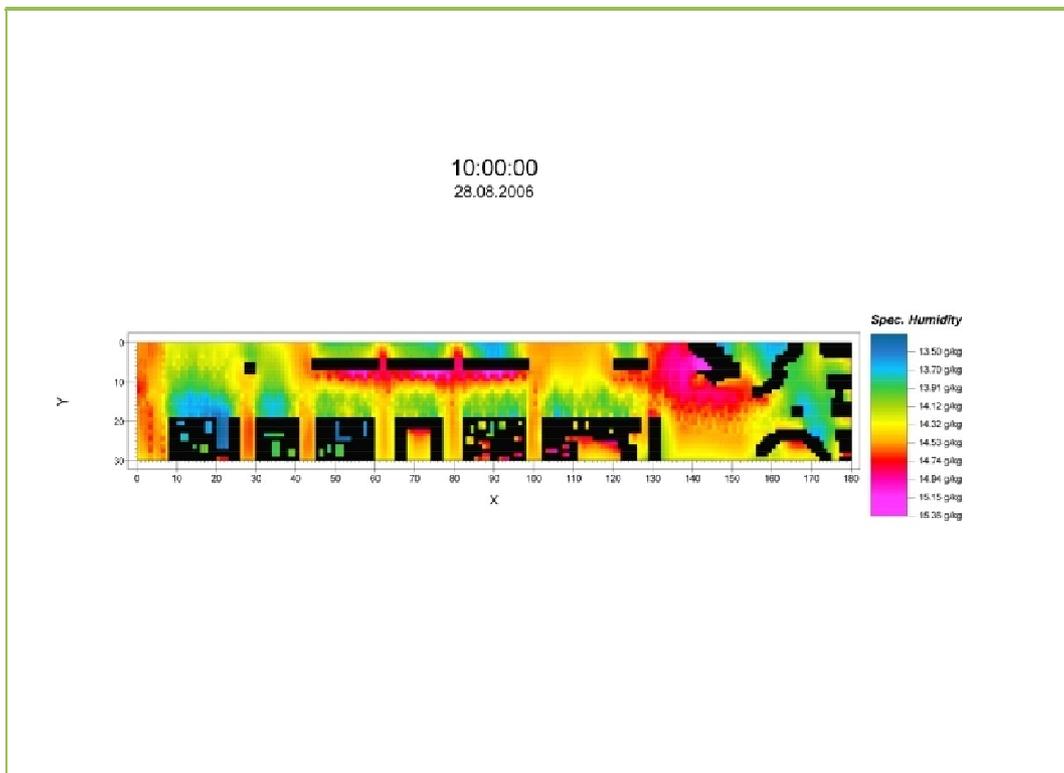


Figure IV.24 : Le parcours des humidités spécifiques à 10h

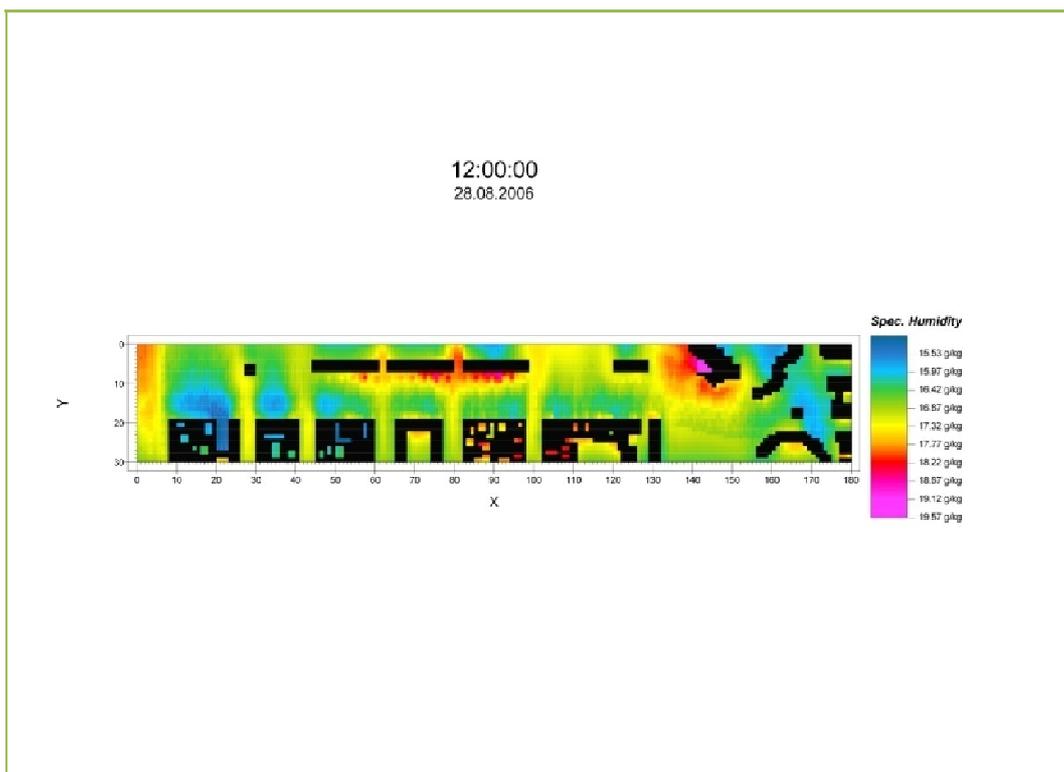


Figure IV.25 : Le parcours des humidités spécifiques à 12h

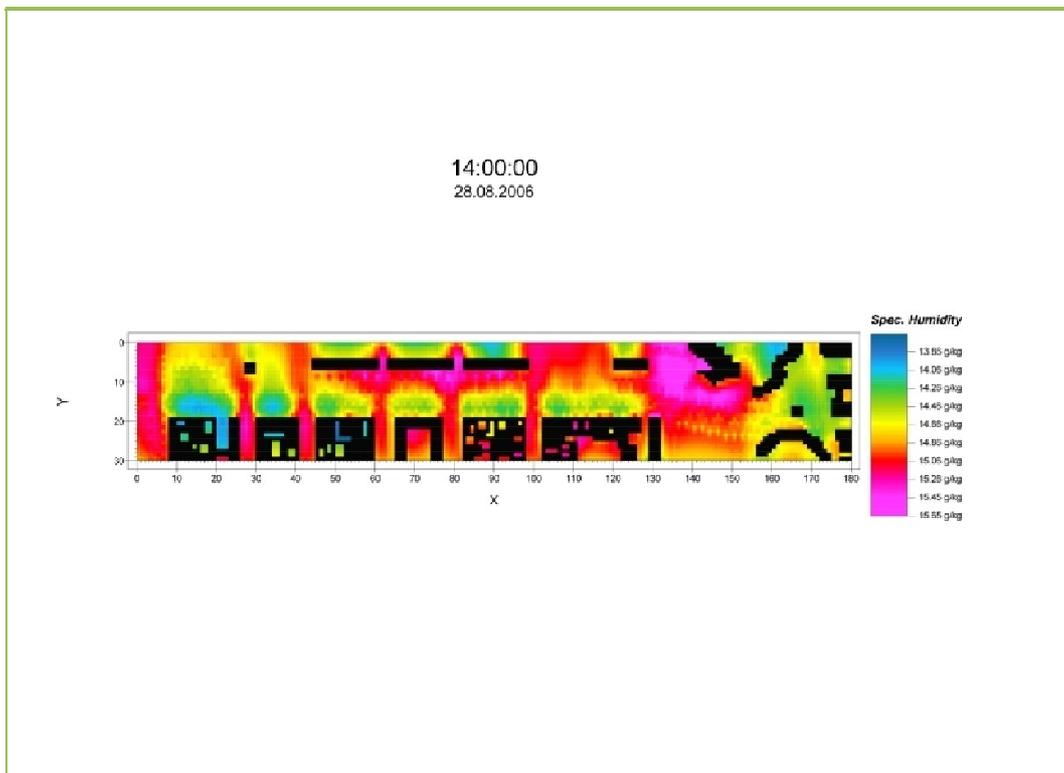


Figure IV.26 : Le parcours des humidités spécifiques à 14h

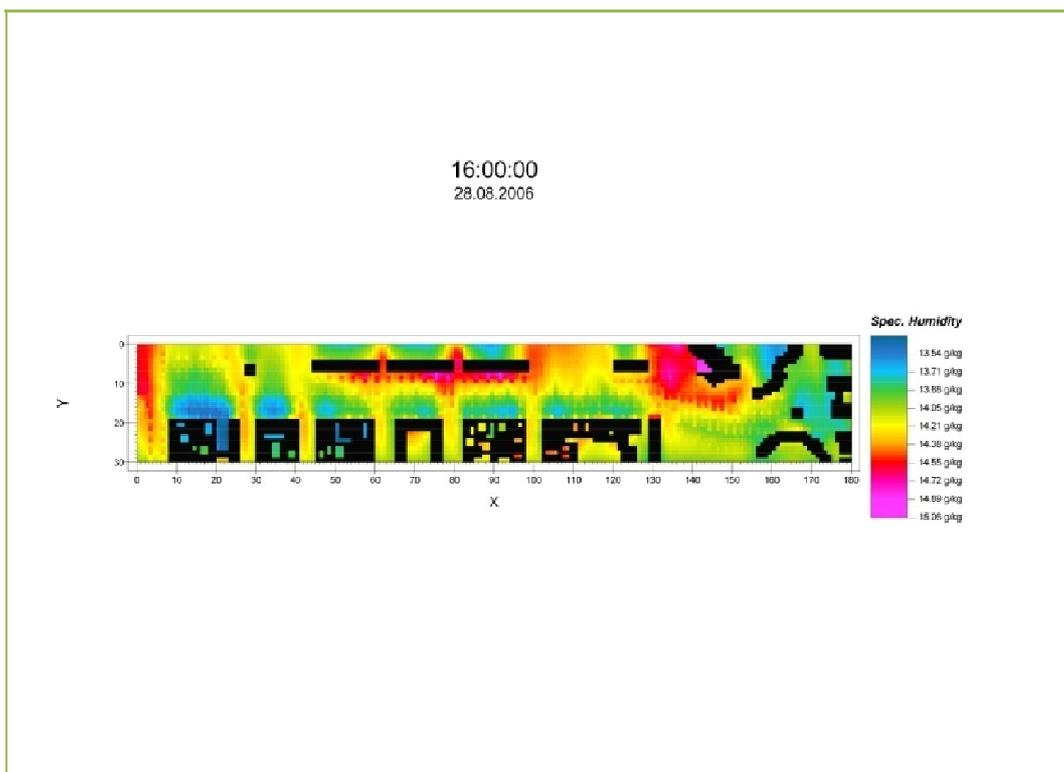


Figure IV.27 : Le parcours des humidités spécifiques à 16h

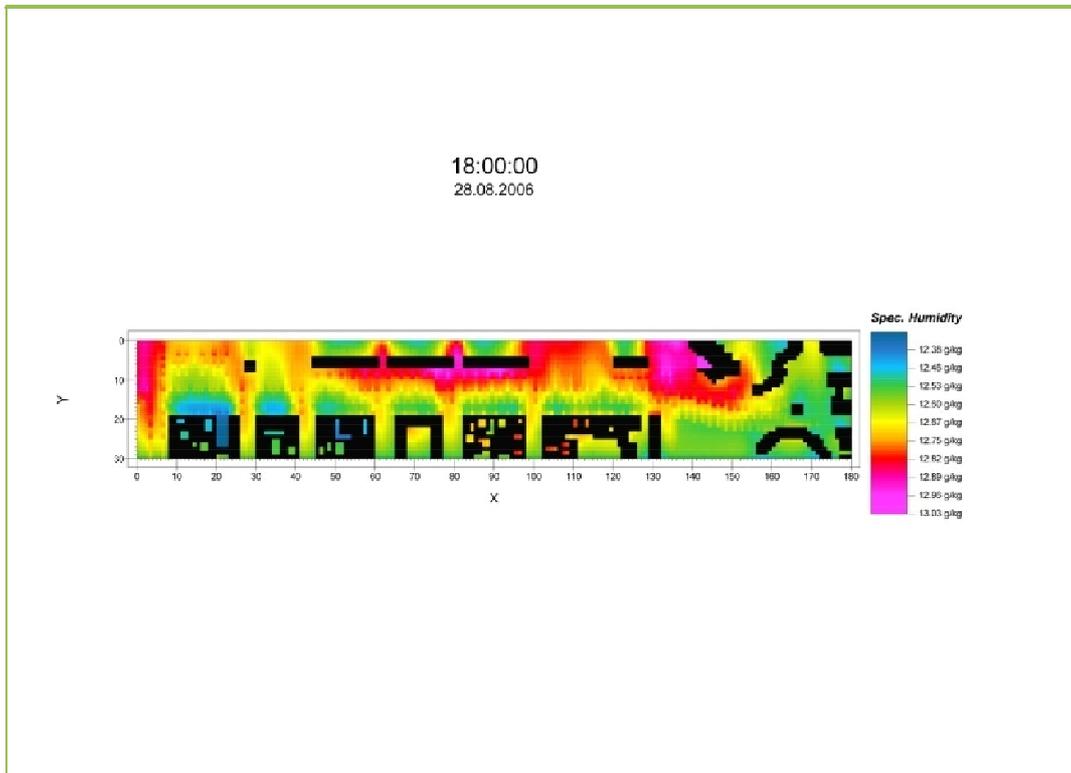


Figure IV.28: Le parcours des humidités spécifiques à 18h

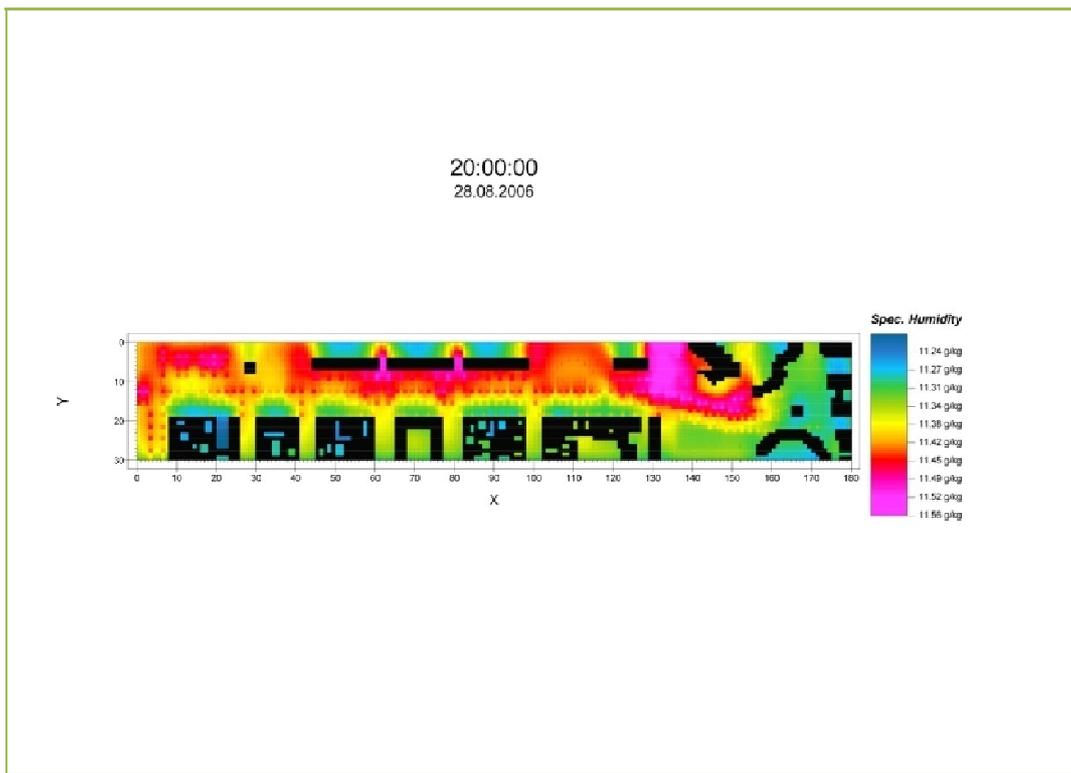


Figure IV.29 : Le parcours des humidités spécifiques à 20h

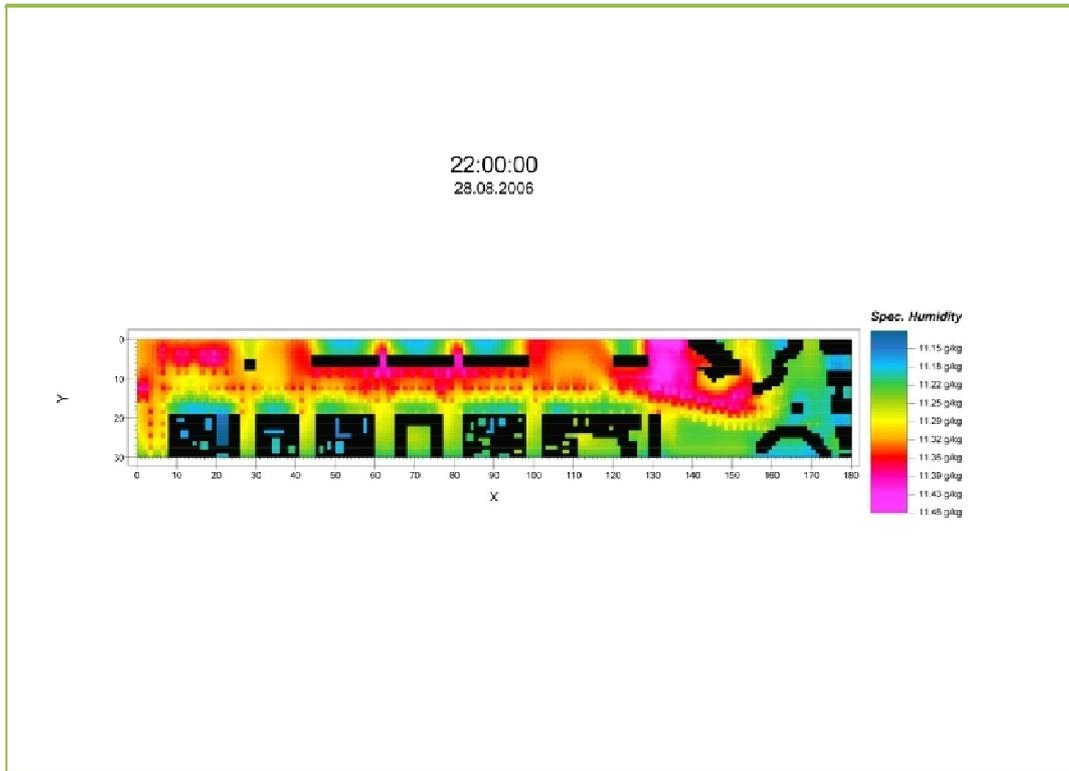


Figure IV.30 : Le parcours des humidités spécifiques à 22h

L'humidité relative dépend toujours de la température de l'air, on remarque que les stations qui ont enregistré les températures les plus élevées, développe les humidités les plus basses (par rapport à notre cas d'étude). Les humidités relatives dépendent de la température de l'air et la quantité d'eau disponible dans l'atmosphère. Cette dernière dépend de l'évaporation des surfaces d'eau et la transpiration des vivants. C'est pourquoi la présence d'arbres dans la partie Nord a provoqué une augmentation tangible dans les humidités.

Les figures montrent une concentration de la couleur rose qui correspond à des humidités un peu élevées dans la partie dense, avec l'absence de la végétation les autres parties enregistrent des humidités spécifiques inférieures à 11 g/kg

Ces deux parcours confirment que la partie Nord des allées (station D) est plus performante que la partie Sud parce qu'elle abrite un grand nombre d'arbres. Les résultats obtenus démontrent que la densité des arbres améliore le microclimat urbain en réduisant les températures et en élevant les humidités.

### IV.4.3.PMV :

L'évaluation de l'impact des paramètres du climat sur le corps humain est très importante pour le confort extérieur des espaces urbains. Dans ce travail le PMV a été évalué à l'aide d'un programme développé par Andrew Marsh en 2005; PMV Tool 2.0.

#### IV.4.3.1.Présentation du logiciel PMV Tool :

Ce logiciel est une mise en œuvre de la norme ISO 7730-1993 (E) pour calculer le vote moyen prévisible (PMV). Il tient compte de la manipulation interactive des divers facteurs affectant le PMV, aussi bien que le processus renversé d'ajuster le PMV pour déterminer ce qu'être un facteur particulier doit pour réaliser cette estimation. Les boîtes de contrôle au-dessus de chaque valeur déterminent ce qui est actuellement choisi comme paramètre variable.

