

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTERE DE L 'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



N° d'ordre :

Série :

Université Mohammed Seddik BENYAHIA - Jijel
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département : Architecture

Thèse Présentée
pour l'obtention du Diplôme de Doctorat en Sciences
Spécialité : Architecture

Réalisée par : Mohammed Chérif LEHTIHET

Thème :

**Amélioration des microclimats des villes par la
prolifération des terrasses et toitures végétalisées
en zones aride et méditerranéenne**

Soutenue le 16 / 12 / 2018 Devant le Jury composé de :

Mr. MEBROUK Fateh	Professeur	U.S.M.B. Jijel	Président du jury
Mr. BOUCHAIR Ammar	Professeur	U.S.M.B. Jijel	Directeur de thèse
Mr. ALKAMA Djamel	Professeur	U. Guelma	Examineur
Mr. LARABA Youcef	Professeur	U. Constantine 3	Examineur
Mr. BENZAID Riad	MCA	U.S.M.B. Jijel	Examineur
Mr. DAARA Djaffar	MCA	U. Constantine 3	Examineur

Année universitaire 2018/2019

Remerciements

En premier lieu, je tiens à exprimer ma reconnaissance et ma gratitude à Mr. Ammar BOUCHAIR, Professeur à l'université de Jijel, mon directeur de thèse pour sa confiance, sa disponibilité, son soutien dans les moments difficiles et pour les nombreux conseils qu'il m'a donné durant toutes ces années pour réaliser les travaux de cette thèse.

Ce travail a été réalisé au niveau du laboratoire cadre bâti et environnement de l'université de Jijel en collaboration avec le laboratoire Architecture Bioclimatique et Construction de l'école nationale supérieure d'architecture de Marseille. Aussi mes remerciements vont vers Mrs Jean louis IZARD, Alain GUYOT et Mohamed BELMAAZIZ qui m'ont accueilli au niveau du laboratoire ABC, mes collègues Mustapha BLIBLI, Saïd GRIMES et Hocine TEBBOUCHE pour les longs moments passés au laboratoire CBE de l'université de Jijel.

J'adresse ma profonde gratitude Mr Fateh MEBROUK Professeur à l'université de Jijel qui a accepté de présider le jury de ma soutenance.

Je suis particulièrement reconnaissant envers Mr Djamel ALKAMA Professeur à l'université de Guelma et Youcef LARABA Professeur à l'université de Constantine 3, Mr Riad BENZAID Maitre de conférences à l'université de Jijel ainsi qu'à Mr. Djaffar DAARA Maitre de conférences à l'université Constantine 3 qui ont accepté de participer en tant qu'examineurs du jury de cette thèse.

J'exprime ma gratitude à ma sœur Rofia qui m'a permis l'acquisition du matériel de mesures in situ nécessaire au travail expérimental. Je suis particulièrement reconnaissant aux membres du jury qui ont bien voulu évaluer ce travail et à tous mes collègues du département et particulièrement Tarik ROUIDI pour son soutien dans les derniers moments difficiles.

Je remercie enfin ma famille, mon frère, mes sœurs, mon épouse qui m'a beaucoup aidé, mes enfants et mes proches qui m'ont supporté, soutenu et encouragé durant toutes ces années, enfin je dédie cette thèse à mon défunt père.

Résumé

Les projections climatiques prévoient une amplification du réchauffement global. La recrudescence d'événements extrêmes comme les canicules peut avoir des conséquences écologiques, sanitaires et économiques dramatiques à l'échelle des villes. La minéralisation généralisée des zones urbaines en remplaçant la végétation et les zones humides par du béton et de l'asphalte développe au niveau des villes des problèmes liés au phénomène d'îlot de chaleur comme les pics de pollution et la surconsommation énergétique due à la climatisation générant une augmentation de la température des rues au niveau des piétons. Les terrasses et toitures végétalisées peuvent être une technique optimale pour réduire l'effet îlot de chaleur urbain, ombrageant le toit en le protégeant des radiations solaires directes, augmentant le rafraîchissement par évaporation et réduisant ainsi la demande énergétique.

L'objectif principal de cette thèse est de caractériser l'incidence de la terrasse avec couverture végétale extensive sur l'amélioration des microclimats des villes dans un contexte climatique méditerranéen comparativement à la zone aride. Pour étudier ce phénomène en premier lieu un travail expérimental comparatif consistant en des campagnes de mesures in situ a été effectué sur des modules expérimentaux réalisées à une échelle humaine le premier doté de terrasse en béton armé nue le second de terrasse couverte de végétation extensive. Les résultats obtenus montrent une atténuation moyenne des températures des surfaces supérieures des constructions de l'ordre de 18% ainsi qu'une amélioration significative des conditions de confort intérieur de l'ordre de 11% et atteignant même 17% aux heures chaudes de la journée. Afin d'étendre le champ d'investigation et de corrélérer les résultats obtenus à l'échelle de la ville le même scénario a été réalisé à l'aide d'outils de simulation numérique que sont ECOTECT pour la performance énergétique et le confort intérieur des constructions et ENVI met qui est un logiciel de simulation pour les conditions de confort au niveau microclimatique.

Les résultats numériques ont confirmé les phénomènes observés au niveau du travail expérimental et montrent que la toiture avec couverture végétale extensive constitue un moyen efficace d'améliorer les conditions de confort thermique des bâtiments par leur pouvoir isolant ainsi que les conditions microclimatiques locales par la modification de l'albédo des surfaces urbaines couplé à la capacité évapotranspirante des végétaux avec une économie potentielle d'énergie entre deux choix d'aménagements pour un même projet.

Mots clés : Changements climatiques, efficacité énergétique, îlot de chaleur urbain, mesures in situ, simulation numérique, toiture végétale, végétation extensive.

Table des matières

Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Nomenclature	
Introduction générale	1
Problématique	2
Objectifs.....	3
Méthodologie de recherche.....	3
Structure de la thèse	4
CHAPITRE 1 : LE VEGETAL EN MILIEU URBAIN	6
Introduction :	6
1.1 Le rôle microclimatique de la végétation	7
1.2. Echanges énergétiques de la végétation.....	12
1.3. Végétation et îlot de chaleur	12
1.3.1 Cas d'études : Parcs urbains.	12
1.4. Arbre d'alignement	17
1.5. Les effets des facteurs environnementaux sur la croissance des végétaux.....	18
1.5.1 Effet de la nature du sol	18
1.5.2 Effet du type et morphologie de l'espace d'implantation sur le végétal	21
1.5.3 Effet de l'orientation de l'espace	23
1.6 Etudes thermo graphiques sur les végétaux	26
1.6.1 Calcul des températures de surface	26
Conclusion :	35
CHAPITRE 2 : EFFET DU VEGETAL ET CONFORT THERMIQUE	36
Introduction :	36
2.1 .Phénomène de L'évapotranspiration	36

2.1.1 Définition :	36
2.1.2 Évapotranspiration potentielle	39
2.1.3 Evapotranspiration réelle (ETR)	40
2.1.4 La relation entre l'évapotranspiration potentielle et réelle	40
2.2 Effet aérodynamique du végétal urbain	41
2.2.1 Cas d'études : Toitures végétalisées	42
2.3. Porosité des végétaux	49
2.4. L'indice LAI	49
2.5. Le confort thermique	51
2.6. Conditions physiologiques	52
2.7. Indices évaluant une sensation de confort	53
2.7.1 La température effective SET :	53
2.7.2 Effet mécanique du vent	54
2.7.3 L'indice PET (Physiological Equivalent Temperature)	55
Conclusion	56
CHAPITRE 3 : VEGETALISATION DES TOITURES	58
Introduction	58
3.1. Définition du toit végétal	59
3.2. Les différents procédés de végétalisation des toits	59
3.2.1 La végétalisation intensive	60
3.2.2 La végétalisation extensive	60
3.2.3 La végétalisation semi- intensive	61
3.3. Historique sur les toits végétaux et leur développement	62
3.4. Les composants des toits végétaux et leurs caractéristiques	65
3.4.1. Le complexe étanchéité- isolation	66
3.4.1.1 L'isolation	66
3.4.1.2 L'étanchéité	67
3.5. Complexe de culture	67
3.5.1 Couche de drainage	68

3.5.2 Couche filtrante	69
3.5.3 Substrat de culture.....	69
3.5.3.1 Les propriétés physiques de la couche de culture (substrat).	70
3.5.3.2 Les phénomènes physiques dans le sol	70
3.5.3.3 Procédé de mise en œuvre du substrat	72
3.6. Couche végétale	72
3.6.1 Critères de choix des végétaux	72
3.6.2 Critères de choix des végétaux pour les systèmes de végétalisation extensifs.....	73
3.6.3 Les espèces recommandées pour la végétalisation extensive des toits.	74
3.6.4 Les espèces recommandées pour les climats chauds.....	75
3.6.5 Capacité d'adaptation de la végétation aux différents stress	77
3.6.5.1 La transpiration en situation normale.....	77
3.6.5.2 Stress au déficit hydrique (sécheresse)	78
3.6.5.3 Stress thermique : Résistance aux températures élevées.....	80
3.6.6 Modes de mise en œuvre de la végétation sur les toits	81
3.6.6.1. Le semis et le bouturage.....	81
3.6.6.2. La plantation	81
Conclusion :	81
CHAPITRE 4 : ELEMENTS DE CLIMATOLOGIE ET LEURS CARACTERISTIQUES	83
Introduction :	83
4.1. Climat et climatologie.....	83
4.2. Les échelles du climat.....	83
4.2.1. Les climats zonaux.....	84
4.2.2. Les climats généraux.....	84
4.2.3 Les climats régionaux	85
4.2.4 Les climats locaux.....	85
4.2.5 Les microclimats	85
4. 3. Répartition des climats à l'échelle mondiale	85
4.3.1. Les climats équatoriaux toujours humides	86

4.3.2. Les climats tropicaux	86
4.3.3. Les climats arides.....	87
4.3.4. Les climats tempérés	87
4.3.5. Les climats froids	88
4.3.6. Les climats polaires.....	88
4.3.7. Les climats de montagne	88
4.4. Climats de l'Algérie	88
4.4.1. Les zones climatiques d'hiver	90
4.4.2. Les zones climatiques d'été	90
4.5. Indices des Domaines et climats arides.....	92
4.6. Microclimats et principes générateurs	93
4.6.1. Effets locaux sur les radiations	93
4.6.1.1. Contribution des radiations d'onde courte	94
4.6.1.2. Emission des radiations d'onde longue.....	94
4.6.2. Effets sur la capacité d'accumulation de chaleur.....	94
4.6.3. Effets des mouvements de l'air de faible grandeur	95
4.7. La ville et le microclimat	95
4.7.1 Les couches d'air	96
4.7.2. Bilan énergétique et bilan radiatif	97
4.7.3. Le phénomène d'îlot de chaleur	98
4.7.4. L'ensoleillement	100
4.7.4.1. Rayonnement solaire et rayonnement terrestre	100
4.7.4.2. Rayonnement solaire et espace urbain	101
4.7.5. Les écoulements aérauliques.....	107
4.7.5.1. Vent et formes urbaines	109
4.8 Végétation en milieu urbain.....	115
4.9 Données climatologiques de la ville de Jijel.....	118
4.10 Données climatologique de la ville de Biskra.....	122
Conclusion :	127

CHAPITRE 5 : METHODES ET MOYENS D'INVESTIGATION	129
Introduction.....	129
5.1. Présentation de la ville de Jijel.....	130
5.2. Historique de la ville de Jijel.....	131
5.3. Structure urbaine.....	133
5.4 Le couvert végétal à Jijel :	134
5.5. Travail expérimental in situ à Jijel :.....	137
5.5.1 Protocole de mesures.....	138
5.5.2 Choix du site d'expérimentation et configuration des modules expérimentaux	139
5.5.3 Périodes, conditions climatiques et séquences de mesures.....	140
5.5.4 Résultats des mesures.....	142
5.6 Comparaison des résultats des mesures entre modules avec dalle nue et dalle avec végétation rampante	145
5.6.1 Comparatif mesures sur module expérimental en couverture dalle béton armée nue.....	145
5.6.2 Comparatif mesures sur module expérimental en couverture dalle béton armée couverte avec végétation rampante.....	145
5.6.3 Comparatif mesures sur module expérimental avec dalle béton armée nue :.....	146
5.6.4 Comparatif mesures sur module expérimental en couverture dalle béton armée couverte de végétation extensive :.....	146
5.7 Comparaison des résultats des mesures entre modules avec dalle nue et dalle avec végétation extensive	149
5.8 Simulation numérique avec le logiciel ECOTECT	151
5.9 Cas d'étude en zone méditerranéenne.....	152
5.9.1 Présentation du cas d'étude.....	152
5.9.2 Présentation de l'échantillon d'étude	153
5.9.3 Les critères d'analyse pour les suites	154
5.9.4 Les démarches de simulation par le logiciel ECOTECT	156
5.10 Simulation numérique avec le logiciel ENVIMET	157
5.11 Résultats obtenus	159
5.11.1 La température de l'air.....	159

5.11.2 L'humidité relative.....	160
5.11.3 La vitesse du vent.....	160
Conclusion.....	161
CHAPITRE 6 : RESULTATS ET DISCUSSION.....	162
Introduction.....	162
6.1 Résultats et discussions travail expérimental in situ.....	157
6.1.1 Comparatif entre module avec dalle en béton armé nue et module avec dalle en béton armé recouverte de végétation rampante	162
6.1.1.1 Comparatif des valeurs de température des surfaces supérieures	162
6.1.1.2. Comparatif des valeurs de température des surfaces inférieures :	164
6.1.1.3. Comparatif des valeurs de température d'air intérieur des modules	165
6.1.2 Comparatif entre module avec dalle en béton armé nue et module avec dalle en béton armé recouverte de végétation extensive	166
6.1.2.1. Comparatif des valeurs de température des surfaces supérieures	166
6.1.2.2. Comparatif des valeurs de température des surfaces inférieures.....	168
6.1.2.3. Comparatif des valeurs de température d'air intérieur des modules	169
6.2 Analyse résultats simulation numérique confort intérieur et consommation énergétique : Cas d'étude en zone méditerranéenne . Ville de Jijel	172
6.2.1 Effet de la toiture végétale sur le confort thermique intérieur en période estivale.....	172
6.2.2 Impact de la toiture végétale sur la consommation énergétique en période estivale.....	174
6.2.3 Effet de la toiture végétale sur le confort thermique intérieur en période hivernale	174
6.2.4 Impact de la toiture végétale sur la consommation énergétique en période hivernale	175
6.3 Analyse résultats simulation numérique confort intérieur et consommation énergétique : Cas d'étude en zone aride. Ville de Biskra	176
6.3.1 Effet de la toiture végétale sur le confort thermique intérieur en période estivale.....	176
6.3.2 Impact de la toiture végétale sur la consommation énergétique en période estivale.....	178
6.3.3 Effet de la toiture végétale sur le confort thermique intérieur en période hivernale.....	178
6.3.4 Impact de la toiture végétale sur la consommation énergétique en période hivernale.....	180
6.4 Analyse résultats simulation du microclimat	180
6.4.1 Effet des toitures végétalisées sur la température de l'air	181
6.4.2 Effet des toitures végétalisées sur l'humidité relative	183

6.4.3 Effet des toitures végétalisées sur la vitesse du vent.....	184
Conclusion	185
Conclusion générale et recommandations	187
Références Bibliographiques	191
ملخص	
Abstract	

Liste des figures :

Figure 1.1 : Treilles sur pergolas. (A.W. Meerow et al, 1993)	8
Figure 1.2 : Relation entre la forme de la canopée et son Ombrage d'espace.(A.W.Meerow et al, 1993)	9
Figure 1.3 : Plan de masse des cas d'études à Göteborg.....	12
Figure 1.4 : Localisation des points de mesures dans les trois parcs.....	13
Figure 1.5 : Sites d'études.....	24
Figure 1.6 : Images prises dans le domaine du visible et de l'infrarouge de sites d'études à Marseille (Izard et al, 1999).....	27
Figure 1.7 : Schémas des effets thermiques comparés de la Pelouse et de l'allée minérale à l'ombre et au soleil. (Izard et al, 1998).....	28
Figure 1.8 : Image de la place d'Assas dans le domaine du visible et de l'infrarouge....	29
Figure 1.9 : Boulevard Victor Hugo dans le domaine du visible et de l'infrarouge. (Izard et al 1999).....	30
Figure 1.10 : Plan de masse des cas d'études dans le centre-ville de « Göteborg », et leurs images thermiques.....	30
Figure 1.11 : Image thermique sphérique de la couverture végétale d'un quartier dans la périphérie de la ville de « Tokyo ».....	31
Figure 1.12 : Ecart de température entre le parc et le milieu urbain.....	32
Figure 1.13 : Influence du parc selon sa taille en milieu urbain.....	34
<hr/>	
Figure 2.1 : Taux d'évapotranspiration en fonction du débit d'eau.....	37
Figure 2.2 : Processus d'évaporation, évapotranspiration potentielle et évapotranspiration réelle (Jacques Beauchamp).....	38
Figure 2.3 : Place de l'eau du sol dans le cycle de l'eau (Jacques Beauchamp).....	40
Figure 2.4 : Profil vertical de la vitesse de vent en fonction de la rugosité de terrain....	41
Figure 2.5 : Différences de température d'air à 6 m du sol ((Bruse et al).....	44
Figure 2.6 : Séparation des deux toits : le toit vert (à gauche) et le toit de référence (à droite).....	45
Figure 2.7 : Fluctuations journalières des températures sur un toit végétalisé et un toit nu Toronto.....	46
Figure 2.8 : Modèle des deux toitures simulées.....	47
Figure 2.9 : Variations de températures journalières du toit de référence, toit vert et l'air Ambiant.....	47
Figure 2.10 : Comparaison du flux de chaleur avant et après végétalisation du toit.....	48

Figure 2.11 : Image stéréographique à axe horizontal des platanes du cours Mirabeau à Aix-en-Provence.....	50
<hr/>	
Figure 3.1 : Types de toits végétaux.....	59
Figure 3.2 : Vue en coupe toit avec végétation intensive.....	60
Figure 3.3 : Vue en coupe toit avec végétation extensive.....	61
Figure 3.4 : Jardins suspendus de Babylone.....	62
Figure 3.5 : Chalet type Norvégien.....	62
Figure 3.6 : Les composants des toits végétaux (Dany Laroche et al 2004).....	66
<hr/>	
Figure 4.1 : Les échelles climatiques.....	84
Figure 4.2 : Zones climatiques dans le monde (Hui Sam C. M. 2001).....	86
Figure 4.3 Zones climatiques d'hiver et d'été en Algérie.....	89
Figure 4.4 : Schématisation du bilan radiatif (Escourrou G 1981).....	93
Figure 4.5 : Imbrication des échelles climatiques et atmosphériques, de l'échelle méso à l'échelle micro de la couche limite atmosphérique (CLA) à la canopée urbaine (CU), adapté de [Oke, 2006]	95
Figure 4.6 : schéma du profil d'îlot de chaleur urbain Source: Cool Roof systems, Inc., 2004.....	98
Figure 4.7 : Différents albédos de l'environnement urbain. Source: Cool Roof systems, Inc., 2004.....	98
Figure 4.8 : Répartition des températures de surface à New York. Acquis par le capteur Atlas (NASA's Marshall Space Flight Center, Global Hydrology & Climate Center). (Cool Roof systems, Inc., 2004).....	100
Figure 4.9 : Variation saisonnière des différents flux solaires (W/m ²)(Porcher G). (1975).....	101
Figure 4.10 : Rayonnement d'été et d'hiver.(Escourrou G.1981).....	102
Figure 4.11 : Rayonnement en ville et en campagne (Escourrou G. 1981).....	102
Figure 4.12 : L'effet "piégeage" du rayonnement solaire.(C.S.T.B., 1996).....	103
Figure 4.13 : Façade potentiellement ensoleillée en fonction du prospect. (Oke T.R.1988)	103
Figure 4.14 : Rayonnement solaire reçu en espace extérieur par rapport au rayonnement global (Miller-Chagas P. & Paul P. 1980).....	104

Figure 4.15 : Photos fish-eye (axe vertical) de deux espaces urbains différents (rue canyon et place à Ghardaïa)(Ali-Toudert F. 2005).....	104
Figure 4.16 : Image thermographique illustrant l'effet de dièdre. (Lehtihet K. 2002).	106
Figure 4.17 : Profil de vitesse de vent au-dessus de trois milieux différents (Baumuller J. & al, 1981).....	108
Figure 4.18 : L'effet de canalisation (Escourrou G., 1981).....	110
Figure 4.19 : L'effet de vortex (Nicholson, 1975 cité par Delaunay D.1986).....	110
Figure 4.120 : Régimes d'écoulement des vents en fonction du prospect(Oke T.R 1988).	111
Figure 4.21 : L'effet venturi. (Gandemer J. & Guyot A., 1976).....	112
Figure 4.22 : L'effet de vides sous immeuble. (Gandemer J. & Guyot A.1976).....	112
Figure 4.23 : L'effet de coin (Gandemer J. & Guyot A.1976).....	113
Figure 4.24 : L'effet de sillage (Gandemer J. & Guyot A., 1976).....	113
Figure 4.25 : L'effet de tourbillon autour d'un bâtiment (Gandemer J. & Guyot A.1976).....	114
Figure 4.26 : Effet de liaison (Gandemer J. & GuyotA.1976).....	114
Figure 4.27 : Effet de maille(Gandemer J. & Guyot A., 1976).....	115
Figure 4.28 : Refroidissement par évaporation selon le taux espace vert/zone construite Source : Oke T.R. cité par Iazard J.L. & Lehtihet K., 2002.....	116
Figure 4.29 : Profil de la température de feuillage, de l'air, Opérative, et météo à trois moments du jour.(DestobbeleireG&IazardJ.L.1998).....	117
Figure 4.30 : Température de surface d'une pelouse et d'une allée à l'ombre et sous le soleil. (Destobbeleire G & Iazard J.L.1998).....	118
Figure 4.31 : Déformation des arbres par le vent(Escourrou G.1981).....	118
Figure 4.32 : Moyennes mensuelles des températures durant la période 2000-2015 (ONM).....	119
Figure 4.33 : Variation de vitesse de vent (m/s) à la station de l'Achouat.....	120
Figure 4.34 : Direction du vent.....	121
Figure 4.35 : Précipitations pluviométriques dans la wilaya Jijel.2000 à 2015.....	121
Figure 4.36 : Moyennes mensuelles des températures de l'air à Biskra.....	123
Figure 4.37 : Moyennes mensuelles des humidités relatives à Biskra.....	124

Figure 4.38 : Vitesse moyenne mensuelle du vent à Biskra.....	125
Figure 4.39 : Précipitations moyennes mensuelles.....	126
Figure 4.40 : Durée moyenne d'insolation quotidienne et mensuelle.....	127
<hr/>	
Figure 5.1 : JIJEL, situation dans l'Algérie.....	131
Figure 5.2 : Centre colonial de Jijel. (Web site Jijel Info).	132
Figure 5.3 : Quartier arabo musulman à Jijel (Auteur).....	132
Figure 5.4 : Végétation côtière à Jijel avant réalisation port de pêche. (Auteur).....	133
Figure 5.5 : La ville de JIJEL et sa couverture végétale en l'année 1976 .Echelle 1/25000 (Agence Nationale du Cadastre. Antenne de JIJEL).....	135
Figure 5.6 : La ville de JIJEL et sa couverture végétale en l'année 2006.....	136
Figure 5.7 : Situation géographique de la ville de Jijel.....	137
Figure 5.8 : Instruments de mesures.....	138
Figure 5.9 : Plan de situation du site d'expérimentation à Jijel.....	139
Figure 5.10 : module sur site expérimental : (a) module découvert, (b) volumétrie et dimensions du module.....	139
Figure 5.11 : Module expérimental de référence avec dalle en béton armé nue. (a) vue aérienne(b) coupe verticale.....	141
Figure 5.12 : Module expérimental avec dalle en béton armé recouverte de végétation rampante.....	141
Figure 5.13 : Module expérimental avec dalle en béton armé, (a) recouvert de végétation extensive, (b) module de référence (c) coupe verticale.....	142
Figure 5.14 : Variation température module avec dalle en béton armé nue.....	145
Figure 5.15 : Variation température module avec végétation rampante.....	145
Figure 5.16 : Variation température module avec dalle en béton armé nue.....	146
Figure 5.17 : Variation température module avec végétation extensive.....	146
Figure 5.18 : Variation de température d'ambiance, module avec dalle en béton armé nue et module avec dalle en béton armé couverte de végétation extensive comparativement à température d'air station météorologique et site.....	151
Figure 5.19 : Plan de situation cas d'étude.....	152
Figure 5.20 : Plan de masse du projet.....	152

Figure 5.21 : plan d'étage courant de l'hôtel.....	153
Figure 5.22 : Plan de la suite.....	154
Figure 5.23 : capture écran volumétrie 1.....	156
Figure 5.24 : Capture écran volumétrie 2.....	156
Figure 5.25 : période de simulation.....	156
Figure 5.26 : Données de simulation.....	157
Figure 5.27 : Données matériau et végétation.....	157
Figure 5.28 : Capture d'image simulation numérique avec ENVI-met.....	158
Figure 5.29 : Plan de situation des récepteurs sur le site d'étude.....	158
Figure 5.30 : Paramètres utilisés lors lancement simulation.....	159
Figure 5.31 : Vue en 3D du cas d'étude.....	159
Figure 5.32 : variation température de l'air.....	159
Figure 5.33 : Température de l'air au niveau du site.....	160
Figure 5.34 : variation humidité relative.....	160
Figure 5.35 : variation vitesse du vent.....	160
Figure 5.36 : Vitesse de l'air au niveau du site.....	161
<hr/>	
Figure 6.1 : Variation de température, de surfaces supérieures de dalle en béton armé nue et végétation rampante comparativement à température d'air station météorologique et site.....	163
Figure 6.2 : Variation de température, de surfaces inférieures de dalle en béton armé nue et dalle avec végétation rampante comparativement à température d'air station météorologique et site.....	164
Figure 6.3 : Variation de température d'ambiance, module avec dalle en béton armé nue et module avec dalle en béton armé couverte de végétation rampante comparativement à température d'air station météorologique et site.....	165
Figure 6.4 : Variation température surfaces supérieures dalle béton armée nue, végétation extensive et sous substrat comparativement à température d'air station météorologique et site.....	167
Figure 6.5 : Variation de température, de surfaces inférieures de dalle en béton armé nue et dalle avec végétation extensive par rapport à température d'air station météorologique et site.....	168
Figure 6.6 : Variation de température d'ambiance, module avec dalle en béton armé nue et module avec dalle en béton armé couverte de végétation extensive comparativement à température d'air station météorologique et site.....	170

Figure 6.7 : Comparatif de température extérieure et intérieure espace avec toiture nue.	172
Figure 6.8 : Comparatif de température extérieure et intérieure espace avec toiture végétale extensive.....	173
Figure 6.9 : besoins mensuels en énergie pour chauffage/climatisation de l'espace étudié.	174
Figure 6.10 : Comparatif de température extérieure et intérieure espace avec toiture nue.	174
Figure 6.11 : Comparatif de température extérieure et intérieure espace avec toiture...175	
Figure 6.12 : besoins mensuels en énergie pour chauffage/climatisation de l'espace étudié.....	175
Figure 6.13 : Température à 1,40 m du sol.....	173
Figure 6.14 : Température à 13,00 m au-dessus du toit.....	177
Figure 6.15 : Température de l'air du scénario toiture avec couverture végétale.....	178
Figure 6.16 : Humidité relative à 1.40m du sol.....	178
Figure 6.17 : Humidité relative à 13.00 m de hauteur.....	179
Figure 6.18 : Vitesse du vent à 1.40m.....	180
Figure 6.19 : Vitesse du vent à 13.00 m.....	181
Figure 6.20 : Vitesse du vent du scénario toiture avec couverture végétale.....	181

Liste des tableaux :

Tableau 1.1 : Effets des arbres urbains selon l'échelle de mise en œuvre dans une ville dépassant le million d'habitants (E. Linacre cité par Izard, 2000).....	8
Tableau 1.2 : Facteurs d'absorption (as) des surfaces naturelles pour les rayonnements de grandes longueurs d'ondes (Perrin de Brichambaut, 1963).....	11
Tableau 1.3 : Valeurs des écarts (ΔT_{u-p}), des facteurs de vue de ciel (SVF), et des distances qui séparent les parcs du reste des points de mesures.....	14
Tableau 1.4 : Valeurs des températures d'air et des écarts AT (pour les couvertures végétales des espaces urbains Nîmois. Izard et Destobbeire 1997).....	18
Tableau 1.5 : Comparaison des conditions climatiques entre les sols en asphaltes et les sols en pelouses pour trois jours d'été.....	20
Tableau 1.6 : Différences de conductances stomatales, températures de feuillage et pertes d'eau selon la nature du sol pour deux essences à Logan (Utah) : pour trois jours d'été (Kjelgren, 1998).....	20
Tableau 1.7 : Ecart entre températures enregistrées dans les deux boulevards et celles enregistrées à une station de référence au centre du square - mai 1999, (Hoffman et al, 2000).....	24
Tableau 1.8 : Effet du CTTC sur les valeurs du $\Delta T_{solaire}$:.....	25
Tableau 1.9 : Valeur maximale de la différence de températures (Ville - Parc), ainsi que la distance d'influence (Upmanis et al, 1998).....	33
<hr/>	
Tableau 2.1 : Taux d'évaporation en fonction des débits d'eau.....	37
Tableau 2.2 : Valeurs de LAI dans trois forêts plantées de Quercus, Fraxinus et Tilia (Eermak, 1998).....	51
Tableau 2.3 : Les valeurs de l'indice SET et les états physiologiques correspondants (McIntyre, 1980).	53
Tableau 2.4 : Echelle de beaufort.....	55
Tableau 2.5 : Valeurs du PMV et du PET, sensations thermiques de l'environnement thermique et les niveaux de stress thermiques.	56
<hr/>	
Tableau 3.1 : les Plage d'épaisseur du substrat de culture (François Lassalle.2008).....	70
Tableau 3.2 : Types d'associations des végétaux et l'épaisseur du substrat correspondante (François Lassalle, 2006).....	76
<hr/>	
Tableau 4.1 Récapitulation des données climatiques par zone (Hiver et Eté) Ministère de l'habitat.1994.....	91/92

Tableau 4.2 Indice d'aridité selon Köppen.(Durand-Dastes.2000).	92
Tableau 4.3 : Ecart des minima entre ville et campagne selon la vitesse du vent.(Escourrou G.1981).....	99
Tableau 4.4 : Albédo et émissivité de quelques étendues Source : Ayra, 1988. p109	
Tableau 4.5 : Rugosité et coefficient 'k' pour différentes étendues.(Gandemer J. & Guyot A.1976).	105
<hr/>	
Tableau 5.1 : Fiche de mesures sur toiture conventionnelle en béton armé du 26/08/2012...142	
Tableau 5.2 : Fiches de mesures sur toiture avec couverture végétale rampante du 26/08/2012	143
Tableau 5.3 : Fiche de mesures sur toiture conventionnelle en béton armé du 29/08/2012...143	
Tableau 5. 4 : Fiches de mesures sur toiture avec couverture végétale extensive du 29/08/2012	144
Tableau 5.5 : Comparatif des valeurs de température de surface supérieure du module avec dalle en béton armé nue et module avec végétation rampante.....	147
Tableau 5.6 : Ecart de température entre température de surfaces supérieures toit conventionnel en béton armé et toit avec végétation rampante (26/08/2012).....	147
Tableau 5.7 : Comparatif des valeurs de température de surface inférieure de dalle en béton armé du module avec dalle en béton armé et module avec végétation rampante.....	147
Tableau 5.8 : Ecart de température entre température de surfaces inférieures du module avec toit conventionnel en béton armé et toit avec végétation rampante (26/08/2012).....	148
Tableau 5.9 : Comparatif des valeurs de température d'air intérieur du module avec dalle en béton armé et module avec végétation rampante.....	148
Tableau 5.10 : Ecart de température entre températures d'ambiances du module avec toit conventionnel en béton armé et toit avec végétation rampante (26/08/2012).....	148
Tableau 5.11 :Comparatif des valeurs de température de surface supérieure de couverture du module avec dalle en béton armé et module avec végétation extensive.....	149
5.12 : Ecart de température entre température de surface supérieure toit conventionnel en béton armé et toit avec végétation extensive (29/08/2012).....	149
5.13 Tableau comparatif des valeurs de température de surface inférieure de dalle en béton armé du module avec dalle en béton armé et module avec végétation extensive.....	149
5.14 : Ecart de température entre température de surfaces inférieures du module avec toit conventionnel en béton armé et toit avec végétation extensive (29/08/2012).....	150
5.15 Tableau comparatif des valeurs de température d'air intérieur du module avec dalle en béton armé et module avec végétation extensive.....	150
Tableau 5.16 : Propriétés physiques des matériaux.....	155

Tableau 6.1 : Ecart de température entre température de surfaces supérieures toit conventionnel en béton armé et toit avec végétation rampante (26/08/2012).....	162
Tableau 6.2 : Ecart de température entre température de surfaces inférieures du module avec toit conventionnel en béton armé et toit avec végétation rampante (26/08/2012).....	164
Tableau 6.3 : Ecart de température entre températures d’ambiances du module avec toit conventionnel en béton armé et toit avec végétation rampante (26/08/2012).....	165
6.4 Ecart de température entre température de surface supérieure toit conventionnel en béton armé et toit avec végétation extensive (29/08/2012).....	167
6.5 Ecart de température entre température de surfaces inférieures du module avec toit conventionnel en béton armé et toit avec végétation extensive (29/08/2012).....	169
6.6 Ecart de température entre température de surfaces inférieures du module avec toit conventionnel en béton armé et toit avec végétation extensive (29/08/2012).....	170

Nomenclature :

ABC : Architecture bioclimatique et construction

APRUE : L'Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie

CTTC : Cluster thermal time constant ou constante thermique du faisceau horaire

CME : Capacité Maximale en Eau

ETP : Evapotranspiration potentielle

ETR : Evapotranspiration réelle

GES : Gaz à effet de serre

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

HQE : Haute Qualité Environnementale

LAD : Leaf area density ou densité de feuillage

LAI : Leaf area index ou Indice de feuillage

ONM : Office national de la météorologie

PET : Physiological Equivalent Temperature

PV : Parcours des voitures

ICU : Ilot de chaleur urbain

IMM : Insolation moyenne mensuelle

IMQ : Insolation moyenne quotidienne

SET : Température effective

SF : Sondes fixes

SONELGAZ : Société nationale de l'électricité et du gaz.

SVF : Facteur de vue du ciel

Ta : Température de l'air

Ts : Température de surface

Tmrt : Températures moyennes radiantés

T-U : Temps universel

Va : Vitesse de l'air

VPD : Tension de vapeur en eau

ΔT : Différence de température

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Préambule

La minéralisation généralisée des zones urbaines en remplaçant la végétation et les zones humides par du béton et de l'asphalte développe au niveau des villes des problèmes liés au phénomène d'îlot de chaleur comme les pics de pollution et la surconsommation énergétique due à la climatisation corollaire des phénomènes climatiques extrêmes que connaissent les villes dans le cadre du réchauffement global.

Le maintien d'une bonne qualité de vie devient une préoccupation majeure au niveau de nos villes. La végétalisation extensive des toitures et terrasses présente un intérêt particulier d'un point de vue écologique et d'amélioration des microclimats urbains, de régulation des eaux de pluies ainsi que pour l'optimisation des conditions de confort acoustique et thermique des constructions. En formant obstacle, les constructions modifient l'écoulement du vent, elles le canalisent, s'opposent à des espaces ventés. Mais des tourbillons, des rouleaux, des accélérations peuvent aussi apparaître, plus les obstacles sont opaques et de type minéral plus l'effet est fort. L'introduction du végétal urbain sous toute ses formes permet de rafraîchir les abords immédiats des constructions en luttant contre l'effet ICU. La modification des apports solaires et de l'écoulement du vent modifie les températures, mais le facteur le plus important dans ce domaine est la consommation énergétique urbaine : les transports, les chauffages en hiver ou climatisation en été, les éclairages publics, les activités industrielles émettent de la chaleur. Il fait plus chaud en ville qu'en périphérie. Les villes en elle-même sont moins arrosées, cela est également dû à la modification du cycle de l'eau induite par l'imperméabilisation des surfaces, les pluies se concentrent plus rapidement et ne s'infiltrent pas, ce qui, en cas de pluies intenses, peut avoir des conséquences dramatiques.

En ville, les constructions créent des zones de surexposition ou de masque, ce qui a un impact sur les phénomènes radiatifs. L'albédo de la ville est plus faible et la ville absorbe le rayonnement solaire qui est stocké durant la journée et restitué durant la nuit surtout en période estivale. Les matériaux des rues, toits et façades sont généralement plus foncés que les surfaces végétales, de plus la pollution réduit le rayonnement visible et renforce son absorption par l'air.

Le végétal urbain au niveau des rues peut être une technique optimale pour réduire l'îlot de chaleur urbain. Les terrasses et toitures végétalisées, ombragent le toit en le protégeant des radiations solaires directes, augmentant le rafraîchissement par évaporation et réduisant ainsi la demande énergétique en conservant l'air frais autour du toit et en transformant le dioxyde de

carbone en oxygène . La végétalisation des murs et terrasses et toitures présente un intérêt particulier d'un point de vue écologique et d'amélioration des microclimats urbains, de régulation des eaux de pluies par le différé d'écoulement évitant ainsi la saturation des réseaux d'évacuation des eaux pluviales ainsi que pour l'optimisation des conditions de confort acoustique et thermique des constructions. Contrairement aux végétalisations intensive et semi intensive, les formes de végétalisation extensive sont plus faciles à réaliser se contentent de peu de substrat et réclament peu de soins.

Dans les pays arabes, les terrasses accueillant une gamme variée de fonctions domestiques et sociales sont dotées de différentes plantes aromatiques, ornementales ou médicinales cultivées d'une manière assez simple dans des pots. La finalité de ces aménagements est principalement de filtrer les radiations solaires, ombrer ces espaces en hauteur durant l'été et surtout procurer plus de confort la nuit. Dans les pays nordiques, la végétalisation des toits à double pente est courante pour assurer une meilleure isolation des toits. Les procédés et techniques permettant l'intégration des végétaux sur les couvertures des bâtiments varient d'un pays à un autre. Aujourd'hui, les techniques de réalisation sont modernisées et uniformisées. Les toits horizontaux ou en pente, accessibles ou pas peuvent être recouverts de végétation selon le type crée qui sont : terrasses jardins, toitures végétalisées, jardin sur dalle, toits verts.

La végétalisation des terrasses et toitures permet de les protéger des radiations solaires, d'améliorer les performances d'isolation des toits différant le transfert de chaleur et contribuant à réduire significativement la consommation énergétique due au recours à la climatisation.

La demande énergétique augmente au niveau de la ville de Jijel en période estivale, la surcharge due à la climatisation est proportionnelle à l'augmentation de la température au niveau de la ville et connaît des pics de consommation durant les mois de juillet et août. La végétalisation des terrasses et toitures permet de les protéger des radiations solaires, d'améliorer les performances d'isolation des toits différant le transfert de chaleur et contribuant à réduire significativement la consommation énergétique due au recours à la climatisation.