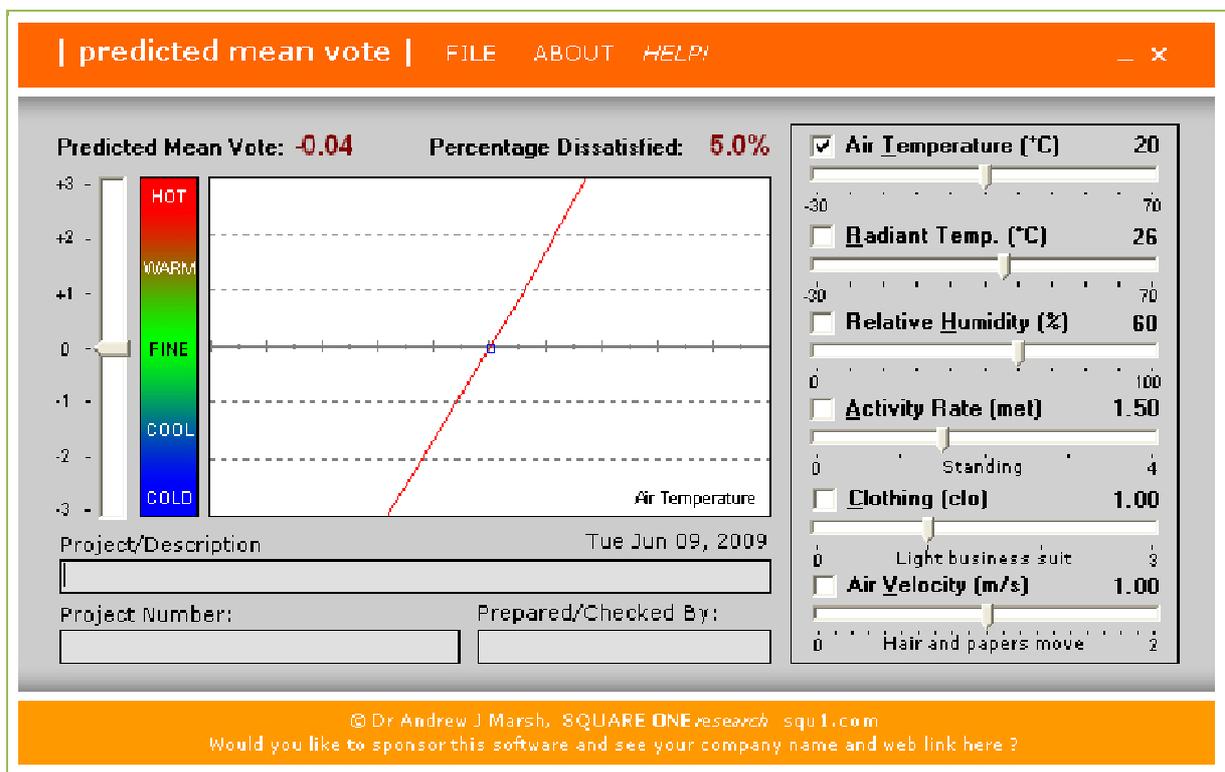


Figure IV.31 : interface du PMV Tool 2.0

#### **IV.4.3.1.1.Dispositif interactifs :**

L'intention derrière cet outil est une interaction interactive avec l'arrangement des divers paramètres affectant le calcul de PMV.

##### **1.Établissement d'un paramètre :**

Pour placer une valeur particulière, traîner la barre coulissante jusqu'à ce que la valeur immédiatement au-dessus d'elle soit comme désirée. Vous pouvez également employer les clefs de curseur et de PageUp/PageDown pour changer la valeur une fois qu'elle a le foyer.

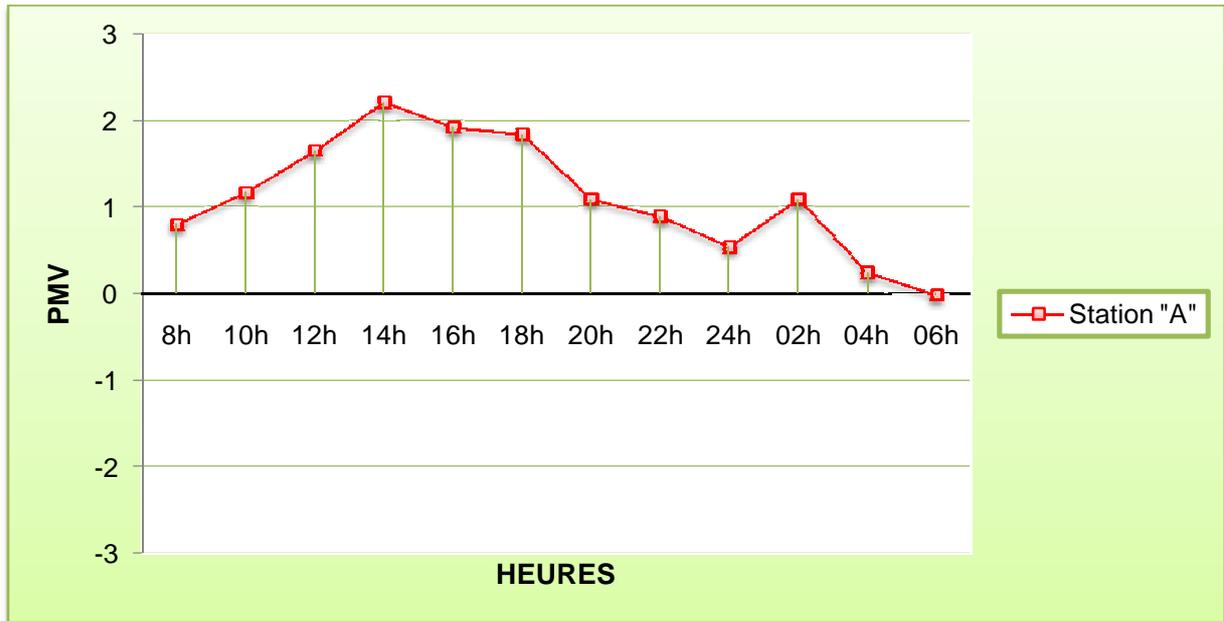
##### **2.Établissement du vote moyen prévisible :**

Vous pouvez placer la valeur de PMV en traînant le glisseur principal au dessus de l'écran. Pour réaliser le PMV choisi, la valeur du paramètre variable courant (celui actuellement vérifié) est automatiquement calculée. Parfois il peut ne pas être physiquement possible de réaliser le PMV désiré car le paramètre variable simplement ne peut pas être placé à la valeur prescrite.

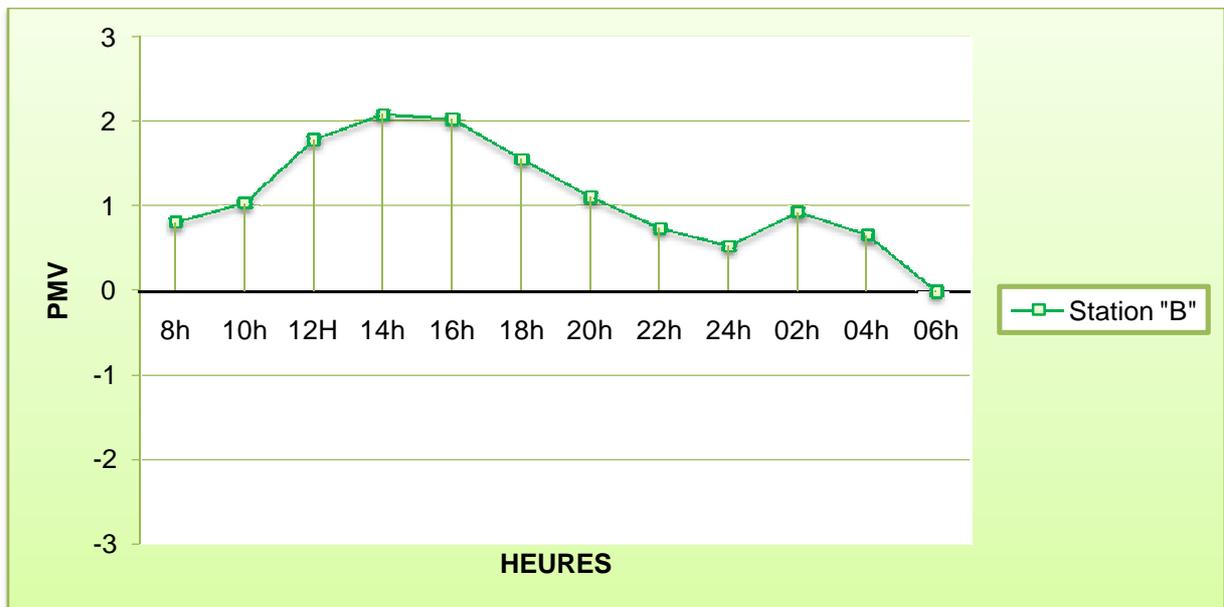
#### **IV.4.3.1.2.Format des fichiers :**

Les fichiers de PMVTool (\*.PMV) sont des fichiers ASCII Simples employés pour stocker les arrangements courants d'application pour un travail particulier. Pour la flexibilité maximum, les dossiers de PMV se servent des marques pour indiquer les données. Une marque est simplement une fin identifiée de corde avec de pleins deux points. Ceci permet au texte d'être placé n'importe où dans le dossier tant qu'il n'est pas une marque entre et ces données.

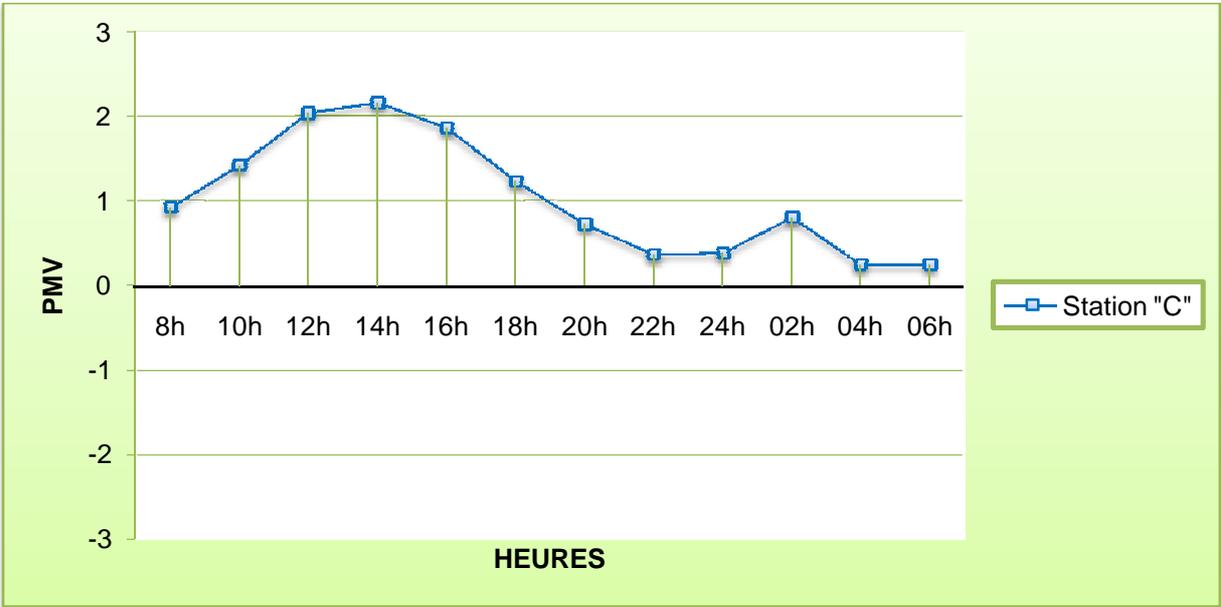
### IV.3.2-Résultats obtenus :



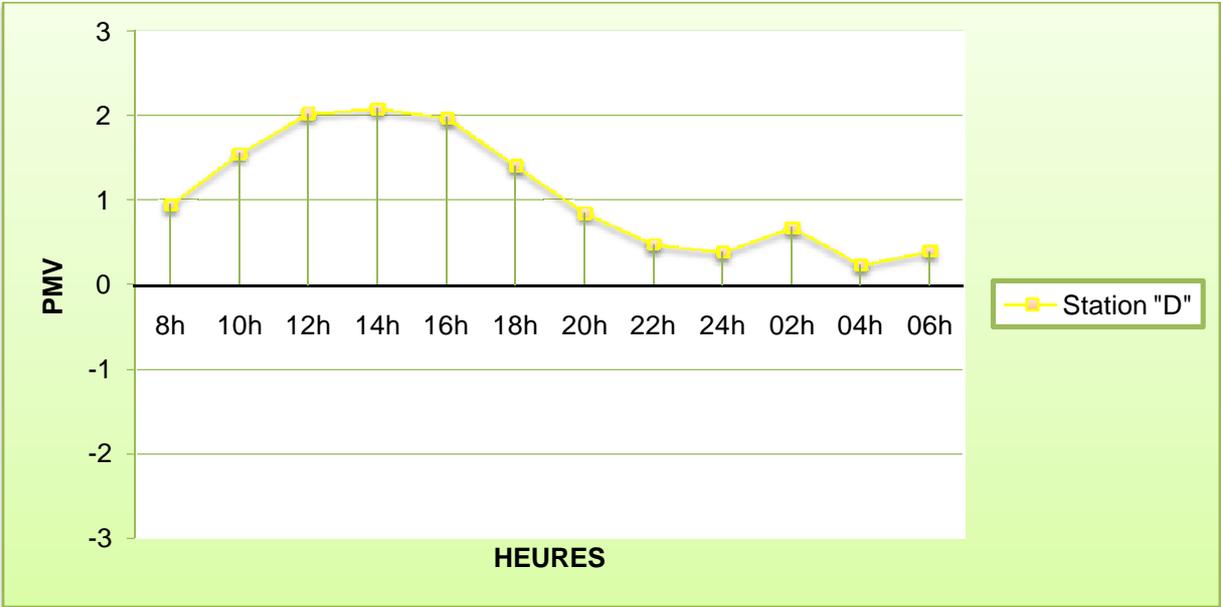
Grphe IV.10 : Variation du PMV au niveau de la station A



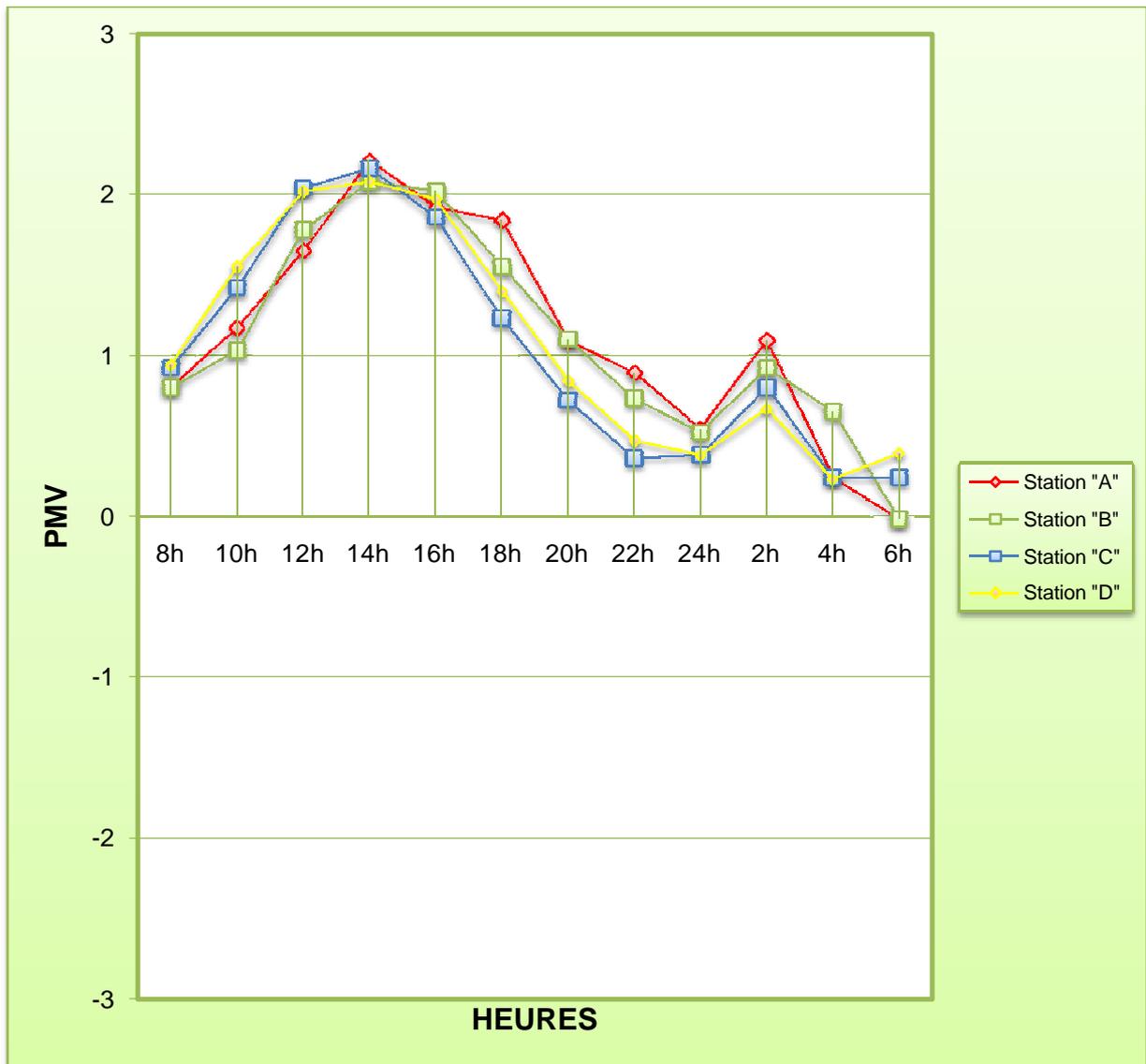
Grphe IV.11 : Variation du PMV au niveau de la station B



Graphe IV.12 : Variation du PMV au niveau de la station C



Graphe IV.13 : Variation du PMV au niveau de la station D



Graphe IV.14 : Comparaison entre la variation du PMV au niveau des 04 stations (A, B, C et D)

Le confort thermique au niveau des allées simulées est évalué en fonction de l'indice de confort PMV. Les valeurs du PMV sont comprises entre six échelles qui varient entre -3 et +3°C où -3°C est le seuil du « froid » et +3°C est celui du « chaud », le niveau « 0 » correspond à la sensation neutre. Cet indice varie entre -0.02 et 2.16.

La valeur du PMV dans notre cas d'étude est dans la zone de confort presque pendant toute la journée.

D'après les valeurs du PMV, le stress thermique augmente pendant l'après midi (entre 12h et 15h).

On conclue que l'évaluation du confort ne peut être assimilée seulement à un facteur physiologique. Cependant il y'a d'autre élément qui intervient tel que l'acclimatation. Après une longue exposition aux mêmes conditions microclimatique, le corps humain s'adapte à son environnement thermique. Cela a été démontré par Nikolouplou. Lors d'une investigation menée à Athènes pendant Juillet, Août 2001, on a trouvé une différence entre le PMV et ASV. Certes les conditions du microclimat influent sur l'utilisation de l'espace public, mais une approche purement physiologique n'est pas adéquate pour caractériser les conditions du confort thermique extérieur.

#### **IV.3.2.1-Parcours du PMV :**

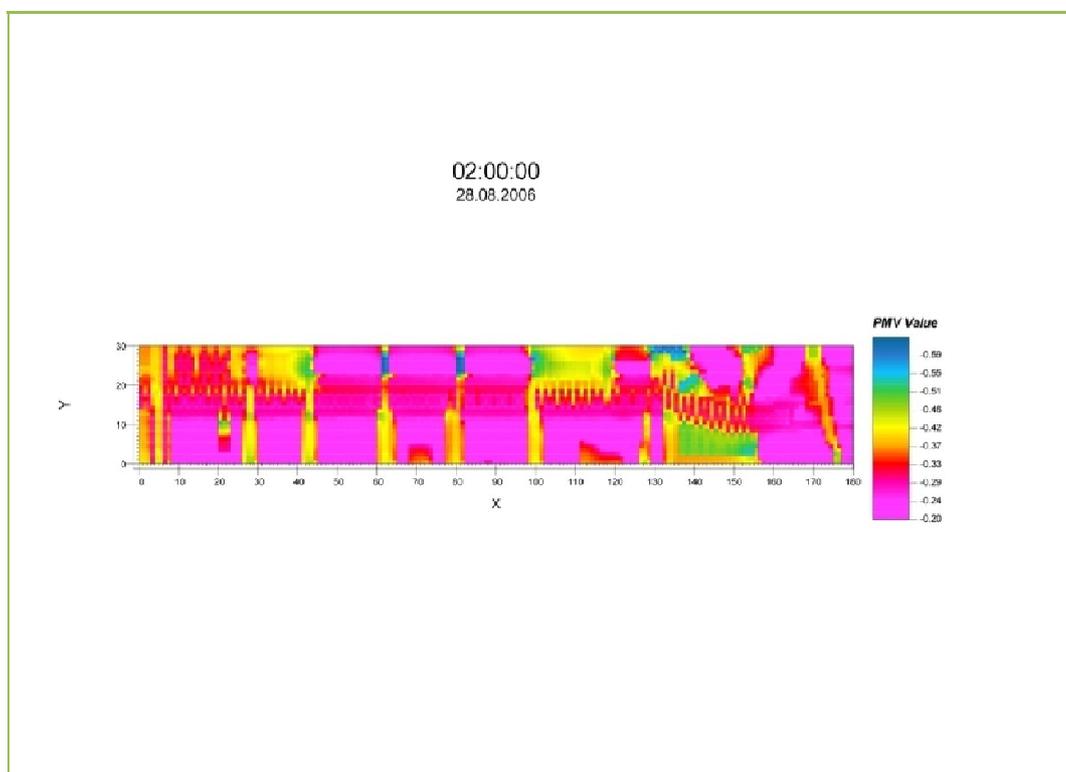


Figure IV.32: Le parcours du PMV à 2h

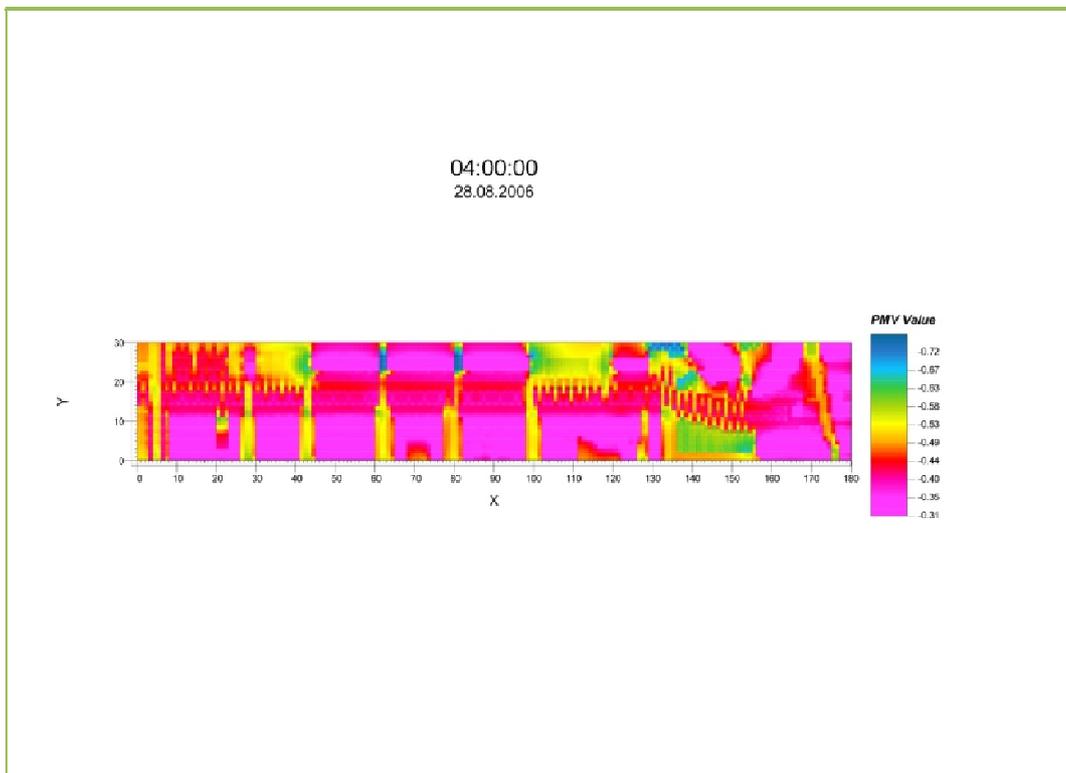


Figure IV.33 : Le parcours du PMV à 4h

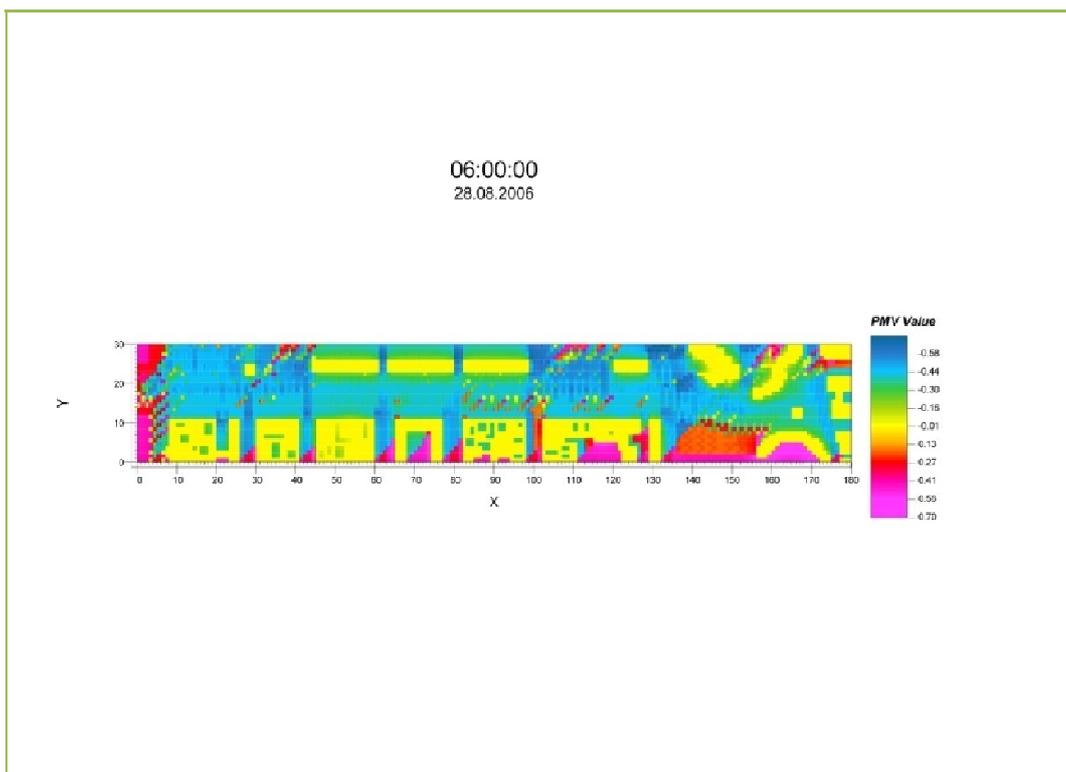


Figure IV.34 : Le parcours du PMV à 6h

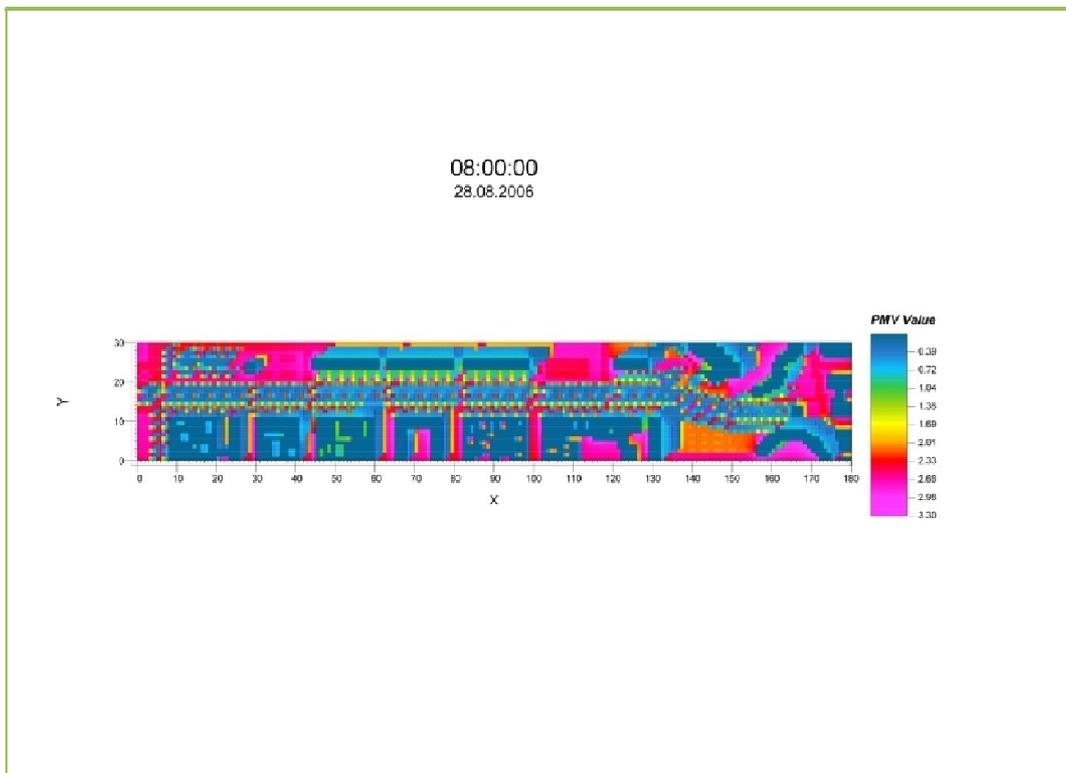


Figure IV.35 : Le parcours du PMV à 8h

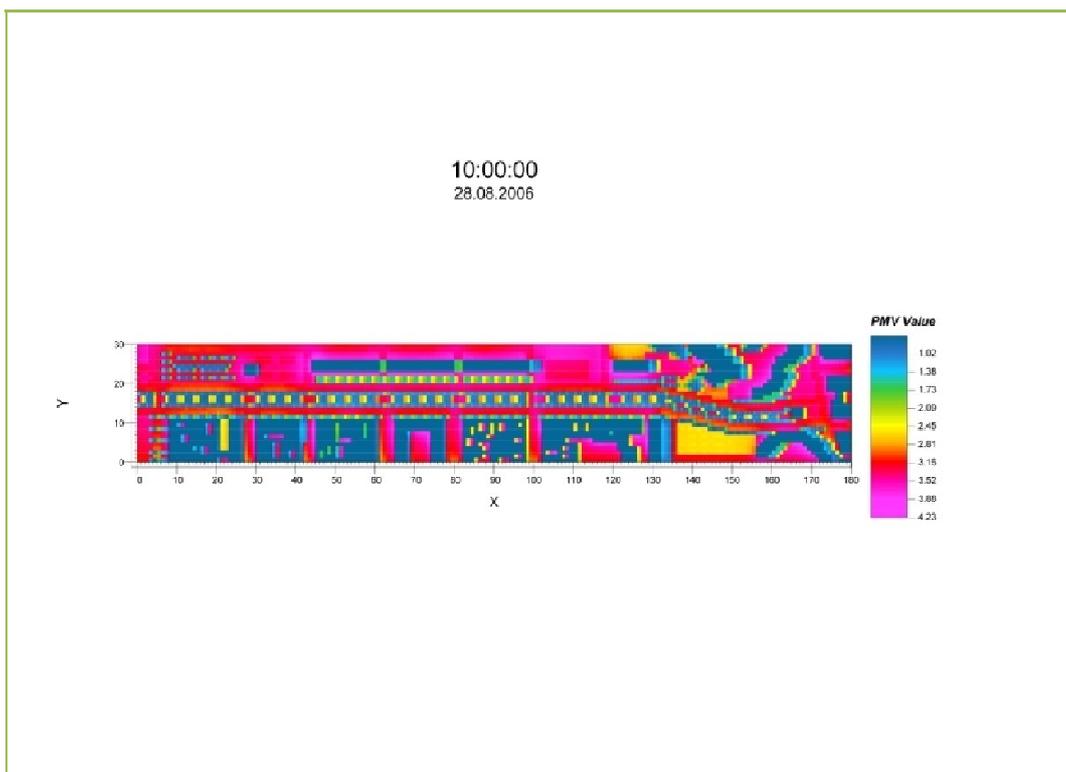


Figure IV.36 : Le parcours du PMV à 10h

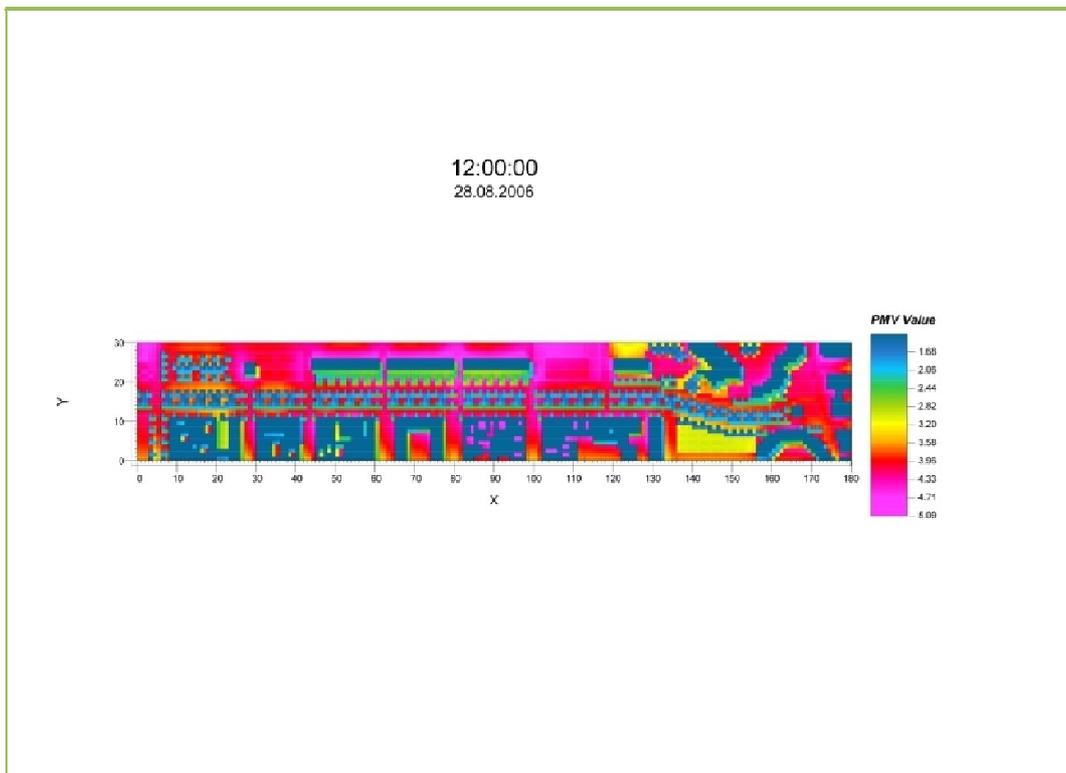


Figure IV.37 : Le parcours du PMV à 12h

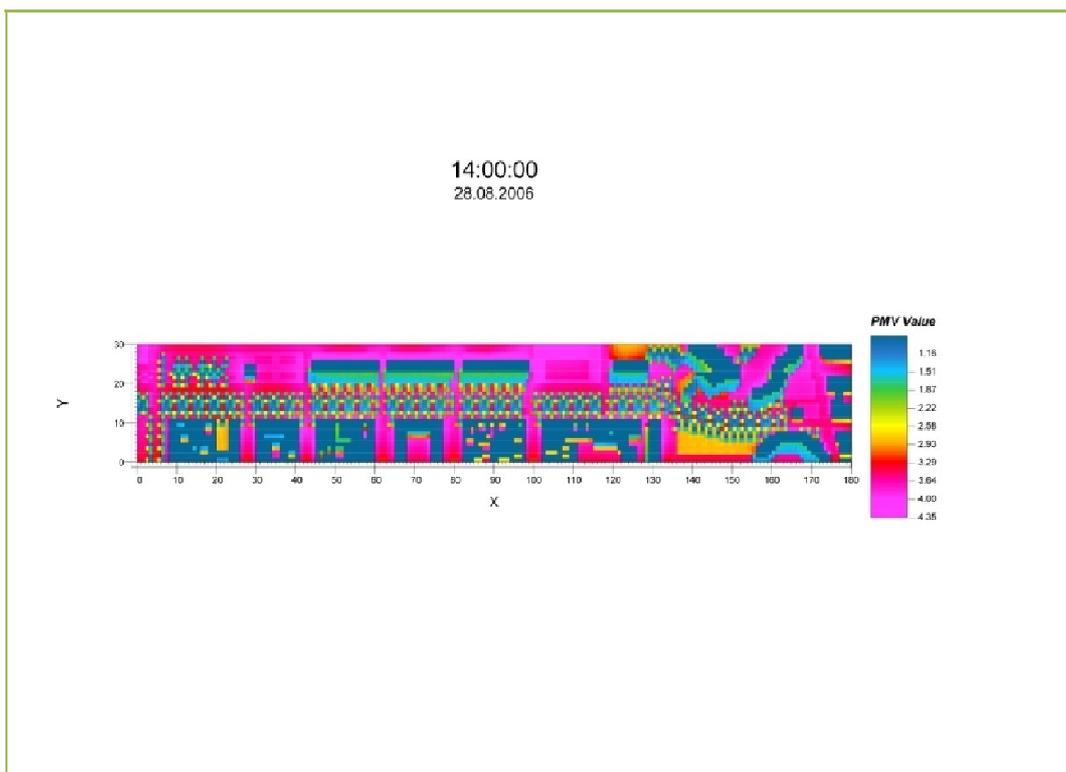


Figure IV.38 : Le parcours du PMV à 14h

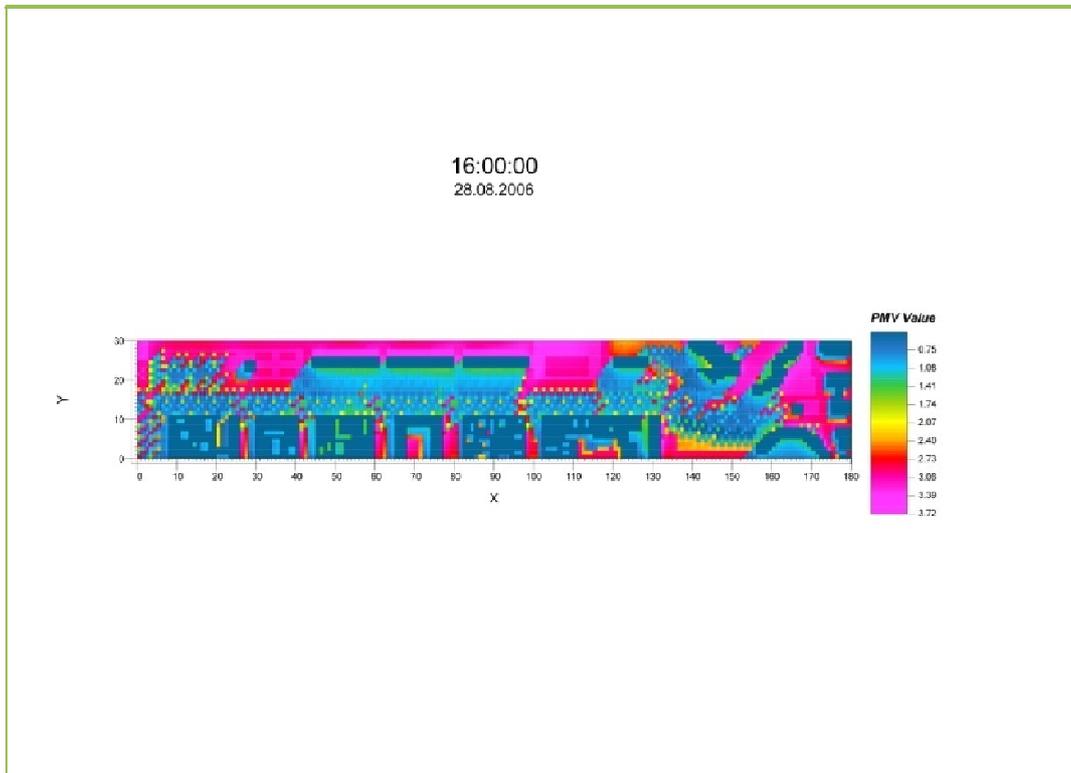


Figure IV.39 : Le parcours du PMV à 16h

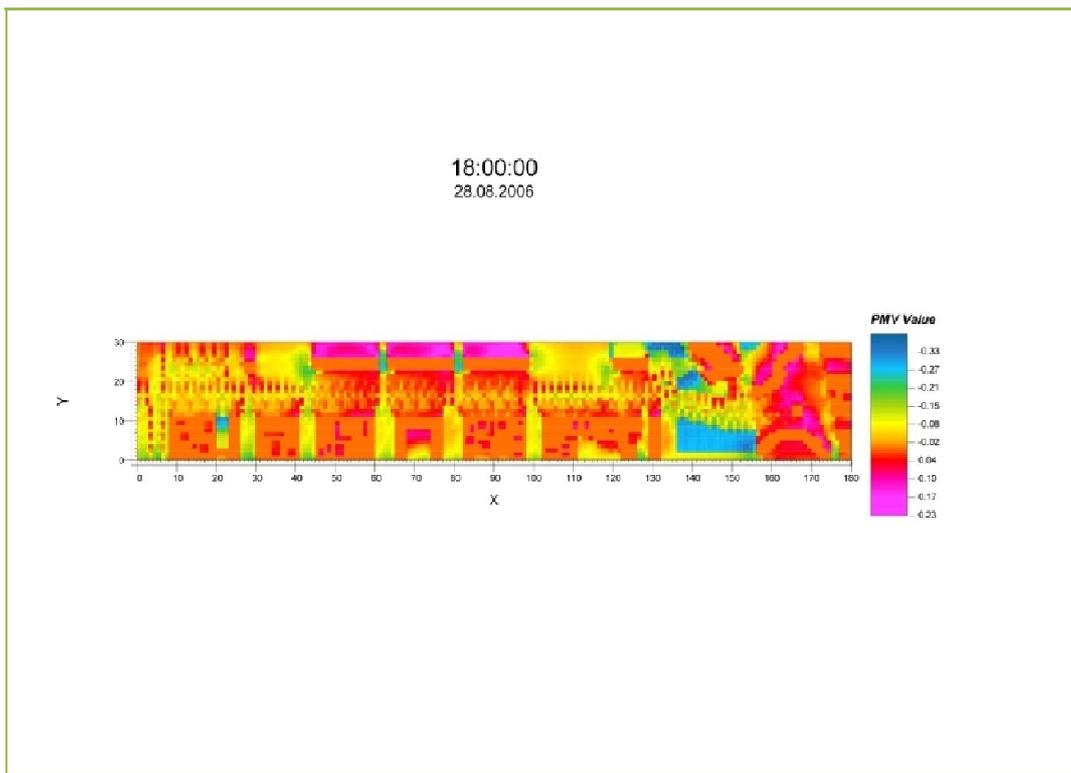


Figure IV.40 : Le parcours du PMV à 18h

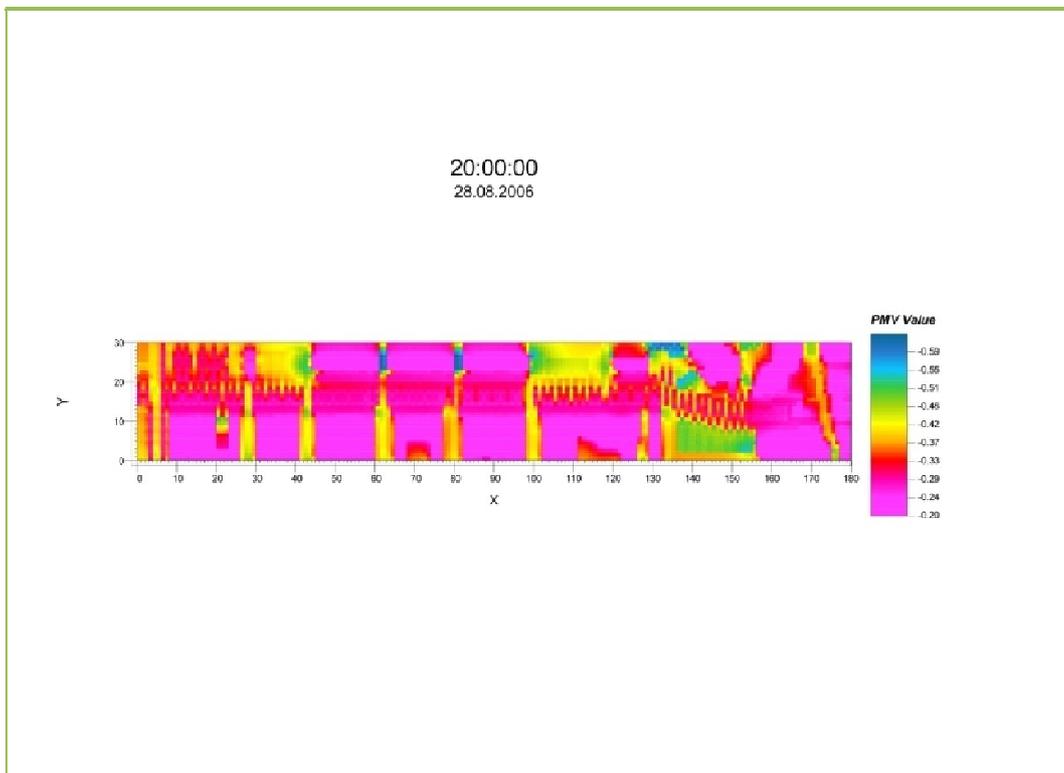


Figure IV.41 : Le parcours du PMV à 20h

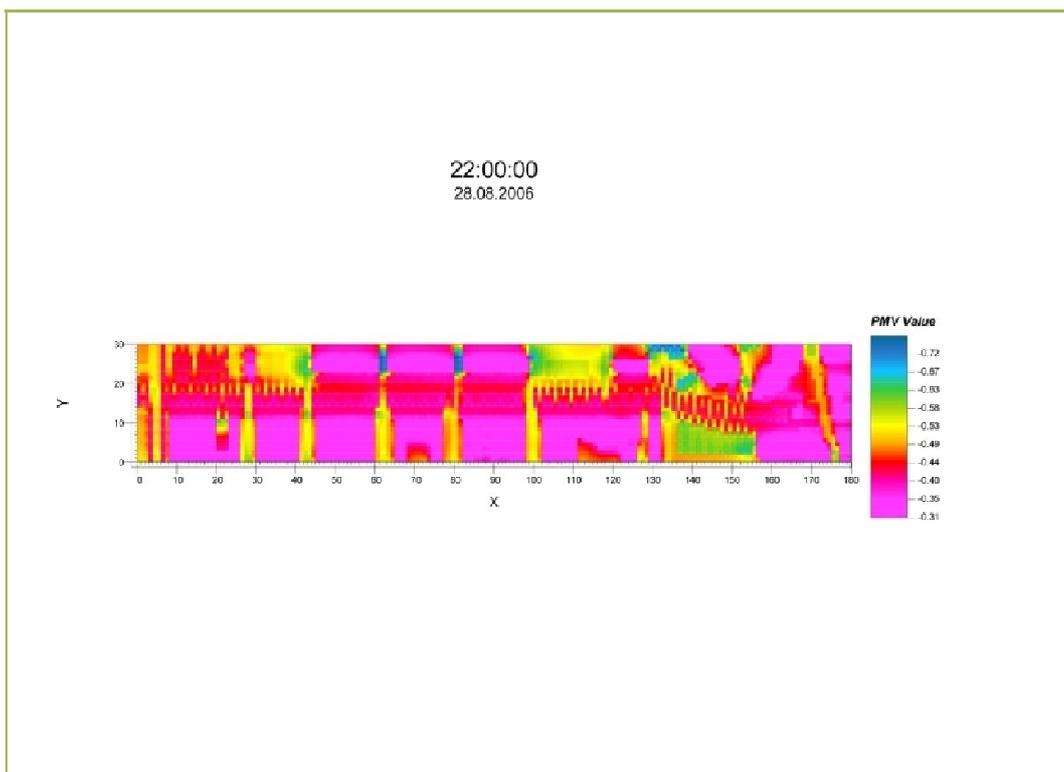


Figure IV.42 : Le parcours du PMV à 22h

#### **IV.5-Conclusion :**

Ce présent chapitre a traité l'étape la plus délicate de notre recherche qui consiste en l'exploitation d'un programme de simulation assez récent.

Le chapitre fût entamé par la présentation du logiciel ENVI-met 3.0, en présentant les différentes étapes à suivre ainsi que l'ensemble des icônes et commandes utiles à sa bonne exécution. Ensuite, ont été présentés les paramètres de base ou les entrées faisant l'objet du fichier (inputs) qui caractérisent l'aire à simuler. Ces paramètres concernent l'aspect géographique, physique et météorologique du site en question. Après, les résultats ont été présentées sous forme de graphes et de cartes.

Le premier objectif de ce chapitre a été atteint du moment où ENVI-met 3.0 a fait ressortir des résultats conformes à l'investigation pratiques objet du chapitre précédent. Le deuxième objectif qui est l'évaluation de l'impact de la végétation urbaine sur le confort thermique extérieur a également connu un aboutissement assez satisfaisant.

La conception urbaine en zones arides et semi aride a fait l'objet de diverses recherches à travers ces dernières années. Le résultat obtenu par la totalité de ces travaux est le soutien la plantation des arbres offrant plus de confort thermique notamment en période chaude.

ENVI-met 3.0, nous a permis d'évaluer une multitude de paramètres climatiques simultanément. Ceci, est d'un apport considérable surtout quant à la fiabilité des résultats. La température de l'air est un paramètre climatique déterminant affectant sensiblement le confort thermique extérieur.

Le revêtement du sol est aussi important que la végétation, le remplacement du revêtement en béton par l'herbe peut augmenter les heures utiles de la fréquentation des espaces urbains d'une moyenne de 22% [Cythia et al 2004]

La question du confort thermique des espaces publics ne peut être assimilée à une démarche purement physiologique. Le processus d'acclimatation peut expliquer l'adaptation des utilisateurs des espaces urbains publics au microclimat et d'élargir la marge du confort après une longue exposition aux mêmes conditions climatiques.



# Conclusion générale et recommandations

## ✓ Conclusion générale :

### 1-Conclusion :

L'espace urbain public est un élément très important dans la composition urbaine. Espace de sociabilité et de rencontre, lieu où se fabrique la citoyenneté. Le degré de fréquentation et la quantité des activités abritées dépendent essentiellement du microclimat généré ainsi que les conditions du confort existantes. L'amélioration de leur qualité dépend d'une bonne prévision de l'interaction entre les paramètres climatiques du méso climat et les éléments physiques qui le constituent.

La température de l'air ambiant, la température des surfaces, l'humidité ainsi que la vitesse du vent peuvent être modérer en fonction des éléments artificiels tel que les matériaux utilisés, la couleur, la géométrie ainsi que les éléments naturels tel que la végétation et les surfaces d'eau.

Ce travail tend à mettre en évidence le rôle de la structure verte sur la réduction de surchauffe généré dans les espaces urbain publics pendant la période estivale.

L'objet d'étude est un espace public situé en plein centre ville de Batna. Il se présente sous forme d'allées entourées de bâtiments et un grand nombre d'arbres.

La recherche s'est développée en deux parties : premièrement une partie théorique puis des prises de température et d'humidité de l'air sur terrain.

Malgré le peu de moyens d'investigation disponibles les deux paramètres mesurés (température et humidité) ont démontrés un certain microclimat bien spécifique différent du reste de la ville. En addition le travail sur terrain nous a permis de se familiariser avec notre cas d'étude, en tenant une campagne de mesures des éléments climatiques et aussi d'observer les différents scénarios de fréquentation manifestés.

Ces observations ont ramené à déduire qu'il y'a une certaine interdépendance entre les ambiances thermiques développées et le comportement des gens.

Toutes ces observations ont démontré que la variante climatique est un facteur

déterminant pour la fréquentation des espaces publics et urbains.

Sachant que le microclimat urbain est une interaction entre les conditions méso-climatiques et l'environnement physique construit et naturel une analyse quantitative des différents paramètres climatique qui sollicitent notre cas d'étude était établie en premier lieu.

Malgré l'importance de l'investigation des mesures limitées à des températures de l'air et des humidités relatives n'ont pas vraiment suffi pour faire émerger l'importance de l'élément naturel. D'autres paramètres étaient bien nécessaires pour répondre aux ambitions de cette recherche. Les plus importants sont bien: Les températures de radiantes moyennes et les vitesses de vent.

La comparaison entre les températures et les humidités relatives de l'air montre des écarts enregistrés justifiés. L'écart dans la température de l'air est marqué beaucoup plus pendant la journée.

Ces résultat nous ont ramené à déduire que plus dense est la végétation meilleur est son effet sur les températures de l'air.

Quand aux humidités elles peuvent être balayées grâce à une bonne ventilation. Le cheminement d'air peut être dirigé en fonction de la trame urbaine et une bonne orientation aux vents dominants.

La question du confort thermique extérieur a toujours eu le moindre d'intérêt par rapport à l'intérieur, les recherches dans ce domaine sont très récentes et très limitées.

Parmi les méthodes utilisées pour appréhender cette question on trouve: Les interviews sur terrain où l'utilisation des indices thermo physiologiques basés sur l'équation du bilan thermique du corps humain, certains paramètres météorologiques et des constantes liées à l'habillement et au métabolisme.

Tous les résultats conjugués convergent à démontrer que l'arbre a joué un grand rôle dans l'amortissement du stress thermique.

Donc l'évaluation du confort thermique ne peut être assimilée à une approche

purement physiologique, plusieurs facteurs psychologiques et culturels qui interviennent doivent être intégrés afin qu'elle puisse être généralisée.

En conclusion cette recherche nous a permis d'appréhender la question du confort thermique des espaces extérieurs et le traitement de la problématique de la qualité des espaces urbains et publics.

## **2-Recommandations :**

L'urbanisation accélérée en détriment des espaces extérieurs a provoqué la dégradation du microclimat des espaces urbains et publics. Le peu d'intérêt porté sur le confort thermique extérieur de ces espaces a provoqué une régression dans leurs fréquentations et leur transformation à des simples espaces de passage négatifs au cadre bâtis.

Pour remédier à cette situation néfaste cette étude recommande un retour à l'exploitation de l'élément naturel et à l'intégration de la végétation dans la conception architecturale et urbaine. Cependant un bon rendement de la végétation exige un bon choix des espèces et une implantation stratégique.