Problématique

Certains quartiers souffrent d'ambiances thermiques inconfortables à cause du manque de végétation et seuls les quartiers disposant de couvert végétal font ressentir un confort psycho thermique même si ce couvert végétal est disposé de façon non étudié. A partir de cela est ce qu'on peut améliorer le microclimat de nos espaces urbains en introduisant le couvert végétal

et comment la végétation modifie les phénomènes thermiques au niveau des quartiers, parcs et espaces publics.

Le couvert végétal est-il nécessaire au niveau de nos villes est quelle type de végétation faut-il implanter. Les toitures et terrasses végétalisées peuvent-elles être une technique optimale pour réduire l'îlot de chaleur urbain, ombrageant le toit en le protégeant des radiations solaires directes, augmentant le rafraîchissement par évaporation et réduisant ainsi la demande énergétique.

Les toitures végétalisées constituent elles un moyen efficace de réduire la consommation d'énergie, non seulement estivale mais aussi à l'échelle annuelle, essentiellement grâce à leur pouvoir isolant. Les toitures végétalisées par leur capacité d'évapotranspiration et de modification de l'albédo des surfaces urbaines contribuent elles à améliorer les conditions microclimatiques en atténuant l'effet îlot de chaleur.

Objectifs

Notre objectif premier est de déterminer en premier lieu l'impact des toitures et terrasses végétalisées à travers leur capacité d'ombrage ainsi que le pouvoir isolant du substrat sur les situations de confort thermique intérieures d'été et d'hiver ressenties par un individu dans le but de quantifier l'incidence sur la réduction de la surconsommation énergétique en période critique.

Le second objectif est de quantifier l'action de la terrasse et toiture avec couverture végétale extensive grâce à l'ombre portée ainsi que le phénomène d'évapotranspiration des végétaux sur la modification de l'albédo des surfaces urbaines et par conséquent sur l'atténuation de l'effet îlot de chaleur urbain.

Le troisième objectif est d'aboutir à des recommandations nécessaires à une éco conception des constructions en zones urbaines améliorant les conditions de confort aussi bien au niveau urbain qu'à l'intérieur des constructions réduisant les surcharges de consommation que subit le réseau d'alimentation en énergie électrique surtout en période estivale.

Méthodologie de recherche

L'approche suivie pour atteindre cet objectif consiste en premier lieu à définir les concepts de développement durable, micro climatologie urbaine, confort en espaces extérieurs, horticulture, ces informations sont utiles lors de la mise en œuvre et de l'interprétation des

résultats de campagnes de mesures climatiques et de simulations envisagées. Des éléments de validation sur des études de cas référencés seront présentés.

En deuxième lieu, nous détaillerons les spécificités climatiques et nature des espèces végétales au climat méditerranéen. nous procéderons à des études de cas des deux situations en se basant sur des essais in situ sur des modules contradictoires le premier avec une toiture en béton armé nue le deuxième avec toiture recouverte de végétation extensive en essayant de démontrer l'évolution notable des conditions microclimatiques et l'amélioration sensible des situations de confort réduisant les besoins en énergie. Afin de consolider les résultats obtenus nous procéderons à l'aide d'outils d'investigations numériques à des simulation selon les scénarios déjà réalisés au niveau du travail expérimental, cela se fera avec le logiciel ECOTECT pour les conditions de confort intérieur et l'efficacité énergétique des constructions ,tandis que le logiciel ENVImet servira d'outil d'investigation pour les paramètres microclimatiques à l'échelle urbaine.

La validation et l'interprétation des résultats obtenus et la comparaison des différentes situations étudiées nous permettront de conclure au sujet de l'impact des terrasses et toitures avec végétation extensive sur l'amélioration des conditions de confort intérieur des constructions ainsi que sur l'atténuation de l'effet îlot de chaleur urbain permettant ainsi une réduction significative de la consommation énergétique des constructions évitant ainsi les surcharges et les pics de consommation énergétique.

Structure de la thèse

La partie théorique abordera au niveau du premier chapitre la recherche bibliographique concernant les dernières publications sur la question du végétal urbain des terrasses et toitures avec couvert végétal par rapport aux conditions climatiques régionales. Le deuxième chapitre traitera de l'impact des végétaux sur les microclimats urbain à travers les résultats des expériences réalisées à travers le monde pouvant servir comme références à la validation de nos travaux, résultats obtenus, outils utilisés, modèles, types de végétation en relation avec les climats régionaux. La végétalisation des toitures est traitée au troisième chapitre où la question de la composante et caractéristiques des toitures avec couvert végétal sont expliqués.

Le quatrième chapitre abordera les éléments de climatologie sous différentes afin de mieux comprendre les phénomènes micro climatiques survenant au niveau urbain ainsi que leur rapport avec les différentes formes de végétalisation.

Le cinquième chapitre aborde la partie opérationnelle en présentant les méthodes et moyens d'investigations consistant en la réalisation de campagnes de mesures in situ sur deux modules expérimentaux réalisés l'un avec couverture en dalle en béton armé nue le second avec une dalle en béton armé recouverte de végétation extensive. Afin de consolider les résultats obtenus le même scénario sera réalisé à l'aide d'outils de simulation numérique présentés à ce niveau et qui sont ECOTECT pour la performance énergétique et le confort intérieur des constructions et ENVI met qui est un logiciel de simulation pour les conditions de confort au niveau microclimatique.

Le sixième chapitre concerne l'évaluation de l'incidence des toitures végétalisées qui se basera sur l'analyse fine des valeurs de températures relevées aussi bien au niveau des surfaces supérieures et inférieures des toitures des modules expérimentaux qu'au niveau de l'air intérieur de ces modules. En dernier lieu nous aborderons la phase analyse et discussion des résultats en vue d'aboutir à des conclusions pouvant aboutir à des recommandations en vue d'une amélioration des conditions microclimatiques urbaines et de réduction de la consommation énergétique des constructions.

CHAPITRE 1

LE VEGETAL EN MILIEU URBAIN

Introduction :

« L'arbre, l'ami de l'homme, symbole de toute création organique ; jeu mathématiquement mesuré des branches démultipliées à chaque printemps d'une nouvelle main ouverte. Ecran généreux à proximité de nos yeux et les géométries éventuelles de nos constructions dures. Outil précieux dans les mains de l'urbaniste. Expression la plus synthétique des forces de la nature. Présence de la nature dans la ville, autour de nos labours ou de nos divertissements. Arbre, compagnon millénaire de l'homme ! », (Le Corbusier, Quand les Cathédrales étaient blanches).

L'air, l'eau, l'espace et la nature sont les ressources environnementales indispensables dans une ville, qui peuvent contribuer à assurer le confort des usagers, en fonction de la manière avec laquelle ils sont utilisés.

Les zones végétales sous forme d'arbres, pelouses ou terrasses et toitures jouent les rôles les plus importants dans les villes, par leur régulation des microclimats, leurs ornements, leurs aspects perceptibles et aussi leur contribution au bien-être des citoyens.

Le parc par exemple, qui a une origine plus récente, est une conséquence des jardins baroques du 19^{ème} siècle et occupe un très grand rôle surtout dans les villes méditerranéennes. Il est devenu un espace réel de séjour d'usagers qui fuient les densités urbaines.

Dans les villes du bassin méditerranéen, la végétation dense y occupe une grande surface et joue un rôle régulateur des microclimats ambiants, surtout pendant les périodes chaudes d'été. Les exemples des villes et jardins traditionnels d'Andalousie tels que la « Médine Azhar » et « l'Alhambra » de Grenade sont caractéristiques à cet égard.

Nous allons aborder dans ce chapitre le rôle du couvert végétal dans le microclimat urbain et les différents échanges énergétiques avec l'atmosphère, ainsi que l'influence des facteurs environnementaux sur la croissance des végétaux en terminant par les températures de surface et cela à l'aide de la thermographie en nous basant sur les différentes études réalisées à travers le monde.

1.1 Le rôle microclimatique de la végétation :

« Fondamentalement, la ville modifie le bilan énergétique normal et la circulation d'air par ses modèles multiples de réflexion et d'absorption, sa surface approximative et inégale, son manque d'eau et de végétation au-dessus de beaucoup de régions et des sources additionnelles de la chaleur et de la poussière fournies par l'activité humaine » (Douglas, 1983), cité par Steamers, 1993.

Le végétal doit être une composante indispensable dans les projets architecturaux et urbains, il permet dans plusieurs cas une économie considérable d'énergie puisqu'il agit directement sur le rayonnement solaire, paramètre très important du confort et des besoins en énergie.

Le végétal réduit les températures d'air en été avec les effets d'ombrage sur les façades et les rues et les effets de refroidissement par évaporation (phénomène d'évapotranspiration), et par la suite permet une économie considérable de l'énergie.

Les abris en végétal réduisent les pertes de chaleur des bâtiments et permettent de filtrer certaines particules de l'air tout en atténuant le bruit urbain. Le végétal urbain se présente sous trois formes qui correspondent aussi à trois échelles spatiales : l'arbre urbain, le végétal grimpant et rampant ainsi que la pelouse. L'arbre urbain peut à son tour être subdivisé en deux catégories :

-l'arbre en parc ou jardin

-l'arbre d'alignement

Dans les deux cas, l'arbre urbain peut atteindre de grandes tailles (plus de 25m de haut) et il participe pour beaucoup au paysage urbain, sa hauteur pouvant être du même ordre de grandeur que les façades des bâtiments qui l'entourent. Ses effets micro climatiques peuvent être très marqués et agir sur tout un volume urbain (cas du " mail"), Izard (2000).

Différents types d'arbres à différentes échelles sont cités dans le tableau 1.1 (Linacre, 1997) :

Tableau 1.1 : Effets des arbres urbains selon l'échelle de mise en œuvre dans une ville dépassant le million d'habitants (d'après E. Linacre) cité par Izard, 2000.

	Forme construite	Situation arbre	Phénomène climatique	Haut, (m)	Larg. (m)	Long. (m)
Bâtiment	Jardin	Arbre isolé	Sillage aérodynamique, ombre	10	10	10
Canyon	Rue	Arbre d'alignement sur avenue, mail.	Tourbillon, ombre, température	10	30	300
Quartier	Ilot urbain, usine	Parc urbain, bois	Brise locale		500	5000
Zone urbaine	Centre-ville résidentiel.	Ceinture verte, forêt suburbaine	Qualité de l'air, topo climat		5000	5000
Ville	Totalité Aire construite	Forêt urbaine	Modification chaleur, humidité, brise urbaine, dôme pollution,		25000	25000

Le végétal grimpant est plus souvent présent dans des espaces piétons (cas des treilles, figure 1.1) et joue un rôle modérateur du microclimat par son effet d'ombrage en limitant les échauffements de façades.

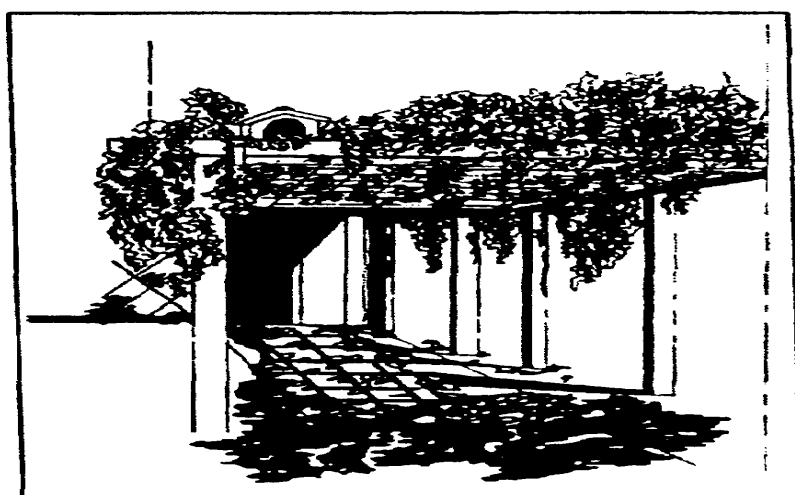


Figure 1.1 : Treilles sur pergolas. (A.W. Meerow et al, 1993)

En général un délai de 5 ans est nécessaire à la croissance d'un jeune arbre pour produire un effet satisfaisant ; en outre d'ombre. Une distance de 2.30 m à 6.60 m de l'arbre par rapport à la paroi latérale est recommandée. La taille et la hauteur prévue de l'arbre à sa maturité influencent directement cette distance (figure 2), (Parker, 1978; 1983a; 1983b).

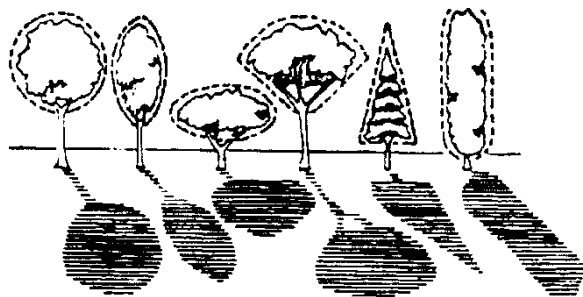


Figure 1.2 : Relation entre la forme de la canopée et son Ombre d'espace.(A.W.Meerow et al, 1993)

Le placement correct des arbres choisis pour ombrager l'espace concerné implique la prise en considération de l'angle des rayons solaires, les dimensions de la canopée et de la hauteur de la structure à ombrager.

La végétation agit sur le microclimat par le biais de trois facteurs :

- Le rayonnement solaire
- Le vent
- L'humidité de l'air

En hiver, les végétaux laissent infiltrer les rayons solaires si leur feuillage est caduc et limitent le renouvellement d'air par des brise-vent végétaux. En été, les canopées foliaires limitent les échauffements des façades et des sols par leurs effets d'ombrage, rafraîchissent l'air extérieur par leurs apports en humidité et freinent les flux d'air.

1.2. Echanges énergétiques de la végétation

Un couvert végétal est le siège d'échanges énergétiques intenses avec l'atmosphère. La nature et l'intensité de ces échanges déterminent non seulement la croissance et le développement des végétaux mais déterminent également le climat ambiant. (J. Damagnez, 1970).

L'énergie lumineuse absorbée par le couvert végétal est utilisée pour la photosynthèse sous forme photochimique. Le reste du rayonnement solaire incident est échangé avec

l'atmosphère sous formes radiatives, de flux de chaleur et de masse (évaporation et Transpiration).

La majeure partie des apports énergétiques au niveau du couvert végétal provient du climat solaire, cette énergie subit certaines modifications en atteignant la surface d'échange (végétation atmosphère) en fonction de :

a)-albédo :

Les apports solaires nets sur un couvert végétal s'écrivent comme suit :

$$R_N = (I - \alpha) G$$

Où : α est l'albédo, G est le rayonnement solaire global.

L'albédo du végétal varie en fonction de son alimentation en eau et de sa couleur, il est compris entre 0.15 et 0.30 dans le cas des champs, prairies, sols labourés et entre 0.05 et 0.18 dans le cas des forêts (Geiger, 1961 ; Van Wijck, 1963). S'il y a un déficit d'eau, l'excédent d'énergie disponible se traduit par réchauffement du feuillage. Dans ce cas, le rayonnement solaire incident est intercepté par la face inférieure du feuillage dont l'albédo est plus élevé (cas de l'olivier).

b)- Echanges radiatifs de grandes longueurs d'ondes :

Le végétal agit sur le rayonnement atmosphérique par absorption et émission successives des différents constituants de l'atmosphère (CO₂, vapeur d'eau, poussières en suspension).

Dans l'infrarouge, les couverts végétaux absorbent un grand pourcentage du rayonnement (tableau 2)

Tableau 1.2 : Facteurs d'absorption (as) des surfaces naturelles pour les rayonnements de grandes longueurs d'ondes ($\lambda > 0.8 \mu\text{m}$), (Perrin de Brichambaut, 1963)

Surface	As
Sable (sec - mouillé)	0.95 - 0.98
Terre (sèche - mouillée)	0.95 - 0.97
Arbres	0.96
Herbe	0.96-0.98
Eau	0.95
Neige	0.97

c)- Le rayonnement net :

Le rayonnement net résultant de tous les échanges sur les surfaces végétales s'exprime de la façon suivante : $RN = (I - X)G + RA - RT$ où : RN est le rayonnement net. RA est le rayonnement atmosphérique. RT est le rayonnement terrestre.

Le bilan de rayonnement net d'une journée ensoleillée peut atteindre les 50 % du bilan global. Ce paramètre représente la quantité nette d'énergie absorbée par le couvert végétal, qui sera par la suite disponible pour la photosynthèse, l'évaporation, la transpiration et les échanges de chaleur avec l'atmosphère et le sol.

d)- Le bilan d'énergie :

Si la couverture végétale est bien alimentée en eau, l'évapotranspiration est dite potentielle, elle représente donc la fraction la plus importante des termes de déperdition du bilan d'énergie et peut atteindre 75 à 85 % du rayonnement net. Ainsi, à une échelle régionale, l'évapotranspiration potentielle est définie par la quantité maximum d'énergie susceptible d'être dissipée sous forme d'évaporation (chaleur latente) pour une zone de dimension infinie et bien pourvue en eau, (Damagnez, 1970) Si la quantité d'eau disponible dans le sol est réduite, l'évapotranspiration sera réduite, l'excès d'énergie sera dissipé sous forme de flux de chaleur et le rapport de Bowen devient plus important.

1.3. Végétation et îlot de chaleur :

Nous allons aborder à ce niveau de l'étude à travers une recherche bibliographique quelques cas d'études réalisés à travers le monde relative à l'influence de la végétation dans les climats urbains que cette végétation soit sous forme de parcs ou arbre d'alignement et essayer de tirer les conclusions relatives à l'effet d'ombrage apporté par la végétation, cumulé avec le phénomène d'évapotranspiration dans l'atténuation de l'îlot de chaleur qui se produit en ville

1.3.1 Cas d'études : Parcs urbains.

a) Göteborg, Suède.

Cette étude (Upmanis et al, 1998) a été effectuée dans la ville de Göteborg (57°42'N, 11°58'E), à propos de trois parcs urbains sélectionnés « le Slottsskogen », « le Vasaparken », et « le Gubberoparken », (figure 3).

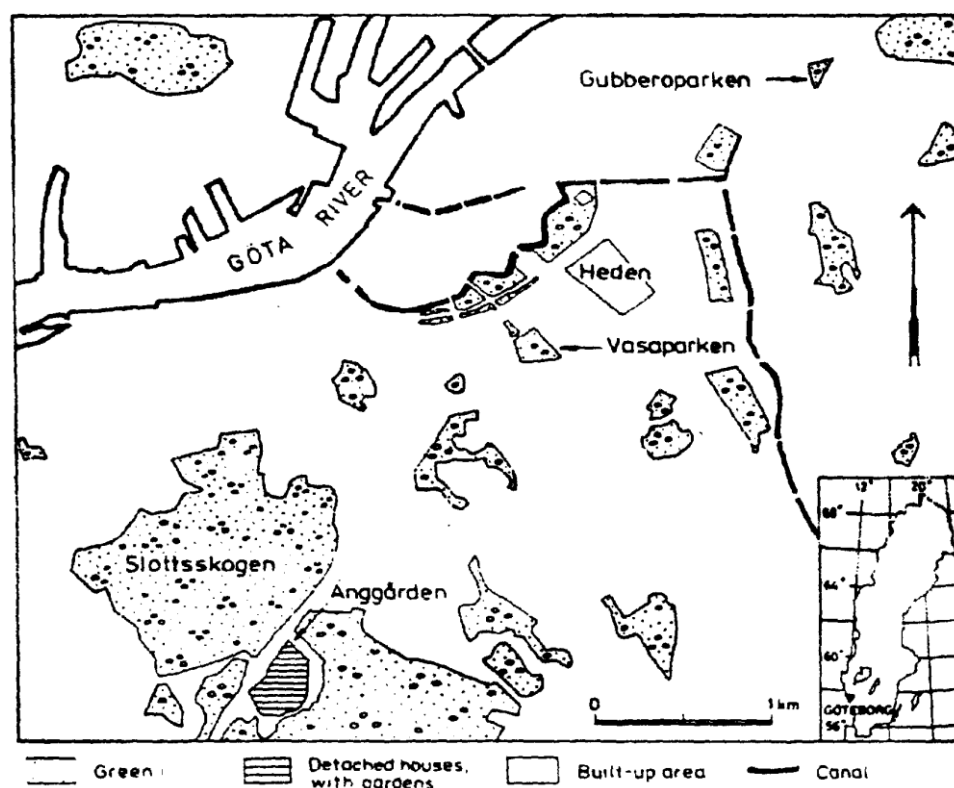


Figure 1.3 : Plan de masse des cas d'études à Göteborg avec les trois parcs «Gubberoparken», « Vasaparken », « Slottsskogen ».

L'objectif de ce travail était de déterminer l'influence des dimensions des parcs et de

leurs facteurs de vue de ciel sur les écarts de températures entre les parcs et les espaces *bâtis*.

Les valeurs du facteur de vue de ciel (déterminé par photos fish-eye) en centre-ville sont respectivement 0.35 - 0.45 - 0.90. Le couvert végétal dans ces parcs est souvent constitué par des arbres à feuilles caduques de 15 m de hauteur, et par de la pelouse.

La période des mesures a été étalée sur plus d'une année (de janvier 1994 en septembre 1995) durant des nuits claires et calmes. Des voitures équipées d'instruments de mesures prélevaient les températures d'air en parcourant tout le périmètre étudié (les espaces bâtis et les parcs). Les données étaient enregistrées toutes les 5 minutes automatiquement par des ordinateurs qui se trouvaient dans les voitures. La vitesse du parcours ne devait pas dépasser 40 km/h. En plus des informations rassemblées pendant les parcours, les données étaient prélevées par des stations de mesures permanentes à 2.5 m du sol. La station météo située à « Save Air port » à 9 km du Nord-Ouest du centre ville a servi de station de référence. Les sites d'études et les points de mesures (figure 4) ont été choisis en fonction de leurs taux de végétalisation, de leurs distances par rapport aux parcs, de leurs dimensions et de leurs facteurs de vue de ciel.

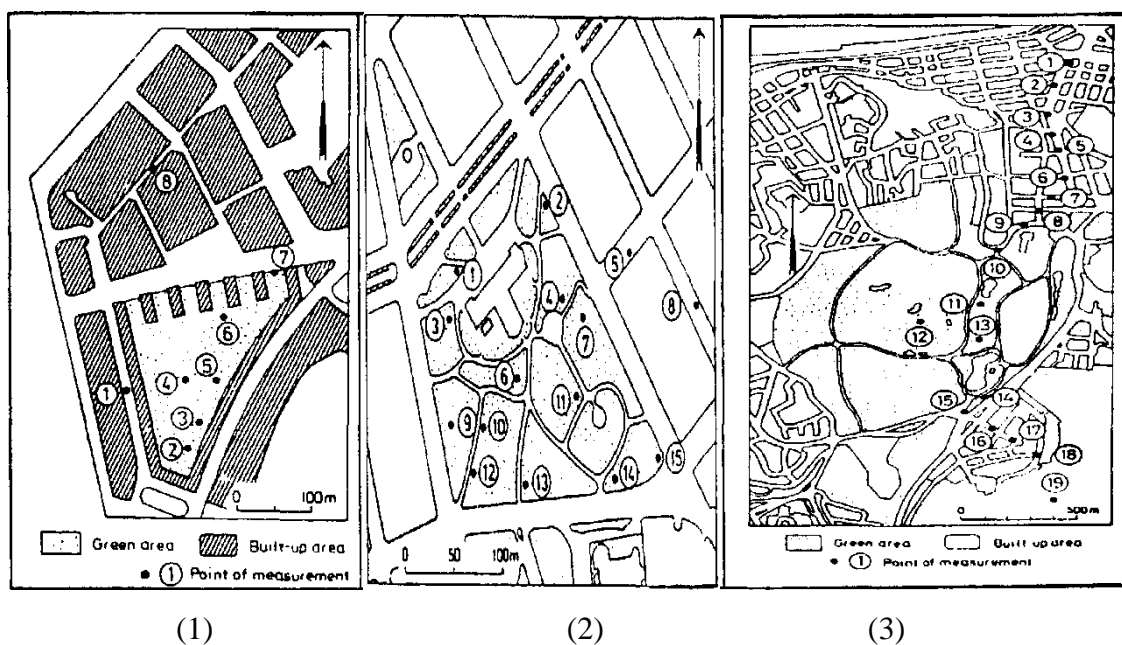


Figure 1.4 : Localisation des points de mesures dans les trois parcs : (1). « Gubberparken », (2). « Vasaparken », (3). « Slottsskogen ».

Les prises de températures d'air ont été effectuées le soir, le tableau 3 présente les valeurs des écarts de températures d'air entre chaque parc et les espaces adjacents, des

informations sur chaque station de mesure, leurs facteurs de vue de ciel et le nombre d'observations de chaque méthode. Les résultats sont rassemblés dans le tableau suivant.

Tableau 1. 3 : Valeurs des écarts ($\Delta Tu-p$), des facteurs de vue de ciel (SVF), et des distances qui séparent les parcs du reste des points de mesures.

P.V : parcours des voitures, S.F : sondes fixes.

Parc	Numéro de station (Figure 6)		SVF		Nombre d'observations		$\Delta Tu.p(^{\circ}C)$ maximal		Extension maximale de la bordure du parc (m)	
	Parc	Bâti	Parc	Bâti	P.V	S.F	P.V ($^{\circ}C$)	Sondes fixes	P.V	S.F
Gubberopark En	5	1	0.42	0.61	8	0.5	-	-	-	-
	4	7	0.81	0.51	-	42	•	1.7	-	-
	-	•	-	-	8	42	-	-	0	0
Vasaparken	15	8	0.53	0.39	11	47	0.9	2.6	-	-
	-	-	-	-	11	47	-"	-	30	40
Slottsskogen	18	4	0.83	0.75	13	-	4.4	-	-	-
	18	1	0.83	0.91	13	-	-	-	-	-
	13	1	0.89	0.91	-	113	-	5.9	-	-
	-	-	-	-	13	113	-	-	1175	1175

Les résultats montrent que le parc de « Slottsskogen » a la plus grande influence sur les espaces bâtis qui l'entourent. La valeur maximale des écarts de températures d'air pris dans les parcours de voitures varie entre 4.4 °C et 5.9 °C. ($\Delta Tu-p$ maximal égale à 2 °C dans « Vasaparken » et égale à 1.7 °C dans « Gubberoparken »).

Le refroidissement d'air provoqué par les parcs est étendu même aux espaces adjacents, le microclimat créé dans le parc de « Vasaparken » s'étend aux espaces bâtis qui l'entourent jusqu'à une distance de 30 à 40 m. Le parc « Slottsskogen » a peu d'influence puisque le prolongement de son taux de refroidissement s'étend jusqu'à 1175m de la bordure de son aire.

Les résultats reportés dans le tableau ci-dessus permettent de mettre en évidence la relation entre le S VF et les variations des températures d'air. La densité du bâti et la densité du couvert végétal (valeurs faibles du S VF) influent sur les températures d'air dans les deux parcs « Slottsskogen » et « Gubberoparken ».

Les résultats les plus significatifs ont été observés dans le parc « Slottsskogen » : plus les valeurs du taux d'obstruction de ciel sont importantes, plus les températures sont élevées (Exemple des stations 11 et 13 au milieu du parc).

La température moyenne enregistrée à la station 13 située sur une grande aire de pelouse est plus grande que celle enregistrée à la station 11 située sous des arbres ($\Delta T = + 0.5^{\circ}\text{C}$).

Ces résultats confirment que la taille des parcs est très importante dans la détermination des valeurs des écarts ΔT_{u-p} . Les résultats montrent aussi que la distance des bordures des parcs et des espaces bâtis adjacents et le taux d'obstruction du ciel (couverture végétale dans les parcs et structures des bâtiments dans les espaces bâtis) a une grande importance dans l'établissement des valeurs des écarts ΔT_{u-p} .

Il faut noter que de grandes différences de températures d'air et de taux de refroidissement existent aussi dans les parcs eux-mêmes en raison des différences des taux d'obstruction de ciel et que le refroidissement créé dans le centre du parc est plus important que celui relevé dans la station rurale la plus proche.

b) Saitama, Japon..

L'objectif de cette étude est de rechercher l'influence des parcs sur leurs environnements thermiques, à travers des mesures in situ et de la simulation numérique sur la réaction du corps humain à son environnement. (Vu Thanh Ça et al, 2000).

La superficie du parc d'étude fait 0.6 km^2 ; l'étude a été effectuée en été par le relevé des valeurs horaires des températures, des vitesses et de l'humidité relative de l'air et sur le rayonnement des surfaces du sol et des façades, mesurées en plusieurs points dans le parc et dans les espaces urbains adjacents.

L'air frais que crée le parc peut améliorer son environnement thermique dans la zone en aval du parc sur une distance de l'ordre de 400 m. Le secteur d'influence du parc est estimé à une valeur approximative de $0,5 \text{ km}^2$.

Des simulations numériques avec un modèle de turbulence révèlent que même la nuit, le déplacement de la masse d'air résultant de la présence du parc peut aussi améliorer l'environnement thermique des espaces bâtis environnants.

Donc, même dans un climat chaud et humide comme celui de la ville de Tokyo, l'humidité qui provient des parcs n'affecte pas le confort thermique des usagers.

c) Berlin , Allemagne.

Il est également intéressant de citer le cas de l'étude effectuée dans la ville de Berlin à propos du grand jardin zoologique « le Grosser Tiergarten » (Horbert et Kirchgeorg, 1980).

Les températures d'air chutent de (- 4 °C) entre le parc et le reste du centre ville, les écarts deviennent moins importants la nuit (entre 1.5 et 2°C) et se trouvent atténués en présence d'un vent fort.

7 types d'espaces urbains ont été définis à l'issue de cette étude : (cité par Izard, 2000).

- Type 1: Construction dense centre ville (immeubles de 4 à 6 étages);
- Type 2: Construction dense centre ville avec une quantité limitée de zones vertes (squares urbains);
- Type 3: Zones avec surfaces minérales et constructions dispersées (entrepôts, installations portuaires, industrielles) sans végétation;
- Type 4: Construction ouverte avec forte proportion (moitié/moitié) de zones vertes, bâtiments à 3-4 étages, îlots avec jardins intérieurs;
- Type 5: Surfaces minérales dans zone verte (allées dans parc et en lisière de celui-ci);
- Type 6: Zones vertes forestières (arbres dispersés à denses, avec couche arbustive);
- Type 7: Zones vertes ouvertes (grandes pelouses ou clairières dans le parc ou en lisière).

Les températures d'air moyennes chutent de 3,3 °C lorsque l'on passe du type 1 au type 7 avec un vent faible. Par vent plus fort, favorisant les échanges entre zones, la différence devient négligeable.

1.4. Arbre d'alignement :

Plusieurs études ont confirmé l'effet des arbres d'alignement sur le rafraîchissement du microclimat dans les espaces urbains.

Une campagne de prises d'images thermiques a été effectuée par Laboratoire ABC dans les deux villes méditerranéennes françaises : Aix-en-Provence et Nîmes. Ces deux villes

disposent d'alignements d'arbres urbains, de pelouses et de treilles. La thermographie a été préférée dans cette étude parce qu'elle est la seule à pouvoir couvrir tout le champ thermique de l'espace.

Les résultats de prises d'images montrent bien les différences de températures de surfaces entre le feuillage (température de feuillage T_f) de l'arbre et le reste de l'espace : les températures de feuillage sont toujours les plus froides de l'environnement urbain, $T_f = 25,9$ °C.

D'après (Izard et al, 1998), le feuillage «annule» l'effet du rayonnement solaire incident, contrairement à une couverture minérale ou métallique : les arbres offrent une ombre sans émission de la chaleur (effet de plafond réfrigérant).

Relevées à trois temps de la journée (7h00, 13h00, 19h00), les températures de feuillage sont nettement inférieures aux températures d'air, aux températures opératives et aux températures météo prises au même moment (figure 5). L'écart maximal est enregistré à 13h00 au boulevard « Victor Hugo », ($\Delta T(a-f) = 3.3$ °C).

Le tableau 1. 4 récapitule les résultats de prises d'images thermographiques [écarts de températures entre la surface des feuillages (moyenne) et l'air dans différents espaces urbains de Nîmes à différentes heures de la journée. La pelouse humide en fin de journée est la surface la plus froide.

Tableau1. 4 : Valeurs des températures d'air et des écarts AT(a-f) pour les couvertures végétales des espaces urbains Nîmois le 9 Août 1995, (d'après Izard et Destobbeleire1997).

Espaces	Mesures	Heures		
		7-8h	12-13h	18-19h
Jardin Fontaine	Ta	18	26	27
	(Tf-Ta)	-1	-1	-3
Esplanade de la Nymphée	Ta	19,5	26	27
	(Tf-Ta) arbres	-1	-2	-2
	(Tf- Ta) pelouse	-2	-1,5	-5
Jet d'eau du canal	Ta	19	26	25,5
	(Tf-Ta)	-1	-1	-0,5
Canal Fontaine	Ta	20	27	27
	(Tf-Ta)	- 0,5	-1	-1
Place Assas	Ta	20,5	26,5	27
	(Tf- Ta) jeunes arbres	-1	+1	-0,5
	(Tf-Ta) Arbres adultes		-1	-1,5
Bd Victor Hugo	Ta	20,5	28	27,5
	(Tf-Ta)	-1	-1,5	-2
Moyenne (Tf- Ta)		-1,1	-0,8	-2

1.5. Les effets des facteurs environnementaux sur la croissance des végétaux

1.5.1 Effet de la nature du sol :

Le type de pavage sur lequel l'arbre est implanté a des effets très importants sur les températures de feuillage, la conductance stomatale et les pertes d'eau journalières. Les arbres urbains sont généralement plantés sur des surfaces d'asphalte dans les parcs ou le long des rues isolées. Dans plusieurs études s'étalant sur plusieurs journées, la transpiration des arbres, la conductance stomatale, les températures de feuillage et plusieurs autres variables microclimatiques ont été mesurées sur des surfaces d'asphaltes et des surfaces de pelouses.

Les températures de surface du pavage en asphalte relevées en soirée étaient plus élevées de 20 à 25 °C que celles des surfaces de pelouses. Les arbres plantés sur des surfaces minérales ont des feuillages plus chauds que ceux qui sont plantés sur des pelouses.

Des pertes d'eau élevées des feuilles sont dues aux valeurs élevées des Tf au-dessus de l'asphalte, ce qui provoque une fermeture stomatale prolongée. Ces pertes d'eau n'ont pas le même ordre de grandeur pour toutes les essences, les stomates de quelques arbres se referment lorsque la différence de pression de vapeur (VPD) du feuillage vers l'air s'élève au-dessus d'un

certain seuil (Miller, 1980).

Les températures d'asphalte élevées (T_s) provoquent plus de rayonnement de grande longueur d'ondes que les surfaces végétalisées ; et entraînent une augmentation d'une manière significative des températures d'air et des surfaces (Kjelgren et Clark, 1994 ; Oke, 1978).

Les sites d'études sont un parking de campus (60 x 110 m) et une grande surface de pelouse non irriguée. Les types d'arbres étudiés étaient des poiriers isolés ou regroupés, plantés au-dessus d'un sol asphalté ou en pelouse, de hauteur égale à 2.5 m. Pour déterminer les pertes d'eau de chaque arbre, le calcul du poids de chaque feuille était effectué au lever et au coucher du soleil, les variables météorologiques [température d'air (T_a), vitesse d'air au niveau de chaque feuille (V_a), température de surface (T_s) de l'aire ombragée par la couronne végétale, rayonnement global de courte longueur d'onde] et les mesures relatives aux plantes [conductance stomatale (g_s), température de feuillage (T_f), différence de tension de vapeur d'eau (VPD)] ont été saisies durant la journée (17, 23 Juillet et 13 Août 1992).

A la fin de chaque campagne de mesures journalières, le LAI (leaf area index, indice de feuillage) de chaque type d'arbre est calculé en divisant la surface totale de tout le feuillage par la surface de la couronne projetée au sol. Les propriétés de surface affectent plus les températures de surface et les températures de feuillage que les températures d'air et les valeurs de tension de vapeur d'eau (VPD, vapeur pressure difference).

L'écart entre les températures de surface de l'asphalte et celles de la pelouse atteint 14°C entre 12h00 et 16h00. La conductance stomatale des feuilles ensoleillées varie durant la journée et en fonction des arbres groupés ou isolés ; les arbres regroupés sur sol empelousé ont une conductance stomatale plus élevée, ce qui explique les faibles valeurs des températures de feuillage .

Les valeurs maximales des températures de feuillage sont bien celles des arbres isolés sur asphalté (T_f maximal = 33 °C à 14h30). Les valeurs enregistrées des vitesses d'air ne représentent pas beaucoup d'écarts entre les différentes dispositions testées. Cependant l'effet de cette variable est très important sur les pertes d'eau des feuillages (Miller, 1980). Les différentes valeurs des températures d'air et de surfaces et mesurés entre 12h00 et 16h00, sur des surfaces de pelouse et d'asphalte relevées pendant deux jours (17 juillet et 23 juillet 1992) sont représentées dans le tableau 5.

Tableau 1.5 : Comparaison des conditions climatiques entre les sols en asphaltes et les sols en pelouses pour trois jours d'été.

Date	Température d'air (°C)		Température de surface (°C)	
	Asphalte	Pelouse	Asphalte	Pelouse
17 Juillet	31.0	29.2	55.3	30.3 2
23 Juillet	35.5	29.9	59.8	32.6

Pour deux essences étudiées (Frêne vert et Erable Norvège), plantées sur des sols en asphalte, les températures de feuillage sont plus élevées. Ceci s'explique par la diminution de la conductance stomatale qui réduit le phénomène de transpiration (tableau 6):

Tableau 1.6 : Différences de conductances stomatales, températures de feuillage et pertes d'eau Selon la nature du sol pour deux essences à Logan (Utah) : pour trois jours d'été (d'après Kjelgren, 1998).

Paramètres	Essences	Sur asphalte	Sur pelouse
Température d'air (°C)		31,5	31,1
Température de surface du sol au soleil		56,6	30,7
Conductance stomatale (mm/s)	Frêne vert	0,03	0,14
	Erable Norvège	0,07	0,09
Température feuillage (°C)	Frêne vert	40,2	35,3*
	Erable Norvège	40,7	36,2
Perte d'eau journalière (mm)	Frêne vert	1,44	1,89
	Erable Norvège	0,92	1,31

Ces résultats montrent bien que les arbres isolés sur des sols d'asphalte interceptent plus de rayonnement de grandes longueurs d'ondes dues aux températures élevées des surfaces.

L'effet de cette interception est beaucoup plus grand dans le cas d'arbres jeunes isolés, ceci est dû au feuillage clairsemé de ces arbres (Kjelgren et Cleveland, 1994). Les arbres plantés dans des aires de pelouse et d'asphalte interceptent moins de rayonnement que ceux implantés que sur des sols entièrement revêtus d'asphalte (Miller, 1980).

En conclusion, les pelouses urbaines, diminuent d'une manière très significative les températures de surface et favorisent l'évapotranspiration des arbres urbains.

5.2 Effet du type et morphologie de l'espace d'implantation sur le végétal :

La croissance d'un arbre urbain dépend de plusieurs facteurs environnementaux, tels que la nature du sol, l'irrigation régulière et la morphologie de l'espace dans lequel l'arbre se trouve. Kljelgren a étudié l'effet de différences morphologiques de trois types d'espaces urbains (place, rue canyon et parc) sur les conditions de croissance de *Liquidambar styraciflua* (copalme d'Amérique).

L'ensoleillement dans la rue canyon est réduit à quatre heures par rapport à la place et au parc. Le phénomène de surchauffe dans la place provoque une évaporation de + 50 % par rapport aux deux autres configurations. Les paramètres mesurés dans cette étude sont : le pH du sol, les conditions du sol, la superficie de la couronne de l'arbre et la superficie de chaque feuille.

La conductance stomatale, le rayonnement global de courtes longueurs d'ondes, la température d'air sèche et humide, la différence de tension de vapeur en eau (VPD) et les températures de surface, ont été moyennées sur les journées de mi-Juillet au début Août (quatre jours en 1987 et trois jours en 1986)

L'absence de l'irrigation, les températures de surfaces élevées, et les faibles valeurs des VPD indiquent la présence d'une forte demande évaporative qui affecte la croissance des végétaux de la place. La croissance du tronc des arbres du canyon est plus faible que ceux des autres sites, ces arbres s'adaptent à l'ensoleillement réduit en présentant des feuilles plus fines ; par contre les dimensions de la couronne et la croissance des pousses ne sont pas affectées.

Les arbres poussant dans la place sur un sol surchauffé ont un aspect malingre et un feuillage clairsemé. Le niveau de Nitrogène du feuillage est le plus faible dans la place, l'évacuation des feuilles au fil du temps perturbe le cycle des éléments nutritifs, en conséquence les arbres épuisent progressivement l'azote du sol. Cet épuisement des nutriments agit en parallèle avec les maximums chroniques d'évaporation et le stress hydrique pour limiter la croissance des végétaux de la place

1.5.3 Effet de l'orientation de l'espace :

a) Jaffa.Palestine.

Le rafraîchissement passif des rues canyon par leur réduction de réchauffement solaire est en fonction de l'orientation de la rue et du rapport dimensionnel (H/L), ces deux facteurs sont largement compensés par l'ombrage que créent les couronnes végétales. Hoffman et Shashua (2000) ont étudié l'effet géométrique et l'effet d'orientation de deux rues canyon sur le microclimat, et comment ces deux facteurs sont affectés par l'addition du couvert végétal.

Des simulations numériques sur deux rues canyon orientées E-W et N-S, en utilisant le modèle [CTTC, cluster thermal time constant ou constante thermique du faisceau horaire], ont indiqué des différences significatives dans les températures d'air en couche limite urbaine. Le CTTC regroupe plusieurs paramètres qui concernent les propriétés morphologiques des bâtiments (densité, rues ombragées, géométries, etc.). Une étude antérieure effectuée par ces mêmes auteurs à propos de 11 sites boisés de la ville de Tel-Aviv montrent que 80 % des effets de refroidissement dans les sites sont provoqués par l'ombrage des arbres d'alignement.

L'implantation d'arbres d'alignement dans des rues canyons requiert une reconsidération du rôle de la géométrie et de l'orientation de la rue dans l'effet de refroidissement. L'aspect aérodynamique n'est pas pris en compte dans cette étude qui a été effectuée au cours des journées calmes et sans vent.

La valeur de la température d'air prédit dans l'ensemble urbain est calculée à travers les contributions des sources de chaleur reçues (rayonnement solaire et chaleur anthropogénique).

Les simulations numériques et les expérimentations ont été effectuées sur deux rues canyon orientées E-W et N-S et avec un rapport H/L faible et égal à 0.5

La figure 6 montre deux boulevards dans la ville de Jaffa séparés par un large parc public entièrement minéral (1 hectare) : le boulevard « Rothschild » est orienté presque N-S (1) et le boulevard « Ben-Zion » est orienté presque E-W (2).

Les deux boulevards ont presque le même rapport H/L (12/40 s 0.3), et sont plantés sur une bande de 12 m de « Ficus » âgés de 50 à 70 ans(Figure 5).

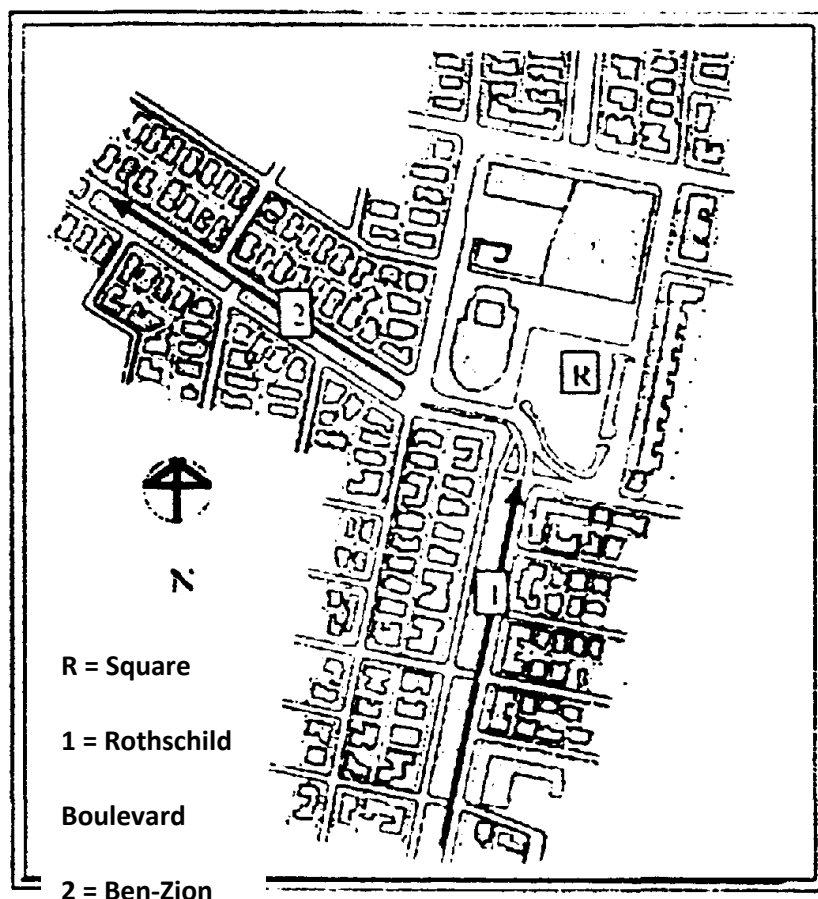


Figure 1.5 : Sites d'études.

La partie ombragée (PSA) , y compris l'ombrage créé par les arbres à 12h00, est voisine de 80% (83 % dans le boulevard « Rothschild » et 74 % dans le boulevard « Ben-Zion »). Les mesures des températures d'air ont été effectuées durant les journées d'été 1999, les prises de mesures étaient espacées de 40 m dans chacun des deux sites sur une distance de 250 m. Les différences de températures diurnes enregistrées à 1.5 m du sol dans chacun des deux boulevards et une station de référence située au centre du square sont présentées dans le tableau 1.7.

Tableau 1.7 : Ecart entre températures enregistrées dans les deux boulevards et celles enregistrées à une station de référence au centre du square - mai 1999, (Hoffman et al, 2000)

Site	H/L	12h00 (K)	15h00(K)	18h00(K)
Boulevard « Rothschild »	0.3	-2.1	-1.6	-0.
Boulevard « Ben-Zion »	0.3	-1.7	-1.2	-0.3

Les résultats de cette étude expérimentale montrent bien qu'il n y a pas d'effet significatif

de l'orientation des deux rues sur l'effet d'atténuation des températures d'air. Par contre, et d'après les résultats de calculs numériques du CTTC, ce dernier est égal à 10 dans le cas des deux boulevards sans les arbres d'alignement et à 13 avec les arbres, soit 3 heures de plus. Le calcul du $\Delta T_{\text{solaire}}$, (Q a fait l'objet de deux simulations numériques avec un CTTC égale à 10 et 13, les calculs étaient effectués du lever du jour jusqu'au coucher du soleil avec les mêmes valeurs de m, h et PSA pour le mois d'août 1996, les résultats sont donnés dans le tableau 8.

Tableau 1.8 : Effet du CTTC sur les valeurs du $\Delta T_{\text{solaire}}$, (t):

Calculs des rapports (1/2)	6h00	9h00	12h00	15h00	18h00	24h00
(1) $\Delta T_{\text{solaire}}$. (i) pour un CTTC = 13 (2) $\Delta T_{\text{solaire}}$, (Q pour un CTTC = 10	0.69	0.74	0.77	0.81	0.85	0.97

De 6h00 à 24h00, les variations des températures sont faibles avec un CTTC égal à 13 heures.

Les résultats reportés ci-dessus montrent que le rôle de l'ombrage des arbres dans des rues canyon types provoque les effets suivants :

Les effets de l'orientation et de la géométrie dans une rue canyon sont largement minimisés ; l'effet de refroidissement dépend essentiellement de la quantité et l'ampleur de la partie ombragée d'arbres ; lentes et atténuées.

b) Munich, Allemagne .

Mayer et Matzarakis (1997) ont effectué des mesures climatiques et des calculs de l'indice de confort PET (Physiological Equivalent Temperature) ; dérivé du PMV, sur trois espaces urbains différents dans la ville de Munich :

Une rue canyon orientée N-S implantée d'arbres d'alignement ;

Une rue canyon orientée N-S sans arbres ;

Un espace urbain minéral ;

Un parc proche.

Le but de cette étude est de comparer l'influence de la forme type du canyon avec et sans arbres sur les paramètres climatiques cités ci dessus.

A part les faibles valeurs des températures d'air relevées dans le site du parc, il n'y a pas trop de variations entre les valeurs enregistrées dans les trois autres sites. Par contre les résultats de mesures des températures moyennes radiantes (T_{mrt}) ou températures opératives sont plus

significatifs, les plus faibles sont enregistrées dans le parc).

Dans les trois autres sites, les valeurs des T_{mrt} sont élevées ou faibles en fonction de l'apparition du soleil. Les variations des T_{mrt} dans la rue canyon implantée d'arbres (*Polulus nigra 'Italica'*) sont intéressantes puisqu'elles montrent une atténuation vers midi. Ceci s'explique par l'ombrage créé par les couronnes des peupliers.

Les variations du PET sont similaires à celle de la température moyenne radiante « T_{mrt} » puisque cette température moyenne radiante est le paramètre qui influe le plus dans le calcul du PET. Les résultats de calcul de ce dernier montrent différents niveaux de contraintes pour l'être humain dû à la chaleur. Cet effet est réduit dans l'après midi par l'effet d'ombrage des couronnes des peupliers.

1.6 Etudes thermo graphiques sur les végétaux :

1.6.1 Calcul des températures de surface :

A) Séville, Espagne..

Dans le cadre du projet européen « GREEN CODE » et par le biais de la technique de la thermographie, une étude de l'effet du refroidissement provoqué par l'apport du végétal dans un espace urbain a été effectuée à l'Ecole Supérieure d'Ingénieurs de Séville.

Cette technique a été largement utilisée en France par le laboratoire ABC (Izard et al, 1997, 1999, 2001-2003) et au Japon (A. Hoyano, 1988). Les résultats de prise d'image thermique dans ce projet montrent que les températures de feuillage sont égales aux températures d'air sous abri.

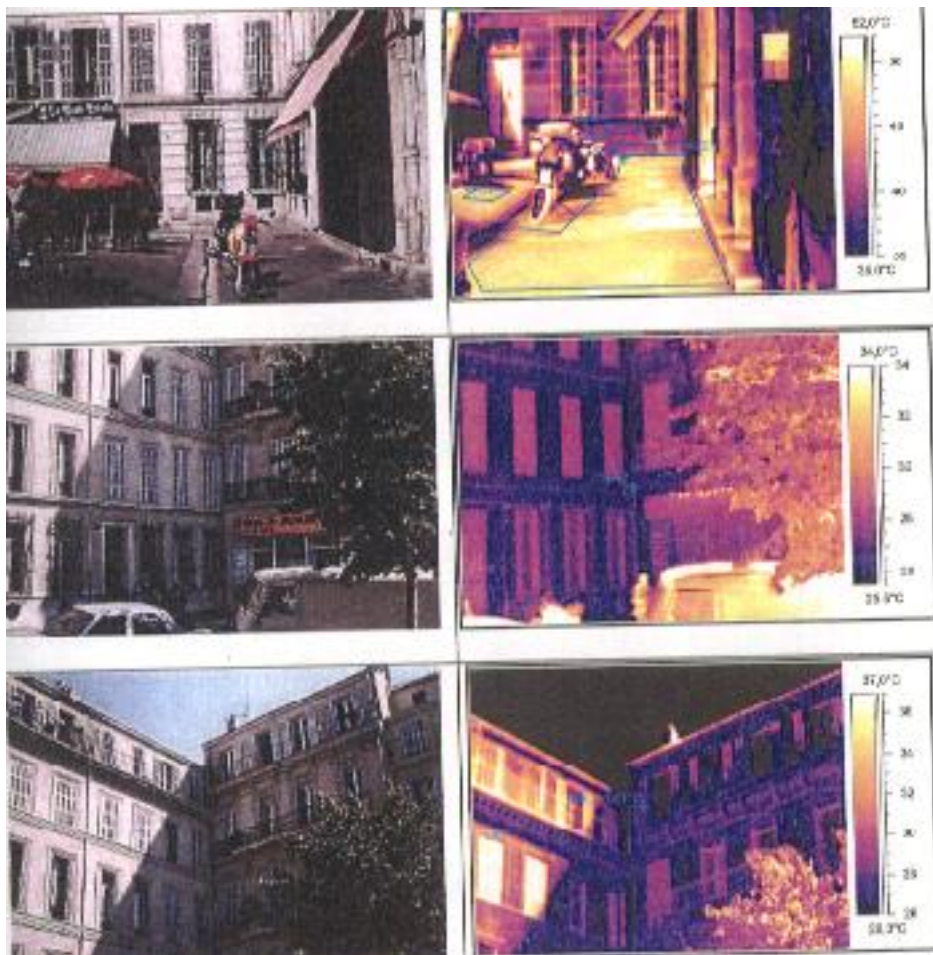
Sur l'échelle thermique de l'image prise dans l'infrarouge qui les couronnes végétales sont à des températures égales à 27, 28 et 29 °C alors que la température d'air in situ relevée en même temps est à 28 °C .

b)Marseille, France ..

Le laboratoire ABC a effectué plusieurs travaux de recherche en utilisant la thermographie infrarouge (Izard et al, 1995/97/99).

Izard et al définissent les masses foliaires des végétaux par la notion de « plafonds réfrigérants ». Ces plafonds n'absorbent pas le rayonnement solaire incident comme c'est le cas pour les couvertures classiques textiles, mais le réduisent.

Durant l'été 1995, et en parallèle avec une campagne de mesures, des images thermiques de sites d'études ont été prises par caméra infrarouge, (figure 1.6).



La thermographie est une méthode de pyrométrie métrique, la mesure des températures de l'objet analysé est liée aux propriétés émissives. Ce qui permet l'analyse et la visualisation des températures de surface des objets.

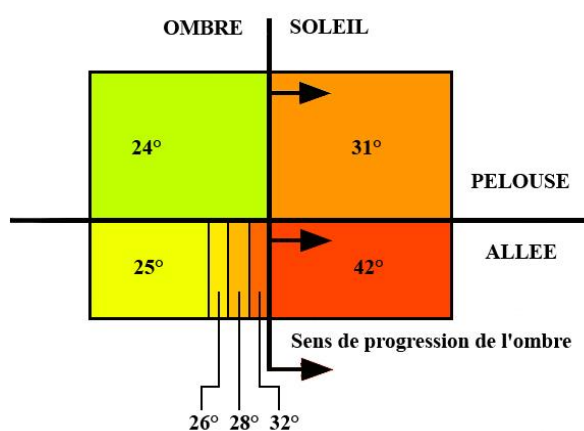
Figure1. 6 : Images prises dans le domaine du visible et de l'infrarouge de sites d'études à Marseille (Izard et al,1999).

Les résultats montrent des valeurs des températures de feuillage similaires à celles de l'air sous abri, par contre les températures de feuillage d'arbres d'alignement sont nettement plus

faibles. Ceci est dû au fait que les feuilles de la treille sont très éparses comparées aux couronnes épaisses des arbres.

D'autres images thermiques de pelouses ont été prises au parc Jourdan à Aix-en-Provence.

Les températures de pelouse au soleil sont plus faibles que la surface minérale adjacente. Il faut noter que les pelouses sont souvent irriguées, ce qui favorise le phénomène d'évaporation. Une comparaison faite entre cette même pelouse et une allée contiguë (figure 1.7) a fait apparaître un rapprochement de température entre les deux surfaces à l'ombre avec un léger avantage pour la surface végétale. Toutefois, sous le soleil l'avantage est respecté mais l'écart est important (11°C). L'extension de l'ombre vers les surfaces ensoleillées a révélé que les pelouses ont un pouvoir de refroidissement très rapide que les espaces minéralisés. Ces résultats sont rendus possibles grâce à l'imagerie thermique infrarouge.



A l'ombre la différence est moindre mais le sol minéral par effet d'inertie se refroidit plus lentement : sa température reste supérieure à celle de la pelouse.

Figure 1.7 : Schémas des effets thermiques comparés de la Pelouse et de l'allée minérale à l'ombre et au soleil. (Izard et al, 1998).

Izard et al. (1998) parle d'effet de «mémoire thermique» de surface mise en évidence par le déplacement de l'ombre. Il explique cette mémoire par l'effet de refroidissement très rapide des pelouses qui réduisent fortement les effets de stockage thermique du sol (Izard et al, 1998).

Dans le cadre du programme « Ecologie urbaine » dirigé par le Ministère de

l'Équipement, du Logement et du Transport, le Laboratoire ABC a aussi effectué une campagne de mesures climatique, de prises d'images thermiques dans deux villes méditerranéennes (Nîmes et Aix-en-Provence) en mettant l'accent sur l'effet du végétal sur le microclimat des espaces urbains.

Une image thermique prise de la place d'Assas dans la ville d'Aix-en-Provence montre bien la différence entre les températures de feuillage des arbres qui bordent la place, et les températures du sol et façades (à 13h00, T_f (Micocouliers) = 23 °C, T_s = 31 °C).

Il faut noter que dans ce cas, la température du plan d'eau (la fontaine) est la plus faible ($T = 22$ °C), (figure1. 8).

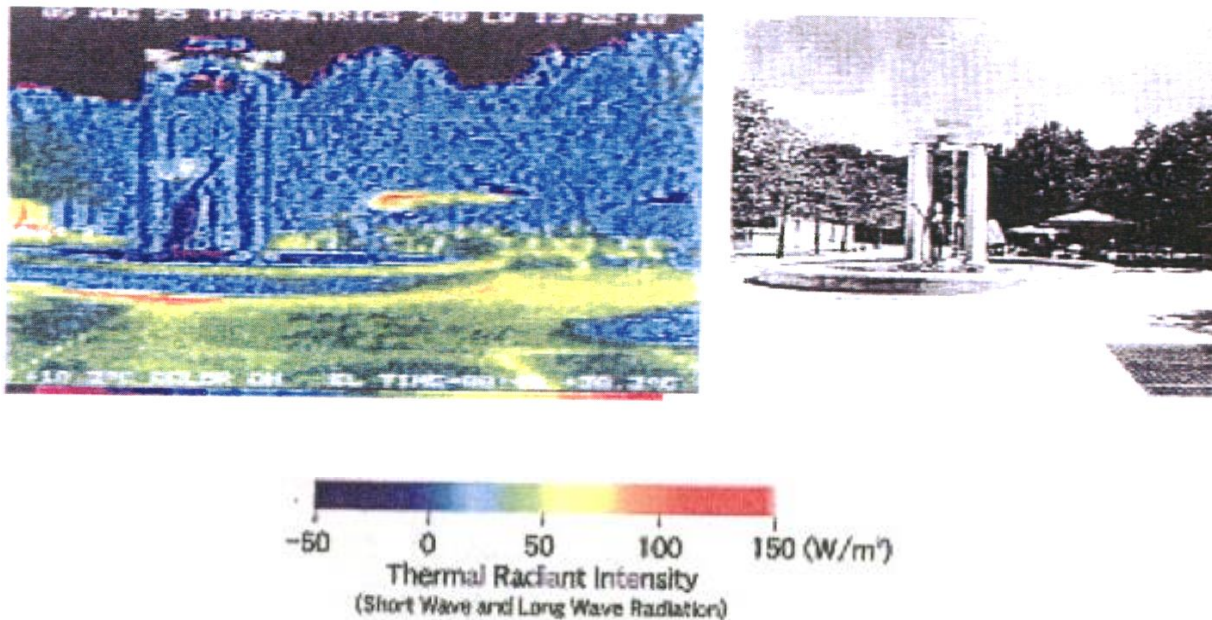


Figure 1.8 : Image de la place d'Assas dans le domaine du visible et de l'infrarouge.

(Izard et, 1999).

L'ombre que crée le feuillage des Micocouliers sur les façades fait chuter leurs températures de surface (T_s des façades au soleil est égale à 32 °C, T_s à l'ombre est égale à 25 °C à 8h00 dans le boulevard « Victor Hugo »), (figure1. 9).

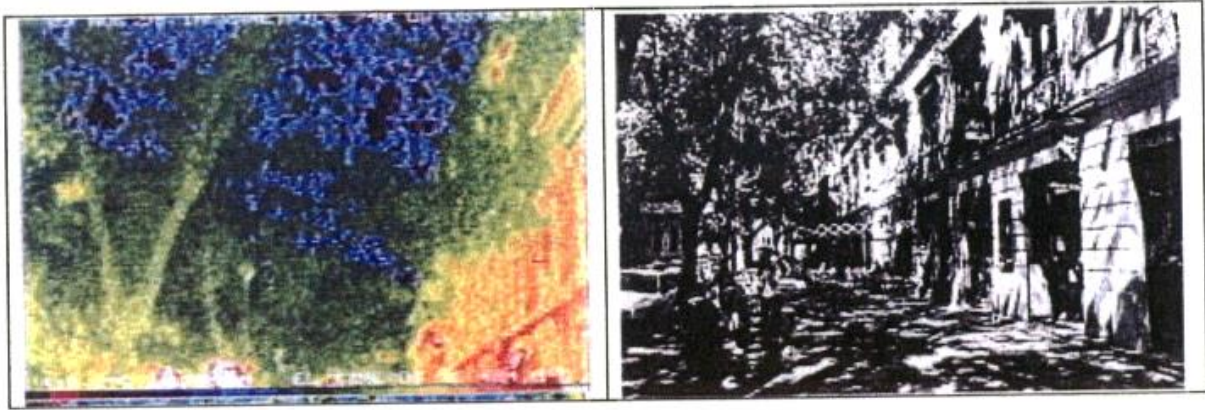


Figure 1. 9 : Boulevard Victor Hugo dans le domaine du visible et de l'infrarouge.

(Izard et al 1999).

c) Göteborg, Suède..

L'analyse de variations de températures entre plusieurs espaces urbains par la thermographie infrarouge a fait l'objet d'une étude microclimatique dans la ville de Göteborg (Eliasson. 1999).

Les résultats de survols aériens montrent les différences de températures entre les différents paysages urbains (parcs, espaces bâtis et plans d'eau), (figure 1.10)

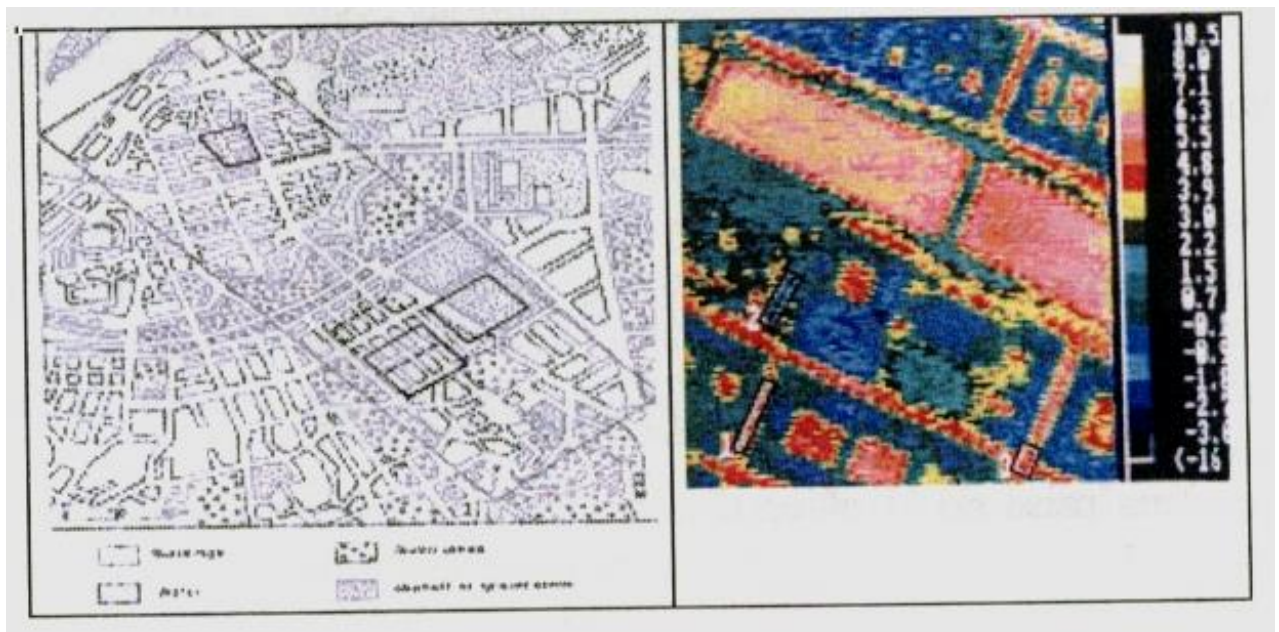


Figure 1.10 : Plan de masse des cas d'études dans le centre-ville de « Göteborg », et leurs images thermiques. (Eliasson. 1999).

Les températures les plus élevées sont celles des rues canyon ($T_s = 43 \text{ °C} \pm 0.5 \text{ °C}$) et les plus faibles sont celles du square ($T_s = 24 \text{ °C} \pm 0.3 \text{ °C}$), soit une différence de 19 °C .

d) Tokyo. Japon..

Hakira Hoyano (2001) a pris des images thermiques de maisons bordées d'arbres dans la ville de Tokyo au Japon.

La méthode utilisée par Hoyano est différente puisqu'il utilise un objectif fish-eye pour ses prises d'images en infrarouge, l'espace dans ce cas-là est plus cerné par la caméra. La prise d'image a été effectuée le 10 août 2000 entre 12h40 et 12h50, la température d'air extérieure était égale à 33 °C , l'humidité relative égale à 58% , le rayonnement solaire direct égale à 673 W/m^2 , la vitesse d'air égale à 0.6 m/s , et la température radiante moyenne égale à 39 °C (figure 11).

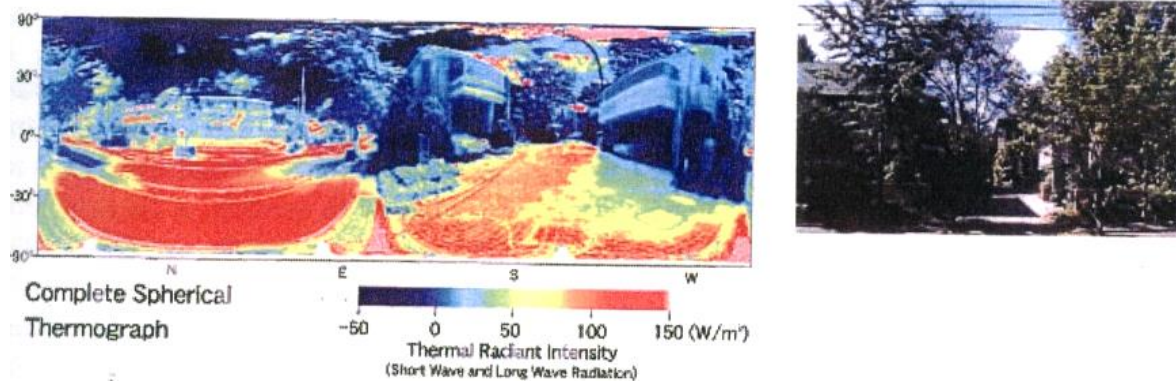
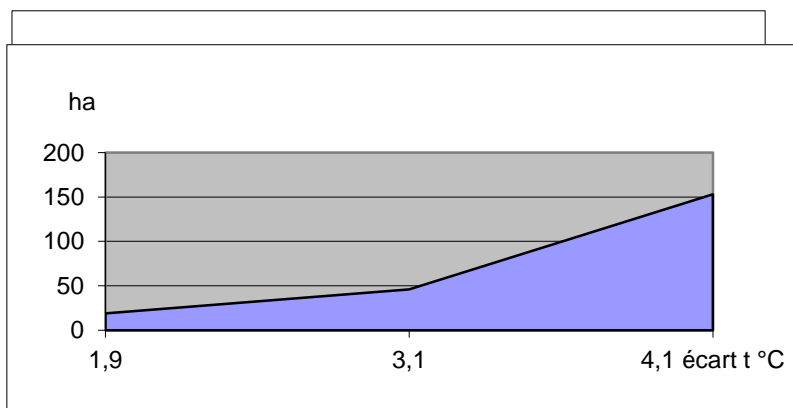


Figure 1.11 : Image thermique sphérique de la couverture végétale d'un quartier dans la périphérie de la ville de « Tokyo ».

Hoyano a aussi étudié l'effet microclimatique d'une treille de vigne vierge (wisteria) dans un jardin d'enfants à « Fukuoka City ». Les résultats de ses mesures montrent un faible effet des végétaux sur les températures pour des hauteurs supérieures à 30 cm par rapport au sol (peu de différences sous la treille et à l'extérieur). Par contre, au-dessous de 30 cm , une réduction de 3 à 4 °C a été observée sous la treille (Hoyano, 1988). Dans la couche d'air proche

du sol, en dehors de la treille, une différence beaucoup plus importante apparaît ($\Delta T = -20^\circ$) due à la température de surface du sol, beaucoup plus élevée en absence d'ombre.

L'effet du parc peut s'étendre au-delà de ses limites son influence croît avec sa taille, même dans un climat chaud et humide comme celui de la ville de Tokyo. L'humidité qui provient des parcs n'affecte pas le confort thermique des usagers (Vu Thanh Ça et al, 2000), il faut un certain nombre d'années (5 ans) pour qu'un arbre puisse contribuer à l'amélioration du micro climat urbain. Le rendement climatique est amélioré sur les pelouses bien irriguées et qu'il est faut éviter de concevoir un couvert végétal sous forme d'arbre d'alignement sur une surface minérale.



Plus la taille du parc est grande, plus son influence sur le microclimat urbain est grande. L'écart de température varie entre 1 et 6,8 °C.

Figure 1.12 : Ecart de température entre le parc et le milieu urbain selon taille du parc.

Une étude récente effectuée sur 11 sites boisés dans la ville de Tel-Aviv (32 °N) montre que 80 % des effets de refroidissement des sites sont expliqués par l'ombrage des arbres (Hoffman et al, 2000). Les climats urbains sont différents des climats ruraux en termes de radiation, humidité et température à cause des configurations et propriétés thermiques des bâtiments et du pavage (Oke, 1978).

L'effet d'ombrage apporté par la végétation, cumulé avec le phénomène d'évapotranspiration joue un rôle très important dans l'atténuation de l'îlot de chaleur qui se produit en ville.

Le taux de surfaces évapotranspirantes de l'ensemble de la ville fait croître le refroidissement des espaces dans lesquels ils sont implantés. La différence de températures d'air

entre les voisinages des surfaces vertes et des surfaces minérales peut atteindre 6°. Les grandes surfaces d'espaces verts jouent un rôle modérateur de l'îlot de chaleur urbain quand elles sont implantées en pleine cour des villes.

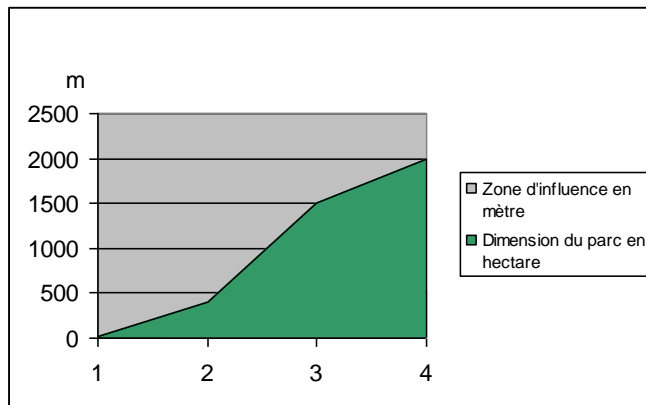
Le tableau suivant montre les résultats de mesures effectuées dans plusieurs localités du monde, exprimés par l'écart entre les températures urbaines et les températures mesurées dans les parcs (ΔT_{u-p}), (Upmanis et al, 1998) :

Tableau 1.9 : Valeur maximale de la différence de températures (Ville - Parc), ainsi que la distance d'influence dans diverses villes et selon diverses sources, d'après Upmanis et al, 1998 cité par Izard, 2000.

Ville	Lat (°N)	Climat	Dim. (ha)	ΔT_{u-p} Max (°C)	Extension (m)	Références
Washington	40	Humide Subtropical		3-5		Lewis et al. (1971)
Mexico City	20	Steppe	525	6	2000	Jauregui (1975-80)
München	48	Humide continental	130 2,5	3,5 2		Bründiet al (1986)
Montréal	45	Humide continental	38	2	400	Oke (1989)
Kumamoto City	33	Humide continental	2,25	4	20	Saito et al. (1990)
Kuala Lumpur	3	Tropical Humide	153 46 19	4,1 3,1 1,9		Ahmad (1992)
Göteborg	57	Maritime côtier ouest	156	6	1500	Lindqvist (1992)
Tucson	32	Aride désertique	171	6,8		Spronken- Smith(1994)

Le tableau 1.9 montre à l'évidence que les plus grands écarts de températures ont été enregistrés dans des climats arides (Tucson et Mexico City). Spronken-Smith (1994) et que l'effet potentiel d'un parc est déterminé à travers le climat à la macro -échelle et donc « plus le

climat est chaud et sec, plus l'effet est plus grand ».



2,25 38 156 525 ha

Dimension du parc en hectare

Figure 1.13 : Influence du parc selon sa taille en milieu urbain.

L'écart de température varie entre 1 et 6,8 °C. Une étude comparative de mesures effectuées au Mexique, au Canada et au Japon prouve que l'extension de l'effet de rafraîchissement des parcs croît avec la taille des parcs (Figure 1.13).

Une autre étude effectuée à Mûnchen, (Brûndi et al, 1986) montre que l'écart (ΔT_{u-p}) disparaît dès que la vitesse de l'air atteint 5 m/s. (Oke, 1989) montre aussi dans une étude conduite sur la ville de Montréal que cet écart devient négligeable à une vitesse supérieure à 6 m/s ; et qu'avec une vitesse d'air plus faible (2 m/s), la masse d'air due à l'effet de refroidissement se déplace dans la direction du vent en aval du parc.

En outre, l'écart (ΔT_{u-p}) est beaucoup plus important au moment du lever du soleil (Spronken-Smith, 1994). Les températures d'asphalte élevées provoquent plus de rayonnement de grande longueur d'ondes que les surfaces végétalisées ce qui entraîne une augmentation d'une manière significative des températures d'air et des surfaces (Kjelgren et Clark, 1994 ; Oke, 1978

D'après les résultats de cette étude la taille du parc a une grande influence sur cet écart (ΔT_{u-p}) : plus le parc est grand plus l'écart est élevé.

Conclusion :

Dans ce premier chapitre l'accent sur le rôle que joue le végétal sur le microclimat en milieu urbain a été abordé, ce rôle microclimatique a fait l'objet de plusieurs études climatiques sur plusieurs échelles et sous plusieurs formes (jardins, parcs, arbres isolés). La végétation agit sur trois principaux paramètres (le rayonnement solaire, le vent et l'humidité de l'air). Son implantation dans les villes est très cruciale pour le bien être des individus.

Le plus souvent cette végétation est sous forme de grands parcs arbres d'alignement ou pelouses. Plusieurs travaux de recherche démontrent que les parcs urbains établissent leur propre climat in situ. En plus de la thermographie les mesures in situ constituent des moyens d'investigation ayant montrés leurs fiabilités. Il a aussi été démontré que le refroidissement qui se produit dans les parcs ou surfaces végétales urbaines s'étend vers les espaces urbains qui les entourent et donc contribuent à l'amélioration de leurs microclimats. L'influence de la végétation sur les climats urbains a été largement démontrée dans plusieurs études.

CHAPITRE 2

EFFET DU VEGETAL ET CONFORT THERMIQUE

Introduction :

Dans ce chapitre les échanges énergétiques avec l'atmosphère seront expliqués à travers le phénomène de l'évapotranspiration, l'effet aérodynamique du végétal sera abordé et son influence sur la réduction de la vitesse du vent, en dernier lieu nous expliquerons l'indice L.A.I qui permet aussi de déterminer le taux de végétalisation d'un espace donné. Des études de cas sur les toitures végétalisées sont aussi présentées à ce niveau.

2.1 .Phénomène de L'évapotranspiration :

2.1.1 Définition :

Le phénomène de l'évapotranspiration est un lien hydrologique critique entre la surface de la terre et l'atmosphère. Il est donc important pour des études impliquant beaucoup d'aspects du climat et de ses variations.

Les études d'évapotranspiration sont nécessaires pour les climatologues, les écologistes, physiciens, spécialistes en hydrologie (eau et ressource) et les agronomes et urbanistes.

L'évapotranspiration est le processus responsable du transfert de l'humidité à partir du sol et des surfaces végétalisées vers l'atmosphère. Les changements de l'évapotranspiration sont susceptibles d'avoir de grands impacts sur la végétation terrestre, puisque la distribution et l'abondance des aires végétales sont fonction de la quantité et du caractère saisonnier de l'humidité.

Hanson (1991), cité par Izard (2000) rappelle qu'à l'échelle d'un continent comme celui des Etats-Unis, l'évapotranspiration, c'est-à-dire l'évaporation directe à partir des surfaces humides à laquelle s'ajoute la transpiration des végétaux, représente de 40 à 100 % des précipitations annuelles en allant du Nord-Ouest au Sud-Ouest du pays. En moyenne, cela représente 67 %, soit plus de deux fois les débits cumulés des cours d'eau vers les deux océans (29 %). Les chiffres annuels à l'échelle de la planète sont repris au niveau du tableau 10.

Tableau 2.1 : Taux d'évaporation en fonction des débits d'eau

Lame d'eau tombée sur terre ferme	720mm	100%
Evapotranspiration	410 mm	57%
Écoulements superficiels et souterrains	310mm	43%
Évaporation directe océans	1250 mm	
Lame d'eau tombée sur océans	1120mm	

Les paramètres qui affectent les débits d'évapotranspiration sont le rayonnement solaire net, la surface des plans d'eau, la vitesse du vent, la densité et le type de couvert végétal, la disponibilité de l'eau dans le sol, la profondeur des racines, l'albédo de la surface du sol, et, pour les climats tempérés, la saison (Hanson, 1991)(Figure 2.1).