Cette dernière dépend des paramètres climatiques tel que: l'orientation par rapport à la course solaire et aux vents dominants.

Pour le choix des espèces l'intention doit être portée sur plusieurs paramètres. La silhouette d'arbre à savoir: forme et hauteur du tronc, étalement et hauteur du houppier, la perméabilité, la transmission, forme et taille de la feuille. L'indice de la densité de la surface de la feuille, régime de développement... etc.

Tous ces paramètres permettent de prévoir la capacité d'obstruction des radiations solaires, le filtrage du vent, la surface d'ombre déployée, le taux d'évaporation et par la suite le refroidissement.

## **3-Axes de recherche :**

Cette recherche ouvre aussi d'autres axes sur le microclimat et le confort thermique extérieur: l'effet de la géométrie, l'impact de la trame urbaine environnante, les matériaux, évaluation de l'apport de refroidissement relatif à

plusieurs types d'arbres et plusieurs types de revêtement. Et même pourquoi ne pas voir la variation des paramètres du méso-climat pour en arriver à définir des recommandations propre à chaque climat.

Quand aux ambiances extérieurs et intérieurs elles peuvent faire l'objet de plusieurs sujets de recherches tel que: L'éclairage, l'acoustique et la consommation énergétique.



# Bibliographie

**Bibliographie :**

- 1) 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.
- 2) ALI-TOUDERT, F. (2000). Intégration de la dimension climatique en urbanisme. Alger : EPAU.
- 3) ALI-TOUDERT, F. (2001). Méthodologie d'intégration de la dimension climatique en urbanisme. Les cahiers de l'EPAU n°: 9/10, Alger.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) ALVAREZ et al. (1989). Acondicionamiento climatico de los espacios abiertos en Expo'92. Laminas de agua. Sévilla : Universidad de Sevilla.
- 7) 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.
- 8) ASHRAE (1993). Physiological principles and thermal comfort. ASHRAE handbook of fundamental. Atlanta : ASHRAE.
- 9) AVISSAR, R. (1996). Potential effects of vegetation on the urban thermal environment. Atmospheric Environment, Vol 30, n°3.
- 10) 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.
- 11) BERGER, X. (1993). Vêtement et micro-climat : gestion dynamique et modèles d'interfaces. In : Journées d'études S.F.T. 12 mai. Paris : SFT.
- 12) 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.

- 13) 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.
- 14) BERTRAND, M.J et LISTOWSKI, H. (1984) Les places dans la ville : les pratiques de l'espace, Edition Dunod, 1984]
- 15) BOTTEMA, M. (1992). Wind climate and urban geometry. Eindhoven: University of Technology.
- 16) BOTTEMA, M. (2000). A method for optimisation of wind discomfort criteria. Building and Environment.
- 17) BRINDEL-BETH, S. et TRICAUD, P. (1998). Isolation thermique et acoustique en résidentiel. Paris : CFE.
- 18) BROWN, R. D. and GILLESPIE, T. J. (1995). Microclimatic Landscape design. Creating thermal comfort and Energy Efficiency. New york : Wiley J. and Sons.
- 19) 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.
- 20) CABANEL, J. In STEFULESCO, C (1993). L'urbanisme végétal. Paris : IDF.
- 21) 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.
- 22) CHEMILLIER, P. Sciences et Bâtiment, la démarche scientifique appliquée à la construction. Paris : Presses de l'ENPC, CSTB.
- 23) COOMBES A. J. (1993). Les arbres. Paris : Bordas, 1993. Collection L'œil Nature. Traduction Isabelle Delvallée.
- 24) 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.
- 25) De SABLET, M. (1988). Des espaces urbains agréables à vivre – Places, rues, squares et jardins. Paris : Moniteur.
- 26) DEPECKER, P et al. (1989). Qualité thermique des ambiances. Paris : AFME, Collection cahiers pédagogiques Thermique et Architecture.
- 27) 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 International conference on indoor air quality, ventilation and energy conservation in buildings, November, 19-21. Lyon : ENTPE.
- 28)** 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.
- 29)** ESCOURROU, G. (1981). Climat et environnement, Les facteurs locaux du climat. Paris : Masson.
- 30)** FANGER, P. O. (1970). Thermal Comfort. New York : Mc Graw Hill.
- 31)** 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.
- 32)** 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.
- 33)** GALEOU, M., GRIVEL, F. et CANDAS, V. (1989). Le confort thermique : aspects physiologiques et psychosensoriels. Etude bibliographique. Strasbourg: CNRS.
- 34)** GANDEMER, J et GUYOT, A. (1981). La protection contre le vent. Paris : CSTB.
- 35)** GANDEMER, J et GUYOT, A. (1981). La protection contre le vent. Paris : CSTB.
- 36)** 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.
- 37)** 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.
- 38)** GAUZIN-MÜLLER, D. (2000). Architecture Ecologique. Paris : Editions du Moniteur.
- 39)** GIVONI, B (1991). Impact of planted areas on urban environmental quality : a review. Atmospheric environment Vol n°3.

- 40) GIVONI, B. (1978). L'homme, l'architecture et le climat. Paris : édition du Moniteur. Traduction de J. L. IZARD.
- 41) 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.
- 42) GRIMAL, P. (1990). Un urbanisme de l'eau à Rome. In : Le grand livre de l'eau. Paris : La Cité des Sciences.
- 43) GROSS, G. (1987). A numerical study of the air flow within and around a single tree. *Boundary-Layer Meteorology*, 40.
- 44) GROUPE ABC (1997). Morphologie, végétal et microclimats urbains. Cas d'Aix-en-Provence et de Nîmes. Tome 2, les mesures. Plan urbain, Ministère de l'Équipement.
- 45) GUERRA et al. (1994). Control climatico en espacios abiertos: evaluacion del proyecto Expo'92. Sevilla : Grupo de Termotecnia, Universidad de Sevilla.
- 46) 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.
- 47) 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.
- 48) GUYOT, A. (1988). L'arbre élément du confort vivant. In : *Vivre dehors, confort des espaces publics*. Manosque : actes de colloques.
- 49) GUYOT, G. (1996). Climatologie de l'environnement - De la plante aux écosystèmes. Paris : Masson.
- 50) HADDAD, Y. (1997). Les arbres d'alignement urbains, un enjeu pour les partenaires multiples. *Les Annales de la Recherche Urbaine*, n°74.
- 51) 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.
- 52) HESCHONG, L. (1981). Architecture et volupté thermique. Paris : Parenthèses. Traduction : GUILLAUD, H.
- 53) HÖPPE, P. (2002). Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. *Energy and buildings*.

- 54) 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.
- 55) HUANG, Y. J. et al. (1987). The potential of vegetation in reducing Summer cooling loads in residential buildings. Berkeley: University of California.
- 56) IZARD, J. L. et GUYOT, A. (1979). Archi Bio. Paris : Parenthèse.
- 57) JONES, H. G. (1992). Plants and microclimate : A quantitative approach to environmental plant physiology. 2nd Edition, Cambridge University Press.
- 58) 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.
- 59) 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.
- 60) KJELGREN, R. and MONTAGUE, T. (1998). Urban tree transpiration over turf and asphalt surfaces. Atmospheric Environment , Vol 12, n°1.
- 61) 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.
- 62) 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.
- 63) LEVINSON, R. M. (1997). Near-ground cooling efficacies of trees and highalbedo surfaces. Ph. D. Thesis. Berkeley: Department of Mechanical Engineering, University of California and Environmental Energy Technologies Division, LBNL.
- 64) LIEBARD, A et DE HEDRE, A. (2005). Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques. Paris : Editions du Moniteur.
- 65) LIU et al. (1996). Modelling of turbulent air flow downwind of a model forest edge. Boundary-Layer Meteorology, 77.
- 66) MAILLET, L. et BOURGERY, C (1993). L'arboriculture urbaine. Paris : édition I.D.F. Collection Mission du Paysage.

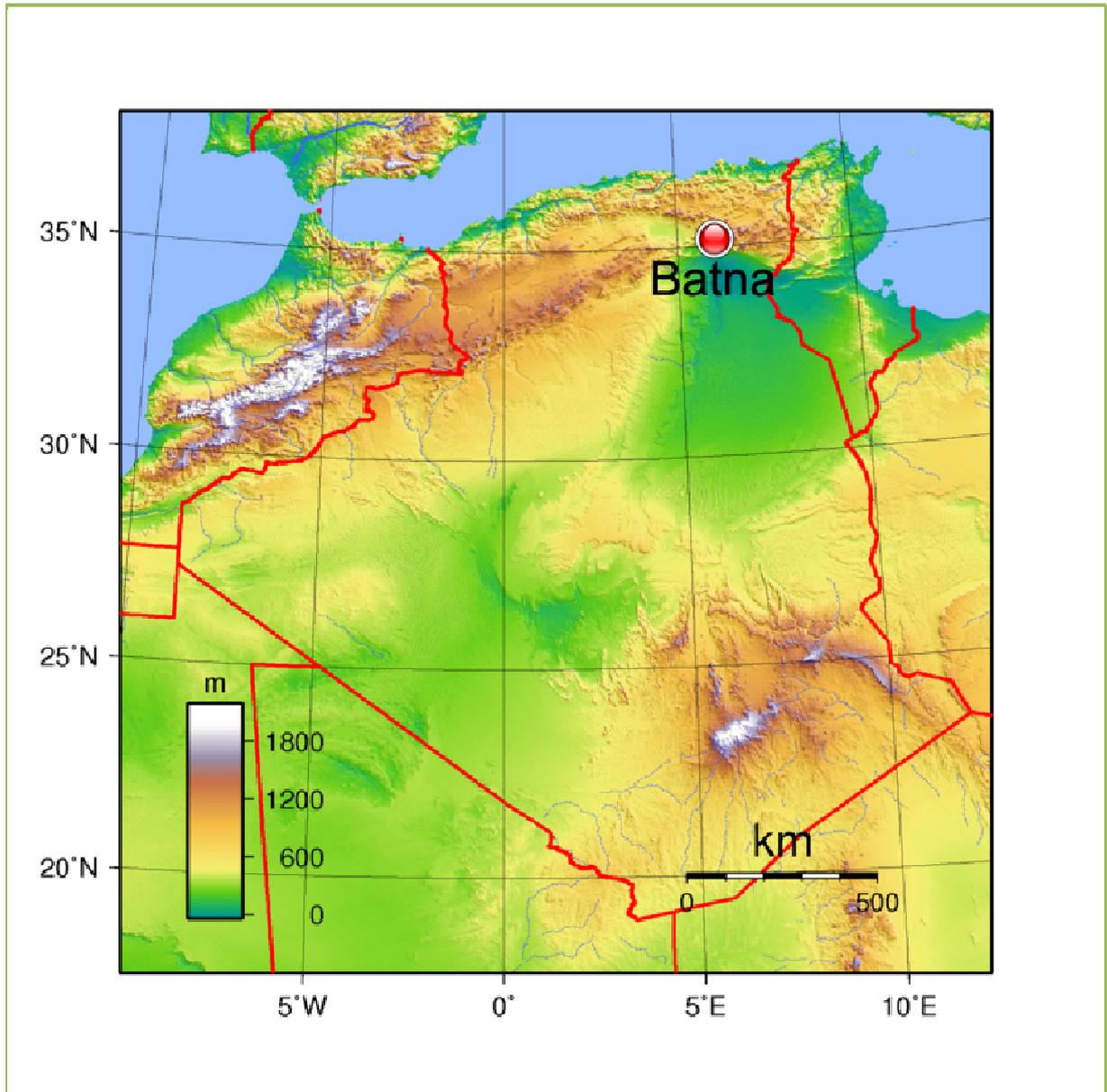
- 67) MALVERTI, X. et PICARD, A. (1994). Les saisons dans la rue. Paris : Les annales de la recherche urbaine, n° 61.
- 68) MASMOUDI, S. (2003). Relation entre géométrie urbaine, végétation et confort thermique extérieur. Université de Biskra : département d'architecture.
- 69) MEEROW, A. W. and BLACK R.J. (1993). Envirosapping to conserve energy: a guide to microclimate modification. Florida: University of Florida.
- 70) Ministère de l'habitat. (1993). Recommandations Architecturales. Alger: ENAG.
- 71) MONTEITH J.L. and UNSWORTH M.H. (1991). Principles of environmental physics. New York : Edward Arnold.
- 72) MURET, J. P. et al. (1987). Les espaces urbains – concevoir, réaliser, gérer. Paris : édition du Moniteur.
- 73) MUSY, A. et SOUTTER, M (1991). La physique du sol. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 335 p. Collection Gérer l'environnement.
- 74) NEUFERT, E. (2006). Les éléments des projets de construction (9e édition). DUNOD.
- 75) NIKOLOPOULOU, M. (2003). The effect of climate on the use of open spaces in the urban environment: Relation to tourism. Centre for Renewable Energy Sources.
- 76) OKE, T.R. (1987). Boundary layer climates. London and New York : Methuen.
- 77) 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.
- 78) RAESSI, S. and TAHERI, M. (1999). Energy saving by proper tree plantation. Building and Environment 34.
- 79) ROBINETTE, G. (1972). Plants / people / and environmental quality. Washington, D. C, Department of the Interior.
- 80) ROGERS, R (2000). Des villes pour une petite planète. Paris : Edition du Moniteur.
- 81) ROODBARAKY, H.J et al. (1994). Experimental observation of the aerodynamic characteristic of urban trees. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 52.

- 82)** SACADURA, J. F. (1982). Initiation aux transferts thermiques. Paris : Technique et Documentation.
- 83)** SAIDOUNI, M. (2000). Elément d'introduction à l'urbanisme. Alger : Edition CASBAH.
- 84)** SAILOR et al. (1992). Measured impact of neighborhood tree cover on microclimate. Berkeley: Energy & Environment Division, LBL, University of California.
- 85)** SAILOR, D. J. (1998). Simulations of annual degree day impacts of urban vegetative augmentation. Atmospheric Environment, Vol 32, N°1.
- 86)** SAUGIER, B (1996). Végétation et atmosphère. Paris : Dominos, Flammarion.
- 87)** SCUDO, G. (2002). Thermal comfort in green spaces. Built environment science and technology.
- 88)** 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.
- 89)** 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.
- 90)** SHACHOUA-BAR, L et HOFFMAN, M.E. (1999). Vegetation as climatic component in the design of an urban street an empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees. Energy and building.
- 91)** SHACHOUA-BAR, L et HOFFMAN, M.E. (2000). Geometry and orientation aspects in passive cooling of canyon streets with trees.PLEA 2000.
- 92)** 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, N°1.
- 93)** SOMON, E (1986). Arbre, arbuste et arbrisseaux en Algérie. Alger : O.P.U.
- 94)** SPAGNOLO, J et DE DEAR, R. (2003).A field study of thermal comfort in outdoor and semi-outdoor environments in subtropical sydney.Building and environment. Pargamon.
- 95)** STATHOPOULOS, T. et al. (1994). Wind shielding effects of trees on low buildings. Building and Environment, 29, 2.
- 96)** STEFULESCO, C. (1993). L'urbanisme végétal. Paris : I.D.F.

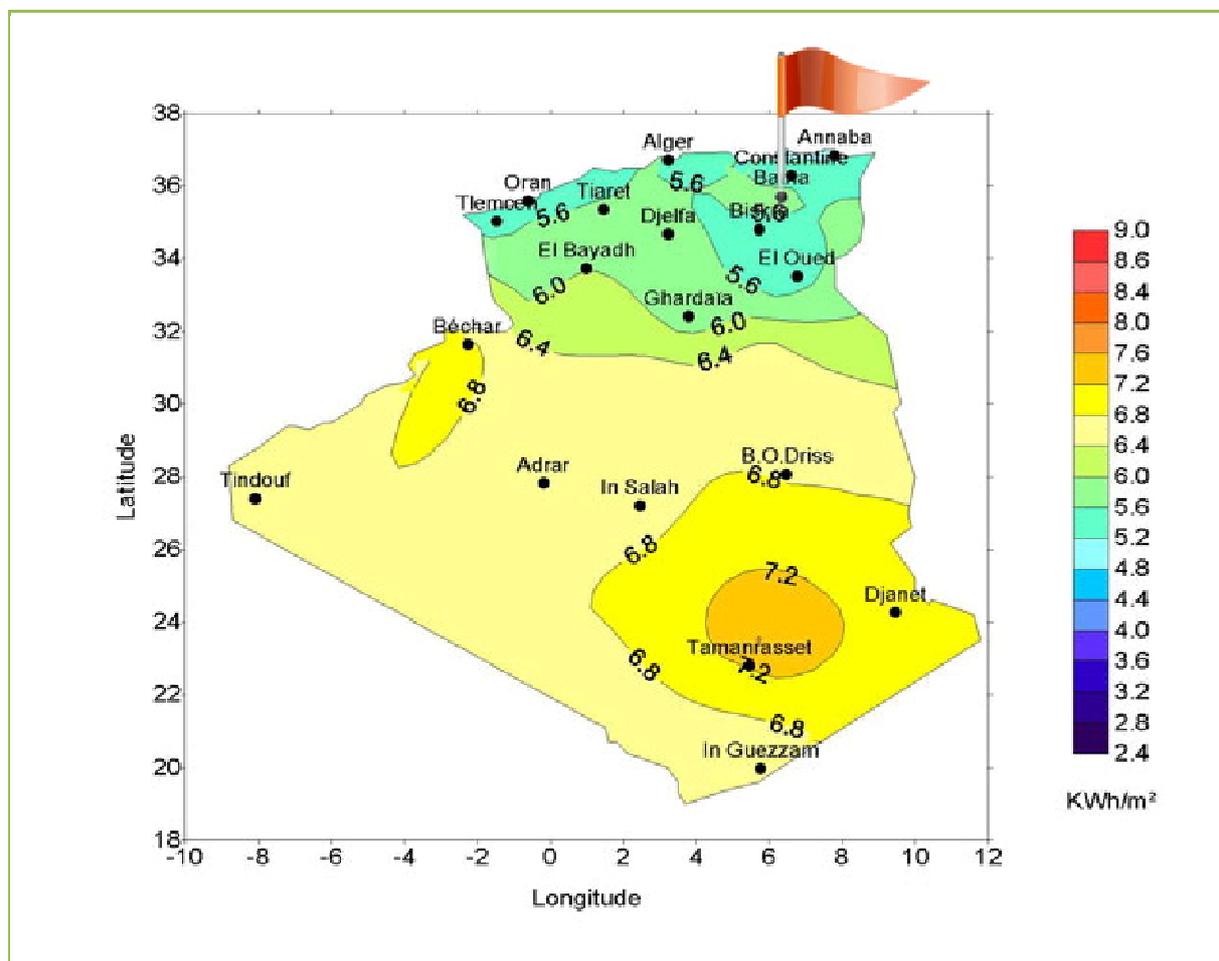
- 97)** STREILLING, S et MATZARAKIS, A. (2003). influence of single and small clusters of trees on the bioclimate of city: A case study. *Journal of arboriculture*.
- 98)** TEBBANI, H (2006). Impact de la végétation sur le microclimat et le confort thermique des espaces urbains publics. Université de Constantine : département d'architecture.
- 99)** 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.
- 100)** 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.
- 101)** VIAN, C et al. (1983). L'Alhambra de Grenade. Paris : Atlas.
- 102)** VILAIN, M (1993). La production végétale. Paris : édition Lavoisier.
- 103)** 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.
- 104)** WATANABE, T. (1994). Bulk parametrization for a vegetated surface and its application to a simulation of nocturnal drainage flow. *Boundary-Layer Meteorology* 70.
- 105)** WESTERBERG, U. (2004). Climate and use of public spaces. PLEA 2004.
- 106)** WILMERS, F. (1988). Green for amelioration of urban climate, Energy and building.
- 107)** SANTAMOURIS, M, ADNOT, J, ALVAREZ, S et al. (2004). Cooling the cities, rafraîchir les villes. Paris : les presses de l'école des mines.



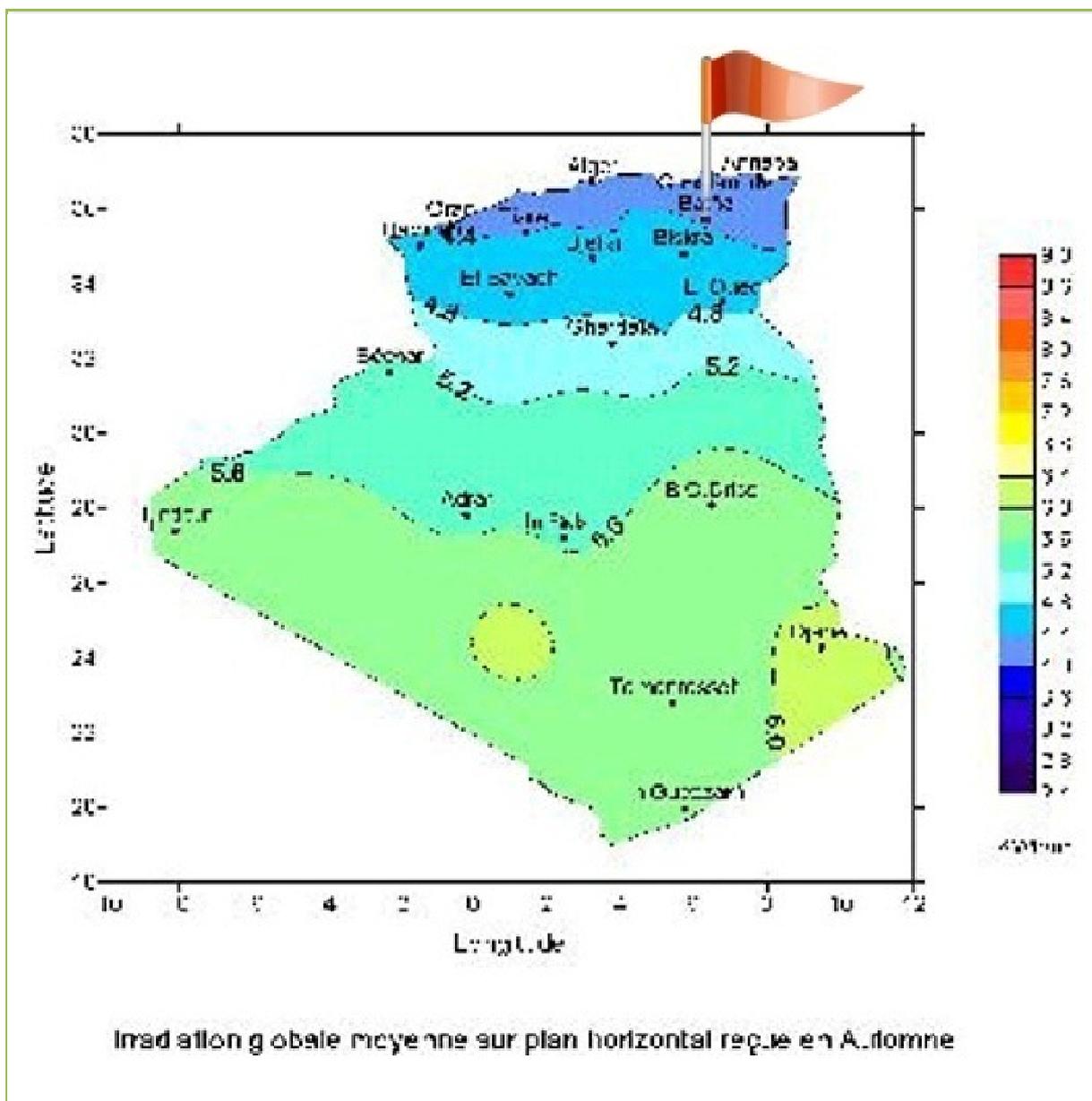
# Annexes

**1-Données climatologiques (Batna) :**

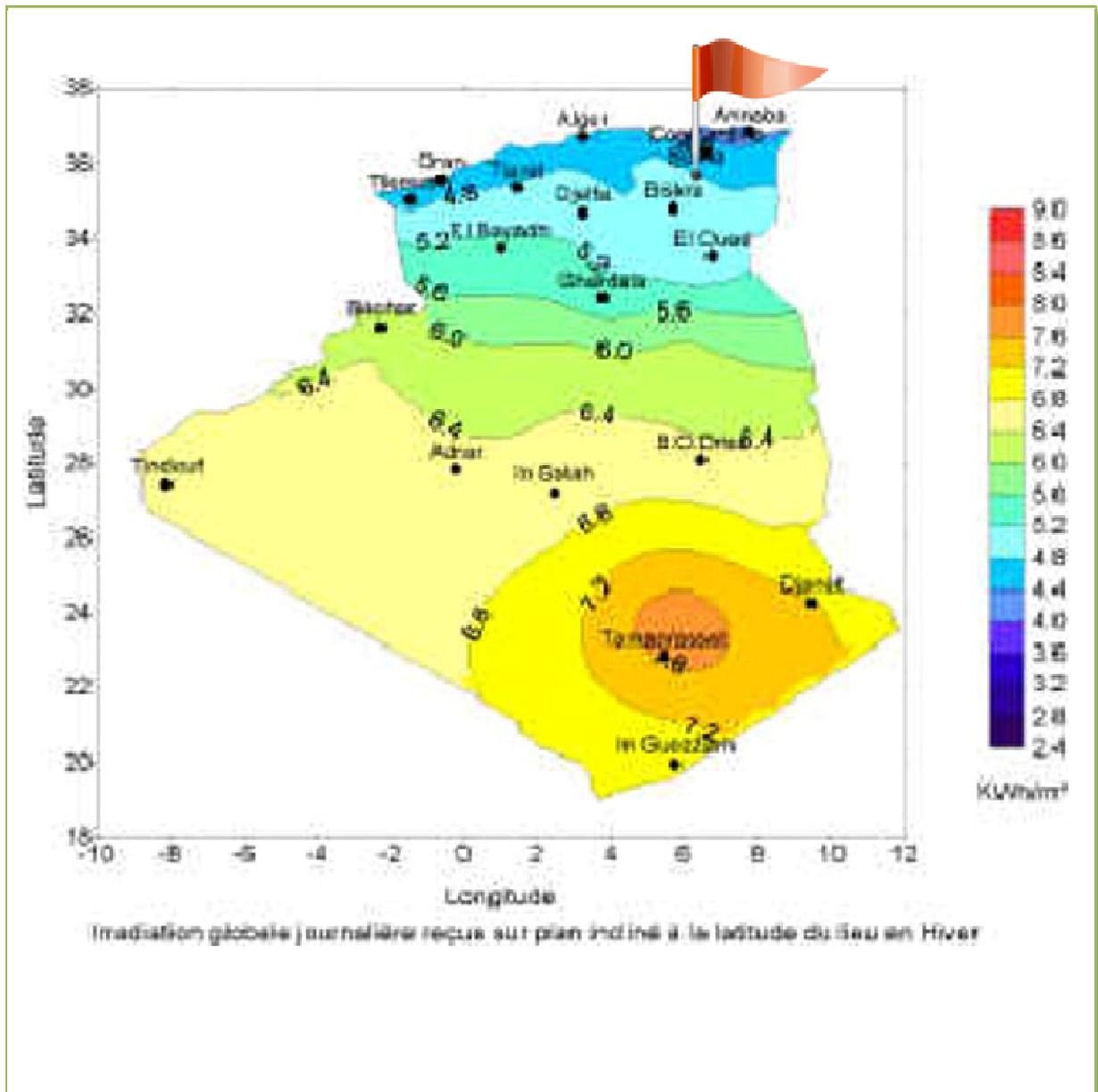
Topographie de l'Algérie [[www.commons.wikimedia.com](http://www.commons.wikimedia.com)]



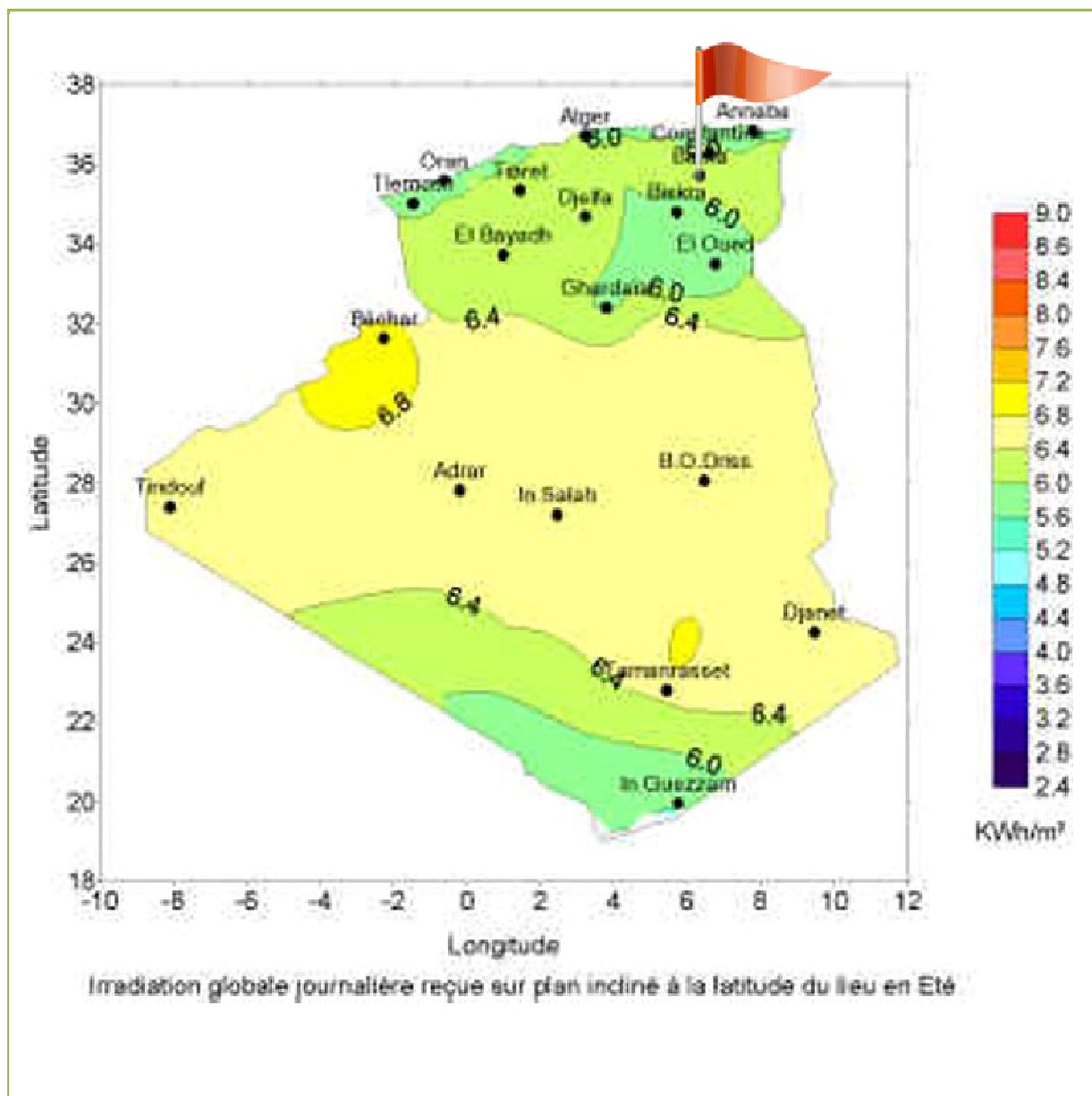
Carte solaire d'Algérie [CDER 2007]