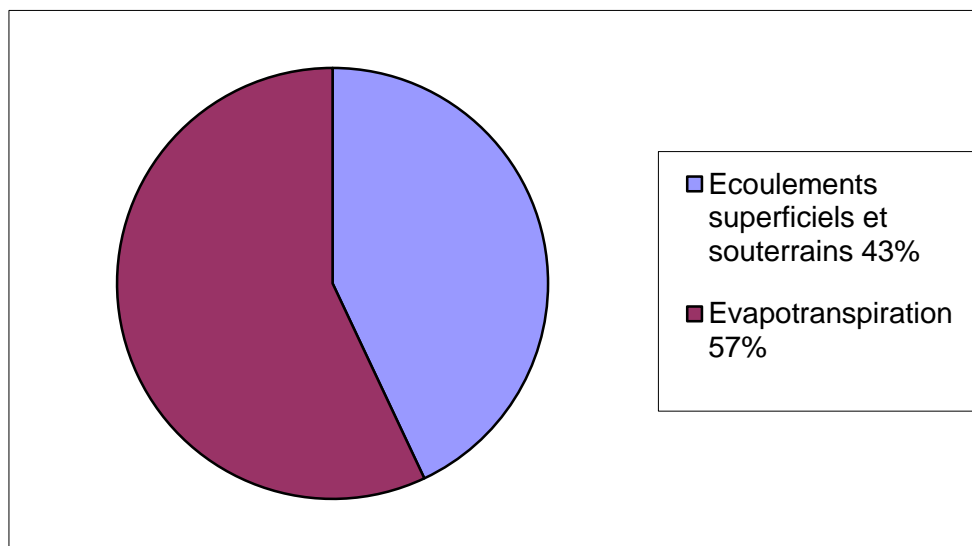


Figure 2.1 : Taux d'évapotranspiration en fonction du débit d'eau.

Souvent, les scientifiques distinguent deux aspects différents de l'évapotranspiration : L'évapotranspiration potentielle et l'évapotranspiration réelle. L'évapotranspiration potentielle « ETP » est une mesure de la capacité de l'atmosphère à extraire de l'eau de la surface par les processus de l'évaporation et de la transpiration. L'évapotranspiration réelle « EA » est la quantité de l'eau qui est réellement extraite d'une surface par les processus de l'évaporation et de la transpiration (figure 2.1).

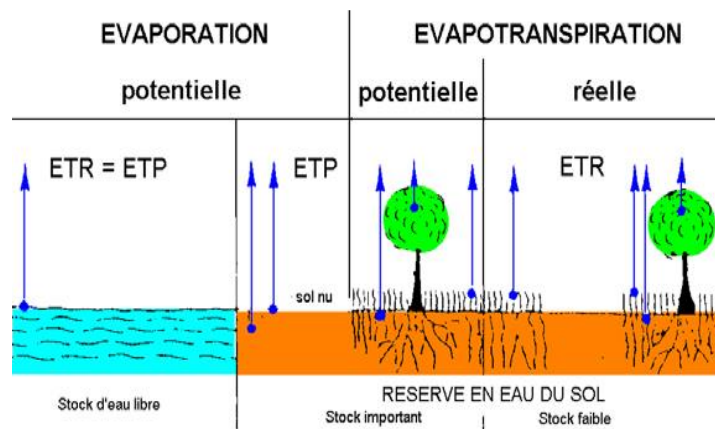


Figure 2.2 : Processus d'évaporation, évapotranspiration potentielle et évapotranspiration réelle (d'après Jacques Beauchamp).

Les scientifiques considèrent ces deux types d'évapotranspiration dans le but pratique de la gestion des ressources de l'eau. Les évaluations des valeurs de ces deux types d'évapotranspiration sont alors employées dans l'équation suivante :

$$\text{Besoin en eau du végétal} = \text{évapotranspiration potentielle} - \text{évapotranspiration actuelle}$$

Les facteurs suivants sont extrêmement importants dans l'estimation de l'évapotranspiration potentielle :

L'évapotranspiration potentielle exige de l'énergie pour le processus d'évaporation. La source principale de cette énergie est solaire. La quantité d'énergie reçue du soleil représente 80 % des variations de l'évapotranspiration potentielle. Le vent est le deuxième facteur qui influe sur l'évapotranspiration potentielle. Il permet aux molécules d'eau d'être extraites de la surface au sol par le processus connu sous le nom de « diffusion tourbillonnaire » (« eddy diffusion »). Le taux d'évapotranspiration est associé au gradient de la pression de vapeur entre la surface du sol et la couche de l'atmosphère recevant l'eau évaporée. (Michael Pidwrimy, 2000).

2.1.2 Évapotranspiration potentielle :

Il existe plusieurs méthodes pour calculer l'évapotranspiration. Les méthodes climatologiques sont souvent employées pour estimer l'évapotranspiration parce qu'elles exigent seulement les éléments mesurés à l'Observatoire Météorologique.

La méthode de « Thomthwaite » est employée quand seule la température de l'air est disponible. La méthode de « Panman » est applicable quand la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse de vent et la durée de l'ensoleillement sont disponibles.

L'approche d'advection - aridité par Burutsaert et Stricker (1979) ou la méthode de « Morton » (1983) sont également applicables. La comparaison de ces méthodes peut être trouvée en Kondoh (1994). Les méthodes de Thomthwaite ou de Penman calculent l'évapotranspiration potentielle qui se produit sur des surfaces denses d'herbes vertes courtes avec suffisamment d'approvisionnement en eau.

Il existe d'autres formules plus simples qui calculent l'évapotranspiration potentielle, telles que la formule de Turc qui s'exprime comme suit :

$$ETP = k \frac{T}{T+15} (R_g + 50) \text{ (mm/mois)}$$

où :

T est la température mensuelle moyenne (°C) ;

K est constant et égal à 0,37 pour le mois de février et égal à 0,40 pour les autres mois ;

R_g est la radiation solaire globale ;

R_g = I_{ga} (0,18+0,62 h/H) où :

I_{ga} est la radiation solaire directe hors atmosphère (W/m²)

h/H est la durée réelle d'insolation locale/durée maximale possible (fraction d'insolation) varie entre 1 et 0,1. Les valeurs de l'évapotranspiration potentielle sont publiées dans les atlas climatiques (Chemery L. et al, 1987),

2.1.3 Evapotranspiration réelle (ETR) :

L'évaporation dépend de la capacité des racines à accéder à l'eau du sous-sol (la réserve utile), (figure 2.3).

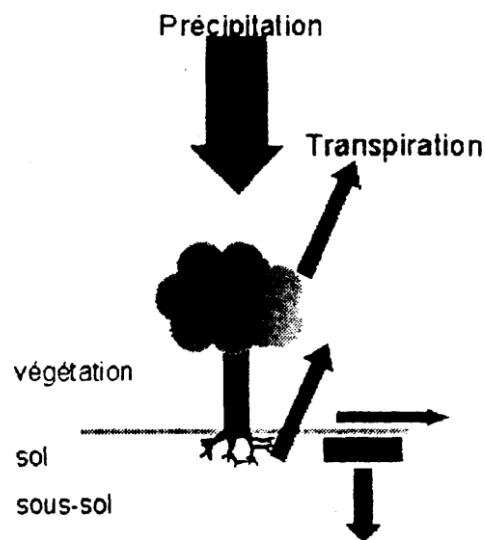


Figure 2.3 : Place de l'eau du sol dans le cycle de l'eau (d'après Jacques Beauchamp).

2.1.4 La relation entre l'évapotranspiration potentielle et réelle :

Du point de vue climatologique, l'évapotranspiration annuelle est relativement stable comparée au ruissellement d'eau et aux précipitations. La variation des précipitations annuelles est importante, et ses valeurs se trouvent parfois au-dessous de l'évapotranspiration humide d'environnement.

Quand un déficit d'eau se produit, l'évapotranspiration potentielle augmente avec la diminution des précipitations, alors que l'évapotranspiration réelle diminue.

Le déficit substantiel de l'eau est exprimé par $E_p - E_a$, ainsi le déficit de l'eau augmente rapidement avec la diminution des précipitations. Par conséquent $dE = E_p - E_a$ est considéré comme l'index de la sécheresse.

$dE = 0$ signifie qu'il n'y a pas de déficit en eau,

$dE > 0$ signifie qu'il n'y a aucun excédent d'eau.

Le cas d'un « dE » élevé peut causer un phénomène de « salinisation » en raison de la grande puissance de séchage de l'atmosphère (Akihido Kondoh and Agung Budi Harto, 1998).

2.2 Effet aérodynamique du végétal urbain :

« La particularité du végétal dans son utilisation de contrôle des ambiances microclimatiques, est sa nature vivante ». (A. Guyot et al, 1985)

Une grande variété de végétaux, de type arbuste ou arbre peut être utilisée pour réaliser les écrans végétaux. Pour réussir cette organisation aérodynamique (haies, mailles, bosquets ou plots), la disposition des écrans par rapport aux bâtiments et dans les espaces urbains doit être étudiée en fonction de l'essence des végétaux et des réserves en eau dans les sols.

Les écrans végétaux sont implantés en fonction des contraintes climatiques et topographiques des sites. En zones ventées par exemple, il faut tenir compte de la résistance de l'essence végétale. Avec l'hétérogénéité des hauteurs de bâtiments et la largeur des rues dans les villes, les vitesses des vents deviennent plus élevées.

A titre d'exemple, la ville de Berlin en Allemagne dont les écoulements de vents à la périphérie et à l'intérieur de la ville ont été simulés, les vitesses résultantes freinent dans les zones végétalisées (Wagner et al, 1993).

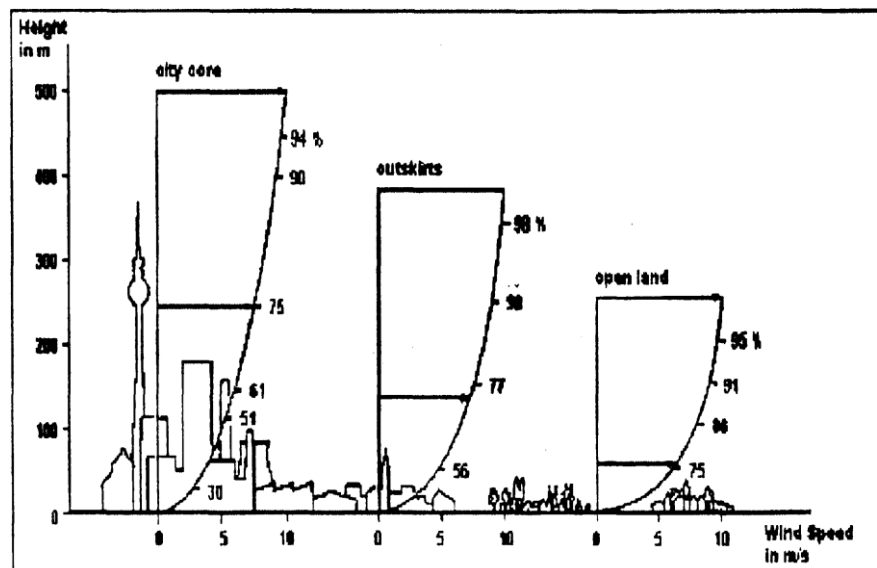


Figure 2.4 : Profil vertical de la vitesse de vent en fonction de la rugosité de terrain.

Les mesures in situ de vitesses d'air étaient effectuées en différentes stations fixes placées à 10 m du sol. Les directions de vent les plus fréquentes sont à l'Ouest (21 %) et au Sud-Ouest (16%) (Figure 2.4)

L'examen du graphe montre bien que les plus faibles vitesses d'air étaient relevées au sein des parcs, des espaces boisés et des surfaces vertes en aval des cours intérieures des immeubles.

2.2.1 Cas d'études : Toitures végétalisées.

A l'échelle de l'espace urbain, les végétaux peuvent être associés aux composantes urbaines (bâtiments, rues et relief) pour freiner et modifier les directions des vents. Plusieurs simulations aérodynamiques ont démontré cela, quelques exemples sont indiqués ci-après :

a) Athènes, Grèce..

Dans le cadre du projet européen Joule, « Precip Project », un intérêt particulier a été porté par A. Dimoudi et M. Nikolopoulou, (2000) sur le rôle de la végétation dans le contexte urbain et ses effets microclimatiques. La réduction des températures d'air suivant les incidences et directions des vents dominants a été mise en évidence par des simulations numériques à l'aide du code CFD (PHOENICS) sur différentes configurations urbaines avec et sans végétations de différentes tailles.

L'étude a été effectuée à propos de la ville d'Athènes en Grèce : les conditions thermiques et aérodynamiques ont été analysées suivant la densité urbaine, le facteur de vue de ciel (SVF), les dimensions des couvertures vertes, la distance par rapport aux couvertures végétales, les conditions climatiques et les différentes essences de végétation.

Les vitesses d'air élevées font accroître le taux de transpiration des feuillages (Transpiration maximale = 0.0305 %, $V_a = 10$ m/s, $T_a = 27,5$ °C). Par contre les températures de feuillages deviennent plus faibles dès que la vitesse d'air est plus élevée (TF maxi = 41 °C avec $V_a = 0.1$ m/s).

Quatre configurations urbaines ont été étudiées :

Cas a : seuls les bâtiments sont considérés, (direction du vent Sud 0°)

Cas b : le bâtiment central est remplacé par un parc, (direction du vent Sud 0°)

Cas c : la surface de la végétation est plus élevée (14.14 m₂), (direction du vent 0°)

Cas d : les surfaces au sol des bâtiments et de la végétation sont plus importantes (direction de vent 0°).

L'analyse des résultats de simulations numériques a été faite le long de deux axes en considérant les variations des températures d'air suivant les distances sous le vent.

Quand les vitesses d'air augmentent de 1 m/s à 1.50 m du sol, l'effet de la végétation devient plus faible. Le profil des températures ambiantes dans ce cas suit les températures avec lesquelles les vitesses d'air ont été introduites. L'effet de la végétation s'étend également hors du périmètre du parc, les températures ambiantes sont élevées dans les rues étroites (= + 3 à 4 °C par rapport aux autres sites) et faibles dans la partie en aval du parc (- 2 °C par rapport aux rues parallèles).

b) Melbourne (Australie) et Bochum (Allemagne).

En ajoutant des toitures vertes, des pelouses, arbustes et arbres autour d'un immeuble existant à Melbourne en Australie, Bruse (1999) a simulé avec le modèle « Envi-met » l'effet du végétal sur le rayonnement incident, les températures d'air et les vitesses d'air. Les simulations numériques étaient effectuées en ajoutant :

- Des toitures vertes sur tous les immeubles
- Des arbustes et pelouses autour des immeubles avec les toitures vertes.

Les résultats des simulations ont démontré une réduction de 0.90 m/s des vitesses d'air dans le cas de l'addition des toitures vertes et une réduction de 1.30 m/s dans le cas de l'addition d'arbres environnants (avec une végétalisation maximale ou « maximal greening »), (figure 2.5).

Il faut noter que les réductions des vitesses d'air se font à l'intérieur de la couche des feuillages, l'effet de réduction devient moindre entre les couronnes végétales.

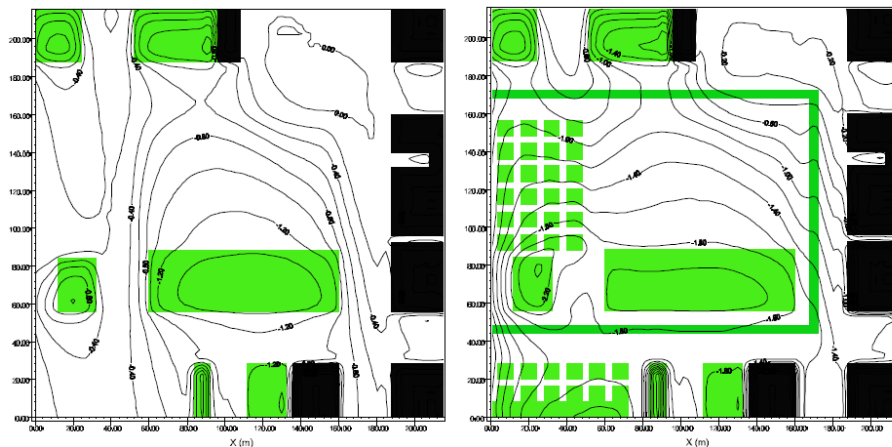


Figure 2.5 : Différences de température d'air, profil horizontal à 6 m du sol (à gauche, toitures vertes seulement ; à droite, toitures et arbres d'alignement).(Bruse et al)

L'écoulement de vent a aussi été calculé avec le modèle Envi-met, dans des rues canyon avec et sans les arbres d'alignement dans la ville de Bochum. Les simulations numériques ont été effectuées à propos d'une rue canyon orientée N-S avec une hauteur de 16 m et une largeur de 16 m ($H/L = 1$). La végétation est représentée par des arbres à feuilles caduques d'une hauteur de 20 m et d'une densité de feuillage qui varie entre (0.00 et 2.18 m^{2-3}).

La figure 2.5 montre la distribution des températures et vitesses d'air à 1.8 m du sol à 14h00 le 23 juin après 32 heures de calculs.

Les vitesses d'air sont plus faibles sous les couronnes végétales et le vortex vertical entre les bâtiments qui apparaît à gauche (sans les arbres) est supprimé. La zone végétale est modélisée par un coefficient de perte de charge (drag coefficient) Cd.

c) Nantes(France)

Vinet et al. (2000) au Laboratoire CERMA à Nantes a trouvé le même résultat en calculant les vitesses d'air simulées avec le code N3S sur la place du Millénaire à Montpellier.

Les vitesses d'air diminuent quand le vent incident traverse une zone végétale, les écarts entre les vitesses d'air en aval du végétal varient entre 1.15 m/s et 1.5 m/s dans le cas d'une végétation déjà existante et entre 0.4 m/s et 1.8 m/s sur une longueur de 50 m par rapport aux

zones végétales.

Les températures de feuillage des arbres sont prises égales à la température de l'air dans le cas d'une évapotranspiration maximale [cette valeur varie d'une équipe à une autre, elle est prise égale à 20 °C par Le laboratoire CERMA et 25 °C par le Centre des Energies Renouvelables en Grèce (Nikolopoulou, 2000)].

Le rayonnement transmis par les arbres est entré dans le logiciel SOLENE par le biais d'un descripteur constant dans les deux cas (cas d'une couronne opaque et cas d'une couronne avec plus de vides entre les feuilles).

L'alimentation en eau des racines de la végétation et le phénomène de résistance et de fermeture des stomates sont modélisés sous forme de descripteur constant dans les deux modèles (SOLENE et N3S).

d) Ottawa (Canada)

Pour étudier la performance des toitures végétalisées, les chercheurs de l'institut de recherche canadien (IRC) ont aménagé et comparé un système de toiture-jardin et un système de toiture sans plantation sur le campus d'Ottawa. Une toiture de type industriel, de faible inclinaison, a été divisée en deux parties égales. La première moitié est une toiture jardin à végétation extensive reposant sur substrat léger de 150 mm de gazon ; la seconde, une toiture en bitume. Des mesures d'écoulement des eaux pluviales, de température, du flux de chaleur, la réflexion solaire, la teneur en eau du sol ont été effectuées.



Figure 2.6 : Séparation des deux toits : le toit vert (à gauche) et le toit de référence (à droite)

(Liu. K.Y et Baskaran.A , 2005)

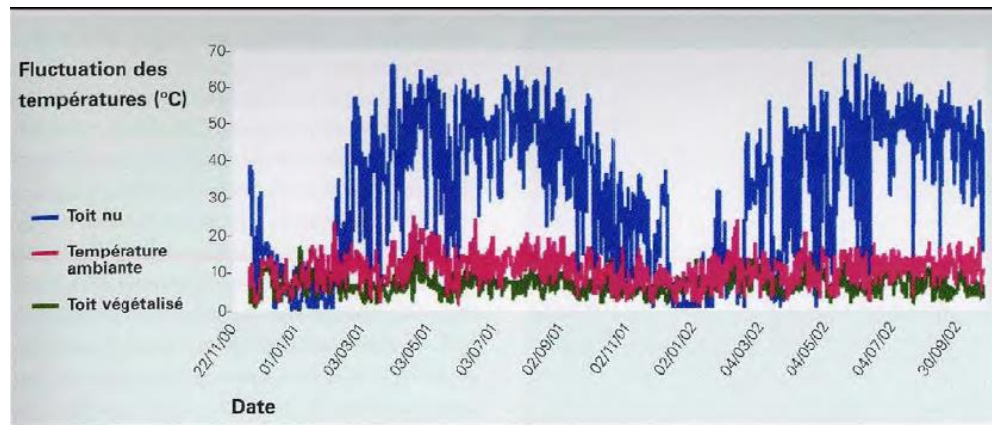


Figure 2.7 : Fluctuations journalières des températures sur un toit végétalisé et un toit nu à Toronto (Liu. K.Y et Baskaran.A, 2005)

Les résultats ont indiqué que la toiture nue a subi des températures plus élevées que celle de la toiture jardin, notamment pendant les mois chauds. Pendant un jour type d'été, la membrane exposée de la toiture nue a atteint 70°C l'après-midi, tandis que celle de la toiture jardin est restée à environ 25°C. Pendant l'hiver, les profils de température des deux toitures étaient identiques, en raison de l'effet isolant de la neige.

De plus, la toiture jardin a permis de mieux contrôler les gains de chaleur au printemps et en été qu'elle n'a permis de réduire les pertes de chaleur en automne et en hiver. La raison revient aux différents mécanismes thermiques en jeu : ombrage, isolation, évapotranspiration et masse thermique. Pendant la période d'étude, la toiture jardin a réduit les gains de chaleur de 95% et les pertes de chaleur de 26%, avec une réduction totale du flux de chaleur de 47% par rapport à la toiture nue. Ce qui a conduit à une réduction de plus de 75% du besoin énergétique en climatisation¹.

Toujours à Ottawa, Bass (2001), a testé le même modèle de toit (un toit vert d'un côté et un toit conventionnel de l'autre côté comme toit de référence) .Dans un but de comparer la performance thermique des deux systèmes de toits, une simulation basée sur le logiciel « DAINE VISUAL » a été alors développée en plus des mesures in situ de température, d'écoulement de chaleur, de réflectivité solaire, d'humidité du sol et d'écoulement de précipitation.

<

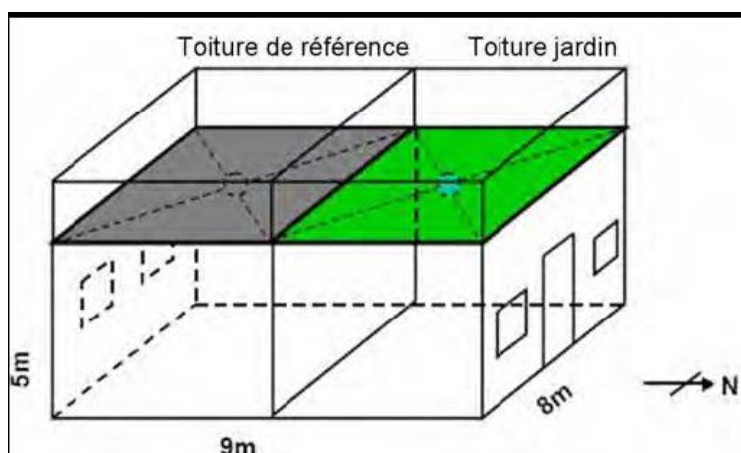


Figure 2.8 : Modèle des deux toitures simulées

(Source : BASS.B, BASKARAN.B, 2001)

Les résultats de cette expérience ont révélé que la membrane de la toiture jardin a subi des variations de température sensiblement plus faibles pendant les mois chauds que celle de la toiture conventionnelle. En été, la variation de température moyenne quotidienne de la toiture jardin était de 6,5°C, contre 46°C, pour la toiture conventionnelle.

Par ailleurs, cette variation de température est restée constamment plus faible que la variation de température moyenne quotidienne de l'air ambiant.

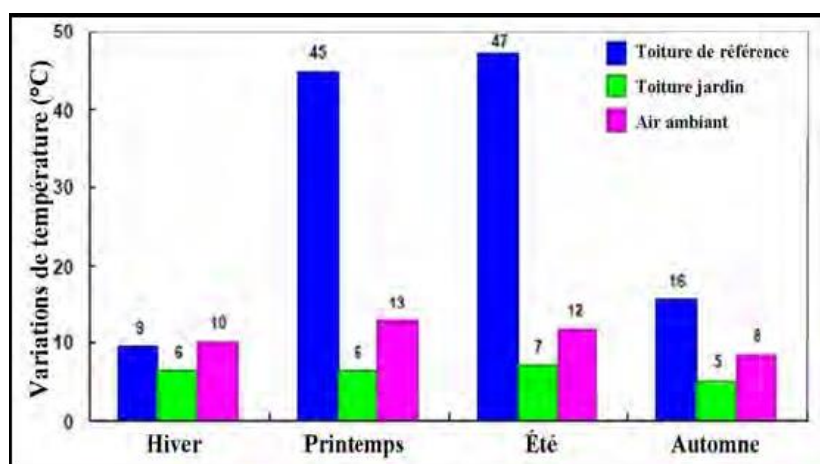


Figure 2.9 : Variations de températures journalières du toit de référence, toit vert et l'air Ambiant, par saison (Nov 2000 à sept 2001)

(BASS.B, BASKARAN.B, 2001)

A l'aide du même logiciel « DAINE », des simulations sur l'impact du toit vert sur les températures intérieures ont indiqué que la consommation d'électricité pour la climatisation pourrait être réduite entre 6 à 18% en Californie.

Selon une étude du ministère canadien de l'environnement, la présence de toitures vertes sur seulement 6% des toits des villes canadiennes ferait descendre la température d'environ 1 à 2°C, ce qui ferait ainsi économiser près de 5% des coûts de climatisation dans tous les

immeubles climatisés des villes. En outre, les toits verts pourraient améliorer la performance thermique d'un bâtiment en bloquant le rayonnement solaire et en réduisant le flux de chaleur. Cette résistance thermique supplémentaire mène à plus de 37% d'économies d'énergie, par année pour un bâtiment non-isolé.

e) Tokyo (japon)

Hoyano a examiné une plantation de gazon sur toit où des températures surfaciques de modèles de toit gazonné (*Zoysia* sauvage) ont été comparées à la température d'une couverture de toit nu. L'étude a été entreprise pendant un an, afin d'observer l'effet du gazon en été et en hiver. En été, les températures surfaciques moyennes des deux types de toit, étaient au-dessus de la température moyenne de l'air ambiant. La température maximale du sol nu était sensiblement plus haute que celle du gazon. Avec un rayonnement d'environ 700 kcal/m²h, la température surfacique des feuilles vertes était environ 8°C au-dessus de la température de l'air². De plus, une membrane de toiture exposée au soleil peut atteindre une température de surface de 65°C alors que la même membrane recouverte de végétaux demeure à une température de 15 à 20°C.

Wong de son côté, a exploré un toit vert en mesurant la température et le flux de chaleur avant et après couverture de végétation. Il a été observé une différence de température maximale de 18°C. De plus, le flux de chaleur était considérablement réduit par l'installation du toit végétalisé (fig. 2.10). D'ailleurs, plus de 60% de gain de chaleur a été arrêté par ce système.

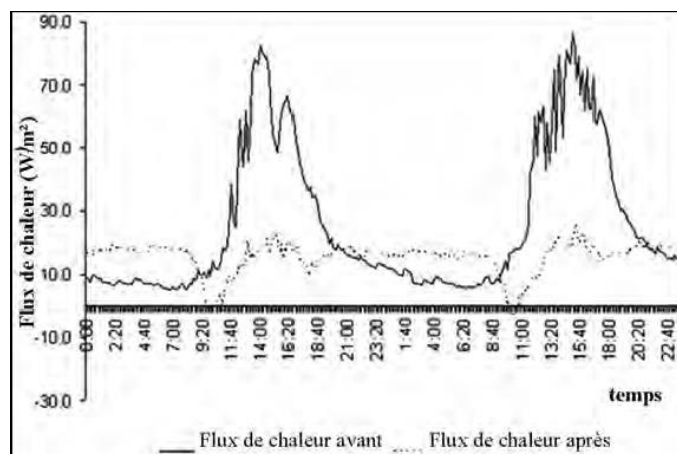


Figure 2.10 : Comparaison du flux de chaleur avant et après végétalisation du toit (Source : Wong, 2006)

f) Philadelphie (USA)

Les mesures de température sur un toit vert à l'institut de Philadelphie ont prouvé que tandis que le toit nu atteignait 32°C, la température sous les plantations du toit vert était moins élevée de 16°C. Un toit vert, particulièrement humide, a la capacité de stocker de grandes quantités de chaleur. Il agira en tant qu'amortisseur entre les fluctuations des températures externes et l'environnement interne, réduisant considérablement la variation quotidienne des températures et réduisant les conditions maximales de chauffage et de refroidissement. Un jour chaud et ensoleillé, l'évapotranspiration d'un toit végétal peut réduire la température du toit. Ceci réduirait la quantité d'écoulement de chaleur dans le bâtiment par le toit et la température d'air externe qui est échangé avec de l'air du bâtiment. Ces températures inférieures de toit pourraient réduire l'énergie utilisée pour la climatisation de 10%.

2.3. Porosité des végétaux :

Les végétaux sont modélisés dans les codes de calcul, en introduisant un terme puits (perte de charge) dans l'équation de la conservation de la quantité du mouvement. Cette perte de charge est définie par une réduction de la vitesse de vent due aux forces de frottement des éléments végétaux.

Cette perte de charge est obtenue en multipliant un coefficient de frottement par la densité d'aire des feuilles, à une hauteur définie par la vitesse moyenne du vent selon une direction.

Bruse et al (2001) prend en compte l'alimentation en eau des racines de la végétation et la résistance et fermeture des stomates dans les formules du modèle ENVI-met, en introduisant les deux indices de feuillages « LAI, leaf area index » et « LAD, leaf area density ($m^2 \cdot m^{-3}$) » dans les formules de turbulence, des flux radiatifs et dans le modèle de végétation.

D'après Bruse, l'indice LAI est seulement valide si le végétal est observé de la perspective d'œil d'oiseaux (Bruse, 2001)

2.4. L'indice LAI :

Le "Leaf Area Index ou l'indice foliaire", est défini comme le rapport de la surface totale de toutes les feuilles d'une plante à la surface de ses feuilles projetée au sol. Sa valeur dépend de l'âge, de la taille et de l'essence du végétal. Dans le cas d'une couronne complètement opaque, la valeur du LAI est donc égale à 1.

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour évaluer la valeur du LAI : l'approche la plus fréquente est celle qui peut déterminer le LAI à partir d'analyse d'images hémisphériques des canopées végétales. Le taux de vides dans la canopée est calculé par l'analyse de la fraction d'espace ou de vides (gap fraction). Ce taux peut être mesuré par le rayonnement solaire transmis par la canopée ou par les tâches solaires projetées au sol.

La photographie hémisphérique prise en positions horizontale et verticale peut être employée pour examiner la variabilité spatiale et temporelle des diverses propriétés structurales des feuillages, telles que l'indice foliaire (LAI), la densité du feuillage (LAD, leaf area density), la taille et l'espacement du feuillage. Cette méthode peut aussi être employée en tant que moyen de mesure de la formation et la fermeture des stomates et de mesure des changements saisonniers des densités de feuillage.

Izard et Mevy (1998) ont proposé une méthode d'analyse de la transmission lumineuse du ciel basée sur la photographie fish-eye et le comptage de pixels sous Photoshop, (figure 2.6).



1

2

Figure 2.11 : (1) Image stéréographique à axe horizontal des platanes du cours Mirabeau à Aix-en-Provence, les canopées ont été sélectionnées en noir. (2) Image stéréographique à axe zénithal d'une treille de vigne près d'Aix-en-Provence, le feuillage est en noir, le nombre de pixels noirs ramené au nombre de pixels de la zone sélectionnée donne le facteur de vision du ciel à travers la treille, que l'on peut assimiler à un facteur de transmission. (Izard et al, 1998).

Le LAI peut aussi se mesurer pour de grandes surfaces végétales homogènes, par des images de satellites qui donnent les valeurs de rayonnement de longueur d'onde situé entre 400

et 700 nm que la canopée absorbe pour la photosynthèse.

Jan Eermak et al (1998) présente des valeurs du LAI pour 3 espèces d'arbres à petites feuilles caduques (Quercus = chêne ; Fraxinus = frêne ; Tilia = tilleul) en fonction de l'âge comme il est décrit dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Valeurs de LAI dans trois forêts plantées de Quercus, Fraxinus et Tilia (Eermak, 1998).

Espèce	Site	Age (ans)	LAI	Référence
Quercus robur	Danemark	40	2,6 - 3,3	Kira 1975
Quercus petraea	Steppe Russie	100	4,5	Rauner1976
Quercus petraea	Danemark	24	3,6	Ladefoged 1963
Fraxinus excelsior	Danemark	29	2,8	Ladefoged 1963
Tilia cordata	Steppe Russie	80	5,3	Rauner1976

Le LAI peut atteindre des valeurs plus élevées comme dans le cas des platanes qui ont un LAI égal à 12.

2.5. Le confort thermique

La compréhension et l'évaluation du confort dans les espaces extérieurs sont nécessaires, car ce dernier représente un élément majeur dans le développement et la conception des villes. La notion de confort est la combinaison de facteurs physiologiques, psychologiques et psychosensoriels qui varient d'un individu à un autre et qui le conduisent à exprimer le bien être de son état. La zone de confort reste très personnelle puisqu'elle dépend des individus de leur accoutumance et de leur état physiologique, cependant l'influence de des facteurs age, sexe et appartenance à un groupe ethnique sur la sensation de confort reste faible (Penicaud, 1978)

Il existe plusieurs types de confort :

- Visuel (dépend du rayonnement solaire de longueur d'onde comprise entre 0,4 μ m et 0,75 μ m)
- Acoustique (souffle du vent à travers les obstacles, bruit d'impact de la pluie)
- Hygrométrique (dépend de la température, humidité et vitesse de l'air, rayonnement de grande longueur d'onde), (Penicaud 1978).

Le confort thermique est abordé par sa propre définition et par celle des différents paramètres qui interviennent dans son évaluation à savoir les facteurs liés à l'individu et ceux liés à son environnement.

De nombreux auteurs ont défini et évoqué la question du confort thermique tel que les frères Olgyay, Givoni en Israël et Vogt et Miller Chagas en France. Bien que la notion de confort thermique présente incontestablement un aspect physique, elle relève aussi de la psychologie et de la sociologie (Cordier et al, 1989), il est en effet le trait d'union entre le monde physique et l'individu, parce que ses lois traduisent les sensations du biologique (le corps) par rapport au non biologique (l'ambiance thermique) (Depecker, 1985). Ce dernier est caractérisé par les paramètres climatiques suivants ; la température d'air, l'humidité de l'air, les précipitations, la pression atmosphérique, le vent, les rayonnements solaire, terrestre et atmosphérique, la pureté de l'air et la nébulosité. La combinaison de ces paramètres climatiques influe sur le confort thermique de l'individu et donc sur l'usage de l'espace.

2.6. Conditions physiologiques :

D'après B. Givoni, le confort thermique se définit comme suit «conditions sous lesquelles les mécanismes autorégulateurs du corps sont dans un état d'activité minimum».

Par son système de thermorégulation, le corps humain adapte les échanges entre la surface du corps et l'ambiance. La notion de confort ou d'inconfort correspond à la sollicitation plus ou moins forte de système, basé sur la modification du flux sanguin et de la transpiration (J R Millet, 1992).

Les échanges thermiques entre le corps et l'ambiance se font par convection entre la surface de la peau, les vêtements et l'air, par radiation entre ces mêmes surfaces et les surfaces environnantes vues et évaporation de la sueur dans l'air ambiant. Les échanges se font aussi par la chaleur évacuée par respiration et par conduction (contact direct des pieds de l'individu avec le sol).

Les échanges par convection s'effectuent en fonction de la différence de température entre corps et l'air ambiant : plus la vitesse de l'air est élevée, plus les échanges thermiques sont importants. On distingue deux types d'échanges respiratoires : les pertes par chaleur latente, par humidification de l'air inspiré et les pertes par chaleur sensible dues au réchauffement de l'air inspiré.

Les échanges par évaporation sont le résultat de la sudation et de la perspiration afin de réguler la température interne : la sueur secrétée à la surface du corps utilise une part de la chaleur métabolique pour s'évaporer. Le transfert par convection est généralement négligé, car

il est admis que les semelles sont suffisamment isolantes et ne permettent qu'un très faible transfert entre le corps humain et l'extérieur.

2.7. Indices évaluant une sensation de confort :

Plusieurs indices thermiques ont été utilisés pour identifier les zones de confort, à base de résultats d'interviews réalisés auprès d'individus se trouvant dans des conditions climatiques extérieures. L'indice de confort thermique dépend de paramètres physiologiques (expérimentation et théorie) ou de conditions physiques in situ (température, vitesse et humidité de l'air, température radiante ...). Dans notre cas, nous allons citer quelques indices qui nous ont paru les plus significatifs en matière de confort thermique

2.7.1 La température effective SET :

Proposé par Houghton et Yaglou en 1923, cette température est la combinaison de la température de l'air et l'humidité relative. Cet indice est directement lié à la sensation éprouvée comme l'indique le tableau ci-dessous (tableau 2.3).

Tableau 2.3 : Les valeurs de l'indice SET et les états physiologiques correspondants (Mc Intyre, 1980).

SET (° C)	Sensation	Etat physiologique d'un individu sédentaire
> 37,5	Très chaud	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
22,2- 25,6	Confortable et acceptable	Vasodilatation
17,5 -22,2	Légèrement frais, légèrement inacceptable	Neutralité
14,5 – 17,5	Frais et inacceptable	Vasoconstriction
10 ,0 – 14,5	Froid et très inacceptable	Frisson

Henri duthu en 1985 citant Liesse définit quatre zones climatiques pour l'organisme humain :

- Une zone froide.
- Une zone d'indifférence, correspondant au confort thermique.
- Une zone chaude avec accroissement du phénomène de transpiration.
- Une zone surchauffée, dans laquelle il n'est possible d'effectuer un travail que limité dans le temps.

La zone de confort thermique peut être définie dans l'étude qui suit et pour les régions concernés par :

- La température de l'air et la température radiante de l'environnement que l'on traduit par la température résultante.
- L'humidité relative de l'air qui commande l'évaporation.
 - Les mouvements de l'air qui, à température donnée accroissent les échanges à travers la peau par convection, et accélèrent l'évaporation de la sueur.

Pour définir la zone de confort thermique, on utilise la notion de *température effective*, c'est-à-dire la température en atmosphère saturé qui produit la même sensation que l'ambiance considéré (exemple : en atmosphère calme, l'ambiance 24,5 °C et 70 % d'humidité relative et l'ambiance 25°C et 50 % d'humidité relative peuvent être caractériser par la même température effective de 25°C.) (Duthu, 1985) .