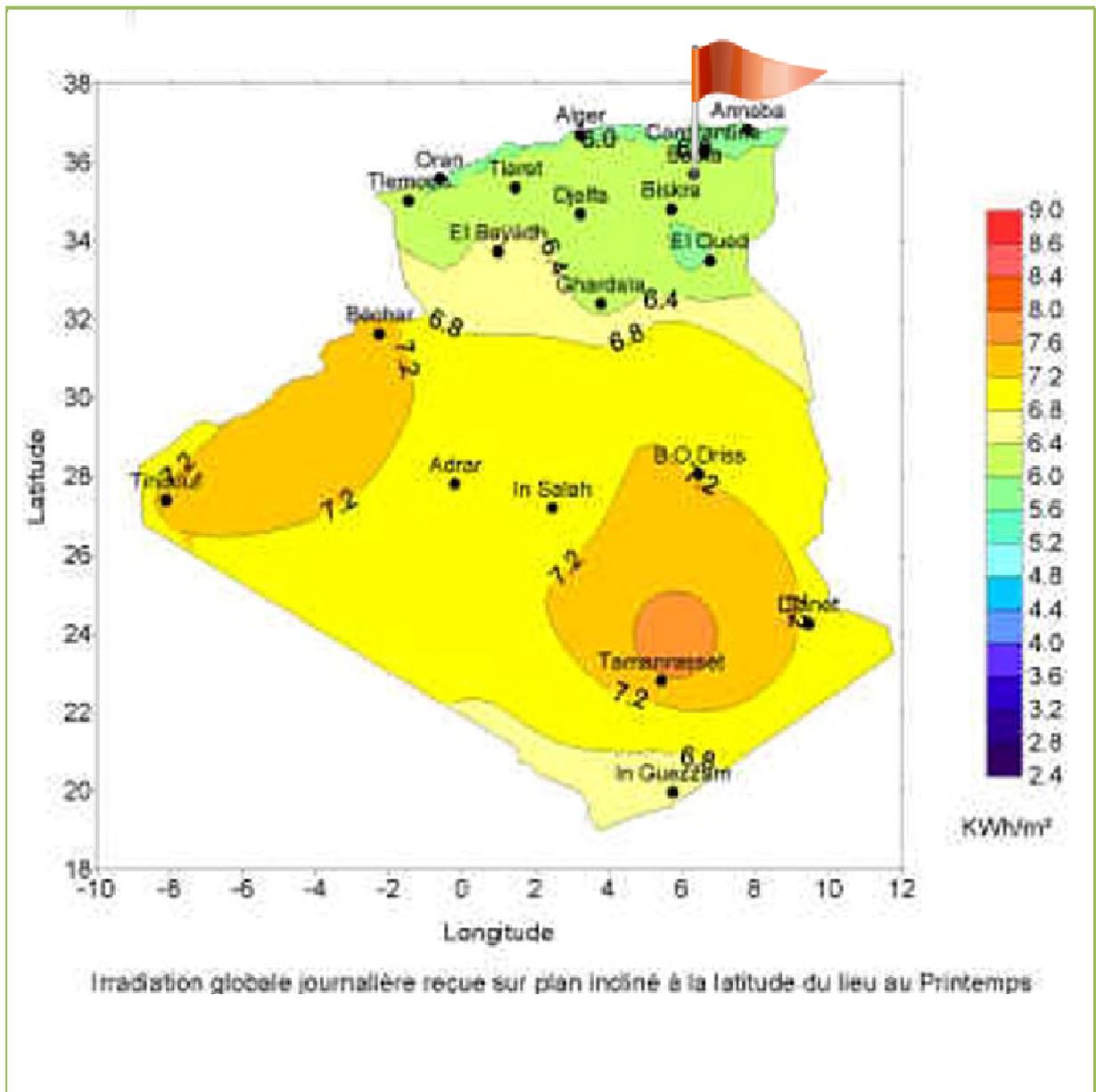
Irradiation globale moyenne sur plan horizontal reçue en Automne [CDER 2007]



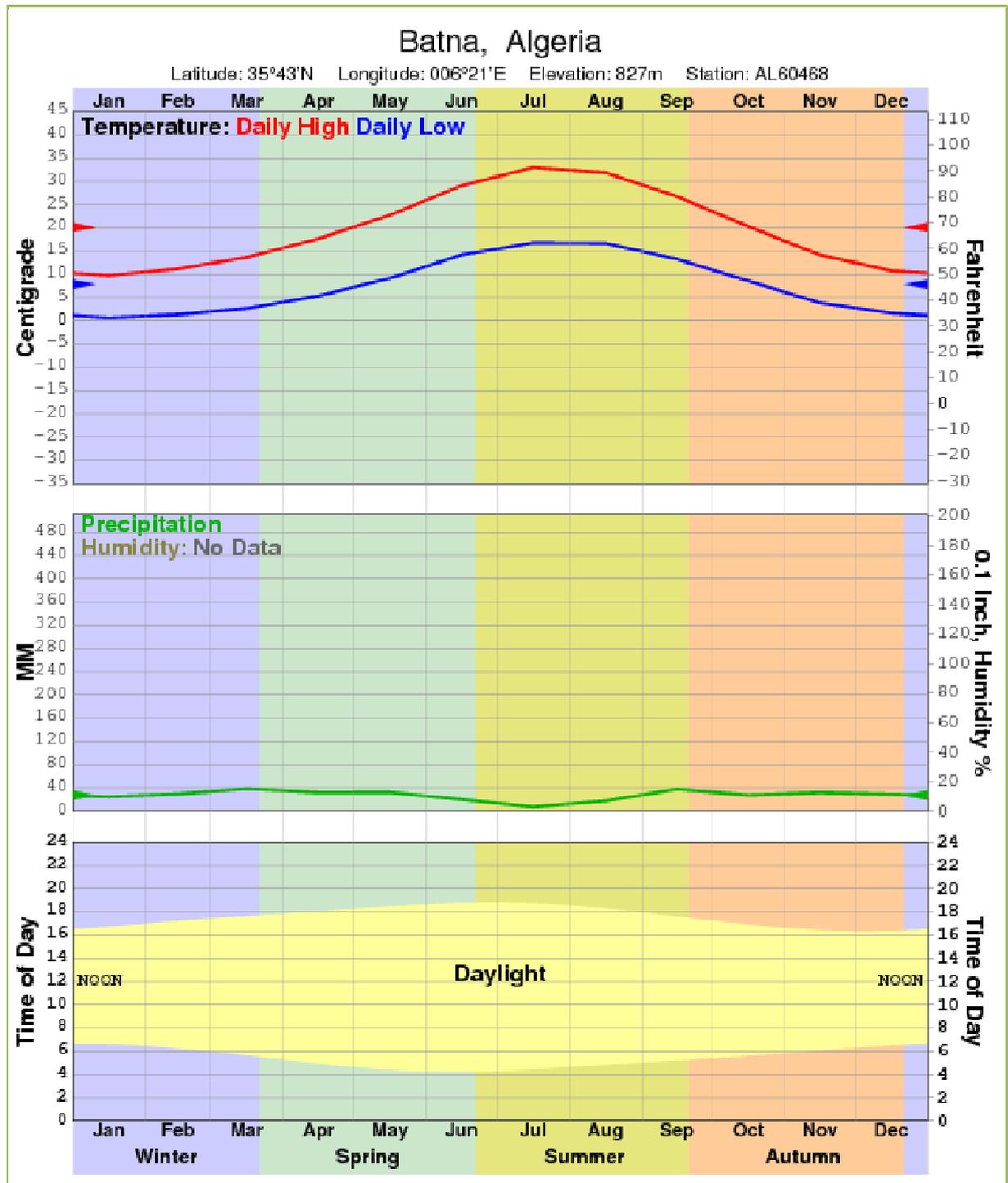
Irradiation globale journalière sur plan incliné reçue en Hiver[CDER 2007]



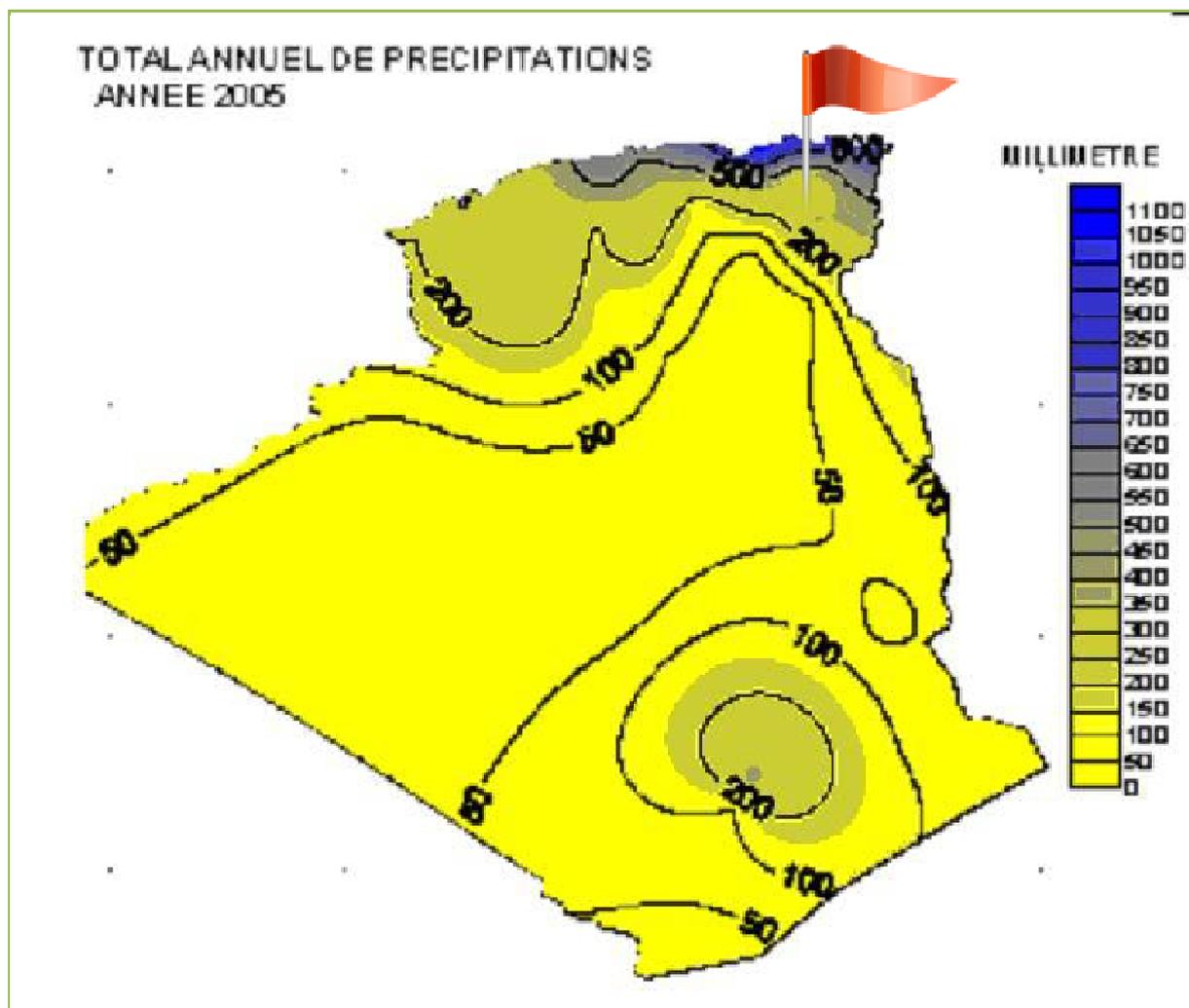
Irradiation globale journalière sur plan incliné reçue en Eté [CDER 2007]



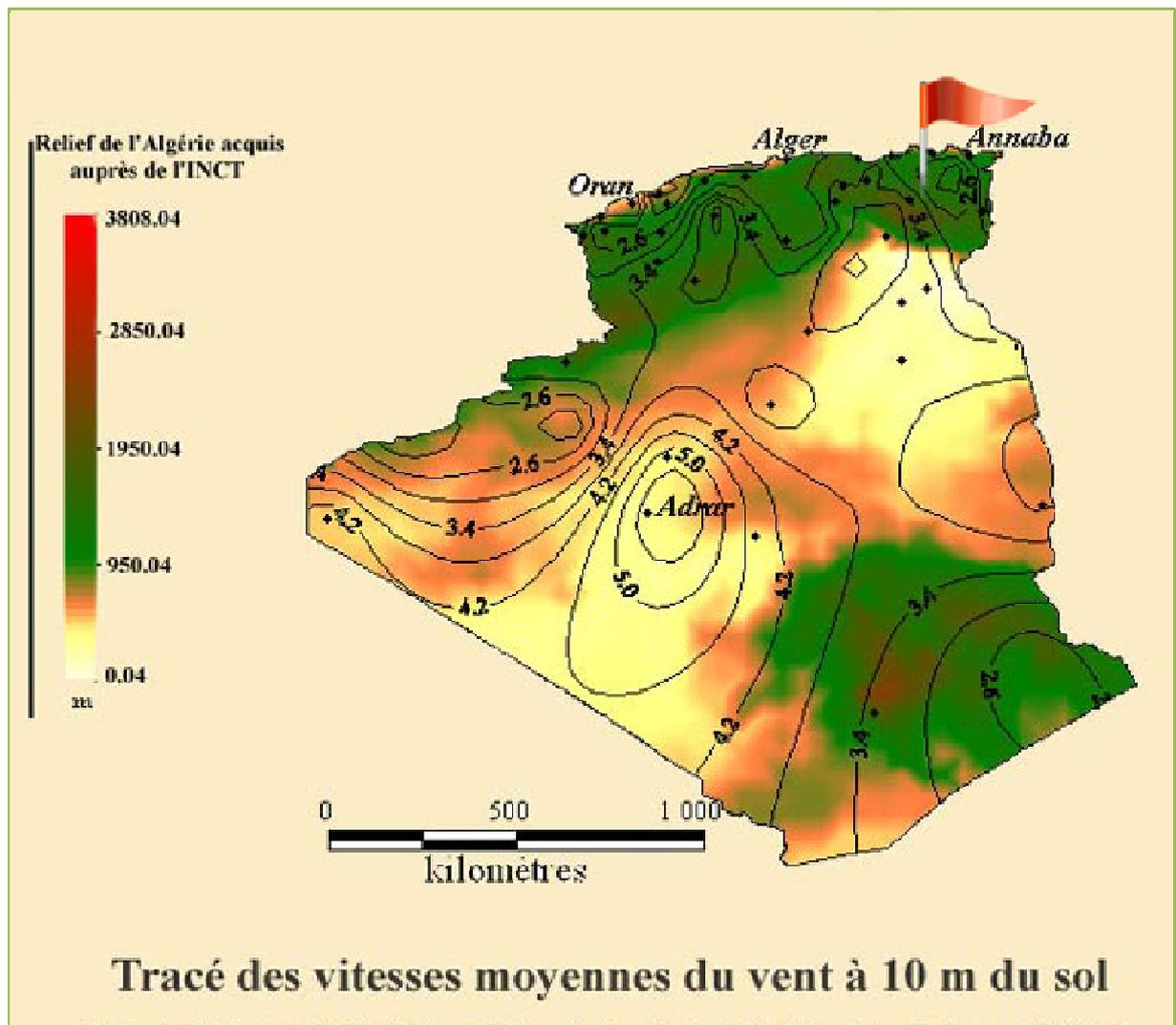
Irradiation globale journalière sur plan incliné reçue au Printemps [CDER 2007]

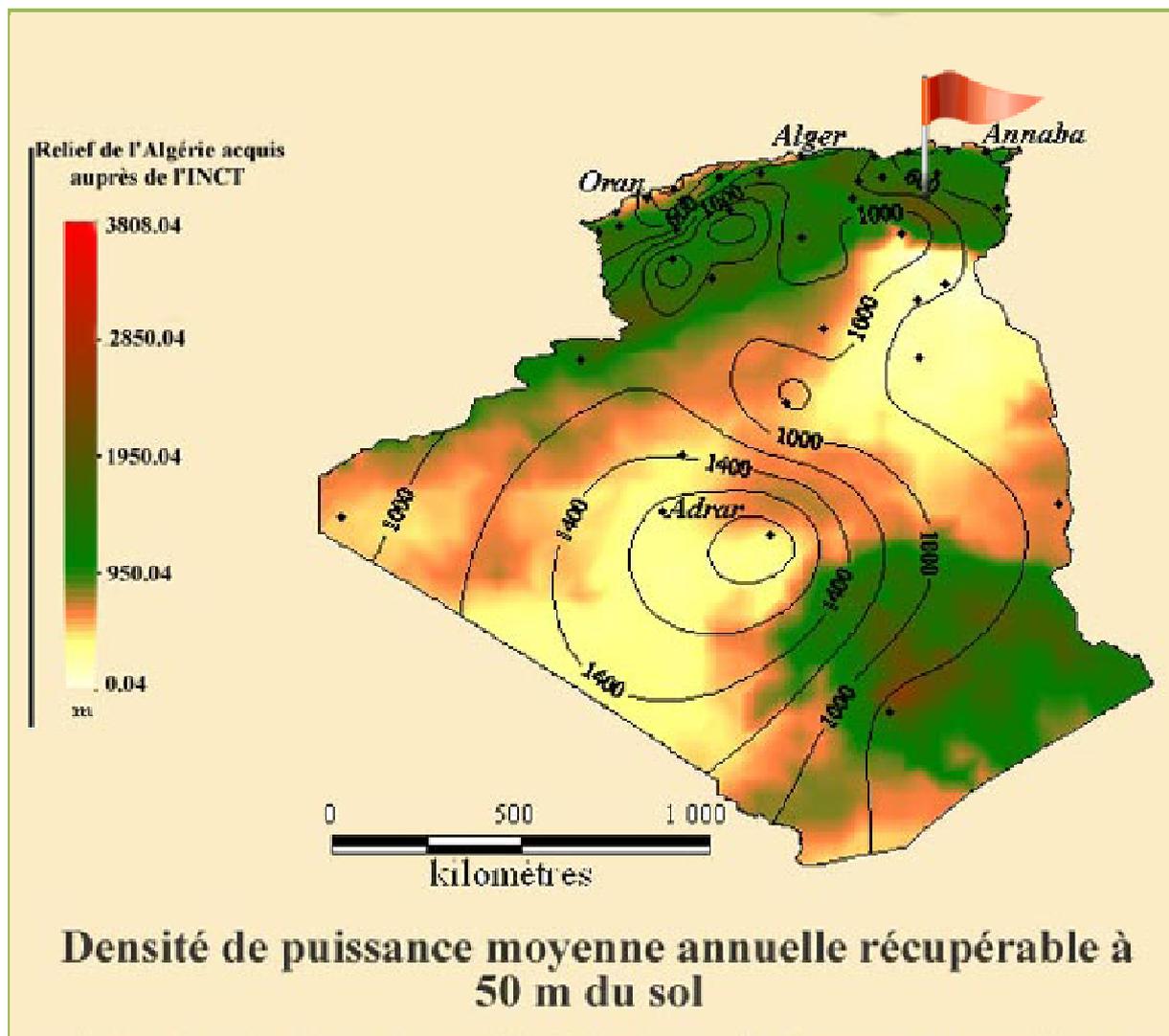


Diagrammes des données climatiques journalières de la ville de Batna

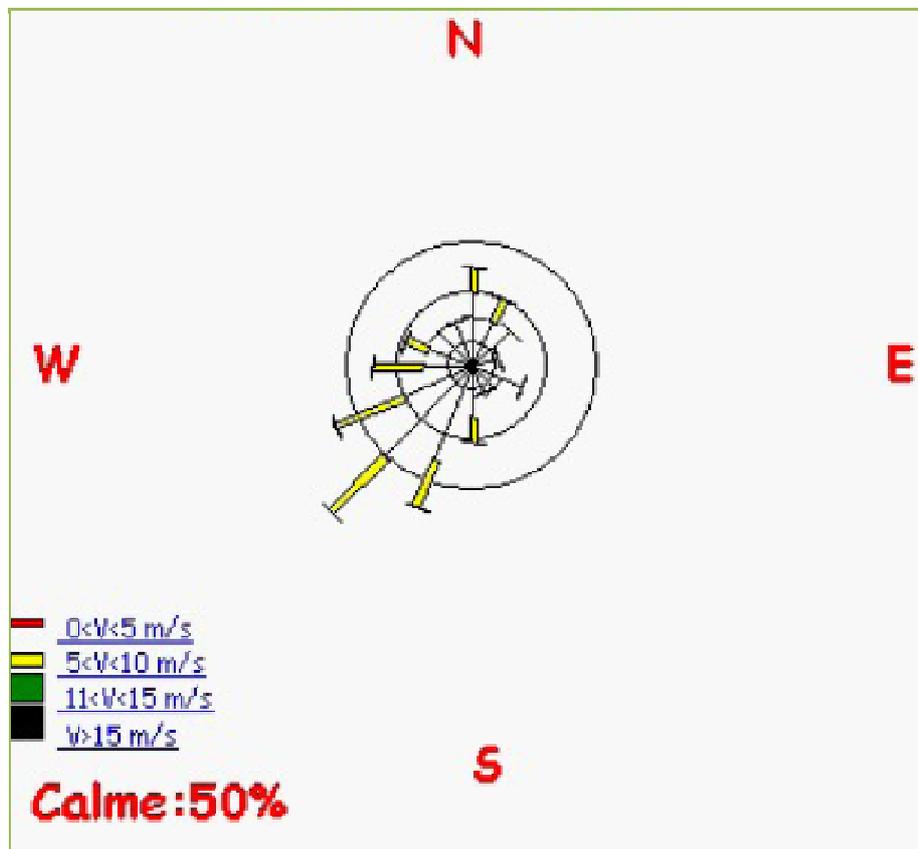


Comparaison à titre d'exemple avec le cumul annuel des précipitations en 2005  
[[www.cosmovisions.com](http://www.cosmovisions.com)]