2.7.2 Effet mécanique du vent :

Les effets mécaniques du vent sur le confort de l'individu apparaissent quand les vitesses de vent dépassent un certain seuil, généralement pris égal à 1,5m/s. L'échelle de Beaufort donne les sensations éprouvées en fonction des rafales de vent à une hauteur de 2 m (tableau 2.4).

Tableau 2.4 : Echelle de beaufort

Force	Vitesse du vent (m/s) à h=2m	Caractéristique du vent
2	1,5 – 3	Les visages ressentent la sensation de vent, les feuilles bruissent.
3	3 – 4,5	Les feuilles et les petits rameaux sont en mouvement permanent. Le vent déploie pleinement les drapeaux. Les vêtements amples battent au vent.
4	4,5 – 7	La poussière et les papiers se soulèvent. Les branches s'agitent, les cheveux sont décoiffés.
5	7 – 9	Les petits arbres avec des feuilles oscillent, la marche est légèrement perturbée.
6	9 – 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 pénible.
7	11 – 14	Les arbres sont totalement en mouvement, on éprouve de grandes difficultés à marcher contre le vent.
8	14 – 17	Les branches d'arbres se cassent. D'une façon générale la progression pédestre est très difficile et dangereuses.
9	17 – 20	Risque d'être violemment projeté a terre sous l'effet des bourrasques.

Plus la vitesse du vent est élevée plus l'individu doit lutter dans son déplacement et plus la gêne occasionnée est grande.

2.7.3 L'indice PET (Physiological Equivalent Temperature) :

Cet indice a été calculé par le modèle de bilan de chaleur MEMI (Munich Energy Balance Model For Individuals) par Hoppe (1978). L'idée fondamentale est de transférer les conditions thermiques extérieures à des conditions fictives intérieures dans lesquelles les mêmes sensations thermiques seront ressenties par les individus (Hoppe, 1999. Taffé, 1997)

Le PET est défini par une température d'air à laquelle le bilan énergétique du corps humain pour les conditions d'intérieur est équilibré pour les mêmes températures internes de

peaux et de taux de sudation que ceux calculés pour les conditions extérieures réelles. D'après les expériences des thermo-physiologues, des valeurs de 23°C du PET peuvent être considérées comme valeurs confortables en milieu extérieur (tableau 2.5).

Tableau 2.5 : Valeurs du PMV et du PET, sensations thermiques de l'environnement thermique et les niveaux de stress thermiques.

PMV	PET	Sensation humaine	Niveau de stress (contrainte thermique)
-3,5	4°C	Très froid	Stress extrême froid
-2,5	8°C	Froid	Stress froid fort
-1,5	13°C	Frais	Stress froid modéré
-0,5	18°C	Légèrement frais	Stress froid léger
0,5	23°C	Confortable	Pas de stress thermique
1,5	29°C	Légèrement chaud	Léger stress chaud
2,5	35°C	Chaud	Stress chaud modéré
3,5	41°C	Très chaud	Stress chaud extrême

Conclusion

Les végétaux par le phénomène de l'évapotranspiration, modifient les températures et l'humidité de l'air. Il était nécessaire qu'on définisse ce paramètre et les lois qui le régissent. Le phénomène de l'évapotranspiration a été expliqué, le taux d'humidité est modifié au niveau du feuillage grâce à ce dernier, le changement du taux d'humidité provenant des arbres et parcs n'affecte pas le confort thermique des usagers même dans un climat chaud et humide. La vitesse du vent est significativement réduite à l'endroit de la couverture végétale, néanmoins l'effet refroidissant végétal est annulé à partir d'une vitesse de 5m/s. L'indice de feuillage ou L.A.I est expliqué plus il est grand plus l'effet d'ombrage du couvert végétal est important cet indice qui peut être calculé à partir de photos aérienne permet de déterminer le taux de végétalisation d'un espace donné. Nous avons détaillé les échanges énergétiques de la végétation et son rôle modérateur du phénomène de l'îlot de chaleur urbain, en citant plusieurs études effectuées sur plusieurs sites [Göteborg (Suède), Saitama (Japon), Berlin (Allemagne)]. Ensuite, nous avons expliqué les effets des facteurs environnementaux sur la croissance des végétaux, tels que la nature des sols, le type et la morphologie de l'espace d'implantation et l'orientation de l'espace.

La technique de la thermographie infrarouge a été expliquée étant donné son efficacité dans la détection des températures de feuillage des végétaux. Cette technique a été définie en donnant quelques exemples de recherches effectuées dans ce domaine. Les végétaux par le phénomène de l'évapotranspiration, modifient les températures et l'humidité de l'air. Il était évident qu'on définisse ce paramètre et les lois qui le régissent. Le dernier effet défini est l'effet des végétaux sur les écoulements aérodynamiques. En milieu urbain, cet effet a fait l'objet de recherches très récentes. L'effet du couvert végétal s'étend même en aval de sa position dans l'espace pour rafraîchir l'air ou changer les incidences du vent. Le confort thermique a été défini à partir des conditions physiologiques, ensuite des indices évaluant ce confort ont été présentés tel que la température effective SET, l'effet mécanique du vent et l'indice PET. Le confort thermique dépend de plusieurs paramètres, certains sont personnels à chaque type d'individu d'ordre physiologique d'autres sont d'ordre physique, nous avons présenté à ce sujet les indices qui nous ont paru les plus représentatifs sur le confort thermique.

Chaque aménagement de toiture végétalisée est unique. Il dépend de l'endroit où il s'implante, de sa localisation géographique, de son utilisation, de son climat, de son orientation, et de sa prise au vent. La toiture végétale donne une bonne isolation qui permet de participer à la protection de l'environnement. En consommant moins d'énergie, on limite les émissions de gaz à effet de serre qui contribuent au réchauffement de la planète.

Le couvert végétal participe aux gains énergétiques des bâtiments par les phénomènes combinés d'évapotranspiration, d'ombrage et de réflexion des rayonnements solaires.

CHAPITRE 3

VEGETALISATION DES TOITURES

Introduction :

La végétalisation des bâtiments se situe entre l'art, l'architecture, l'urbanisme, l'écologie, et concerne la façon de penser la ville et la vie des individus au début du 21^e siècle « *Les regarder apaise l'esprit, vivre en dessous permet un meilleur climat intérieur : les toitures vertes ont beaucoup à offrir* ». Végétaliser les toitures et les façades fait partie des techniques « passives » pour le confort et l'économie d'énergie, ses effets sont intéressants, ce qui traduit le recours de plusieurs pays vers leur application comme une alternative pour introduire la nature et développer une biodiversité au sein des espaces urbains (Clergeau et Blanc 2013). Dans les pays arabes, les terrasses accueillant une gamme variée de fonctions domestiques et sociales sont dotées de différentes plantes aromatiques, ornementales ou médicinales cultivées d'une manière assez simple dans des pots. La finalité de ces aménagements est principalement de filtrer les radiations solaires, ombrer ces espaces en hauteur durant l'été et surtout procurer plus de confort la nuit. Dans les pays nordiques, la végétalisation des toits à double pente est courante pour assurer une meilleure isolation des toits. Les procédés et techniques permettant l'intégration des végétaux sur les couvertures des bâtiments (toitures ou terrasses) variaient d'un pays à un autre. Aujourd'hui, les techniques de réalisation sont modernisées et uniformisées. Les toits horizontaux ou en pente, accessibles ou pas peuvent être recouverts de végétation selon le type créé qui sont : terrasses jardins, toitures végétalisées, jardin sur dalle, toits verts... Nous abordons au niveau de ce chapitre l'évolution des toits végétaux anciens, souvent contraignants à cause de leur poids, vers des systèmes plus légers et efficaces. D'autre part, les différents types et procédés de végétalisation des toits sont définis, ainsi que leurs composantes de base, leurs modes de mise en œuvre et les aspects environnementaux variés qu'ils génèrent. Nous accorderons une attention particulière aux caractéristiques requises pour les matériaux composant le système léger de végétalisation des toits (système extensif) concernant le complexe de culture et surtout le choix de la végétation et son adaptation à différents stress. L'intérêt porté à la végétalisation extensive des toits est dû à l'adaptabilité de ce système à différentes situations : toits en pente, toits plats, construction neuve ou ancienne.

3.1. Définition du toit végétal :

La dénomination des toitures recouvertes de végétaux diffère selon les caractéristiques de la couche de culture, l'espèce végétale ou le type d'entretien. Les Règles Professionnelles pour la Conception et la Réalisation des Terrasses et Toitures distinguent entre les toitures-

terrasses jardins (ressemblant à l'ancien procédé de végétalisation des toitures) et les terrasses ou les toitures végétalisées (nouveau procédé plus léger adaptable à différentes situations).

La définition d'une toiture verte ou végétale est souvent liée à sa composition ou sa fonction.

- Le principe de la toiture végétale (aussi toit vert ou toit végétalisé) consiste à recouvrir de substrat, un toit plat ou à faible pente (jusqu'à 35%, au-delà, on parlera de mur végétalisé).

- L'encyclopédie Larousse, définit la toiture végétalisée comme étant une toiture recouverte d'un tapis végétal pour obtenir une meilleure intégration dans un site.

- «Le toit jardin est n'importe quel espace planté, prévu pour fournir le repos et le plaisir à l'homme ou l'agrément environnemental. Celui-ci est séparé du sol par un bâtiment ou toute autre structure» (Osmundson 2003).

3.2. Les différents procédés de végétalisation des toits :

La végétalisation des toits représente l'action de créer des surfaces végétales sur les toits des bâtiments ou une autre structure. Il existe trois procédés de végétalisation des toits ; la végétalisation intensive, la végétalisation extensive et la végétalisation semi- intensive.

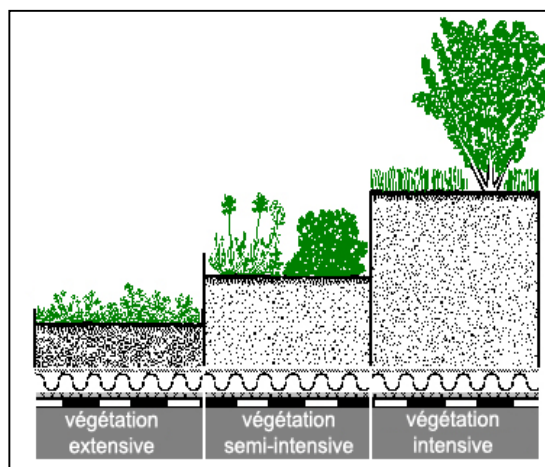


Figure 3.1 : Types de toits végétaux (Lassalle 2006)

Le procédé de végétalisation est choisi par le propriétaire selon l'aspect final désiré et la possibilité de fréquentation de l'espace aménagé. Mais surtout, cela dépend de plusieurs paramètres et contraintes techniques puisque chaque procédé de végétalisation possède des avantages et des inconvénients qui le caractérisent.

3.2.1 La végétalisation intensive :

Les appellations correspondant à ce procédé sont « toiture-terrasse-jardin », « terrasse à végétation intensive » ou « toit jardin ». Ce procédé consiste en la création de jardins ressemblant à ceux aménagés sur le sol de par les différentes espèces végétales autorisées (plantes vivaces, arbres, arbustes, plantes grimpantes, gazon...).

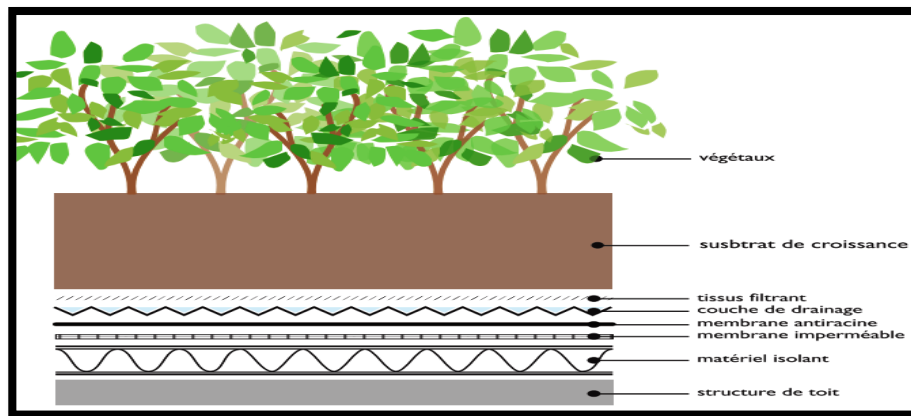


Figure 3.2 : Vue en coupe toit avec végétation intensive (Dunnet et Kingsbury 2008)

La terrasse à végétation intensive est caractérisée par un complexe de culture composé de terre végétale et d'un drainage (Fig. 3.2). D'après les Règles Professionnelles pour la Conception et la Réalisation des Terrasses et Toitures Végétalisées de 2007, la pente du toit ne peut dépasser 5%, la profondeur de la terre végétale est supérieure à 30cm (jusqu'à 1m) pour un poids supérieur à 600 daN/m² (Déca Newton). Celui-ci peut varier selon les sociétés de 290 kg/m² à 1500 kg/m². Les toits jardins ne sont réalisables que sur dalle en béton. Ils entraînent des charges permanentes et des charges d'exploitations très importantes à prendre en compte dès la conception. Par ailleurs, ces jardins sur les toits peuvent être fréquentés et piétinés tout en nécessitant un entretien et un arrosage réguliers. Leur coût de réalisation et d'entretien est donc assez élevé.

3.2.2 La végétalisation extensive :

La végétalisation extensive représente une végétalisation moderne basée sur le développement naturel d'une végétation rustique proche de la nature. Les espèces choisies ne nécessitent pas d'intervention (mousse, succulente, vivace et graminée), et l'apparition des espèces voisines fait partie de la dynamique naturelle du monde végétal.

Ce type de toit végétal (Fig.3.3) utilise au lieu de la terre un compost léger dont la composition diffère selon les sociétés spécialisées dans ce domaine. D'après les Règles

Professionnelles pour la Conception et la Réalisation des Terrasses et Toitures Végétalisées de 2007, son épaisseur varie de 4 et 12 cm et son poids est compris entre 60 et 180 daN/m², ce qui le rend réalisable aussi bien pour les constructions neuves que pour les aménagements sur terrasses existantes. L'épaisseur est suffisante pour le développement d'un couvert végétal permanent de différentes espèces (plantation basse et serrée).

L'arrosage autre que celui naturel n'est pas nécessaire (sauf en régions extrêmement sèches ou arides), favorisant justement des situations de stress qui provoquent des signes d'adaptation de la végétation, recherchés par les concepteurs puisqu'ils procurent différents aspects saisonniers. La végétalisation extensive est adaptable à tous les types de toitures, plate ou en pente (acier, bois ou béton), cependant elle ne tolère qu'un piétinement occasionnel pour l'entretien (annuel) et donc, ce système est adaptable pour les toitures ou les terrasses inaccessibles.

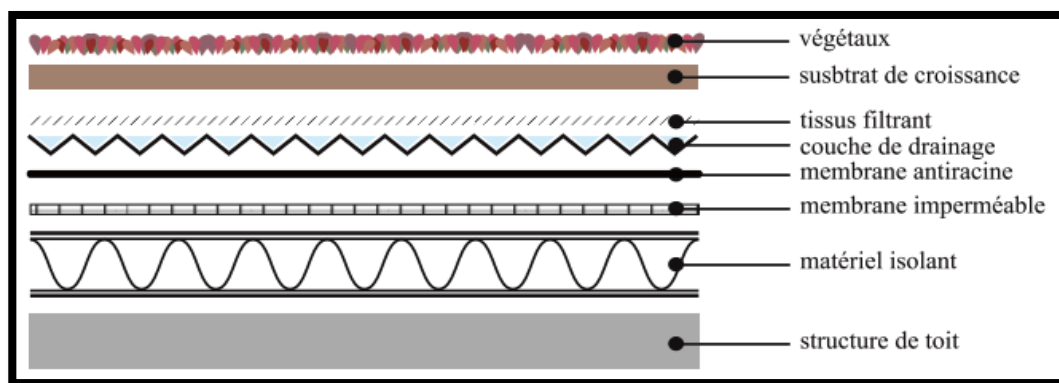


Figure 3.3 : Vue en coupe toit avec végétation extensive (Dunnet et Kingsbury 2008)

3.2.3 La végétalisation semi- intensive :

Appelée aussi selon certaines sociétés « jardin léger », c'est un type qui se situe entre les deux catégories précédentes. Le complexe de culture est plus important que celui de la végétalisation extensive, épaisseur du substrat entre 12 et 30 cm pour un poids compris entre 50 et 350 daN/m² et une pente ne dépassant pas 20%. Ce qui permet le développement d'une végétation plus importante (lavande, romarin, gazon...), dont l'entretien et la fréquence d'arrosage sont plus réguliers mais restent modérés par rapport à la végétalisation intensive.

Ce système peut être appliqué en rénovation en raison de la quantité assez faible de substrat utilisé.

3.3. Historique sur les toits végétaux et leur développement :

L'idée d'introduire de la végétation sur les toitures ne date pas d'aujourd'hui, elle remonte aux jardins suspendus de Sémiramis à Babylone sur le bord de l'Euphrate (actuelle Irak) en 605 av. J.C. Ces jardins furent construits par Nabuchodonosor II afin de rappeler à son épouse Amytis de Mèdes les montagnes boisées de son pays natal. Ils furent longtemps considérés comme l'une des sept merveilles du monde. La figure (3.4) représente une gravure de ces jardins faite par Maarten van Heemskerck au XVI^e siècle.



Figure 3.4 : Jardins suspendus de Babylone

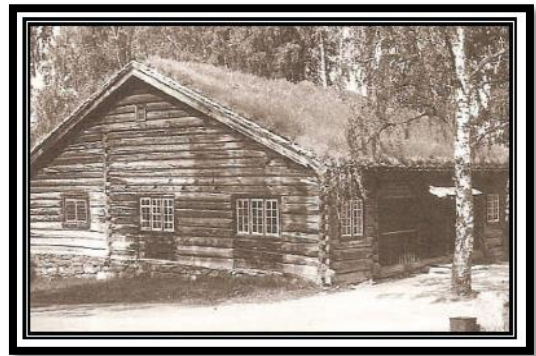


Figure 3.5 : Chalet type Norvégien.

Diodore de Sicile, historien grec, décrit vers 50 av. J.-C. que ces jardins suspendus étaient carrés (120m de côté) et qu'ils se déployaient sur trois terrasses disposées en amphithéâtre. Des galeries voûtées construites sur chaque terrasse supportaient tout le poids des plantations. La galerie supérieure mesurait jusqu'à 25mètres de haut Larcher et Geldon (2000). D'autre part, la surface de ces jardins (1 200m² à 1 800m²) est très discutée. Les toitures plates les constituant sont construites en blocs de pierre, recouvertes de bitume et d'un mètre à deux mètres de terre végétale. On y a planté ; les rosiers, les lilas, le jasmin, les abricotiers, les cerisiers, les grenadiers, les pêchers, les palmiers- dattiers, les peupliers et les pins. La coupe type de ces jardins a été supposée d'après les textes des anciens, et illustrée par J.-P. Salomon.

Plus tard, dans l'Athènes antique et à Rome, on aménageait des jardins sur les toits traditionnellement plats à cause de la concentration urbaine. Cependant, c'est l'Islande qui est à l'origine de la construction type de ces toits. Leur utilisation sur des toitures à doubles pentes a gagné ensuite graduellement la Scandinavie puis le reste de l'Europe (friande, Norvège, Suède...) sous l'appellation de Chalet norvégien. L'utilisation de ces toitures n'a atteint les prairies du Nord d'Amérique qu'au 19^{ème} siècle (Nascimento et Schmid 2008).

Les toits verts ont été utilisés auparavant comme une enveloppe importante du bâtiment, essentiellement pour maintenir un climat confortable à l'intérieur des habitations, en empêchant les déperditions thermiques et les infiltrations de l'eau à l'intérieur du bâtiment. On se protégeait donc des aléas climatiques, vent et froid mais aussi de la chaleur dans les pays tropicaux chauds (Guatemala et la Tanzanie), où l'on utilisait une végétalisation comparable à celle des pays nordiques. Dans d'autres sociétés traditionnelles, que ce soit en Turquie, en Mongolie ou chez certains peuples Amérindiens, la présence voulue ou acceptée de végétaux sur les toitures est courante puisqu'ils contribuent au rafraîchissement des volumes intérieurs en été.

Dès le 17^{ième} siècle en Suède, le botaniste Linné a commencé à décrire des toits couverts de jubarbes à Stockholm. Par ailleurs, l'exposition universelle de Paris de 1867 a marqué un pas important dans l'histoire des terrasses- jardins pour les pays du nord, avec la présentation d'un modèle réduit du toit jardin d'une résidence située à Berlin.

D'après Lassale (2006) Dunnet et Kingsbury (2008), l'utilisation des toitures végétales traditionnelles comme une partie de l'enveloppe du bâtiment a commencé à décroître dans un premier lieu au XIX^e siècle à cause de l'introduction des matériaux de toits conventionnels ; planches de bois, bardeaux de bois, tuiles et plus tard le bitume. Alors que, le développement moderne des toits végétaux a été stimulé en grande partie par le développement des techniques et matériaux de constructions modernes tels que le béton (Dunnet 2005). Ce qui est plus exact, puisque la généralisation du béton armé dans les constructions et l'apparition de toitures plates au 20^{ième} siècle (dans les années 20) avec les cinq points de l'architecture moderne a généralisé l'idée des toitures- terrasses utilitaires notamment les terrasses plantées ou terrasses jardins. Le mouvement moderne en architecture a été décisif avec l'idée de Le Corbusier en 1933 d'inclure une terrasse plantée à chaque bâtiment. Il formulait déjà l'idée de restituer sur les terrasses la parcelle de jardin ôtée au sol par la construction.

Les années 60 sont marquées par l'apparition de parcs publics, avec du gazon et des arbres, construits sur des stationnements souterrains dans un but d'exploitation pour les loisirs. Ces derniers sont réputés ; lourds et coûteux à la réalisation et surtout pour l'entretien. On les associe à la végétalisation intensive des toits.

Ce n'est qu'en 1970, que le Mouvement de l'environnement urbain est né en Allemagne permettant aux toits jardins d'occuper une importance primordiale dans la restitution de la verdure en ville en tant qu'amélioration écologique, créative et fonctionnelle de l'habitat et des lieux de travail(Nascimento et Schmid 2008). L'Allemagne est l'un des premiers pays qui s'est

intéressé au développement des techniques de végétalisation, avec comme objectif, la réduction des coûts de réalisation et d'entretien et la diminution des surcharges sur les structures des bâtiments. Ce qui a entraîné des recherches sur :

- La simplification des procédés et techniques qui ont permis la fabrication de nouveaux matériaux de filtrage, de drainage et de substrats de culture artificiels.
- La phytosociologie, par l'observation de la végétation spontanée qui a envahie précédemment les toitures et les terrasses, ce qui a permis de distinguer les associations végétales naturelles possibles et de comprendre la capacité d'adaptation des végétaux aux aléas climatiques.
- On s'intéressa aussi à la notion « d'entretien extensif » (par opposition à l'entretien intensif): qui consiste à restreindre au maximum les interventions d'entretien en privilégiant les essences indigènes et les plantes adventices (mauvaises herbes). Donc c'est une végétation proche de la nature qu'on recommande pour les nouveaux procédés légers.

L'idée de réduire l'entretien des installations a débouché au milieu des années 80 en Allemagne, sur le développement de techniques permettant l'installation de systèmes de végétalisation autonomes : la végétalisation extensive des toitures était née. Ce concept n'est apparu en France qu'au début des années 90, porté par les industriels de l'étanchéité alors que les premières directives de base de planification, d'exécution et d'entretien des systèmes de végétalisation sont publiées en Allemagne dès 1982 (Boivin 1999) par la FLL (Groupe de recherche sur le développement et la réalisation en paysage).

Ce n'est qu'en 1989 que SOPREMA, société spécialisée dans l'étanchéité, lançait SOPRANATURE, un nouveau concept de toitures végétalisées en France. Dans les autres pays, on a vu une montée en puissance pour le domaine de la végétalisation extensive, dès 1996 au Canada, 1998 au Japon, 2000 au Etats- Unis et 2001 au Royaume-Uni.

3.4. Les composants des toits végétaux et leurs caractéristiques :

Dans le temps, les composantes et les techniques de construction des toits végétaux étaient différentes d'un pays à un autre. En Scandinavie, on clouait sur les solives trois couches de carton goudronné aujourd'hui bitumé, et malgré la pente de 15 à 20° on y met de la terre végétale. Le toit non doté de gouttière est abandonné à son sort, la flore s'y installe ensuite toute seule, adaptée au climat et à l'emplacement(Grun.W.1977). D'après, W.Grun, cette technique un peu plus affinée a été appliquée par des ingénieurs à Allendorf, près de Kassel (Allemagne), où mille toitures- terrasses en béton armé avaient été construites, elles avaient jusqu'à (20 x 20

m) de surface, épaisses de 15 à 20cm, revêtues plus ou moins bien de carton goudronné et recouvertes de 15 à 20cm de terre à la place des filets de camouflage. On semait ensuite du gazon pour cacher ces bâtiments industriels aux avions adverses. Aujourd'hui ces toitures existent toujours et les lieux sont habités.

Dans la tradition des Amérindiens d'Amérique du Nord, la couche protectrice placée entre la partie végétalisée et la charpente afin que cette dernière ne pourrisse pas, doit être en tuiles de bois peu putrescibles, ou le plus souvent en plaques d'écorce de bouleau déroulée. La construction moderne utilise des bâches spéciales en matière plastique avec feutre anti- racine ou des éléments étanches thermo soudés ou collés non métalliques.

Aujourd'hui, les toits verts se réfèrent à la même configuration de base pour tous les types de végétalisation (intensif, semi- intensif ou extensif) et ils se composent essentiellement de deux complexes. Le complexe « étanchéité- isolation » mis en place sur un système pare vapeur qui protège l'élément porteur de l'humidité et des infiltrations de l'eau, et le « complexe de culture » qui comprend la couche de drainage, la couche filtrante et le substrat de culture. La végétation est ensuite installée selon différents modes de mise en œuvre. La figure (3.6) montre la disposition type des principales composantes de la toiture végétalisée.

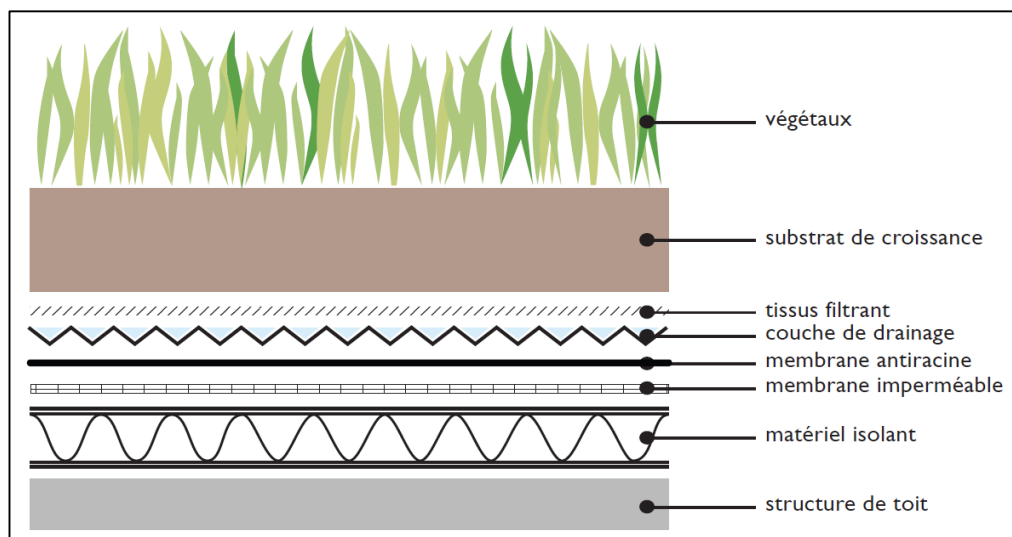


Figure 3.6 : Les composants des toits végétaux (Dany Laroche et al 2004)

La constitution du toit végétal dépend de nombreux paramètres : la localisation, la pente, les charges admissibles par l'élément porteur, les exigences esthétiques, le niveau d'entretien accepté par le maître d'ouvrage.

3.4.1. Le complexe étanchéité- isolation :

3.4.1.1 L'isolation :

L'isolation de l'enveloppe des bâtiments permet d'empêcher la chaleur de sortir en hiver et de rentrer en été. Le principe de l'isolation est de poser une barrière entre l'extérieur et l'intérieur, entre le chaud et le froid grâce à des matériaux ayant un pouvoir conducteur le plus faible possible (conductivité thermique faible). Ajouté à cela une forte densité, une bonne aptitude à accumuler la chaleur, la perméabilité à la vapeur d'eau, la longévité et l'absence de nocivité.

Les isolants choisis pour les toitures végétalisées doivent avoir une résistance à la compression compatible avec les charges prévues. Les panneaux isolants sont mis avant l'étanchéité anti- racine. Ils sont d'abord collés sur l'élément porteur, après que ce dernier soit préparé par une couche d'imprégnation et protégé par un pare- vapeur, afin d'éviter la formation de condensation sous l'isolant.

Pour les pentes $\leq 5\%$, l'utilisation de panneaux isolants en isolation inversée est également admise selon leur Avis Technique ou Document Technique d'Application.

3.4.1.2 L'étanchéité :

L'étanchéité est une protection qui rend le support imperméable aux infiltrations de l'eau à l'intérieur des bâtiments. Pour une toiture ou terrasse recouverte de végétation celle-ci devient plus importante. Depuis 1970, on rajoute des étanchéités anti-racines dont le principe est d'empêcher la pénétration des racines dans la membrane d'étanchéité (Lassale 2006). Celle-ci est appliquée sur toute la surface de la terrasse (parties courantes, zones stériles et les relevés).

La membrane d'étanchéité peut être en bitume, caoutchouc ou PVC, en bâche ou film plastique empêchant la pénétration des racines, en asphalte ou en membranes synthétiques. D'après les règles professionnelles françaises, les revêtements d'étanchéité sont posés soit en adhérence totale (soudés sur toute la surface), soit en semi- indépendance, soit fixés mécaniquement conformément à leur document technique.

Le procédé Sopranature de SOPREMA, applique une étanchéité bi- couches avec une première membrane (bitume thermo- soudable) déroulée et soudée sur une membrane protégeant l'isolant. La deuxième couche d'étanchéité est une membrane à base de bitume et de matière élastomère, à armature de polyester non tissé, comportant des adjuvants anti- racines.

3.5. Complexe de culture :

Le complexe de culture représente l'ensemble des couches explorées par les racines. Il peut être composé de substrat seul lorsque la couche de drainage ne permet pas aux racines de se développer (plaques de polystyrène alvéolé). Comme il peut être composé du substrat et de la couche de drainage si celle-ci est constituée d'agrégats minéraux (argile expansée, pouzzolane...) pouvant être considérés comme un support de culture (Lassale 2006). Il se trouve que pour les toitures à végétalisation extensive, certaines couches peuvent être regroupées selon le choix, en système monocouche, bicouche ou multicouche (tri- couches selon certaines sociétés). Les épaisseurs des composantes sont précisées selon l'étude technique préalable. On distingue les configurations suivantes :

Configuration monocouche : dont un seul matériau assure les fonctions de drainage et de couche de culture, la végétation est directement plantée dans une couche de substrat ; il n'y a donc ni drainage ni rétention d'eau. Dans ce cas, des configurations spécifiques sont requises pour les pentes supérieures à 20 % nécessitant des dispositifs de retenue ou anti-érosion.

Configuration bi -couche : avec mise en place d'un substrat et d'une couche de drainage. La couche filtrante est supprimée et la couche de drainage est renforcée. On peut mettre des éléments pré cultivés (rouleaux ou plaques) directement sur la couche de drainage

Configuration multicouche : caractérisée par la mise en place des différentes couches (drainage, filtre, substrat) que ce soit pour la plantation, pour les rouleaux ou pour les plaques pré cultivées. Parfois les systèmes pré cultivés possèdent des réservoirs d'eau, séparés ou intégrés dans la couche de drainage, dans lesquels les plantes peuvent trouver l'eau nécessaire en période de sécheresse.

3.5.1 Couche de drainage :

La couche de drainage doit assurer l'écoulement rapide des eaux de gravité vers les dispositifs d'évacuation des eaux pluviales, dans le but d'éviter l'asphyxie des racines. Les caractéristiques de cette couche (épaisseur, matériaux...) sont fonction des charges admissibles du toit, de sa pente, des exigences de la végétation en eau (qui détermine la capacité maximale de rétention de l'eau de cette couche). Les drainages utilisés pour les toitures végétalisées sont :

Le drainage en agrégats minéraux poreux : permet de retenir l'eau et d'augmenter la profondeur du complexe de culture. On distingue : la roche volcanique, pouzzolane, la pierre ponce, les granulats issus de recyclage (brique ou tuile concassées et calibrées), billes d'argiles...

Le drainage en agrégats minéraux non poreux : tel que les gravillons roulés. La société Soprema autorise, en cas de réfection d'une toiture terrasse en toiture végétalisée, la réutilisation des gravillons existants à condition que ces derniers soient soumis à la vérification des caractéristiques suivantes : épaisseur comprise entre 3 et 6 cm, granulométrie comprise entre 5 et 25 mm, évacuation correcte de l'eau, la masse volumique prise en compte par défaut est de 20kN/m³

Les matelas de drainage synthétiques : permettent de diminuer le poids du complexe de culture vu leur faible poids. Ce sont des éléments alvéolaires et poreux tels que les panneaux en mousses plastiques, les plaques de polystyrène moulées et alvéolées, les éléments synthétiques pré moulés.

Les éléments drainant à réserve d'eau : tels que les bacs de drainage et de rétention d'eau. Ces bacs en polyéthylène haute densité (PEHD) recyclé, ont une forme qui permet de récupérer l'eau drainée de manière homogène sous toute la surface de la toiture végétalisée et la réserver au fond du bac pour une utilisation ultérieure.

3.5.2 Couche filtrante :

La couche filtrante est liée à la fonction du drainage. C'est un géotextile en non-tissé qui ne constitue pas une barrière aux racines mais qui s'interpose entre les particules fines du substrat et la couche drainante (agrégats minéraux ou matériaux synthétiques) pour éviter son colmatage et faciliter son bon fonctionnement. Par ailleurs, le filtre offre un support mécanique à la fixation des racines. La couche filtrante est généralement réalisée par des nappes de fibres synthétiques (polypropylène ou polyester non- tissé) imputrescibles.

La mise en œuvre de la couche filtrante est coordonnée avec celle de la couche de culture. La couche filtrante n'est obligatoire que lorsque l'épaisseur de la couche de culture représente plus de la moitié de celle de la couche de drainage 30. En général, la couche filtrante est simplement déroulée sur la surface courante et relevée contre les reliefs ou dispositifs de séparation jusqu'au niveau supérieur de la couche de culture.

3.5.3 Substrat de culture :

En général, la terre végétale est constituée essentiellement d'éléments solides minéraux (cailloux, gravier, sable, limon, argile...) et d'éléments organiques tels que l'humus (Faurie et al 2006).

En agriculture, un substrat est un mélange (terre, sable, compost, etc.) sur lequel on fait des semis. C'est le constituant principal des complexes de culture des terrasses et toitures végétalisées, il se substitue à la terre végétale des toitures terrasses jardins. Il doit être léger et résistant au compactage tout en retenant l'eau, il est constitué de terre végétale pauvre, de terreau, du compost léger et d'agrégats de pierres légères et absorbantes dont le diamètre est de 3 à 12 mm (pierre ponce, schiste expansé, pouzzolane, argile expansée, terre cuite concassée et éventuellement récupération de déchets de tuiles broyés...). Ce qui réduit le poids du toit de 80 % en comparaison avec un toit de terre.

L'épaisseur totale du substrat peut ainsi être réduite à seulement 10 cm d'épaisseur, voire moins pour les rouleaux pré végétalisés de sédums. En zone tempérée l'épaisseur minimale convenant aux plantes très résistantes au gel est de 10 cm, sachant que 15 cm sont nécessaires pour bénéficier d'une plus grande variété de plantes. Le tableau (3.1) montre les plages d'épaisseur du substrat pour différents types de végétalisation et leurs épaisseurs moyennes.

Tableau 3.1 : les Plage d'épaisseur du substrat de culture
(Source : François Lassalle.2006)

Forme de végétation	Plage d'épaisseur de complexe de culture (cm)	Epaisseur de complexe de culture (cm)
Végétation intensives	De 30 à 100	50
Végétation semi-intensives	De 15 à 40	25
Végétation extensives	De 5 à 25	10

3.5.3.1 Les propriétés physiques de la couche de culture (substrat) :

Le rôle principal du substrat est d'être un support physique pour la végétation (permettant l'ancrage des racines) en plus de son approvisionnement en nutriments, en eau et en oxygène. Le choix du substrat et de son épaisseur est fonction dans un premier lieu de la capacité portante de la structure et d'autre part, du choix de l'espèce végétale et ses besoins. Pour cela, la texture des substrats est très importante pour les toitures à végétalisation extensive puisque l'intervention post- installation est très réduite. D'autre part, la structure du substrat conditionne l'ensemble des propriétés physiques du sol tel que la porosité, la perméabilité et la

cohésion qui sont importantes puisqu'elles agissent directement sur l'équilibre sol- végétation-climat.

La structure conditionne l'ensemble des phénomènes physiques et biochimiques du sol nécessaires pour le développement des végétaux et pour l'aspect général qu'ils auront. De ces phénomènes on distingue l'aération et la possibilité de respiration des racines, les phénomènes thermiques dans le sol et la rétention par les forces capillaires d'une réserve d'eau utilisables par les plantes en période sèche diminuant de l'effet du stress hydrique affectant les plantes.

3.5.3.2 Les phénomènes physiques dans le sol :

a. L'aération du sol et la respiration des racines :

Selon les Règles françaises de la conception des terrasses et toitures végétalisées, le substrat des toits végétaux doit préserver une teneur en air de 10% à l'état saturé. Cette dernière permet une bonne isolation thermique et elle est fonction de la structure du substrat.

Une bonne porosité et structure du sol créent un volume d'air important dans le sol et donc une bonne aération. L'atmosphère du sol se compose de trois gaz importants : l'oxygène qui doit avoir une teneur totale entre 10 et 20 %, l'Azote entre 78 à 80 %, le dioxyde de carbone entre 0.2 à 3.5 % (Faurie et al 2006). L'oxygène et le dioxyde de carbone, sont soit à l'état libre (gazeux) lorsque la capacité en air est suffisante, soit à l'état dissous dans les solutions du sol. La quantité d'oxygène conditionne à la fois, la respiration des racines et organismes du sol, quant au dioxyde de carbone ; produit de l'activité respiratoire, il est nécessaire aux organismes autotrophes (Bactéries nutritives capables de synthétiser leur matière organique à partir d'éléments minéraux et d'un apport énergétique).

S'il arrive à manquer d'oxygène gazeux (dont la teneur doit être supérieure à 10% (Duchaufour et al 2001), les plantes utilisent l'oxygène dissous dans l'eau, dans la seule condition que l'eau soit constamment renouvelée au contact des racines, puisque la diffusion de l'oxygène dans l'eau est très lente : il s'y épuise facilement. Le seuil critique de l'épuisement de l'oxygène dans le sol est de 5%, d'autre part, des phénomènes de toxicité apparaissent à une teneur en dioxyde de carbone entre 4 à 5%.

b. Rétention de l'eau dans le sol :

Chaque définition d'un complexe de végétalisation des toitures doit indiquer la Capacité Maximale en Eau (CME) exprimée en volume d'eau par m² de toiture. On doit aussi préciser le poids du substrat à sec et le poids à Capacité Maximale en Eau. Que ce soit pour le complexe

entier ou pour chaque élément du complexe de culture séparément. Le poids à (CME) est considéré comme la valeur maximale atteignable sur le toit, et il est pris en compte dans le calcul des charges sur le toit.

La rétention de l'eau dans les substrats des toits, définie par la Capacité maximale en eau (CME), a une importance considérable puisque l'arrosage est limité pour les végétalisations extensives et semi- intensives et donc le substrat doit avoir une grande capacité de rétention de l'eau. Celle-ci est fonction de la texture du sol et de sa microporosité, elle est d'autant plus élevée que le pourcentage en éléments fins augmente.

L'eau retenue occupe les pores fins et très fins là où les forces de capillarité et d'absorption sont suffisamment élevées pour s'opposer aux forces de la gravité. On retrouve alors ; une eau capillaire absorbable par les racines, occupant les pores fins, et une eau liée (eau d'absorption), formant une fine couche à la surface des particules du sol (pores très fins), celle-ci n'est pas utilisable par les racines. Lorsque tous les vides sont remplis, le sol a atteint sa capacité maximum de rétention.

c. Procédé de mise en œuvre du substrat :

Le substrat des végétalisations extensives et semi- intensives peut être:

- > Soit incorporé à un rouleau de végétation ou à une caissette.
- > Soit disposé à l'état meuble ; son épaisseur doit tenir compte d'un tassement ultérieur de 10 à 20%. Celui-ci est réparti manuellement puis nivelé au râteau. La répartition doit être régulière et le nivellement de surface correct en contrôlant en plusieurs points l'épaisseur.

Ce qui peut être atteint en répartissant un nombre précis de sacs se rapportant à une surface donnée. Par ailleurs, le substrat peut aussi être soufflé directement sur le toit.

3.6. Couche végétale :

3.6.1 Critères de choix des végétaux :

Larcher et Gelgon considèrent que la sélection des végétaux pour un aménagement doit prendre en considération l'analyse de certains paramètres. On retrouve: les paramètres édaphiques (structure, texture, pH, profondeur du sol...), les paramètres climatiques (températures, pluviométrie, ensoleillement, luminosité...), la disponibilité spatiale (pour le développement optimal du végétal), mais aussi les caractéristiques botaniques à savoir: les critères propres à la végétation (dimensions, époque de floraison, feuillage, adaptations ...) et le

facteur phytosociologique (association des végétaux, et leur comportement en groupe, ainsi que les ambiances qu'ils génèrent).

Aux paramètres précédents, la végétation accompagnant un bâtiment doit entre autre s'accorder avec le style architectural. Des paysagistes recommandent : Glycine et Hortensias pour les maisons de style art nouveau, des variétés de l'hostas et des rosiers grimpants pour les balcons du dix-neuvième siècle, des fleurs aux couleurs vives pour les bâtiments nouveaux (Furlani 1996).

Par ailleurs, certaines espèces sont recommandées sur les terrasses ou balcons, plantées dans des pots ou directement sur dalle pour la création d'ambiances et de microclimats grâce à leur ombrage (vigne vierge, bougainvillier...) ; la protection contre le vent ou du vis-à-vis qu'elles procurent (*Skimniia japonica*, photinia, *Kalmia*, oranger du Mexique). D'autres espèces sont plantées pour leurs effets aromatiques, médicinales ou condimentaires. La végétation doit s'adapter progressivement à son milieu en étant résistante à différents types de stress (thermique, hydrique et lumineux) pour pouvoir accomplir son rôle esthétique, environnemental et autre. Sachant qu'il est normal que certaines espèces disparaissent partiellement ou totalement au profit d'autres espèces.

La végétalisation intensive des toitures-terrasses tolère des espèces végétales aussi vaste que pour une plantation au sol, suivant l'aménagement désiré (herbes, gazon, fleurs, arbrisseaux, arbustes, arbres, plantes grimpantes...) vu l'épaisseur de la terre végétale mise à leur disposition, celles-ci nécessitent par contre plus d'entretien. Pour des épaisseurs de substrat plus faibles (végétalisation semi-intensive et extensive), le choix diminue et surtout devient plus exigeant et contraignant.

En réalisant ces végétalisations extensives sur les toits, on voudrait que les plantes soient à la fois sauvages et contrôlables. Les espèces les plus combattues, autrefois sur les façades sont aujourd'hui recherchées seulement, elles sont difficiles à pousser aux endroits qu'on choisit (Caille 2002). Les mousses par exemple peuvent vivre dans des milieux très hostiles, leur particularités tient au fait qu'une fois parvenues à dessiccation complète, une simple hydratation peut leur redonner vie, cependant, elles sont rarement visibles en été sous un climat aride.

Pour le climat méditerranéen marqué et pour les terrasses et balcons exposés au sud, il faut choisir selon Furlani (1996) des succulentes, des plantes grasses ou au moins des plantes qui résistent bien aux hautes températures et au vent.

3.6.2 Critères de choix des végétaux pour les systèmes de végétalisation extensifs :

Les espèces recommandées pour les végétalisations extensives doivent répondre à certaines exigences telles que :

- L'aptitude des végétaux à couvrir le sol.
- La capacité d'auto- régénération : qui consiste en l'aptitude des plantes à se multiplier d'elles-mêmes sans intervention ; soit par leurs propres semences ; soit par développement végétatif, et ce dans le but d'obtenir une colonisation naturelle. Des expérimentations sur les succulentes ont montré que des feuilles détachées du plant mère peuvent survivre plus de 120 jours et se former en une nouvelle plante (Gravatt 2003).
- La résistance et l'adaptation aux conditions climatiques les plus stressantes (gel, sécheresse, humidité excessive, hautes températures) constituent les plus importants paramètres pour la végétalisation extensive.
- La capacité de la végétation à se développer dans des épaisseurs de substrat très faibles.
- De faibles exigences sur le plan de la nutrition et d'arrosage.
- La résistance à la pollution, aux parasites et à la concurrence grâce à la sociabilité des végétaux.
- Le paramètre esthétique dépend de l'aspect souhaité (texture ; couleur, changement d'aspect, persistance du feuillage...).
- Les plantes choisies doivent être répandues dans la région pour que leur adaptation au climat soit rapide avec un minimum de maintenance. D'après Lassalle (2006), seule l'expérimentation du terrain réalisée sur trois années au minimum permet de s'assurer de la bonne adaptation des plantes, à partir d'un travail livresque et d'observation prenant en compte les critères précédents.

3.6.3 Les espèces recommandées pour la végétalisation extensive des toits :

Les plantes admises pour la végétalisation extensive et semi- intensive d'après les règles françaises de la conception de ces toitures sont : les succulentes, les graminées, les bulbeuses, les vivaces et les ligneuses.

- Les plantes succulentes : Les succulentes (plein de suc) comptent plus de 12 000 espèces, regroupées dans 70 familles botaniques (Monterusso et al 2005). Elles ont la capacité de stocker facilement de l'eau et des éléments nutritifs dans leurs organes charnus. Par ailleurs, elles comptent plusieurs familles dont les crassulacées, dont le mécanisme de photosynthèse est de

type CAM (Crassulean Acid Metabolism). Celui-ci représente avec la photosynthèse du type C4 des adaptations aux milieux secs.

Les végétaux de type CAM ou plantes grasses (les Cactées, Orchidées, Liliacées, les sedums...) ont une productivité faible puisque le gaz carbonique (CO₂) est fixé et emmagasiné durant la nuit afin de garder les stomates fermées pendant la journée, ce qui permet d'augmenter l'efficacité d'utilisation de l'eau par les plantes (Gravatt 1992). Celles-ci présentent une moins grande perte d'eau par transpiration et un besoin en nutriments faible. Les plantes les plus utilisées pour les climats secs sont du genre Sedum et Sempervivum. Les espèces les plus utilisées en végétalisation de toiture sont les Sedums S. acre, S. album, S. floriferum, S. reflexum, S. sexangulare, S. spurium, S. rupestre.

En général, les végétalisations extensives associent plusieurs espèces de Sedums pour leur aspect changeant et leur coloration originale. Par ailleurs cette dernière s'échelonne du vert tendre au vert foncé à une coloration rouge vif lors de la période estivale ou hivernale due au stress hydrique. Ce dernier peut entraîner éventuellement une rétraction passagère de ces végétaux.

-Les plantes vivaces : (type œillet) sont des espèces qui vivent plusieurs années grâce à leurs organes souterrains qui assurent leur conservation, mais dont les besoins en eau sont plus élevés. La plupart de ces plantes sont rustiques supportant bien le froid et les températures extrêmes. Il y a les plantes basses (les œillets, les campanules...) et les semi arbustives (lavande, santoline, ciste...). La floraison s'échelonne de mars à octobre, certaines vivaces aiment une situation en plein soleil et un sol sec, d'autres préfèrent la mi- ombre, un sol frais et humide. (L'entretien consiste au désherbage, tuteurages pour certaines espèces ; coupe des tiges défleuries ou enlèvement des fleurs passées (Georget 1966).

Les plantes vivaces sont des couvre- sols qui réduisent l'assèchement du sol, elles ont aussi l'avantage de laisser peu de place aux mauvaises herbes et de réduire l'entretien. Parmi les vivaces, il en existe dont les tiges herbacées disparaissent l'hiver, époque de repos de la plante, pour repousser au printemps (Pivoines, Delphiniums, Ancolies...), d'autres sont à tiges et feuilles persistantes toute l'année, leur floraison printanière ou estivale étant souvent très belle (Ibérus, Hélianthe, Corbeilles d'or...).

-Plantes bulbeuses : (type iris), les espèces bulbeuses sont très nombreuses, elles agrémentent les pelouses en résistant aux hivers rudes.

- Les graminées vivaces ou xérophiles : (type fétuque : ce sont des graminées qui forme la base des prairies naturelles) elles se multiplient facilement grâce à la production de graines et ont un faible besoin en eau avec une floraison s'échelonnant de mars à octobre. Quelques-unes prospèrent au soleil, d'autres à mi- ombre et la plupart ont un feuillage glauque (couleur vert bleuâtre), très décoratif, des fleurs et des graines curieuses. Les graminées utilisées par le procédé MEPLE sont : *Fetusca glauca*, *Stipa tenuifolia*, *Fetusca scoparia*, *Dechampsiaflexusa*.

-Les plantes ligneuses : Pour les toitures à végétation extensive et semi- intensive, les Règles françaises pour la végétalisation des toits (2007) conseillent les ligneuses à petit développement qui peuvent être adjointes selon l'effet désiré et le programme d'entretien accepté par le maître d'ouvrage.

3.6.4 Les espèces recommandées pour les climats chauds :

Pour la végétalisation intensive, le choix des espèces végétales ne pose pas de problème puisqu'on procure à la végétation une profondeur de terre végétale suffisante et un arrosage copieux permettant son développement quel que soit le climat. Cependant, mieux vaut choisir des espèces régionales pour que leur développement puisse être meilleur.

Pour la végétalisation extensive les caractéristiques du climat, les faibles épaisseurs de substrat et la restriction ou l'absence d'arrosage réduisent la palette végétale. Des associations type ont été fixées par la FLL (Groupe de recherche sur le développement et la réalisation en paysage), pour les régions à climat continental. Ces compositions floristiques pour les végétalisations extensives ont été déduites de l'analyse et de l'observation de la végétation spontanée qui a recouvert certaines toitures durant des années. Le choix des végétaux et des associations possibles s'accorde avec les épaisseurs du complexe de culture selon les besoins des végétaux mais aussi selon le climat.

Tableau 3.2 : Types d'associations des végétaux et l'épaisseur du substrat correspondante

(Source. François Lassalle, 2006).

Association type	Epaisseur indicative du complexe de culture
Mousse-sedum	6 à 9 cm
Mousse-sedum-vivaces	9 à 10 cm
Sedum-graminées-vivaces	12à 16 cm
Graminées-vivaces (pelouse sèche)	≥ 15 cm

Lassalle (2006), pense qu'une vigilance doit être portée pour le climat méditerranéen non seulement pour le choix de la végétation mais aussi pour les complexes de culture : une situation très exposée, avec des périodes sèches d'une durée de cinq à six semaines réduira la palette végétale aux vivaces vraiment xérophile/ et aux succulentes. Les régions à précipitations rares pendant la saison chaude, le littoral méditerranéen par exemple, présentent les contraintes les plus fortes pour les végétalisations extensives de toiture et donc la conception et le choix des matériaux et des végétaux, prennent une importance particulière. Une irrigation de sauvegarde peut être préconisée, mais elle doit rester aussi rare que possible (un arrosage copieux toutes les trois ou quatre semaines). Les plantes préconisées pour ces régions sont, les succulentes et les bulbeuses, alors que les plantes ligneuses et les mousses ne sont pas résistantes quelques soient le volume de rétention en eau mis à leur disposition. Quant aux graminées qui sont très résistantes à la sécheresse comme (*Koeleria glauca*, *Sesleria glauca* ou *Stipa pennata*) trouvent leur limite de résistance. Il se trouve que même parmi les succulentes, la sélection est limitée sous ce climat : *Sedum acre*, *Sedum spurium* et d'autres variétés ne résistent pas toujours aux longues semaines de canicule de l'été méditerranéen.

Dans les régions plus chaudes encore (Californie, Afrique...), un arrosage d'appoint avec une fréquence assez faible est recommandé pour que de telles végétalisations puissent encore être considérées comme extensives : ce sont des « végétalisations semi- extensives » ou bien des « végétalisations extensives assistées » (Lassalle 2006).

3.6.5 Capacité d'adaptation de la végétation aux différents stress :

Selon les nouveaux procédés de végétalisation des toits, la végétation exposée aux conditions climatiques extrêmes doit survivre d'une manière autonome à des situations stressantes variées. Le stress biologique implique les effets hostiles s'exerçant sur un organisme. C'est une influence hostile qui tend à empêcher un système normal de fonctionner. Les plantes subissent différents types de stress (hydrique, thermique et lumineux), et afin d'éviter leurs effets néfastes, les végétaux présentent des adaptations différentes (Jones 2003).

Celles-ci permettent aux plantes d'éviter le stress en accomplissant leur croissance en période de moindre stress ; elles lui échappent comme les plantes du désert. Ou bien, elles le tolèrent par des mécanismes soit ; d'acclimatation après exposition à une situation stressante grâce à des modifications physiologiques non hérissables (non transmissible à la génération suivante) ; soit d'adaptation par des modifications génétiques hérissables tel que le métabolisme

acide des plantes crassulacées (CAM) (Crassulacen Acid Metabilism), d'où leur préférence pour les toitures végétalisées.

Nous allons aborder le volet relatif au stress thermique (température élevée) et au stress hydrique (manque d'eau) que les plantes ont à subir en période estivale. Par ailleurs, ces deux stress agissent sur la transpiration des plantes et la photosynthèse ; deux phénomènes vitaux pour les plantes.

3.6.5.1 La transpiration en situation normale :

L'eau représente 70 à 90% du contenu cellulaire primaire de la plupart des végétaux (Dajoz 2006). 90% de ce dernier est renfermé dans les feuilles jeunes et 50% pour le tronc d'un arbre caduc en saison estivale (Leget et Crawford 1967). L'eau est absorbée le plus souvent par les racines, mais il arrive parfois que les stomates captent de l'humidité. Cependant, ça marche en général en sens inverse par le rejet de vapeur d'eau grâce à la respiration et l'évapotranspiration qui représente la quantité d'eau totale transférée par l'évaporation au niveau du sol et par la transpiration des plantes, elle correspond au flux de chaleur latente dans le bilan de l'énergie.

Les espèces végétales varient en fonction de leur besoin en eau et le milieu dans lequel elles vivent. Sachant que, la plante échange l'eau avec son milieu environnant grâce à la transpiration, il se trouve que le taux de transpiration de la plante est étroitement relié à la disponibilité de l'eau dans le sol et à la température de l'air ambiant.

La transpiration est un processus dû à l'évaporation de l'eau par les feuilles et la reprise qui y correspond en la puisant du sol. Par ailleurs, les plantes perdent plus d'eau qu'elles n'en puisent, puisque pour former 100g de cellulose elles puisent 55g d'eau et perdent par transpiration 100 000 g d'eau, ce qui participe à rafraîchir l'air ambiant. La transpiration se produit principalement au niveau des stomates et est régulée par l'ouverture et la fermeture de ces derniers.

La transpiration a trois rôles importants : elle permet de rafraîchir les plantes en diminuant la température surfacique de l'épiderme, elle permet le transfert des sels minéraux jusqu'aux feuilles et le plus important est la montée de la sève. La transpiration est donc régulée

par la quantité d'eau mise à la disposition des végétaux et par l'ouverture et la fermeture des stomates.

3.6.5.2 Stress au déficit hydrique (sécheresse) :

Le stress hydrique représente un déficit en eau constituant une menace à la survie des plantes. Lorsque les plantes sont exposées à des conditions hydriques extrêmes, dues par exemple au manque d'eau dans le sol et à l'augmentation de la température ambiante, elles s'adaptent par des stratagèmes morphologiques, anatomiques et physiologiques.

Lorsque l'air chaud et sec souffle sur une plante, il provoque une différence de pression de vapeur entre la feuille et l'air environnant augmentant l'intensité de la transpiration. La plante doit se protéger des pertes excessives d'eau lorsqu'il arrive à en manquer dans le sol, elle doit survivre à une dessiccation qui n'endommage pas son protoplasme et doit conserver sa capacité de reprendre une croissance normale une fois réhydratée.

En général, les végétaux présentent différentes adaptations à la sécheresse que ce soit par la taille de la plante (forme en coussinet, en touffe ou en boule), le développement des racines (en profondeur lorsque le sol le permet ou latéralement pour de faibles épaisseurs du sol). Les feuilles présentent les adaptations les plus complètes dans le but de réduire la transpiration excessive de par : la taille, le parenchyme, la cuticule ou par les stomates.

Les plantes grasses, xérophytes ou succulentes telles que : les agaves, Joubarbes et Sedums sont caractérisés par des adaptations leurs permettant de capter le maximum d'eau de la stocker et de la conserver.

- L'absorption de l'eau se fait rapidement et massivement en surface ou en profondeur au moment des averses par un appareil racinaire très important présentant un réseau de racines superficielles proche de la surface.

- Le stockage de l'eau se fait par les organes aériens ou même dans les racines de ces plantes qui sont gorgées d'eau grâce à un parenchyme spécial abondant dans les tiges et les feuilles (le parenchyme aquifère) permettant le stockage de l'eau. Ce parenchyme est composé de grandes cellules à parois minces qui contiennent des vacuoles très développées, leur pression osmotique est assez faible, puisqu'elle est comprise entre 5 et 10 bars (Faurie et al 2006), l'eau est surtout retenue par imbibition de mucilages.

- La conservation de l'eau se fait en général par la diminution des pertes d'eau par transpiration, grâce à des adaptations des feuilles telles que : la réduction de la surface de contact avec le

milieu ambiant ; le phénomène de dimorphisme foliaire de certaines plantes qui gardent de petites feuilles adaptées à la saison sèche et perdent leurs larges feuilles d'hiver -tel que *Ononis*, *Nitraria*- (De lemps 1970). Ajouté à cela la cuticule des feuilles qui devient en saison sèche épaisse, dure, souvent imprégnée de cire, de gomme ou de résine ce qui la rend imperméable et s'oppose aux pertes d'eau par évaporation. Les stomates sont par ailleurs réduits et enfoncés dans l'épiderme épais ou bien masqués par des poils (feuilles pubescentes) pour répondre au stress hydrique

Les stomates des plantes qui sont souvent exposées au stress, s'ouvrent tôt le matin avec les premiers rayons du soleil, assimilent le maximum de CO₂ avant que la chaleur n'augmente et que le sol ne s'assèche, elles se ferment donc et ne s'ouvrent que peu avant le coucher du soleil⁷⁶ (cas des Crassulacées recommandées pour les toitures végétalisées). D'autre part, Mansfield et Athinson (1990) ont démontré que les stomates se ferment aussi avant la diminution de la turgescence des cellules du mésophylle foliaire, et avant eux, Blackman et Davies (1985) et Zhang et Davies (1987) ont prouvé que c'est la racine qui transmet l'information d'un déficit hydrique aux stomates grâce à des hormones telles que l'ARA (Acide abscissique) (Hopkins 2003).

3.6.5.3 Stress thermique : Résistance aux températures élevées

Chaque plante possède un optimum de température lui permettant d'effectuer sa croissance et les fonctions primaires à son développement telles que l'assimilation chlorophyllienne et la transpiration. Lorsque la température dépasse le maximum ou le minimum toléré on dit qu'elle est exposée au stress thermique qui parfois annule la croissance. Ce stress diffère selon les saisons, on distingue en hiver le stress au froid (températures basses) et au gel, et en été le stress aux températures élevées qui est souvent accompagné d'un stress hydrique (sécheresse). Sachant que, les variations de températures ne sont pas toujours néfastes puisque certaines plantes demandant un rythme diurne ou annuel de température avec des amplitudes thermiques marquées qui leur permettent de fructifier (De lemps 1970)

Les plantes qui doivent subir des températures élevées avec des manques d'eau sont variées. Il y a les éphémérophytes, les reviviscentes et les xérophytes qui résistent à la déshydratation et dont on distingue : les sclérophytes qui ne font aucune réserve d'eau (Thym, Romarin, l'Olivier, le Chêne), et les succulentes (plantes grasses) caractérisées par des organes aériens gorgés d'eau.

Les plantes s'adaptent au mieux aux températures saisonnières, hivernales et estivales par différents stratagèmes ce qui leur donne des aspects saisonniers différents. L'adaptation saisonnière commence soit en automne soit au printemps quand les végétaux entrent en dormance pour se protéger, grâce à une forme de vie en ralentie ou une suspension de la croissance. Selon Faune et al, (2006) elle est due essentiellement au photopériodisme mais aussi à la variation de température.

Résistance aux températures élevées : En été les plantes subissent l'air chaud et sec, et pour se protéger de la chaleur elles adoptent pratiquement les mêmes stratagèmes que ceux utilisés contre la sécheresse à des différences près. Certaines plantes par exemple, produisent de petites feuilles alors que d'autres font opter à leurs feuilles une position verticale parallèle aux rayons du soleil, ce qui limite leur échauffement (Eucalyptus, ...), d'autres feuilles s'enroulent le long de leur axe (Romarin, Thym). Certaines sont protégées par une pilosité abondante qui immobilise l'air chaud et sec et protège les stomates enfoncés dans l'épiderme (Olivier, ce qui diminue la transpiration. Les surfaces des feuilles peuvent être cireuses réfléchissant la lumière et réduisant l'absorption d'énergie. Certaines plantes (les sciérophytes) produisent par des glandes, des essences volatiles épidermiques dont l'évaporation produit un refroidissement ralentissant la transpiration (les Cistacées, les Labiées, ...).

Toutes ces modifications permettent de réduire les pertes par transpiration qui habituellement joue un rôle important dans la dissipation de la chaleur par les feuilles. Peu de plantes vasculaires sont capables de survivre à des températures foliaires excédant 50°C ou 55°C. Le maximum de tolérance connu chez les plantes vasculaires s'observe chez les agaves (plantes grasses) et les cactus (Hopkins 2003).

3.6.6 Modes de mise en œuvre de la végétation sur les toits :

Le mode de mise en œuvre pour la végétation extensive et semi intensive est faite selon différents procédés dont chacun possède des avantages et des inconvénients. Ces procédés sont :

3.6.6.1. Le semis et le bouturage :

Le bouturage représente la mise en terre de fragments de tiges qui racinent rapidement dès l'instant que le sol n'est pas totalement sec. Ce mode de mise en oeuvre correspond aux espèces à feuilles larges (Sedum spurium, Sedum floriferum ...). Les densités utilisées varient entre 10 et 60 fragments/m² en fonction de la proportion de couverture recherchée pour chaque espèce par rapport aux autres (Lassalle 2006).

Le semis représente la manière de semer, c'est-à-dire de propager une espèce, une variété ou un cultivar à partir de semences (Come et Corbineau 2006). Le semis peut aussi concerner l'épandage de fragments de tiges ou de feuilles de Sedums (*Sedum album*, *Sedum sexangulare*, *Sedum. reflexum* ...). Le semis peut être manuel ou hydraulique pour de grandes surfaces. Ce dernier consiste à projeter sur la couche de culture un mélange comprenant : semences et/ou fragments de Sedum, de l'engrais, un fixateur, des éléments minéraux et organiques et de l'eau.

3.6.6.2. La plantation :

Consiste à répartir sur le substrat des plantes pré cultivées dans des contenants (plaques, godets, micro mottes ...) suivant l'épaisseur correspondante et le Plan de plantation. Elle est utilisée pour certaines espèces (vivaces multipliées par divisions de touffes, rhizomateuses comme l'iris...). Selon les règles françaises de végétalisation des toits, la plantation de micro mottes s'effectue à raison de 15 à 25 unités/m² et les godets par 12 à 15 unités/m². Pour le procédé Sopranature, la répartition usuelle des plantes se situe entre 12 et 16 plantes par m² pour les petites plantes (vivaces, graminées, Sedum), et 2 à 4 plantes par m² pour les arbustes.

Conclusion :

Le concept de végétalisation des toits n'est pas nouveau, les peuples anciens maîtrisaient des techniques leur permettant de faire pousser des végétaux sur les toits. Les contraintes de forte charge et d'entretien des systèmes intensifs ont favorisé le développement de nouveaux systèmes de végétalisation des toits, plus légers et efficaces, appelés toitures à végétation extensive. Cette dernière s'est développée grâce à la création d'étanchéité anti- racines, de substrats et systèmes de drainages à grande capacité de rétention de l'eau. Ces derniers sont nécessaires pour la survie des plantes. Malgré cela, les espèces choisies pour la végétalisation extensive doivent être, des plus résistantes possible aux situations stressantes rencontrées sur les toits. Les plantes succulentes de type CAM (crassulacées) sont vraisemblablement les seules adaptables pour les végétalisations extensives dans les régions à climat chaud et sec puisqu'elles ne nécessitent pas d'entretien régulier et peuvent résister à la sécheresse et aux fortes chaleurs en réduisant fortement leur transpiration en été. Ceci n'entrave en rien leur rôle esthétique, puisque les plantes succulentes peuvent engendrer, grâce à des adaptations anatomiques et physiologiques, des aspects changeants et originaux recherchés au fil des saisons dans l'environnement neutre et inerte des centres urbains. Le développement des matériaux composants les systèmes de végétalisation extensive des toits a comblé les lacunes des systèmes de végétalisation intensive.

L'évapotranspiration des plantes est capable de réduire plus efficacement les températures de l'air que les surfaces absorbant une faible quantité de radiations solaires et ne transpirant pas (Alexandri et Jones 2006). L'humidité du substrat peut procurer une meilleure isolation du toit toute la journée (Wong et al 2003). L'importance de l'épaisseur du substrat pour les toits végétaux est basée sur son inertie thermique, une faible épaisseur n'a pas la capacité de maintenir des températures intérieures basse pour une longue période (Theodosiou 2003). Ce qui nous amène à avancer que des espèces à indice foliaire important doivent être privilégiées ainsi qu'un accès à l'eau des plantes formant le couvert végétal en toiture.

CHAPITRE 4

ELEMENTS DE CLIMATOLOGIE ET LEURS CARACTERISTIQUES

Introduction :

Notre échelle d'intervention étant au niveau microclimatique urbain aussi Le microclimat nécessite obligatoirement de le comprendre d'un point de vue étymologique et technique, de connaître les éléments qui le forment et qui sont capables de le produire, ses dimensions ainsi que les paramètres physiques les plus déterminants. La morphologie urbaine est l'un des éléments que le concepteur essaie de maîtriser afin de minimiser les effets négatifs du climat sur le confort thermique des individus ou même d'en créer d'autres, à travers une morphologie "climatique" contribuant relativement confort de l'utilisateur des espaces urbains.

Comme le climat est toujours exprimé à une échelle bien déterminée (Belchun B., 1993), dans ce chapitre les phénomènes physiques d'origine solaire et aéraulique conjugués aux formes des espaces extérieurs et leurs composants au voisinage de la couche d'air la plus proche du sol sont abordés.

4.1. Climat et climatologie :

Pour les météorologistes la climatologie dans son sens restrictif est l'étude des statistiques relatives aux éléments du climat. De ce fait, cette étude nécessite dans sa partie la plus grande un processus de stockage de données. Elle est aussi la science qui donne une description systématique et une interprétation de la répartition des climats à travers le monde.

Adopté par les Grecs, étymologiquement le vocable "climat" désigne l'angle (l'inclinaison) entre les rayons solaires et la surface du globe. En termes généraux, c'est l'ensemble des états successifs et ordinaires de l'atmosphère au-dessus d'un lieu donné. De ce fait, les dimensions du climat sont alors spatiales (dont il se manifeste à plusieurs échelles où à chacune d'elles apparaissent des problèmes bien particuliers) ainsi que temporelles (Durand-Dastes F. (2000)).

4.2. Les échelles du climat :

En détaillant la description du climat on réduit automatiquement son espace ainsi que la possibilité de son extension et vice versa. En définissant les climats zonaux, généraux, régionaux, locaux, et enfin les macro méso et microclimats, nous serons en mesure de passer

des climats à faible compréhension et à forte extension aux climats à forte compréhension et à faible extension (Durand-Dastes F. (2000)).

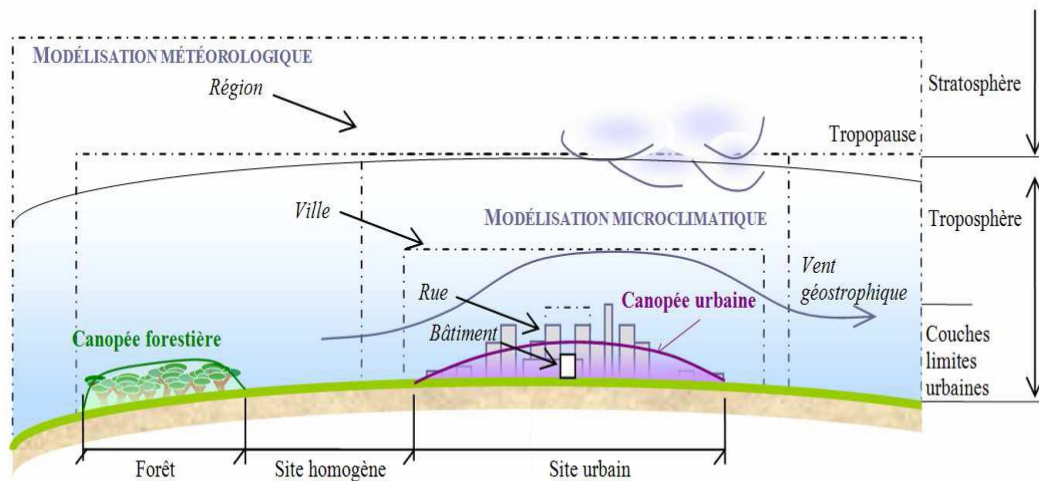


Figure 4.1 : Les échelles climatiques

4.2.1. Les climats zonaux :

Cette catégorie représente l'échelle la plus grande. La différenciation entre les zones qui sont par définition des régions du globe comprises entre deux parallèles, est soulignée d'ailleurs par rapport à la hauteur du soleil dans le ciel. On note ainsi :

- La séparation autour de la latitude 40° environ qui différencie les régions ayant dans l'année un bilan thermique positif et celles où ce bilan est négatif.
- Le contraste des régions de basse latitude dont la différenciation des saisons est principalement d'ordre pluviométrique car le refroidissement hivernal est faible, aux hautes latitudes dans lesquelles les saisons sont plutôt thermiques.

4.2.2 Les climats généraux :

Chacune des grandes zones susmentionnées est occupée par deux ou trois grands climats généraux qui s'étalent sur des dizaines de millions de kilomètres carrés et sont déterminés en plus de la latitude par leur position par rapport aux grandes masses marines et continentales ainsi qu'aux grands systèmes de courants atmosphériques. A cette échelle apparaissent de l'unité telle que les climats équatoriaux, tempérés, arides.

4.2.3 Les climats régionaux :

Les caractères des climats généraux auxquels les climats régionaux sont intégrés ainsi que les facteurs d'influence d'ordre restreint tels que l'aspect de la circulation atmosphérique (extension estivale des anticyclones subtropicaux vers les pôles, etc.) ou l'intervention des grands caractères du relief, ont une grande influence sur cette échelle climatique. L'étendue de ces climats englobe plusieurs centaines de milliers de kilomètres carrés voire quelques millions de kilomètres carrés.

4.2.4 Les climats locaux :

Sont d'une variation s'étendant sur l'échelle comprise entre quelques dizaines à quelques centaines de mètres. Leur dépendance est relative en premier lieu aux climats régionaux auxquels ils font allégeance puis aux reliefs, à la nature du sol, aux couverts végétaux, aux bilans radiatifs locaux et aux mouvements locaux de l'air. Comme c'est le cas pour une ville, un littoral marin, une forêt ou un versant.

4.2.5 Les microclimats :

Ils changent pour la simple distance de quelques mètres voire même pour quelques dizaines de centimètres. Des caractères très étroits qui agissent sur le bilan radiatif et les mouvements de l'air à très faible ampleur, dépend cette échelle du climat. C'est ce qui différencie le microclimat de deux étages d'une même forêt à savoir la couronne d'arbres et le sous-bois ou les niveaux haut et bas d'un versant ou même un espace minéral et une rue canyon dans une ville, etc.

4. 3. Répartition des climats à l'échelle mondiale :

L'accent dans cette répartition est principalement mis sur les climats régionaux car à l'échelle planétaire ce sont eux les plus significatifs et les plus couverts par les études (Durand-Dastes F. (2000)).

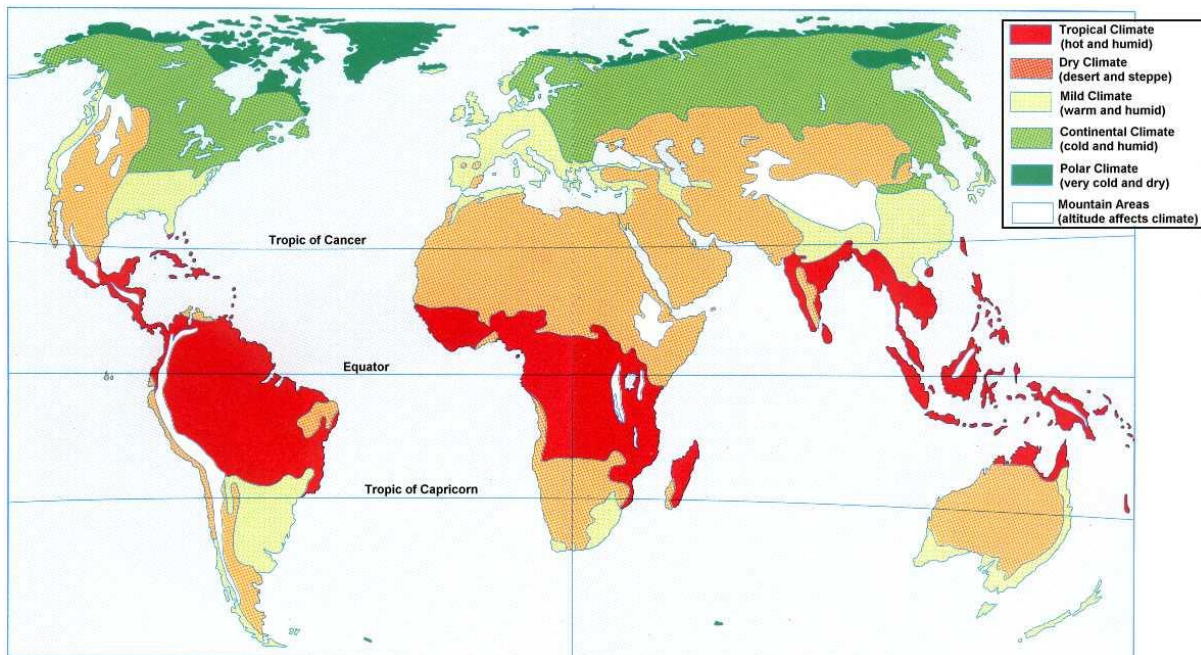


Figure 4.2 Zones climatiques dans le monde

Source : Hui Sam C. M., 2001.

4.3.1. Les climats équatoriaux toujours humides :

Ce sont des climats sans saisons ou presque, qui règnent le long de l'équateur sur une bande très courte. Ils sont caractérisés par des températures et des humidités relatives très régulières mais des pluies continûment abondantes sans qu'elles n'atteignent les valeurs extrêmement élevées observées à travers le monde. Un rapport d'un quart voire même d'un cinquième est celui entre le mois le moins pluvieux et le plus arrosé. Ce dernier se positionne très souvent autour des équinoxes dans cette partie du monde où on n'observe jamais de mois sec.

4.3.2. Les climats tropicaux :

Les caractères principaux de ces climats sont l'opposition entre une saison sèche et une saison humide (l'été) ainsi qu'un hiver faiblement souligné. On peut distinguer trois subdivisions du climat tropical qui ont tous un été de caractères commun et typique, mais qui se nuancent suivant les caractères du reste de l'année.

- Climat tropical des très basses latitudes où se succèdent trois types de saisons :

saison sèche relativement fraîche (températures moyennes autour de 30 °C, peu de pluie, humidité relative basse); saison sèche et très chaude (températures moyennes avoisinant 40 °C, pas de pluie et humidité relative un peu plus forte); saison pluvieuse (moyenne de température de 30 °C, beaucoup de pluie avec humidité relative forte). Bamako est l'un des exemples de ce type qu'on peut aussi trouver dans les basses latitudes des parties occidentales des continents et aussi dans des latitudes plus hautes sur les façades orientales.

- Climat tropical de type nord de l'Inde où il existe une saison sèche un peu plus fraîche, par contre le reste de l'année est semblable au type précédent. Allahabad est un exemple représentatif de ce type de climat.
- Climat tropical de type chinois sans aucun mois sec, il comprend un hiver très bien marqué, suivi d'un printemps pluvieux et court, puis d'un été chaud et humide et enfin un automne moins arrosé que le printemps. C'est un type de transition qui est difficile à classer qu'on trouve sur les côtes orientales des continents.

4.3.3. Les climats arides :

La longue période de huit à neuf mois au minimum dont le déficit en eau (évapotranspiration potentielle supérieure aux précipitations) pouvant affecter toute l'année constitue le dénominateur commun des climats arides. Toutefois, on différencie entre les climats arides chauds des basses latitudes où la moyenne des températures hivernales demeure autour de 10 °C et les climats à hiver net (température négative) des latitudes moyennes de l'hémisphère Nord à l'intérieur des continents, comme il devient aussi nécessaire de faire la différence entre les climats nettement arides de ceux qui constituent des passages entre climats arides et subarides.