Densité de puissance moyenne annuelle récupérable à 50 m du sol [CDER 2007]

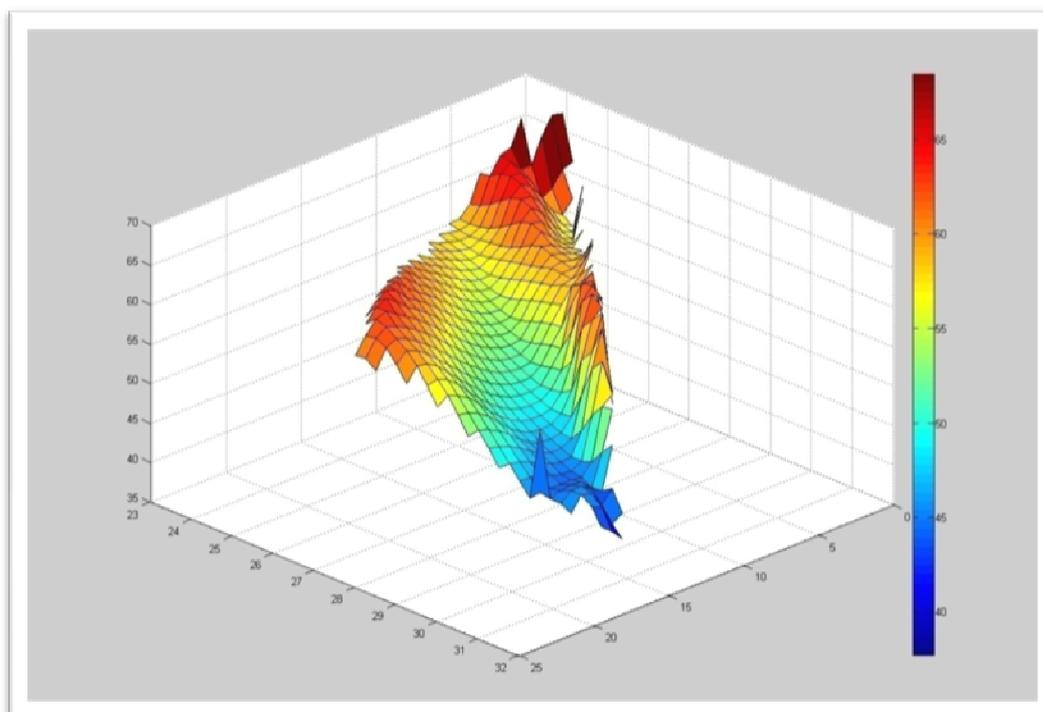


Rose des vents de la ville de Batna [ONM 2008]

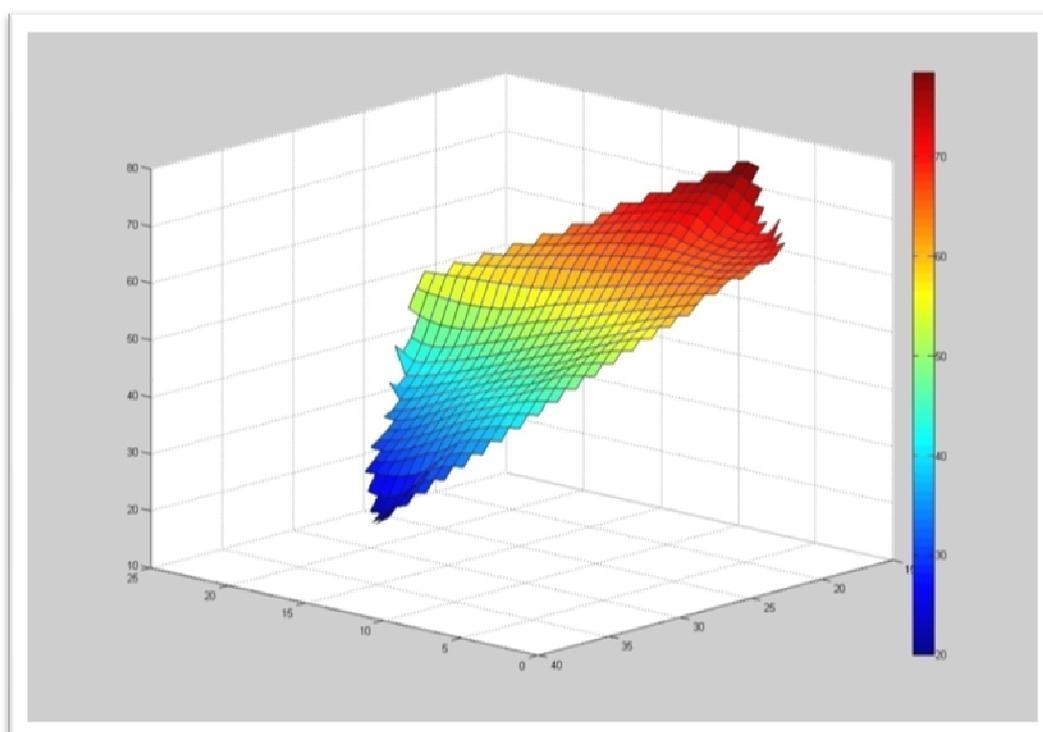
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	Total Moyen
<b>T moy</b>	5.5	6.8	10.1	12.6	18.1	32.2	26.2	25.9	21.7	16.9	10.7	6.9	15.4
<b>T mini moy</b>	-0.1	0.3	2.9	5.1	10.2	14.5	16.9	17.2	14.3	10.1	4.9	1.5	8.1
<b>T maxi moy</b>	11.5	13.8	17.2	19.7	25.9	31.8	35.2	34.5	29.3	24.1	16.8	12.0	22.6
<b>RR (mm)</b>	32.3	22.4	30.5	33.6	46.6	15.4	8.6	20.2	35.8	22.2	31.7	34.7	330.4 mm
<b>T° n ABS</b>	-8.6	-9.0	-7.3	-5.5	-2.5	2.8	7.8	8.3	3.4	0.6	-7.5	-8.3	-9.0 °C ABS
<b>T° x ABS</b>	22.4	24.7	32.3	33.4	40.5	41.1	43.8	42.6	39.1	35.5	27.6	24.8	43.8 °C
<b>Nbj brouillard</b>	2	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	09 jours
<b>Nbj Orage</b>	1	1	1	2	5	5	4	6	6	2	1	1	35 jours
<b>Pression</b>	925.6	925.3	923. 3	920. 2	921. 8	923. 5	923. 7	923. 9	923.3	924.0	923.4	923.3	923.5 mb
<b>Humidité</b>	75	69	62	59	55	46	39	43	56	60	67	75	69 %

Moyennes climatologiques : Septembre 1988-Aout 2006 (18 ans) [ONM 2008]

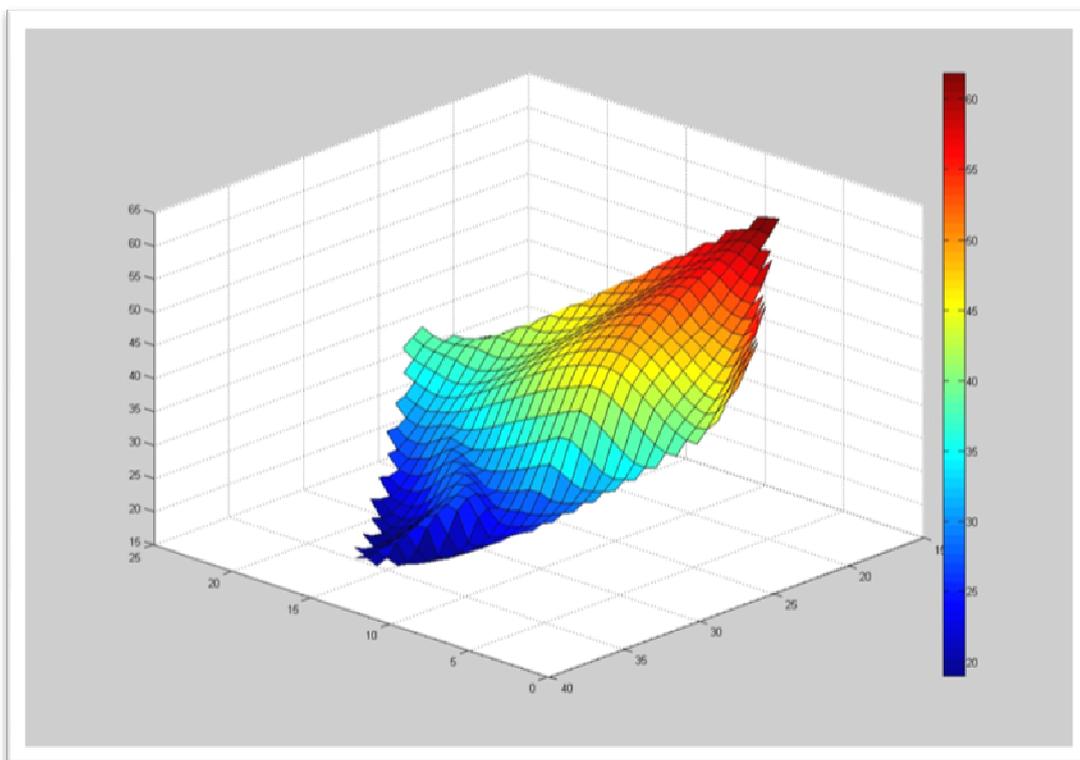
**2-Variation de la température de l'air et de l'humidité relative l'air en fonction du temps dans les stations « A, B, C et D » le 27,28 et 29 Aout 2006 :**



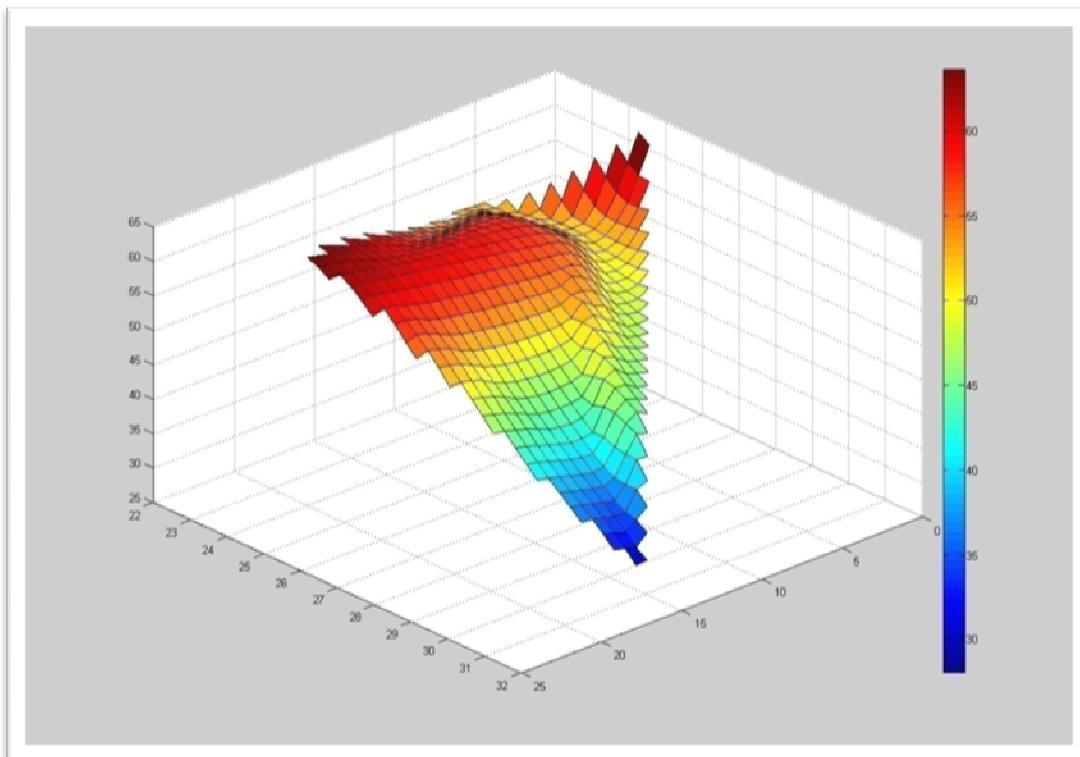
Variation de la température de l'air et de l'humidité relative l'air en fonction du temps dans la station « A » le 27/08/2006 [Auteur 2008]



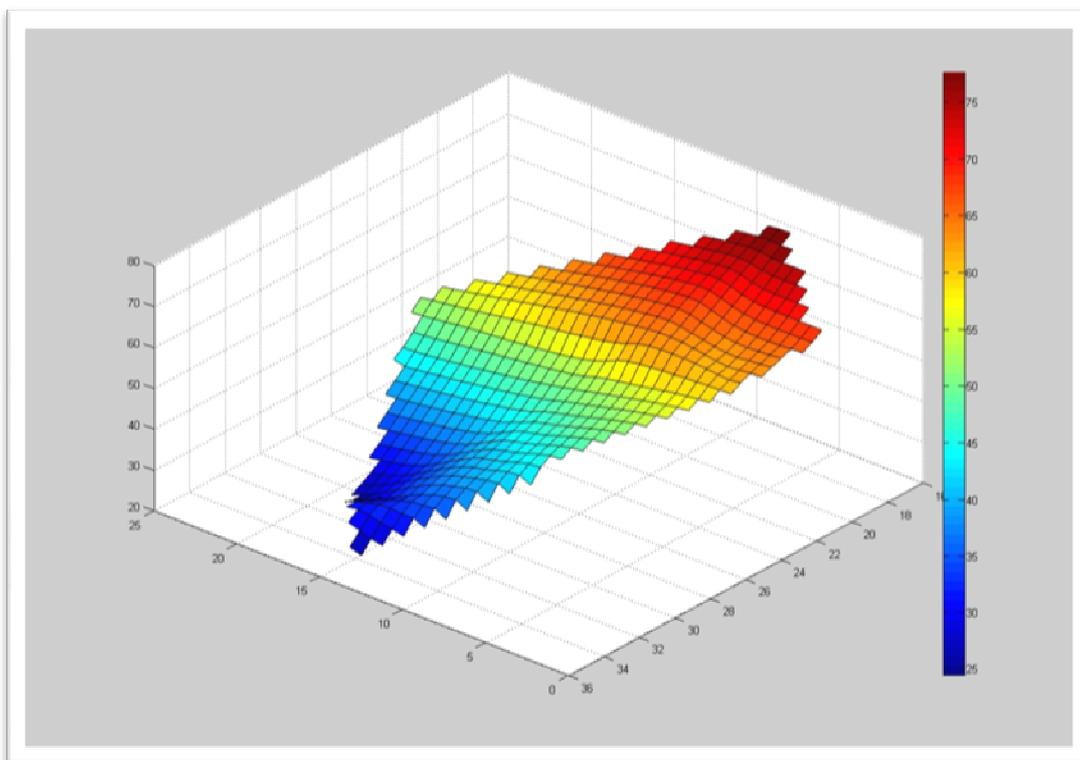
Variation de la température de l'air et de l'humidité relative en fonction du temps dans la station « A » le 28/08/2006 [Auteur 2008]



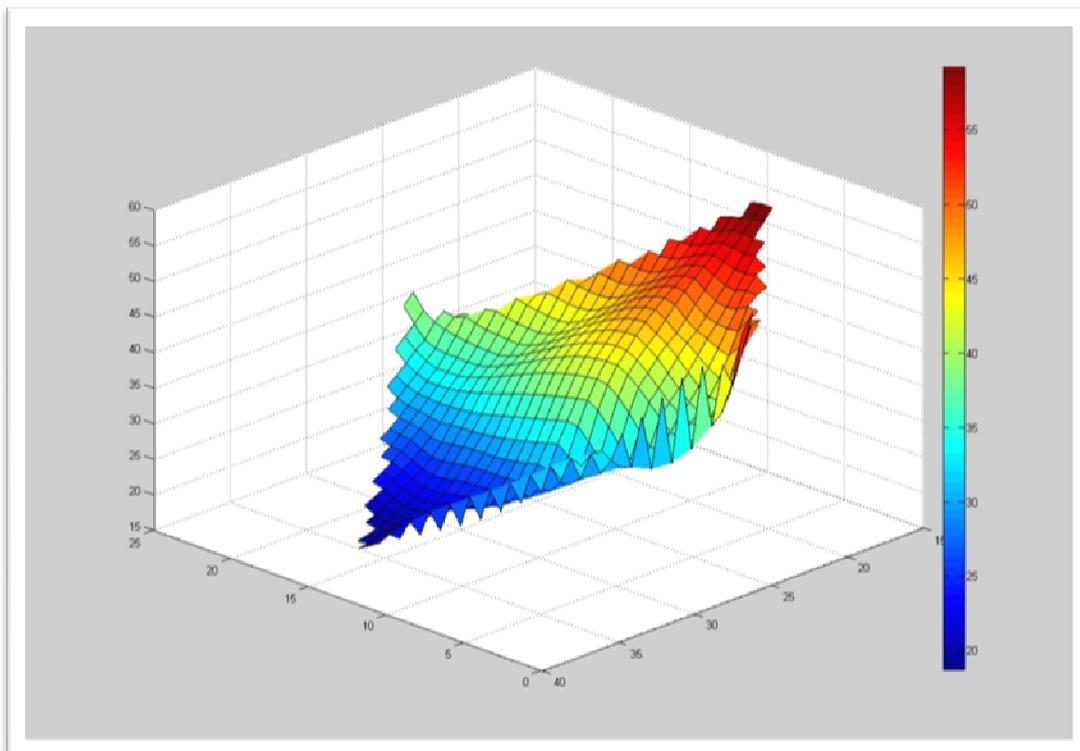
Variation de la température de l'air et de l'humidité relative en fonction du temps dans la station « A » le 29/08/2006 [Auteur 2008]



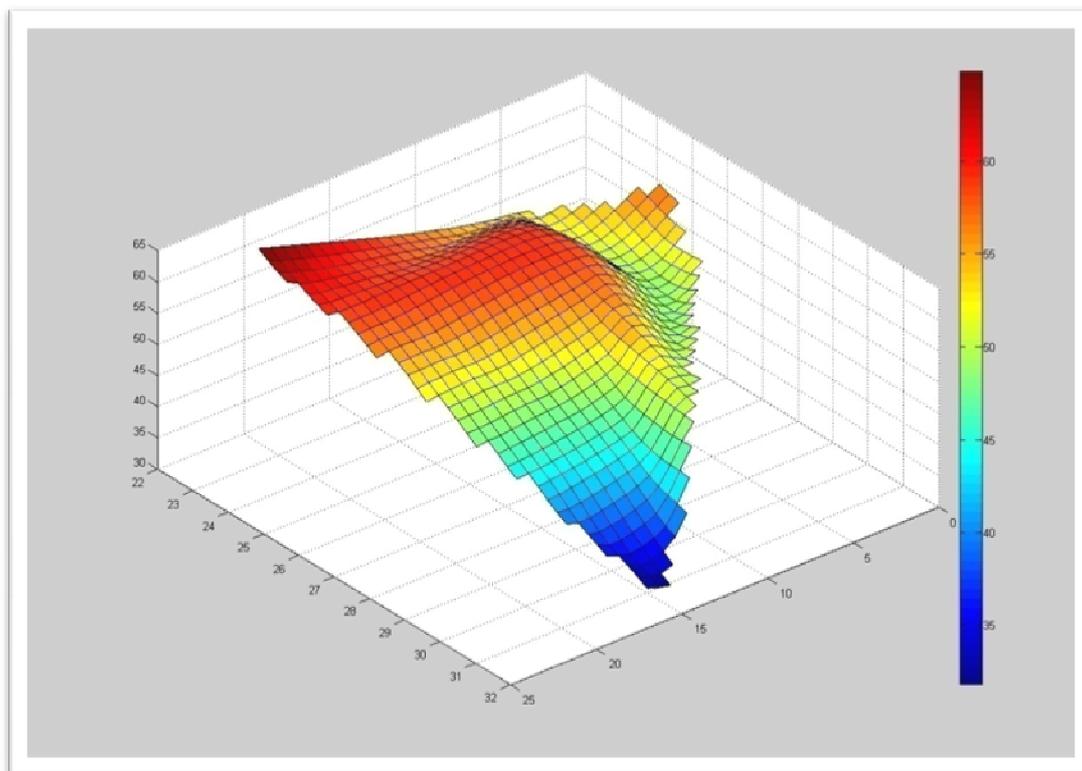
Variation de la température de l'air et de l'humidité relative en fonction du temps dans la station « B » le 29/08/2006 [Auteur 2008]