4.3.4. Les climats tempérés :

Ce sont les climats où l'amplitude thermique est modérée entre l'hiver et l'été. Ce sont aussi des climats non arides où le mois le plus froid a une moyenne thermique supérieure à -3 °C et le mois le plus chaud une moyenne comprise entre 10 et 22 °C mais qui peut être franchie comme c'est le cas au Maghreb ou dans les marges du côté équatorial. La définition de ce climat est plutôt thermique mais les pluies jouent un rôle important et procurent des différences en son sein. Comme c'est d'ailleurs le cas du climat méditerranéen où succèdent quatre saisons bien

contrastées : un hiver doux, un printemps pluvieux et un automne le dépassant de peu en pluviométrie et un été chaud et sec. Ou bien le cas des climats hyperocéaniques qui sont très doux en hiver, même aux latitudes élevées, avec des pluies bien réparties sur tout les mois avec un pic automnal.

4.3.5. Les climats froids :

Ce sont des climats qui ont pour caractère primordial un hiver très marqué avec des moyennes de température du mois le plus froid inférieures à -3°C et qui peuvent avoir un été assez chaud dont la moyenne de température du mois la plus élevée excède 10°C . Loin d'être arides malgré la parcimonie des pluies hivernales, leur été et printemps sont bien arrosés. Généralement ces climats se situent à l'intérieur des continents de l'hémisphère Nord, d'où le substantif de "climat continental" qu'utilisent quelques scientifiques, par contre d'autres le trouvent excessivement vague, car à vrai dire ce dernier inclut une partie du domaine aride.

4.3.6. Les climats polaires :

Ces climats ont un hiver extrêmement froid ainsi qu'un été bref et peu marqué où la moyenne de température du mois le plus chaud est inférieure à 10°C . Durant toute l'année, les précipitations sont très peu abondantes et les vents sont excessivement violents. Comme leur nom l'indique, ces climats règnent en maîtres sur les pôles.

4.3.7. Les climats de montagne :

De par le monde, ce sont des climats étroitement liés aux reliefs même insignifiants. Ils ont trois caractères essentiels à savoir leur fraîcheur et leur abondance pluviométrique par rapport au climat des plaines avoisinantes ainsi que leur changement rapide dans le temps.

Mais il existe des différences bien nettes selon la latitude (basse ou moyenne) entre les montagnes, car les différents étages climatiques et végétaux n'apparaissent pas aux mêmes altitudes, mais notamment à cause de la faiblesse des contrastes saisonniers dans les montagnes tropicales ce qui crée l'absence de variation d'altitude du couvert neigeux. En revanche, dans les moyennes latitudes, la saison froide (neigeuse) s'oppose à un été très différent.

4.4. Climats de l'Algérie :

Les aires climatiques en Algérie sont tributaires des grandes frontières morpho structurales (Prenant A., 2000). D'une superficie de territoire de $2.381.741\text{ km}^2$ l'Algérie est comprise entre

les latitudes 18 et 38° nord et les longitudes 12° est et 9° ouest (Ministère de l'habitat, 1994). Cette immensité divisée par lesdites limites, lui a conféré trois grandes zones climatiques :

- Le Tell, d'un climat humide de type sud-méditerranéen caractérisé par une sécheresse estivale quasi absolue, des précipitations hivernales maximales et des températures douces et peu contrastées (Alger de 12 à 25° C).
- Les hautes plaines, d'un climat de type froid (continental) dont la partie orientale est plus arrosée que celle qui se trouve à l'ouest. On note une diminution globale des précipitations comparativement au Tell, une importance des pluies d'automne et de printemps, l'intervention des orages d'été, l'accentuation des contrastes thermiques (El Eulma de 5 à 24° C), les gels souvent tardifs et la neige hivernale sur les hauteurs.
- Le Sahara où règne un climat sec et aride dont la frontière nord est le pied sud de l'Atlas saharien. Avec un rythme saisonnier qui ne diffère guère de celui des Hautes plaines, l'aridité est un résultat de l'insuffisance dans l'activité des perturbations elle-même due à la faiblesse du gradient vertical. (Ministère de l'habitat, 1994), (Prenant A., 2000).

Dans l'étude menée par le Bureau d'Etudes d'Ingénierie et de Service pour le compte du ministère de l'habitat (1994), il a été proposé une classification plus détaillée des différentes zones climatiques sur base de calcul du degré jours qui n'est autre que la différence entre température extérieure moyenne et température intérieure de base de confort cumulé sur l'année (16 °C en hiver et 25 °C en été). L'Algérie a été ainsi divisée en trois zones climatiques d'hiver qui contiennent sept sous-zones sous l'influence de l'altitude et cinq zones climatiques d'été sans subdivisions.

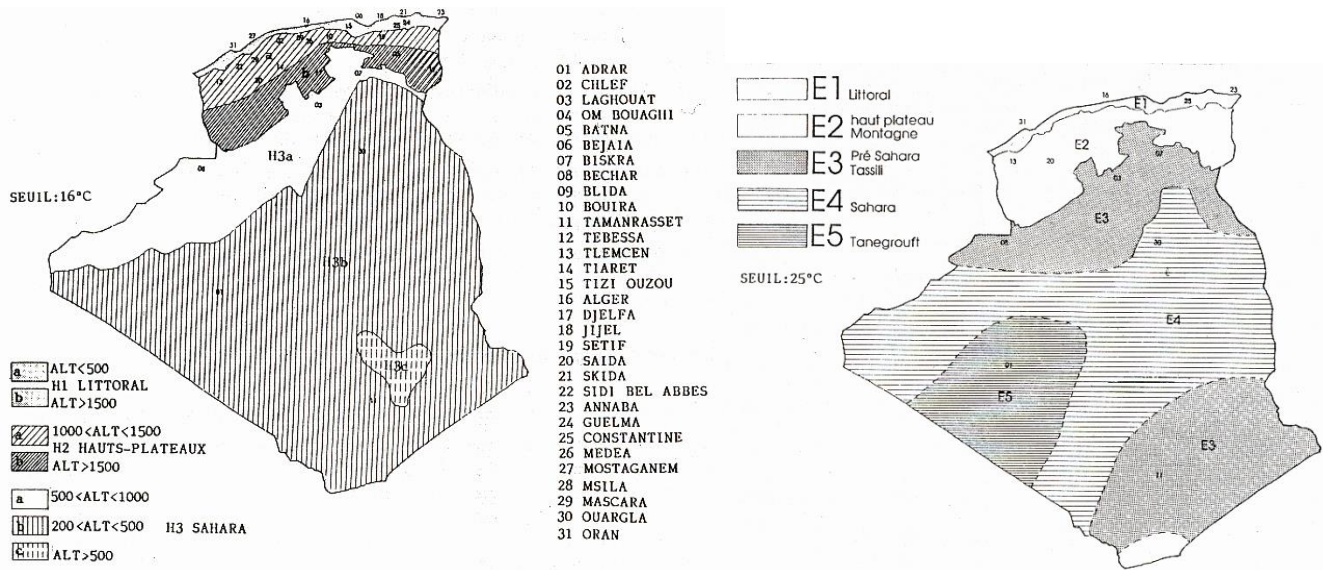


Figure 4.3 Zones climatiques d'hiver et d'été en Algérie

Source : Ministère de l'habitat, 1994.

4.4.1. Les zones climatiques d'hiver :

- **La zone H1** : Sous la subordination directe de la proximité de la mer, selon l'effet de l'altitude, elle se subdivise en deux sous-zones à savoir H1a (littoral-mer) dont l'altitude est inférieure à 500 m et où règne des hivers doux de faibles amplitudes thermique. Alors que la sous-zone H1b (Arrière littoral- montagne) dont l'altitude est supérieure à 500 m, lui confère des hivers plus froids et plus longs.

- **La zone H2** : Sous la dépendance de l'altitude, se partage en deux sous-zones. La première H2a (Atlas tellien-montagne) est comprise entre 1000 et 1500 m d'altitude dans laquelle sévissent des hivers froid avec des écarts importants de température diurne. La deuxième H2b (Atlas saharien-montagne) dont l'altitude dépasse les 1500 m se nuance de la première par des hivers encore plus froids;

- **La zone H3** : Subit l'effet de la latitude et vu l'immensité du Sahara ainsi que l'influence de la l'altitude, elle se divise en trois sous-zones. H3a représente le Pré Sahara dont l'altitude varie entre 500 et 1000 m. elle se caractérise par des hivers très froid la nuit comparativement au jour avec des différences considérables de température entre le jour et la nuit. H3b qualifié de Sahara, dont la fluctuation de l'altitude est de 200 à 500 m, se distingue par ses hivers moins froids que la sous-zone précédente et des écarts de température diurne. Finalement les hivers très froids de la sous-zone H3c (le Hoggar)

où l'altitude excède 500 m sont semblables à ceux de la zone H3a mais la fraîcheur continue même au cours des journées.

4.4.2. Les zones climatiques d'été :

- **La zone E1** : Où la mer a une influence essentielle sur son climat estival, elle se caractérise par des étés chauds et humides mais l'écart de température diurne est moindre.
- **La zone E2** : Car elle subit l'influence de l'altitude, cette zone est plus chaude en été mais moins humide par rapport à la précédente. Les écarts de température diurne sont importants.
- **Les zones E3, E4 et E5** : En subordination à l'effet de la latitude, la chaleur et sècheresse des étés de ces zones grandissent proportionnelles à l'augmentation de leur indices. Commenant par un été très chaud et sec dans la zone E3 pour devenir extrême et pénible dans la zone E5 (la plus brûlante en Algérie). Dans ces trois zones, l'amplitude thermique est aussi importante.

Tableau 4.1 Récapitulation des données climatiques par zone (Hiver et Eté)
Source : Ministère de l'habitat, 1994.

ZONE	DONNES MOYENNES	LE MOIS LE PLUS FROID : JANVIER								HIVER				
		TEMPERATUR (°C)			HUMIDITE RELATIVE (%)			DEGRE-JOUR FROIDS (Base 16°C)		IRRADIATION GLOBALE (WH/M ²)			VENT DOMINANT (VITESSE)	
		Moy.	Min.	Max.	Moy.	Min.	Max.	Janv.	Année	VERTICAL				HOR.
										Sud	S/E ou S/O	Est ou Ouest		
H 1	H1a	10.5	5.4	16.5	77.1	51.2	93.5	151	649	3602	2798	1545	2196	Sud-Ouest (3.4 m/s)
	H1b		5.4	14.4				189	742					
H 2	H2a	4.9	1.7	10.4	75.4	47.0	96.6	308	1447	4966	3844	2114	2976	Nord (3 m/s)
	H2b	4.6	-0.8	9.3	73.5	49.1	92.0	364	1800	4444	3472	1976	2800	Nord-Ouest (3.2 m/s)

ZONE	DONNES MOYE- NNES	LE MOIS LE PLUS CHAUD : JUILLET								ETE				
		TEMPERATUR (°C)			HUMIDITE RELATIVE (%)			DEGRE-JOUR CHAUDS (Base 25°C)		IRRADIATION GLOBALE (WH/M ²)			VENT DOMINANT (VITESSE)	
		Moy.	Min.	Max.	Moy.	Min.	Max.	Juil.	Année	VERTICAL		HOR.		
										Sud	S/E ou S/O			Est ou Ouest
	H3a	9.8	3.6	16.6	45.8	26.3	66.5	183	589	5878	4589	2604	3716	Nord (2.5 m/s)
	H3b	12.1	3.5	21.2	48.0	25.0	72.9	137	391	6440	5131	3138	4340	Nord-Est (5.7 m/s)
	H3c	12.6	5.3	20.5	27.3	13.9	45.5	116	334	6342	5207	3461	4960	Nord-Est (2.4 m/s)
	E 1	24.2	18.4	30.6	68.7	40.8	91.2	39	95	2312	3362	3857	6936	Nord-Est (3.4 m/s)
	E 2	24.9	14.7	34.5	54.4	27.0	83.8	70	171	2548	3773	4408	7494	Nord (2.6 m/s)
	E 3	32.5	24.5	40.4		16.9	55.8	95	394	2634	3723	4296	6924	Est (4.3 m/s)
	E 4	33.4	24.3	42.0	24.1	10.8	42.5	171	621	2072	3523	4439	7516	Nord-Ouest (4.3 m/s)
	E 5	36.5	26.8	44.9	12.7	9.1	20.5	210	880	2374	3953	4940	8108	Est (5.8 m/s)

4.5. Indices des Domaines et climats arides :

Les régions de la sphère où le bilan hydrique déficitaire (dû essentiellement à l'insuffisance des précipitations par rapport aux prélèvements de l'évaporation) est la principale caractéristique, sont considérées comme partie intégrante du domaine aride. La notion d'aridité est rendue difficile par d'autres intervenants tels que l'insolation, les vents, le relief, etc. sur la base desquels plusieurs indices d'aridité (ou d'humidité) ont été formulés. Entre autres on cite le facteur de pluie (Regenfaktor) de R. Lang, amélioré par Emmanuel de Martonne, le quotient pluviothermique de L. Emberger, la confrontation d'Henri Gaussen ou la méthode analogue de Charles P. Péguy, etc. Cependant, grâce à son efficacité, l'indice de Wladimir Köppen est le

plus célèbre et le plus utilisé. Son originalité réside dans la détermination de seuils limitant les régions arides et semi-arides en s'appuyant sur la température et les précipitations (selon la saison d'abondance) (Durand-Dastes F. (2000) :

Tableau 4.2 Indice d'aridité selon Köppen. P représente les précipitations moyennes annuelles en centimètres ; T représente les températures moyennes annuelles en degrés Celsius.

Source : Durand-Dastes F. (2000).

	non aride	semi-aride	aride
pluies en toutes saisons	$P > 2(T + 7)$	$P < 2(T + 7)$ $P > (T + 7)$	$P < (T + 7)$
pluies d'été	$P > 2(T + 14)$	$P < 2(T + 14)$ $P > (T + 14)$	$P < (T + 14)$
pluies d'hiver	$P > 2 T$	$P < 2 T$ $P > T$	$P < T$

4.6. Microclimats et principes générateurs :

Mac Gehee cité par Durand-Dastes F. (2000) définit le microclimat comme : "*le climat de tout espace local qui diffère sensiblement du climat dominant d'ordre de grandeur plus élevé. Cet espace peut être une pente, une vallée, un lit d'oued, une cité, une oasis, un fossé d'irrigation, ou la couche d'air comprise entre le sol et un couvert végétal*".

Ces climats de petite extension se caractérisent par :

- Leurs dépendance aux influences étroitement localisées (la nature du sol, le couvert végétal, la pente, l'exposition, etc.);
- La rapidité de leur variation spatiale ;
- Leur détermination est sujette au rôle essentiel joué par les bilans radiatifs locaux et les mouvements de l'air de faible amplitude.

4.6.1. Effets locaux sur les radiations :

En traversant l'atmosphère, une partie des rayons solaires se réfléchit par la haute atmosphère, les nuages ou sera absorbée par eux, les particules ou la vapeur d'eau ou sera diffusée par elles ou absorbée et transformée en chaleur. (Escourrou G., 1981) Ce qui arrive sur sol en qualité de rayonnement global (directe et diffus) échauffe la terre qui émet à son tour des

rayonnements d'onde longue, cause essentielle de la variation de la température de l'air le jour, ou celle issue du stockage la nuit.

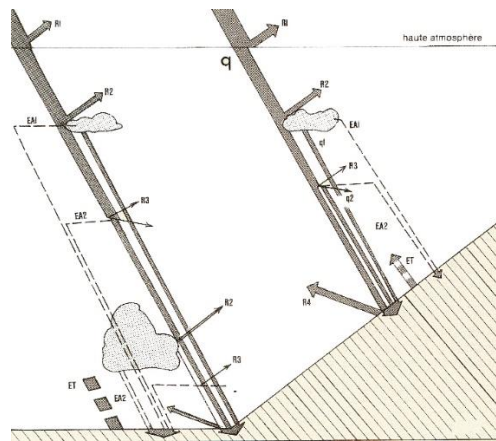


Figure 4.4 : Schématisation du bilan radiatif (basse altitude et montagne)

Source : Escourrou G., 1981.

Radiation solaire (q); Radiation diffusée par : les nuages (q_1), les particules ou la vapeur d'eau (q_2); Radiation réfléchie par : la haute atmosphère (R_1), les nuages (R_2), les particules ou la vapeur d'eau (R_3), le sol (R_4); Radiation absorbée et transformée en chaleur par : les nuages (EA_1), par les particules et le vapeur d'eau (EA_2); ET est le rayonnement de la terre; EA présente le rayonnement de l'atmosphère.

4.6.1.1. Contribution des radiations d'onde courte :

Les facteurs influençant l'apport des radiations d'onde courte au sol sont :

- La pente : à cause de l'angle d'incidence, les surfaces inclinées se réchauffent plus que les surfaces horizontales à l'exception de celles ayant le nord en guise d'orientation, aux hautes et moyennes latitudes. Ce qui est moins net aux basses latitudes quand le soleil est très haut dans le ciel. Aussi, les pentes exposées à l'est sont moins échauffées que celles donnant face à l'ouest car une bonne partie de la chaleur du matin sert à l'évaporation de la rosée.
- la nature du sol et son couvert végétal : selon l'importance de la flore d'une forêt, le rayonnement solaire est partiellement empêché d'atteindre le sol. D'un autre côté, la possibilité d'absorption de la radiation selon la nature du sol implique qu'une partie de cette radiation est renvoyée vers l'atmosphère (l'albédo) et ne sert en aucun cas à son échauffement.

4.6.1.2. Emission des radiations d'onde longue :

Les effets des ondes longues émises par le sol la nuit, sont dispersés et n'apportent que peu de chaleur à la couche d'air la plus basse car ils la traversent librement. Mais un couvert végétal dru ou un smog et poussière quand ils existent, renvoient ces rayons et diminuent les pertes. Ce qui explique l'augmentation de la température nocturne dans les forêts et les grandes villes polluées.

4.6.2. Effets sur la capacité d'accumulation de chaleur :

La nature du sol joue un rôle important dans la capacité de stockage de chaleur. Une forte conductivité thermique de la lithosphère chauffe l'air d'une façon plus lente le jour. Mais la nuit, la chaleur stockée fait augmenter la température du sol et de l'air. Par contre, une faible conductivité du sol (exemple de la roche) crée des microclimats plus chauds le jour et plus frais la nuit. Quant aux étendues liquides du fait de l'utilisation de la chaleur dans l'évaporation de leur eau, une diminution des apports thermiques est constatée sur leurs surfaces le jour, mais une restitution nocturne de chaleur emmagasinée est à noter.

4.6.3. Effets des mouvements de l'air de faible grandeur :

Tout ce qui encourage la stagnation de l'air pendant la nuit a un sens microclimatique (le refroidissement nocturne des creux, des protections végétales, des quelques segments des villes, etc.). A l'opposé, la circulation de l'air contrecarre les effets susmentionnés, car l'air se mélange et les pellicules refroidies pendant les nuits claires et calmes au contact du sol, se dispersent ce qui diminue leur fraîcheur. Un double effet de refroidissement est enregistré quand l'air frais ayant une forte densité rencontre une pente, car il descend et s'accumule dans ces dépressions déjà froides. En outre, les effets de canalisation sont rendus spectaculaires par les phénomènes locaux tel que les cols, certaines clairières ou surtout des rues, qui par leur orientation augmentent le flux aéraulique, avec tout ce que cela peut induire sur le confort de l'homme ou la vie des végétaux (Durand-Dastes F. (2000)).

4.7. La ville et le microclimat :

Chaque partie d'espace a son microclimat spécifique. Toutefois, à cause des influences locales, le microclimat de certains milieux est nettement différent, telles les régions accidentées, les forêts, les étendues liquides et surtout les villes (grâce aux effets de canalisation des vents, les îlots de chaleur, l'effet de poussière et pollution sur le rayonnement, etc.).

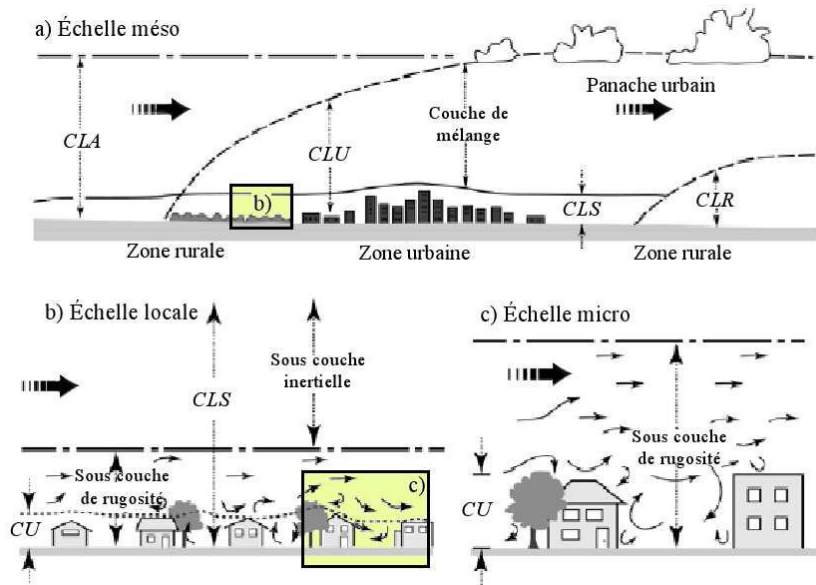


Figure 4.5 : Imbrication des échelles climatiques et atmosphériques, de l'échelle méso à l'échelle micro de la couche limite atmosphérique (CLA) à la canopée urbaine (CU), adapté de [Oke, 2006]

4.7.1 Les couches d'air :

L'atmosphère est l'enveloppe gazeuse entourant le globe terrestre, constituée par un mélange de gaz et de particules solides d'origine terrestre et cosmique et d'une épaisseur de zéro à mille kilomètres. Au-delà de cette distance, c'est l'exosphère où il n'y a plus lieu à des phénomènes observables à cause de la raréfaction des molécules d'air. La classification des couches de l'atmosphère se base sur la température qui y règne. D'une façon ascendante on distingue : la troposphère (7 km aux pôles et 16 km à l'équateur), la stratosphère (s'étendant à une cinquantaine de kilomètres d'altitude), la mésosphère (environ quatre-vingt kilomètres) et enfin la thermosphère.

La troposphère représente 90 % de la masse de l'atmosphère, contient 100 % de la vapeur d'eau atmosphérique et est le siège de phénomènes météorologiques (Dictionnaire universel francophone (1997). Guyot G. (1997), la divise schématiquement en trois couches parallèles. La plus proche du sol est la sous-couche limite, celle qui suit est la couche limite et la plus haute est la couche externe. Respectivement, elles correspondent aux échelles microclimatique, méso-climatique et macro-climatique.

La sous-couche limite de rugosité ou "urban canopy" est comprise entre le sol et la hauteur moyenne des toits. Cette couche d'air est relative à l'espace public et aux bâtiments limitrophes, continuellement en perturbation à cause des interactions paramètres climatiques/éléments urbains, et est le siège de diverses variations microclimatiques dues aux influences locales (type de matériaux, texture, couvert végétal, orientation des constructions, etc.). Le transfert d'énergie et de matière dans cette couche est important pour la compréhension des problèmes de pollution, échanges thermiques, confort humain, etc. (Noilhan J. 1980).

La couche limite urbaine dont la base est le sommet de la couche précédente (hauteur moyenne des toits), s'étend jusqu'à 400 m au-dessus du sol. C'est une couche relativement stable car la distance qui la sépare du sol fait en sorte que ce dernier n'influence pas les mouvements de l'air, et que cette couche échappe aux effets de la rotation de la terre. Néanmoins elle est en contact permanent avec les toitures et les terrasses. Elle est correspondante à l'échelle d'un quartier de la ville qu'elle surplombe ou même de sa totalité, car la densité urbaine, la structure générale du tissu, les étendues liquides ou végétales, etc. influencent la vitesse et la direction de l'air, le bilan thermique, etc. (Delaunay D., 1986; Escourou G., 1996).

4.7.2. Bilan énergétique et bilan radiatif :

Dans la ville et suite aux variations des paramètres du climat, de multiples échanges énergétiques se créent à partir des différents aménagements et activités urbains qui s'y trouvent. Ce qui explique la formation d'un microclimat bien déterminé conséquence de la modification du climat local par l'urbanisation dont la manifestation la plus étonnante réside dans la formation de ce qu'on appelle "l'îlot de chaleur". Oke T.R.

Pour diminuer la quantité de chaleur urbaine l'homme peut agir sur la chaleur stockée dans la zone urbaine $Q_{\text{Bât}}$ et l'énergie anthropique Q_A en les diminuant ainsi que l'augmentation de la chaleur latente Q_L . Le bilan radiatif dont la distribution est fonction des trois types de rayonnement (solaire, atmosphérique et terrestre) n'est qu'une partie du bilan énergétique. Selon le CSTB (1996), ses termes sont : $Q_{\text{Net}} = R_S + L_A - L_S = (1 - \alpha) G_H + L_A - L_S$ d'où

Q_{Net} : Rayonnement net ;

R_S : rayonnement solaire global (incident (direct + diffus) et réfléchi) d'ondes courtes ;

L_A : Rayonnement atmosphérique descendant de grande longueur d'onde (atmosphère – sol) ;

L_S : Rayonnement terrestre ascendant de grande longueur d'onde (sol - atmosphère) ;

α : Albédo de la surface réceptrice au sol ;

G_H : Irradiation solaire globale reçue par la surface réceptrice.

4.7.3. Le phénomène d'îlot de chaleur :

Effet principal du bilan radiatif et de l'apport d'énergie liée aux activités humaines, l'îlot de chaleur urbain est d'une façon générale l'augmentation de la température sèche de l'air du centre urbain par rapport à la campagne environnante. Son intensité peut varier de 3 à 5 °C Givoni B.(1989), mais est susceptible d'enregistrer des valeurs de 8 à 10°C Escourrou G. (1991). Cependant, cette température décroît du centre vers la périphérie (banlieue) et l'écart entre ville et campagne est beaucoup plus marqué pour les minima que pour les maxima, Escourrou G., (1981).

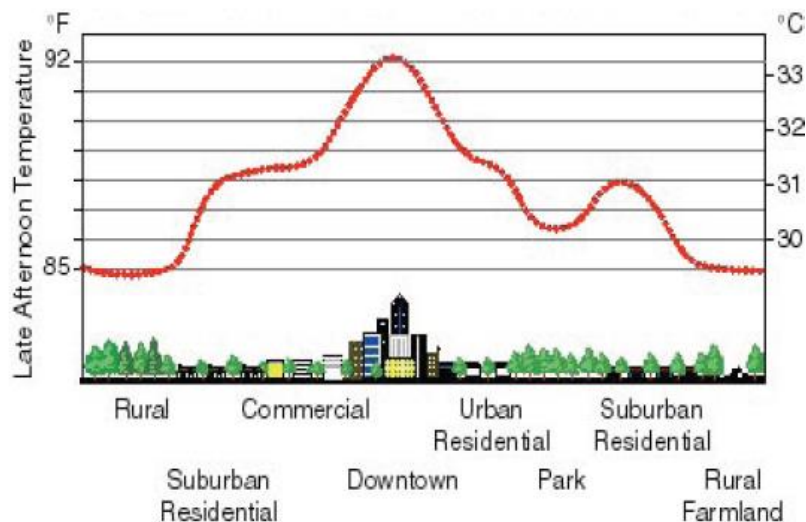


Figure 4.6 : schéma du profil d'îlot de chaleur urbain

Source: Cool Roof systems, Inc., 2004.

L'îlot de chaleur est favorisé par :

L'apport de l'énergie anthropique en ville ($\text{cal}/\text{cm}^2/\text{jour}$) constituée principalement du chauffage et éclairage, circulation urbaine, industrie et métabolisme humain. Le stockage de chaleur dans les bâtiments issu des radiations solaires directes et réfléchies favorisé par la réflexion du rayonnement solaire dans la zone urbaine. IL est fonction de la densité et la géométrie urbaine ainsi que de l'albédo (facteur de réflexion du rayonnement solaire).

L'absorption de la chaleur est relative à la couleur. Ainsi le noir absorbe 100 %, le bleu, brun et vert entre 85 et 90 %, le gris ciment et métal entre 75 et 85 %, le rouge, brun clair et kaki de 70 à 75 %, les couleurs pales entre 50 et 55 % et enfin le blanc 40 à 45 %.

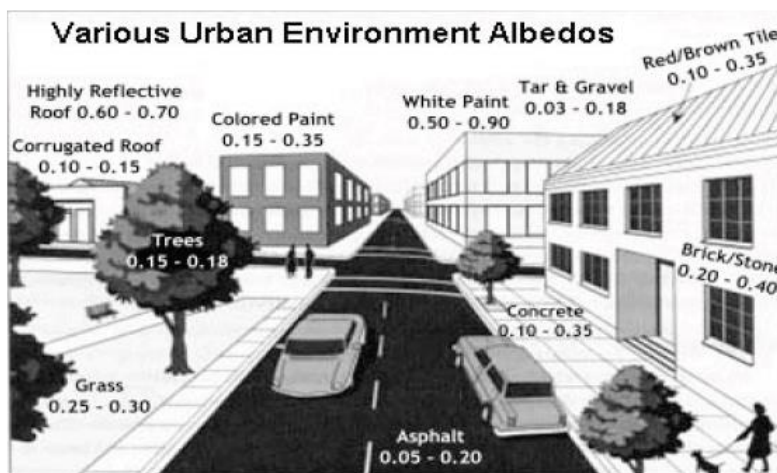


Figure 4.7 : Différents albédos de l'environnement urbain.

Source: Cool Roof systems, Inc., 2004.

- La réduction de la chaleur latente (énergie consommée pour l'évaporation de l'eau et l'évapotranspiration des plantes) à cause du drainage rapide des eaux de pluie tombant sur des surfaces urbaines imperméables et la diminution du couvert végétal en ville. En s'évaporant, l'eau consomme 600 calorie/gramme.

- La diminution de la vitesse du vent par ciel clair, entraîne un écart maximum de l'îlot de chaleur, car le vent venu d'ailleurs tend à égaliser les couches d'air au dessus de la ville en les mélangeant avec celles de la campagne. La direction du vent, intervient dans la mesure où l'écoulement est entravé par des obstacles morphologiques, ce qui ramène à la situation susmentionnée. Escourrou G. (1981) donne les écarts des minima en fonction de la vitesse moyenne du vent (voir tableau suivant) :

Tableau 4.3 : Ecart des minima entre ville et campagne selon la vitesse du vent.

Source : Escourrou G., 1981.

Vitesse du vent	Ecart de température
1 m/s	4.5 °C
2 m/s	3.4 °C

3 m/s	3.4 °C
4 m/s	2.6 °C
5 m/s	2.2 °C

L'existence de la poussière en ville transforme en chaleur une partie de la radiation absorbée ce qui induit un accroissement du rayonnement de l'atmosphère. En influençant la température de l'air dans la ville, l'îlot de chaleur diminue l'humidité relative, le nombre de jours de brouillard et fait naître des mouvements d'air locaux (brises de campagne)



Figure 4.8 : Répartition des températures de surface à New York. Acquis par le capteur Atlas (NASA's Marshall Space Flight Center, Global Hydrology & Climate Center).

Source : Cool Roof systems, Inc., 2004.

4.7.4. L'ensoleillement :

4.7.4.1. Rayonnement solaire et rayonnement terrestre :

Le rayonnement solaire extra-terrestre correspondant à un corps noir émettant de l'énergie à une température variant entre 6000 et 7000 K (loi de Stefan-Boltzmann), subit des transformations dues aux absorptions successives à son entrée dans l'atmosphère. Au-dessus de 80 km (atmosphère supérieure), la grande partie des très courtes longueurs d'onde et les courtes longueurs d'onde sont respectivement absorbées par l'oxygène atomique et l'oxygène moléculaire. Dans l'atmosphère inférieure, l'ozone, le CO_2 , et la vapeur d'eau, la diffusion de l'énergie par les molécules d'air, ainsi que l'effet écran des particules en suspension dans l'air (solides ou liquides) absorbent aussi le rayonnement solaire et font

en sorte que le rayonnement global (ϕ'') reçu par une surface au sol soit la somme des rayonnements solaires direct (ϕ_D''), diffus (ϕ_d'') et réfléchi (ϕ_r''). Il se situe dans les longueurs comprises entre 300.10^9 et 2400.10^9 m. dont une bonne partie forme le spectre visible 400.10^9 à 800.10^9 m.

Le rayonnement (ou flux) direct est atténué, en plus des éléments susmentionnés (constituants fixes de l'atmosphère), par la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon. Cette dernière et pour un même angle peut varier dans des proportions non négligeables selon le facteur de trouble du ciel, lui-même fonction des conditions météorologiques (nébulosité, vapeur, etc.) et de la teneur en aérosols de l'atmosphère (particules solides ou liquides en suspension).

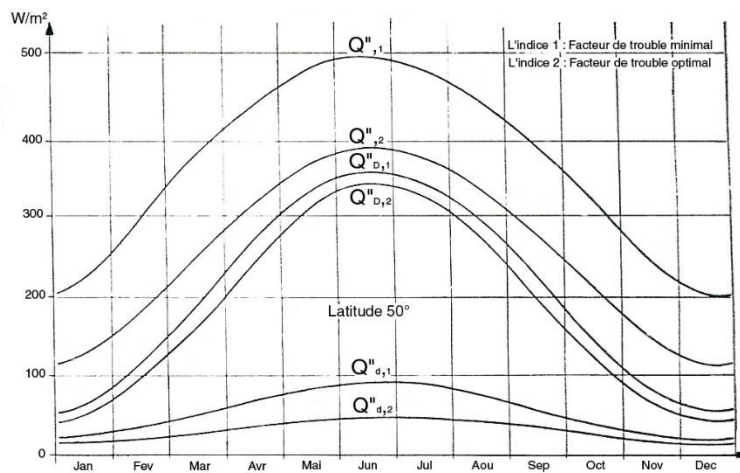


Figure 4.9 : Variation saisonnière des différents flux solaires (W/m^2)

Source : Porcher G. (1975).

Le rayonnement solaire diffus est, dans sa majorité, la perte d'énergie subie par le rayonnement solaire direct sous l'effet du phénomène de diffusion moléculaire pendant sa traversée de l'atmosphère, causé principalement par les molécules d'air (O_2 et N_2), la vapeur d'eau (brume, brouillard), les gouttelettes en suspension (nuage) et les aérosols. Ce flux est directement influencé par les facteurs de trouble. Comme son nom l'indique, le rayonnement solaire réfléchi par l'environnement est principalement tributaire des obstacles sis aux parages proches de la surface susceptible de le recevoir, de la faculté de réfléchir (albédo) des obstacles ainsi que de l'exposition et de l'orientation des surfaces réceptrices du flux (Porcher G., 1975).

Le rayonnement une fois reçu sur une surface au sol, une partie qui le compose sera réfléchi en fonction de l'albédo, de la surface réceptrice et la hauteur du soleil dans le firmament. Le rayonnement solaire reçu par la terre quand il n'est pas réfléchi, il est absorbé par elle. Avec un certain retard (essentiellement la nuit), la terre réémet un rayonnement

terrestre ascendant de grande longueur d'onde vers l'atmosphère participant au réchauffement des couches d'air près du sol (Guyot G., 1997). De la même façon, les bâtiments d'une ville agissent selon leurs faces extérieures en fonction de la température, l'émissivité et l'angle sous lesquels ces dernières sont vues.

4.7.4.2. Rayonnement solaire et espace urbain :

Par certaines dispositions de l'espace urbain à savoir son prospect (rapport de la hauteur à la largeur) ou son facteur de vue du ciel, son orientation, les matériaux de construction participant dans sa constitution, leur couleur et leur texture, la présence ou l'absence de la végétation par sa forme ou sa consistance, etc., la distribution du rayonnement solaire considérée comme l'élément essentiel responsable en grande partie de la qualité de l'ambiance thermique, est directement affectée dans ces espaces. Dans les régions à climat chaud et sec, tout l'intérêt est de minimiser les apports énergétiques et faciliter les déperditions ou les échanges de chaleur avec la voûte céleste afin de mieux refroidir les masses ainsi chauffées. Atteindre cet objectif nécessite impérativement la connaissance du comportement des espaces urbains face à ce phénomène naturel.

a. Rayonnement d'été ou d'hiver, en ville ou en campagne :

Généralement, le rayonnement solaire en ville est inférieur qu'en campagne car il se trouve que dans certains cas, la nébulosité en ville est légèrement supérieure (réflexion par les nuages), les particules solides et gazeuses (absorption des ultraviolets en les transformant en chaleur latente) augmentent le rayonnement diffus (l'hiver ou la haute latitude accentue ce phénomène en raison de l'épaisseur atmosphérique constituée par la faible hauteur du soleil, ce qui accroît le nombre des particules rencontrés, le smog).

Mais l'énergie en ville est beaucoup plus importante à cause du stockage de la chaleur et sa restitution progressive, l'apport d'énergie anthropique, la diminution de l'évaporation et une énergie variable restituée à l'atmosphère en fonction d'un albédo plus faible en ville (qui augmente en été, car les surfaces verticales réfléchissent plus. (Escourrou G., 1981).

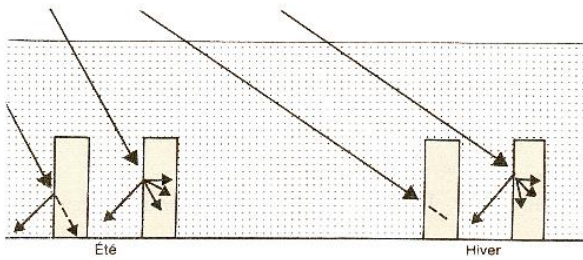


Figure 4.10 : Rayonnement d'été et d'hiver

Source : Escourrou G.1981.

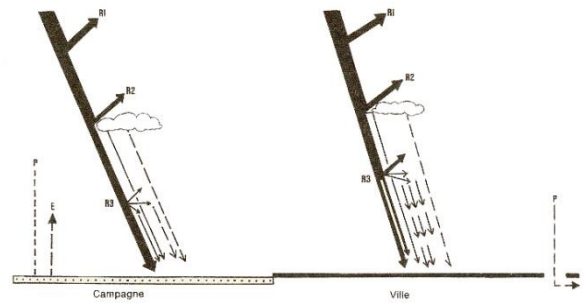


Figure 4.11 : Rayonnement en ville et en campagne

Source : Escourrou G. 1981.

b. Piégeage du rayonnement. Le canyon :

Le rayonnement solaire peut être piégé par la disposition des objets bâtis ou aménagés au sol, ce qui engendre sa diminution à travers les phénomènes d'absorption, ou bien son renforcement par le biais du phénomène de réflexion de la radiation. Ainsi la figure 4.11 (CSTB, 1996) illustre l'effet de captage et les réflexions diverses du rayonnement solaire selon le type d'éléments urbains jonchant le sol. Ce piégeage conduit généralement à un échauffement de courte durée de l'air à l'intérieur du canyon qui minimise les fluctuations de températures renforcées par un air calme au cours de la journée. Le sol est alors peu irradié et il se refroidit aussi lentement, vu sa petite ouverture au ciel (Bennadji A. 1999).

c. Mensurations de l'espace, prospects et orientation :

Le prospect de l'espace, suivant une orientation bien définie, détermine le pourcentage de surfaces urbaines ensoleillées ou occultées (ombragées), selon la logique de gain ou de protection espérée. Mais face à la variation de la hauteur du soleil dans le ciel selon l'heure de la journée et le jour de l'année ce pourcentage n'est jamais le même. Dans son étude Oke T.R. (1988) a défini l'accès solaire direct comme la proportion de la surface potentiellement ensoleillée à midi au solstice d'hiver. A la latitude 45° N, dans une rue orientée est-ouest, il a démontré que le rapport de la hauteur à la largeur $H/L = 1$ expose 39 % de la façade Sud au soleil et laisse 61 % d'elle à l'ombre. Les prospects 0.6 et 0.4 donnent respectivement 0.66 % et 100 % de soleil contre 34 % et 0 % d'ombre sur cette même façade.