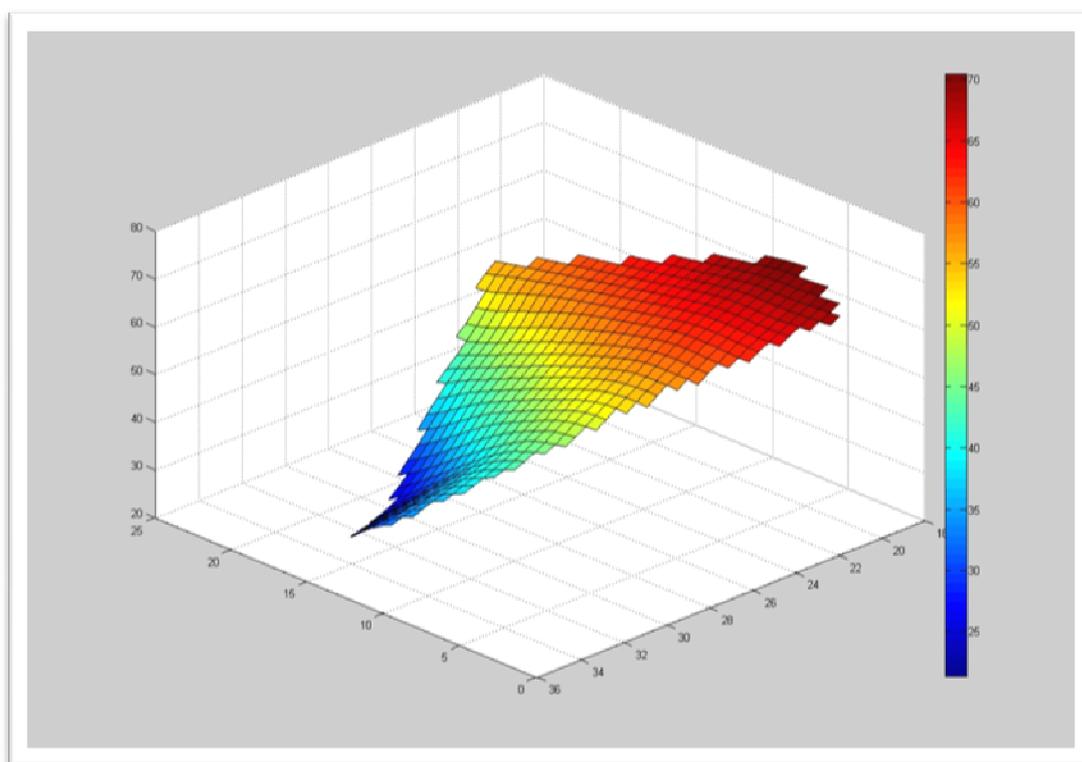
Variation de la température de l'air et de l'humidité relative en fonction du temps dans la station « B » le 28/08/2006 [Auteur 2008]



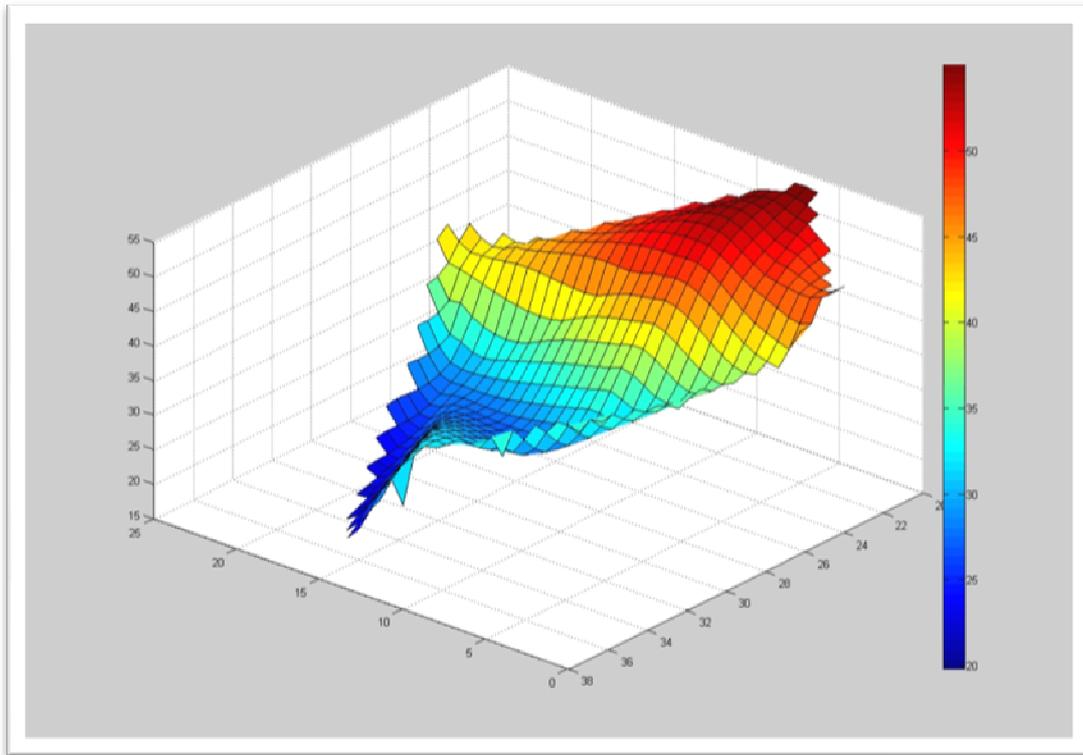
Variation de la température de l'air et de l'humidité relative en fonction du temps dans la station « B » le 29/08/2006 [Auteur 2008]



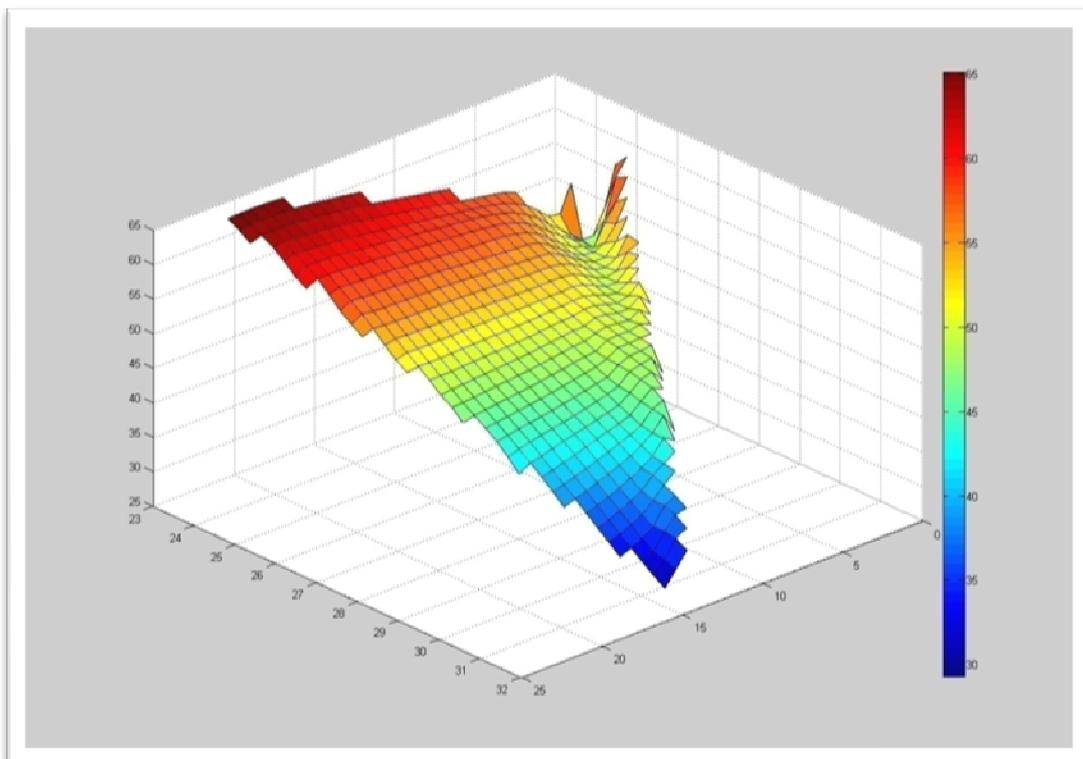
Variation de la température de l'air et de l'humidité relative en fonction du temps dans la station « C » le 27/08/2006 [Auteur 2008]



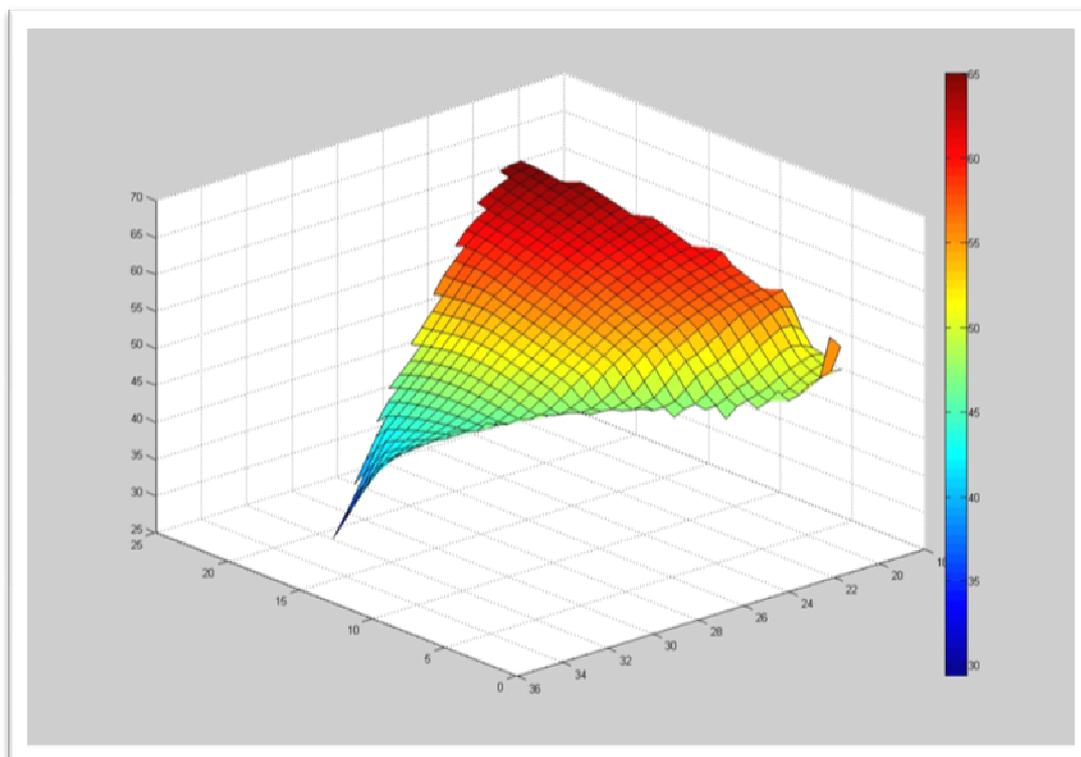
Variation de la température de l'air et de l'humidité relative en fonction du temps dans la station « C » le 28/08/2006 [Auteur 2008]



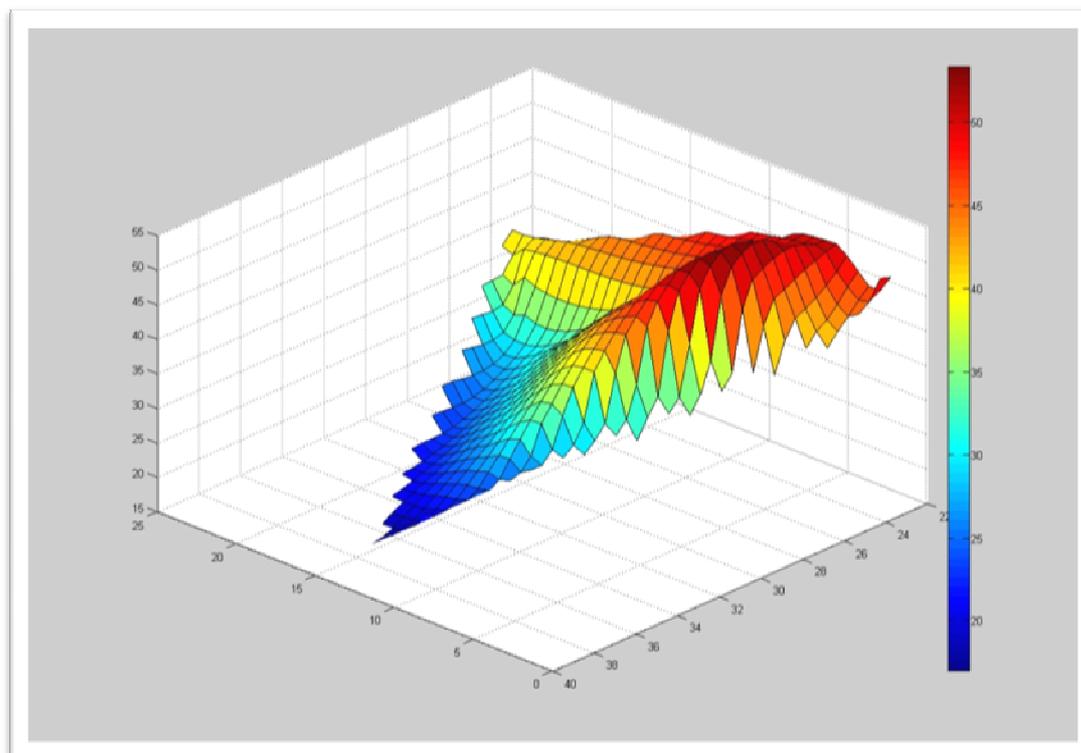
Variation de la température de l'air et de l'humidité relative en fonction du temps dans la station « C » le 29/08/2006 [Auteur 2008]



Variation de la température de l'air et de l'humidité relative en fonction du temps dans la station « D » le 27/08/2006 [Auteur 2008]



Variation de la température de l'air et de l'humidité relative en fonction du temps dans la station « D » le 28/08/2006 [Auteur 2008]



Variation de la température de l'air et de l'humidité relative en fonction du temps dans la station « D » le 29/08/2006 [auteur 2008]

### 3-Diagramme (H,x) de l'air humide :

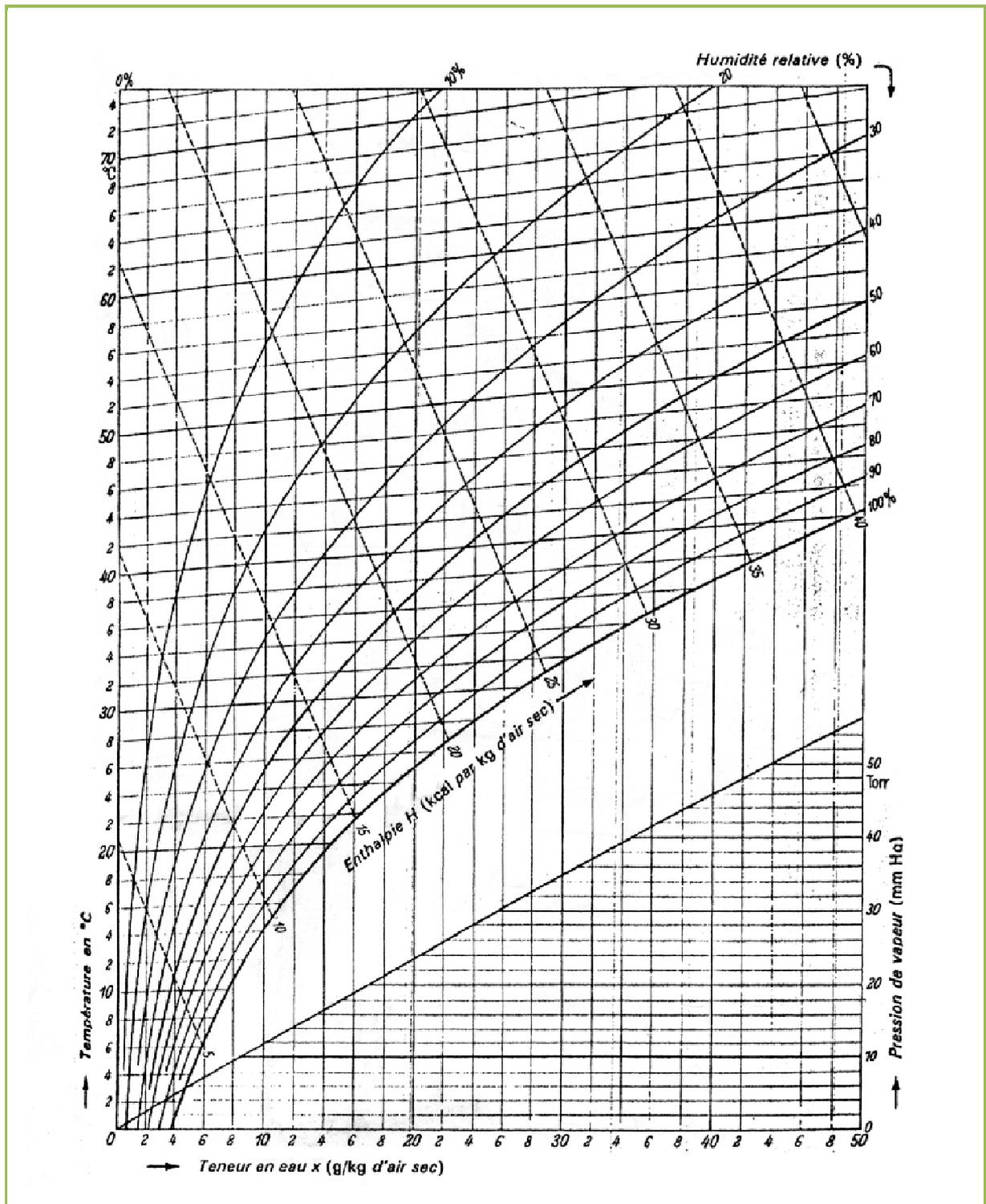


Diagramme (H,x) de l'air humide



# Résumés

## **Résumé :**

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

Les espaces urbains publics, composants fondamentaux dans la ville, support des activités urbaines. Lieux de rencontre et de sociabilité, là où se fabrique la citoyenneté. Le taux d'urbanisation accéléré a négligé ces espaces, par conséquent on assiste à leur déclin et leur dégradation. Leurs absence de a engendré la dégradation du microclimat. Actuellement les projets de villes durables exigent leur requalification afin d'affirmer la cohésion et l'identité urbaine en s'appuyant sur l'hospitalité de ces lieux.

La requalification réside dans l'amélioration de leur qualité. Cette dernière dépend essentiellement du microclimat et le confort thermique.

Le microclimat généré est le résultat de l'interaction entre les paramètres du mésoclimat et l'unité urbaine. Par conséquent, de part leurs géométries, leurs formes, leurs orientations, les matériaux et les éléments composants, le concepteur peut intervenir à l'amélioration de leur confort thermique. Beaucoup de recherches ont démontré que la minéralisation généralisée a augmenté le problème de surchauffe et l'inconfort dans les espaces urbains publics. C'est pourquoi l'intégration de l'élément naturel se révèle d'une grande importance. L'arbre urbain présente plusieurs avantages écologiques: Il offre l'ombre et refroidit l'air ambiant, atténue le bruit et filtre la pollution.

Dans l'objectif d'évaluer les avantages de l'arbre urbain, ce travail a étudié l'impact de la végétation sur le microclimat et le confort thermique dans les Allées Ben boulaïd : Espace public, situé au centre de la ville de Batna. L'investigation a démontré qu'il développe un microclimat spécifique généré grâce aux différents éléments qui le composent.

## **Mots clés:**

Espace public urbain, Végétation, Microclimat, Confort thermique extérieur.



## **Abstract:**

The big cities, in summer period, develop more and more frequently certain problems involved in the phenomenon of “urban heat island”. The mineralization of the cities, by replacing the vegetation by concrete and asphalt contributes to these harmful effects.

Public urban spaces, basic components in the city, support of the urban activities. Meeting places and of sociability, where the citizenship is manufactured. The rate of urbanization accelerated neglected these spaces; by consequence one attends their decline and their degradation. Their absence of generated the degradation of the microclimate. Currently the projects of durable cities require their requalification in order to affirm cohesion and the urban identity while being based on the hospitality of these places.

Requalification lies in the improvement of their quality. The latter depends primarily on the microclimate and thermal comfort.

The generated microclimate is the result of the interaction between the parameters of the mesoclimate and the urban unit. By consequence, of share their geometries, their forms, their orientations, the materials and the elements component, the originator can intervene with the improvement of their thermal comfort. Many research showed that generalized mineralization increased the problem of overheating and discomfort in public urban spaces. This is why the integration of the natural elements appears of great importance. The urban tree has several ecological advantages: It offers the shade and cools the ambient air, attenuates the noise and filters pollution.

In the objective to evaluate the advantages of the urban tree, this work studied the impact of the vegetation on the microclimate and thermal comfort in the Alleys Ben boulaïd: Public space, located at the centre of the town of Batna. The investigation showed that it develops a specific microclimate generated thanks to the various elements which compose it.

## **Key words:**

Urban public space, Vegetation, Microclimate, outdoor thermal Comfort.



## ملخص:

تعاني المدن الكبرى في الفترة الصيفية من بعض المشاكل المتعلقة بظاهرة ارتفاع درجة الحرارة داخل أحيائها.

من بين الأسباب الرئيسية، استبدال العنصر الطبيعي الأخضر بالخرسانة و الإسفلت.

تحسين المجالات العمرانية يعني تحسين الميكرومناخ و مستوى الراحة الحرارية، بما أن هذا الأخير ناتج عن تفاعل مختلف العناصر المناخية و العمرانية، فإن التحكم في المحيط العام لهذه المجالات ممكن و ذلك من خلال دراسة هندستها، اتجاهها، مواد البناء و العناصر المكونة لها.

بينت كثير من الدراسات أهمية إدراج العناصر الطبيعية التي تتمثل في الأشجار، بحيث توفر الظل، تلطف الجو و تقلل من الضجيج و التلوث.

من أجل إبراز دور العنصر الأخضر، تمت دراسة تأثير الأشجار على الميكرومناخ و الراحة الحرارية في "ممرات به بولعيد" بباتنة.

أظهرت الدراسة أن هذه الأخيرة تتمتع بميكرومناخ خاص بها بسبب تنوع العناصر المكونة لها، خاصة الأشجار منعها.

## مصطلحات هامة:

المجالات العمرانية العمومية، الأشجار، الميكرومناخ، الراحة الحرارية في الخارج.