L'orientation de l'espace doit être en étroite relation avec la géométrie solaire si on veut réaliser une protection solaire par l'effet d'ombre portée ou de masques en diminuant l'exposition voir même son bannissement. Mais parallèlement à ça il serait très important de se pencher sur les conditions nocturnes de l'ambiance thermique, car une étroitesse de l'espace conjuguée à une forte inertie des murs conduit inéluctablement à un désagréable réchauffement de l'espace pendant les nuits d'été (Bennadji A. & al. 1998)

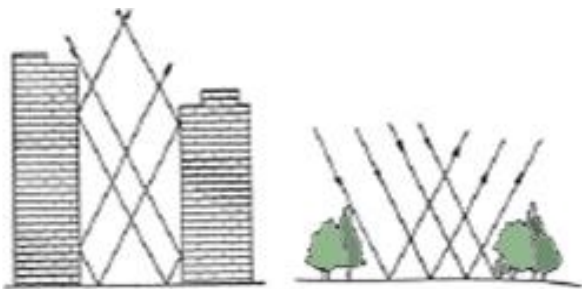


Figure 4.12 : L'effet "piégeage" du rayonnement solaire
Source : C.S.T.B., 1996.

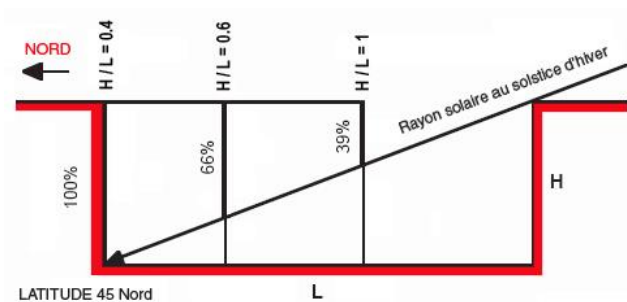


Figure 4.13 : Façade potentiellement ensoleillée en fonction du prospect. Source : Oke T.R., 1988 a.

d. Vue du ciel et ouverture de l'espace :

Le facteur de forme F_i du ciel ou facteur de vue du ciel est défini comme le taux d'ouverture de l'espace vers le ciel. Les obstacles qui s'y trouvent à proximité peuvent jouer un rôle primordial dans la détermination de la quantité de rayonnement reçu par un point au sol.

Miller-Chagas P. & Paul P. (1980) ont comparé le rayonnement solaire incident aux différents points de la cité Rotterdam à Strasbourg en rapport à leur proximité ou éloignement des obstacles morphologiques, proportionnellement à un point totalement dégagé se situant sur l'un des toits des constructions. Par ciel dégagé, un écart important est à noter entre un point à l'ombre et ceux au soleil (qui peut aller jusqu'à 88 %), mais aussi selon la distance qui sépare ces derniers des obstacles considérés. Dans des conditions de ciel couvert, le rayonnement diffus est aussi variable d'un point à un autre ou la différence peut atteindre les 40 %. Ce qui a permis de mettre en avant cette notion de vue du ciel. D'un autre point de vue, grâce à cette étude, on a pu démontrer que certains points à l'ombre reçoivent un supplément de rayonnement réfléchi à cause de leur proximité d'une façade réfléchissante, ce qui leur compense l'énergie perdue par leur faible ouverture au ciel.

L'ouverture au ciel est généralement matérialisée par une photo fish-eye combinée au diagramme solaire de la ville en question afin de préciser le lever et le coucher réels du soleil au point voulu, la durée d'ensoleillement ainsi que l'estimation du taux des composantes limitant le champ visuel. Cette vue fish-eye est aussi prise horizontalement en deux poses opposées pour des considérations d'angles solides vues par un point (le piéton par exemple).

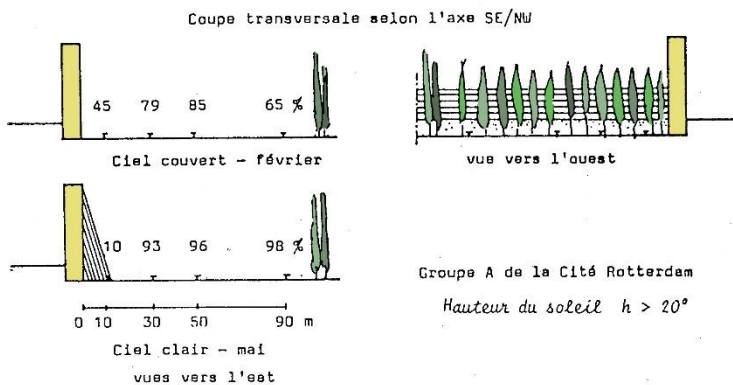


Figure 4.14 : Rayonnement solaire reçu en espace extérieur par rapport au rayonnement global

Source : Miller-Chagas P. & Paul P., 1980.



Figure 4.15 : Photos fish-eye (axe vertical) de deux espaces urbains différents (rue canyon et place à Ghardaïa)

Source : Ali-Toudert F., 2005.

e. Matériaux de construction utilisés :

Les matériaux de construction utilisés en ville influencent le microclimat dans la mesure où ils participent à la réflexion d'une portion du rayonnement solaire incident dans différentes directions vers des surfaces et objets en augmentant leur énergie, et émettent un rayonnement de grande longueur d'onde responsable d'échauffement des masses d'air près du sol. Selon Fuggle et Oke (1976) cités par Adolphe & al. (2002), trois caractéristiques essentielles sont inhérentes à ces phénomènes à savoir, l'albédo, l'émissivité et la capacité thermique. Comme il a été sujet aux paragraphes précédents, on rappelle que l'albédo est conditionné en grande partie par les caractéristiques du matériau, la couleur, la teneur en eau, l'angle de la paroi face aux rayons solaires, le crénelage de la surface, du tissu urbain et de sa densité (Escourrou G., 1981, Oke T.R., 1988, Aida, 1982 cité par Adolphe & al. 2002). Mais une surface ayant un albédo fort n'est pas forcément une surface moins chaude que les autres, car la nature du matériau intervient pour le compte de son émissivité. Autrement dit, de la capacité thermique dépend

l'émission du rayonnement de grande longueur d'onde mis en valeur surtout la nuit par le biais du phénomène d'îlot de chaleur. Le tableau 4.4 (Ayra, 1988, cité par Boussoualim A., 2002) donne les grandeurs d'albédo et d'émissivité de quelques surfaces en fonction de leur nature et caractéristiques.

Tableau 4.4 : Albédo et émissivité de quelques étendues

Source : Ayra, 1988.

Etendue	caractéristiques	Albédo	Emissivité
Eau	Faible angle zénithal	0.03 – 0.01	0.92 – 0.97
	Fort angle zénithal	0.10 – 0.50	0.92 – 0.97
Sable nu	Sec	0.35 – 0.45	0.84 – 0.90
	Humide	0.20 – 0.30	0.91 – 0.95
Sol nu	Argileux sec	0.20 – 0.35	0.95
	Argileux humide	0.10 – 0.20	0.97
Surfaces artificielles	Béton	1.17 – 0.27	0.71 – 0.88
	Route goudronnée	0.05 – 0.10	0.55 – 0.95
Surfaces agricoles	Prairies	0.16 – 0.26	0.90 – 0.95
	Cultures de blé, riz, etc.	0.10 – 0.25	0.90 – 0.99
	Vergers	0.15 – 0.20	0.90 – 0.95
Forêts	A feuilles caduques	0.10 – 0.20	0.97 – 0.98
	Conifères	0.05 – 0.15	0.97 – 0.99

f. Intersection de plans. Le dièdre :

Un autre effet ayant des conséquences importantes sur les utilisateurs des espaces publics et leur confort, méritant d'être exposé, est celui recensé par l'équipe du laboratoire ABC (1997). L'effet dièdre naît de l'intersection de deux plans, l'un horizontal et l'autre vertical ou de deux plans verticaux qui se croisent pour créer selon leur orientation, de multiples réflexions de rayons solaires partant de l'un vers l'autre et favorisées par les températures plus ou moins

élevées de ces derniers. Le dièdre en espace urbain est formé généralement par les façades donnant sur une rue et son parterre ou par les façades des constructions en décrochement avec coin, où la température la plus élevée de l'ensemble s'avère celle de l'arête de croisement. Deux champs radiatifs se forment, par la paroi verticale vers l'horizontale, et ce par le biais de réflexion solaire et d'émissivité thermique de sorte que la personne qui se trouve près de l'arête du dièdre subit en plus de ces deux derniers champs, un rayonnement direct. La technique des images thermographiques prises par une caméra infrarouge permet la visualisation des températures de surfaces et explique clairement ce phénomène (figure 4.16)

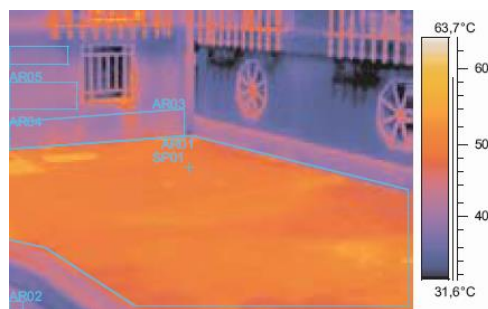


Figure 4.16 : Image thermographique illustrant l'effet de dièdre

Source : Lehtihet K. 2002.

g. Effet d'espace dégagé :

Les espaces libres et dégagés s'ils ne comportent aucun aménagement limitant leur ouverture au ciel sont les plus exposés au rayonnement incident (directe et diffus). De ce dernier et de leur albédo qui est le facteur de réflexion du rayonnement solaire, dépend leur échauffement (tableau 4.4), par contre du pourcentage de vue du ciel, leur refroidissement résulte. Izard J.L. (1999) cité par Bennadji A. (1999) note que : "*La surface du sol échauffée a tendance à perdre sa chaleur par rayonnement infrarouge vers le ciel plus froid. Le ciel est en effet toujours la surface apparente de l'environnement qui est la plus froide, en été comme en hiver (hormis le disque solaire et son halo proche). Dans un espace dégagé, rien ne s'oppose à ce rayonnement, si bien qu'en fin de nuit, cette surface est froide : elle peut même être plus froide que l'air ambiant*". Un albédo fort amoindrit certes la quantité d'énergie reçue par le sol mais il contribue par ricochet au réchauffement du piéton déjà sous l'effet du rayonnement incident.

4.7.5. Les écoulements aérauliques :

En dépit de leurs facultés à conditionner une ambiance urbaine et leur pouvoir d'affecter directement le confort thermique de l'être humain (sujet qu'on étalera au deuxième chapitre du présent travail), les mouvements de l'air de faible amplitude sont la deuxième principale grandeur climatique responsable de la détermination des microclimats, car les effets des échanges radiatifs sont altérés en présence de fortes amplitudes circulatoires, induisant ainsi un mélange des pellicules (Durand-Dastes F.2000).

La ville a des énormes effets pouvant modifier le vent, sa vitesse et sa direction. La densité des constructions fait baisser la vitesse du vent du fait d'un accroissement de la rugosité urbaine. Ces changements sont très versatiles, d'une ville à l'autre suivant la taille, le relief limitrophe et l'influence de l'urbanisation sur la direction du vent. En outre, la direction des vents est modifiée par l'îlot de chaleur urbain, la grande rugosité et la forte densité de constructions. Les changements se situent principalement au niveau de :

- La déviation des vents régionaux en traversant l'agglomération (convergence, divergence, déviation cyclonique, déviation anticyclonique, ondulation) ;
- La brise de campagne considérée comme un vent local (déclenchée par un gradient de pression faible et des écarts thermiques importants entre la ville et sa périphérie) ;
- La canalisation de l'air à ras du sol de la ville (voies rectilignes et continuité dans la masse du bâti) (Escourrou G., 1981 et 1991) et autres effets dus à la forme, les dimensions, la disposition du bâti et sa position par rapport aux vents (Gandemer J. & Guyot A. 1976, Oke T.R., 1988).

Baumuller J. & al. (1981) illustrent dans la figure 4.16 la modification du profil de vitesse du vent régional en traversant trois milieux de rugosité différente.

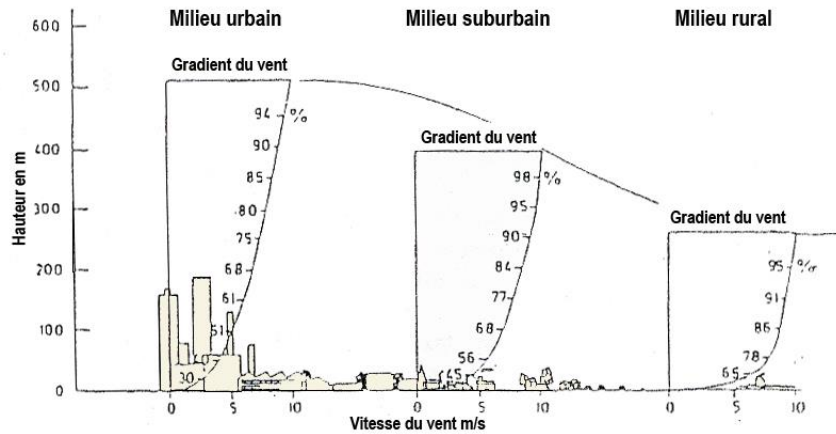


Figure 4.17 : Profil de vitesse de vent au-dessus de trois milieux différents

Source : Baumuller J. & al, 1981.

La hauteur de rugosité urbaine (Z_0) selon une direction donnée du vent, ou rugosité tout court, explique la résistance des obstacles (le tissu urbain dans le cas d'une ville) à l'écoulement de l'air. Cette grandeur a fait l'objet de plusieurs études (empiriques ou analytique), mais la principale difficulté en vue de son estimation réside dans la variation de la hauteur des obstacles au sol, dont la proposition d'un chiffre moyen pour toute la zone s'avère une tâche des plus délicates (Deboulbé E., 1997, Adolphe L. & al, 2002).

Le modèle logarithmique simplifié reliant vitesse moyenne du vent, hauteur et rugosité est parmi les plus utilisés, donné ici par Gandemer J. & Guyot A. (1981) :

$$U_z / U_{\text{référence}} = k \cdot \log (Z / Z_0) = C_z \quad \text{où :}$$

U_z : Vitesse du vent à l'altitude (z) considérée ;

$U_{\text{référence}}$: Vitesse du vent à l'altitude de référence prise généralement à une hauteur de 10 m au-dessus d'un sol plat à faible rugosité ;

Z : Altitude considérée, à laquelle une vitesse de vent est à connaître par exemple ;

Z_0 : longueur de rugosité du site en question (voir tableau 1.5) ;

C_z : Coefficient de rapport

k : Coefficient de proportions variables du site (voir également tableau 1.5).

L'utilité de cette relation peut se manifester dans le rapport de la vitesse météo prise généralement à une hauteur de 10 m au-dessus du sol à une hauteur de l'être humain 1.60 m par exemple, en vue d'établir des comparaisons avec une donnée prise à ce niveau.

Tableau 4.5 : Rugosité et coefficient 'k' pour différentes étendues

Source : Gandemer J. & Guyot A., 1976.

Etendue	Z _o (m)	k
Océan, grand lac	10 ⁻⁵ – 10 ⁻²	0.17
Rase campagne	0.01 – 0.1	0.19
Bocage, banlieue	0.1 – 0.5	0.19
Zone urbaine	0.5 – 1.5	0.22
Centre de grandes villes	1.5 – 2.5	0.24

4.7.5.1. Vent et formes urbaines :

Le comportement du vent en milieu urbain présente d'énormes irrégularités comparativement au caractère relativement stable du rayonnement solaire. Ces complexités sont le résultat essentiel du caractère turbulent (instationnaire) causé par la rugosité du sol, responsable aussi du phénomène de freinage du vent moyen, ainsi que les interactions entre masses bâties (Gandemer J., 1986). Dans la canopée urbaine (sous-couche limite), la forme, la disposition (juxtaposition) et la hauteur des obstacles de quelque nature que ce soit, modulent les écoulements du vent (Delaunay D., 1986). Les préoccupations de détermination de seuil de confort en milieu urbain ont conduit à des études en souffleries atmosphériques et sur terrain (Nicholson, 1975, Gandemer J. & Guyot A., 1976, Delaunay D., 1986, Oke T.R., 1988, Escourrou G., 1991) qui ont abouti aux effets relatés ci-après.

a. Effet de canalisation et effet de vortex :

Le canyon urbain a été l'objet de plusieurs études aérodynamiques et beaucoup de modèles ont été proposés et développés à son sujet. Toutes leurs conclusions mettaient en évidence, selon la circulation longitudinale ou transversale du vent le long ou en travers du canyon, soit respectivement un effet de canalisation ou un vortex (écoulement circulaire) (Delaunay D., 1986).

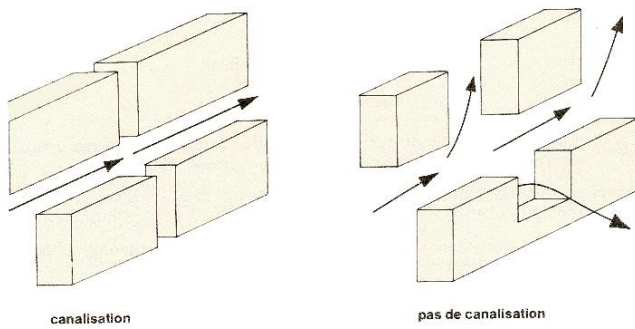


Figure 4.18 : L'effet de canalisation

Source : Escourrou G., 1981.

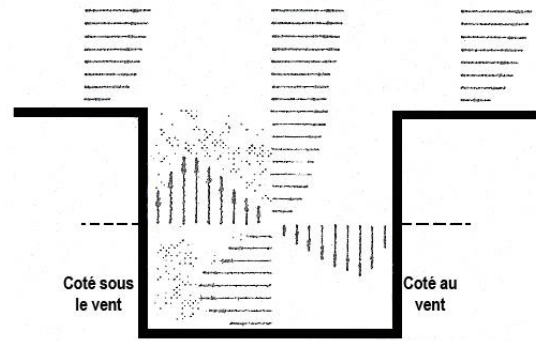


Figure 4.19 : L'effet de vortex

Source : Nicholson, 1975 cité par Delaunay D., 1986.

- Pour qu'il y ait une canalisation, les expériences ont montré qu'il faudrait que les parois du couloir soient d'une hauteur de plus de six mètres, légèrement poreuses (moins de 5 %) comportant des ouvertures inférieures ou égales à l'épaisseur du bâtiment contenant l'orifice, afin d'éviter une éventuelle déviation du flux (filtration). En lui-même cet effet n'est considéré comme 'accident aérodynamique' que lorsqu'il induit une accélération excessive et gênante, mais dans certains pays chauds et surtout humides il serait bien recherché pour un renouvellement d'air ou une évaporation sudorale.

- L'effet vortex a été abordé par Nicholson en 1975, qui a pu constater l'écoulement circulaire du flux à l'intérieur du canyon quand l'air est perpendiculaire à l'axe de ce dernier. De son côté Oke TR (1988) a pu aller encore plus loin en nouant une relation entre hauteur et largeur du canyon (prospect), dimensions des bâtiments et l'écoulement d'un air en travers. Trois régimes ont pu être détectés. Au-delà d'une certaine largeur de la rue (en relation avec la hauteur), les bâtiments du canyon sont considérés comme des constructions isolées (cas : a) et le régime est appelé "courant de rugosité isolée" (ce cas sera détaillé après). En augmentant le rapport H/W (hauteur sur largeur) ou en diminuant la largeur de la rue sous un certain ratio, on entre dans un écoulement dit "courant d'intrusion de sillage", où des parties du flux descendent dans le canyon pour créer un écoulement circulaire (cas : b). Enfin, en augmentant encore plus le prospect ou en rétrécissant d'avantage la rue canyon, un troisième régime appelé "courant d'effleurement" se crée (cas : c), qui consiste en la naissance et l'installation d'un vortex permanent dans la rue canyon en effleurant la masse d'air à l'intérieur de la

rue. L'écoulement d'air des trois régimes en relation avec le prospect est expliqué par la figure 4.19.

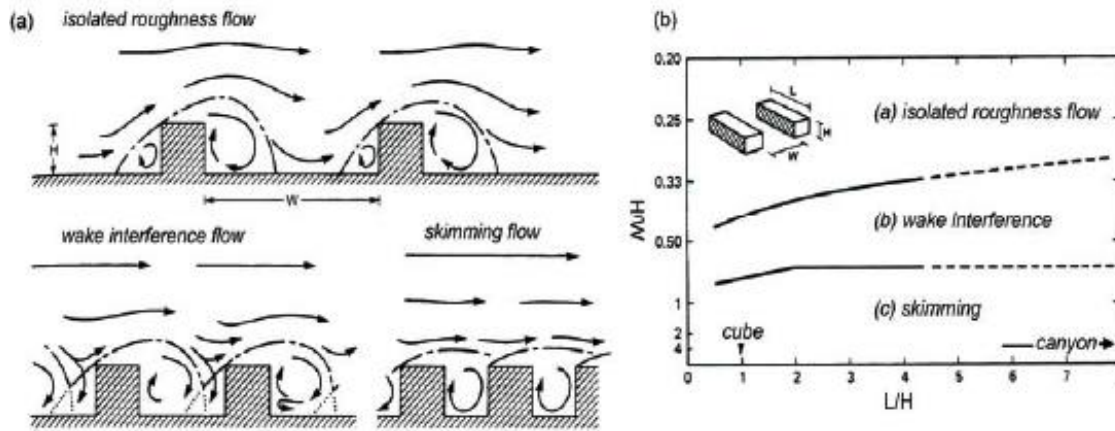


Figure 4.20 : Régimes d'écoulement des vents en fonction du prospect

Source : Oke T.R., 1988.

D'un autre côté, Gandemer J. & Guyot A., (1976) ont entrepris des études en souffleries simulant le comportement de bâtiments isolés, ayant abouti à un ensemble d'effets différents qu'on résume dans ce qui suit :

b. Effet venturi :

Par analogie au tube utilisé pour les mesures du débit des fluides, comportant un rétrécissement, relatif au physicien italien qui porte le même nom, dans ce phénomène l'ouverture face au vent et la disposition en angle (dièdre au coin tronqué) des constructions ayant une hauteur minimale de quinze mètres, forment une sorte de canal collecteur de vents. L'angle tronqué du dièdre est la zone la plus critique vis-à-vis du confort aéraulique car la vitesse de l'air pourrait est considérable.

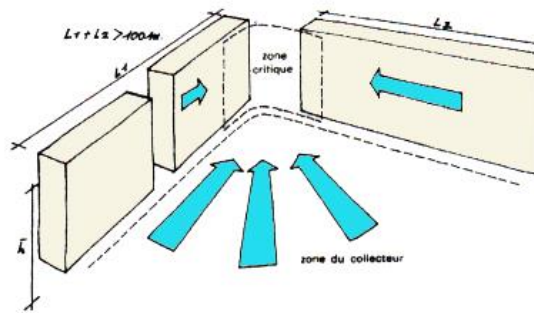


Figure 4.21 : L'effet venturi

Source : Gandemer J. & Guyot A., 1976.

c. Effet de vides sous immeuble

Par une opposition de pression en amont et en aval d'une construction dont la face est au vent et le dos sous le vent, les masses d'air tentent à relier les deux côtés qui dont leur passage ne trouvent que les vides sous le bâtiment pour assurer la continuité. Un appel d'air est fait par les pilotis, passage couvert, etc. (les trous en général).

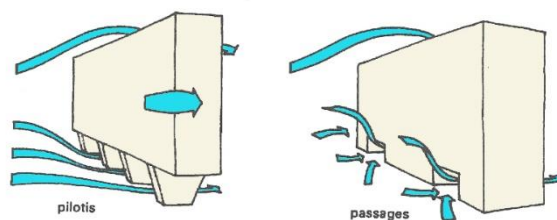


Figure 4.22 : L'effet de vides sous immeuble

Source : Gandemer J. & Guyot A., 1976.

d. Effet de coin :

Si dans le cas précédent (Effet de vides sous immeuble), le vent ne trouvait pas d'ouvertures ou de vides pour continuer sa trajectoire face à un bâtiment isolé ou un ensemble de constructions formant un seul bloc, ce dernier contourne en passant par les arêtes situées entre la face et les plans latéraux en dépression, créant un effet de coin.

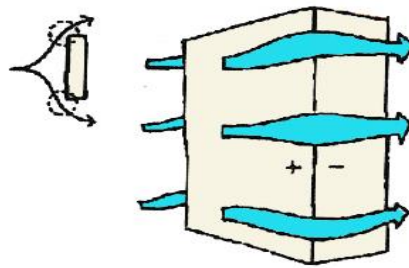


Figure 4.23 : L'effet de coin

Source : Gandemer J. & Guyot A., 1976.

e. Effet de pyramide :

C'est une association de constructions à décrochements ayant une forme pyramidale stimulant cet effet. Une sorte de remède à l'effet de coin par le dégradé vertical en réduisant l'inconfort inhérent, amenuisant les survitesses habituellement remarquées au pied et à la terrasse des bâtiments et modifiant la structure du vent.

f. Effet de Sillage :

Dans la partie sous le vent d'un bâtiment se dessine un mouvement fluide tourbillonnaire en forme de fer à cheval qui s'étale sur une distance égale à presque deux fois la hauteur du bâtiment en question. L'effet de sillage englobe aussi l'effet de coin, ce qui rend la vitesse de l'air en aval excessive et extrêmement inconfortable.

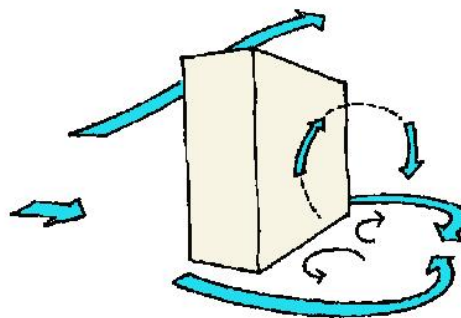


Figure 4.24 : L'effet de sillage

Source : Gandemer J. & Guyot A., 1976.

g. Effet de tourbillons :

Quant à la partie au vent (effet précédent) du bâtiment lorsque sa hauteur dépasse une quinzaine de mètres, se forme au pied de ce dernier un rouleau tourbillonnaire conditionné par le gradient vertical de la vitesse du vent. Un autre bâtiment de 10 à 15 mètres s'il se trouve devant le premier, contribue à l'accélération du tourbillon horizontal et à sa canalisation entre les deux constructions.

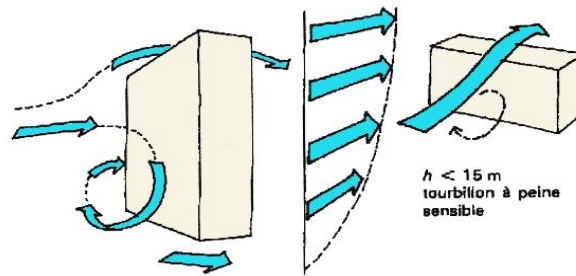


Figure 4.25 : L'effet de tourbillon autour d'un bâtiment

Source : Gandemer J. & Guyot A., 1976.

h. Effet de liaison :

Lorsque des bâtiments parallèles, d'une hauteur maximale de quinze mètres s'implantent en quinconce, subissant un écoulement proche de la normale et avec une zone de chevauchement (ombragée sur la figure 4.26), cette dernière ayant une pression négative liera le flux arrivant des zones positives. Un écoulement entre les zones se crée.

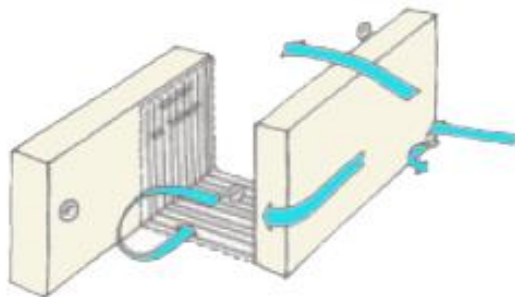


Figure 4.26 : Effet de liaison

Source : Gandemer J. & Guyot A., 1976.

i. Effet de maille :

L'effet de maille varie en conséquence des dimensions de la maille et de sa forme (ouverte, perpendiculaire, parallèle, fermée, etc.). Il apparaît quand il y a une disposition des constructions les unes à côté des autres en constituant une poche. On observe alors une pénétration par le vent si la hauteur de la maille est faible ou ayant une petite superficie, ou un franchissement total si ses dimensions sont faibles (cas des aires abritées).

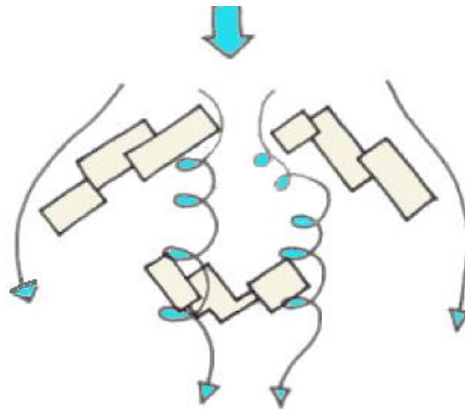


Figure 4.27 : Effet de maille

Source : Gandemer J. & Guyot A., 1976.

j. Effet de barre :

Les barres isolées, ou groupées et alignées sans un grand espacement dévient l'écoulement en filament, si ce dernier se présente avec un angle proche de 45° de face ou parallèle.

4.8 Végétation en milieu urbain :

En ville, la végétation peut prendre soit la forme de masse compacte tridimensionnelle (l'arbre d'alignement), ou masse planaire (la treille) ou bien une simple interface comme c'est le cas de la pelouse (Destobbeleire G & Izard J.L., 1998). Quel que soit sa forme, la végétation urbaine possède une grande possibilité de modification du climat local et le microclimat en ville. Comme il a été sujet dans les paragraphes précédents, son importance réside dans sa capacité à rendre de l'eau à l'air par les phénomènes d'évapotranspiration végétale et de l'évaporation de l'eau contenue dans le sol. L'énergie consommée pour ce processus de refroidissement est la chaleur latente responsable de la baisse de chaleur sensible (Escourrou G., 1981, 1991, McPherson et al, 1994).

Trois effets directs de la végétation pouvant affecter le microclimat à savoir : la procuration d'ombre, l'humidification et son aptitude à briser les vents (McPherson et al, 1994). Dans une zone urbaine, l'efficacité de la végétation dépend du ratio "espace vert/zone construite" où les avantages s'accroissent avec l'augmentation de ses proportions. Mais c'est loin d'être une relation linéaire comme le démontre Oke T.R., (cité par Izard J.L. & Lehtihet K., 2002) dans la figure 4.28 l'efficacité se situe aux alentours du taux des 40 % environ.

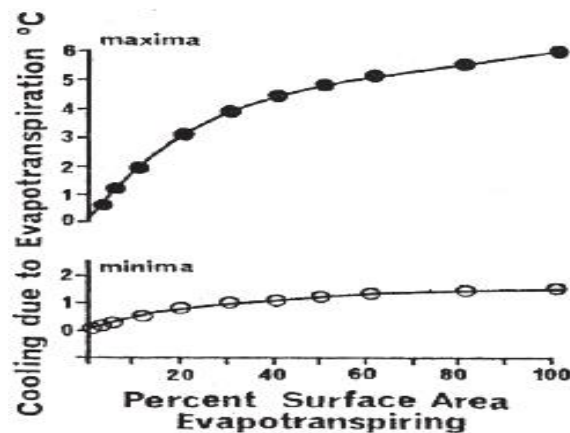


Figure 4.28 : Refroidissement par évaporation selon le taux espace vert/zone construite

Source : Oke T.R. cité par Izard J.L. & Lehtihet K., 2002.

D'une autre part, cela va aussi avec les caractéristiques propres de l'arbre (espèce, densité, forme, taille, volume, âge, situation, etc.). En effet, les arbres urbains en alignement n'ont pas le même comportement et ne sont pas soumis aux mêmes conditions (rayonnement, température de l'air et irrigation) que les arbres en parc ou en jardin. Dans le premier cas, le stress thermique provoque pour les plus jeunes espèces une diminution de leur évapotranspiration. Avec l'âge les arbres d'alignement grandissent et forme une canopée végétale, ce qui inverse la situation précédente. Pour l'estimation de l'évapotranspiration l'écart entre la température de feuillage et celle de l'air s'avère un bon indicateur, car cette dernière augmente proportionnellement à l'accroissement de cet écart (Groupe ABC, 1997).

L'étude faite par Destobbeleire G & Izard J., (1998) a donné les résultats suivants :

Les feuillages ont toujours des températures apparentes qui font d'elles les surfaces les plus froides de l'environnement urbain après la voûte céleste. En plus d'un ombrage procuré, les arbres d'alignement offrent un "plafond réfrigérant" que l'échauffement dû à l'absorption solaire n'a aucun effet sur eux (contrairement à une couverture de protection en textile).

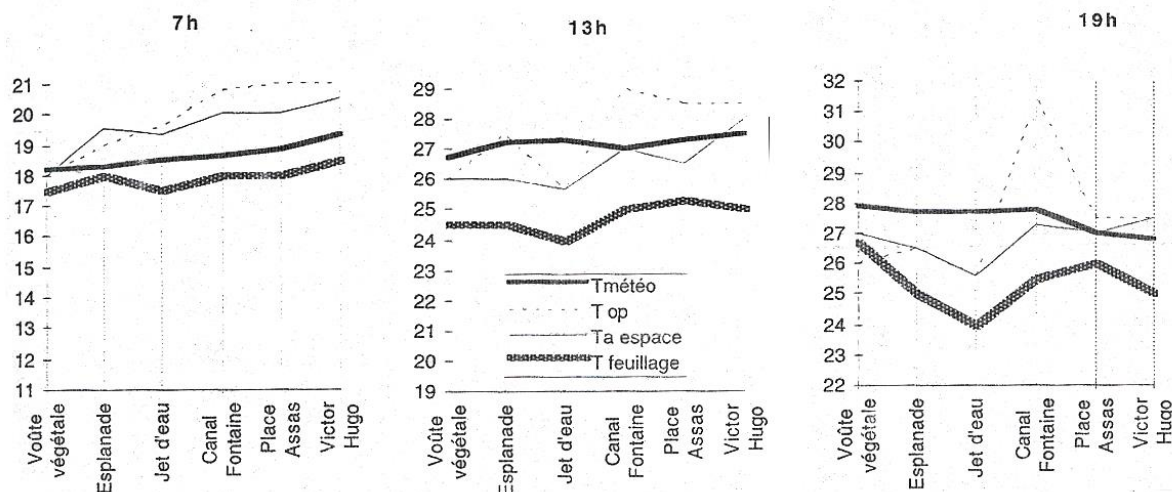


Figure 4.29 : Profil de la température de feuillage, de l'air, Opérative, et météo à trois moments de la journée.
Source : Destobbeleire G & Izard J.L., 1998.

Les treilles ont aussi des températures de surface moins élevées que celle de l'air sous abri mais plus proches d'elle. Cependant, elles restent légèrement plus chaudes que celle d'un arbre d'alignement, du fait de leur faible épaisseur. Les pelouses quant à elles, constituent un véritable tampon entre le sol et l'air extérieur, une sorte de protection contre le rayonnement solaire par la grande réduction des effets de stockage de chaleur dans le sol.

Dans une autre étude effectuée par Escourrou G. & Roussel I. (1996) dans trois rues de Paris dont deux sans végétation et une plantée d'arbres, ils ont trouvé que la température de l'air mesurée verticalement à la hauteur de chacun des cinq niveaux de la rue plantée, est inférieure aux positions similaires dans les deux autres rues (-3 °C environ), ce qui permet de mettre en valeur l'effet thermique de la végétation en milieu urbain.

Parallèlement à ça il a été démontré que l'ombre des arbres et végétaux n'a pas un effet très net sur la température de l'air, mais diminue largement le rayonnement solaire incident sur les surfaces qui pourraient émettre un rayonnement thermique de grande longueur d'onde (Izard J.L. & Lehtihet K., 2002)

L'existence d'un vent dominant sur une direction donnée ou une forte canalisation de ce dernier provoque une déformation du végétal présent sur la traversée du flux aéraulique et conduit à une dissymétrie de son feuillage, ce qui est en soi un indicateur très fort de l'écoulement dominant de l'air (Escourrou G.1981). Ainsi qu'au-delà d'une vitesse de 2 m/s la croissance de l'arbre se ralentisse (fermeture des stomates et interruption de la photosynthèse) comme le prouve la taille des arbres en milieux abrités qui s'avère plus grande qu'en zones

exposées. De l'autre côté, en traversant l'arbre urbain (utilisé en alignement ou en brise-vent) le vent perd de sa vitesse.

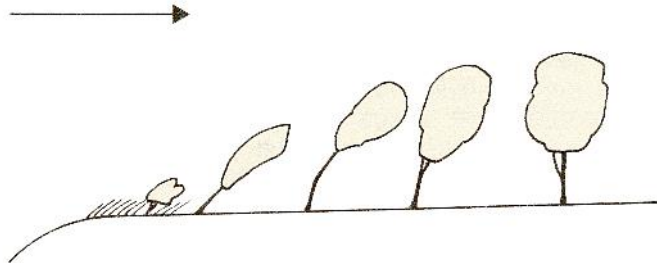


Figure 4.31 : Déformation des arbres par le vent

Source : Escourrou G., 1981.

4.9 Données climatologiques de la ville de Jijel :

La région de Jijel est de climat méditerranéen humide, la présence des hautes montagnes des Babors le caractérise par un volume important de précipitations pendant les saisons pluviales, la belle saison chaude mais sans excès ne connaît par contre que de rares pluies, des températures agréables allongent la saison balnéaire de mai à octobre avec des variations mensuelles de 19° à 26 °C.

Le climat est un élément important dans l'étude du milieu, il est à la base de la distribution des végétaux et des animaux. C'est un facteur clé de valorisation des milieux naturels, ce qui nécessite une investigation analytique de ses composantes. Le climat de notre région d'étude n'échappe pas au type méditerranéen, la région de Jijel est considérée parmi les régions les plus pluvieuses d'Algérie. Elle est caractérisée par un climat pluvieux et froid en hiver, chaud et humide en été. Les températures varient entre 20C° et 35C° en été à 5C° à 15C° en hiver. La saison de pluie dure environs 06 mois.

-Les températures :

Les températures de la zone côtière connaissent un adoucissement grâce à la présence d'une végétation abondante d'eau vive et de la mer. La température annuelle moyenne sur la côte est de 18,2°C (Figure 4.32).

La moyenne maximale correspond au mois d'août avec 26 °C et la moyenne minimale au mois de janvier avec 11°C

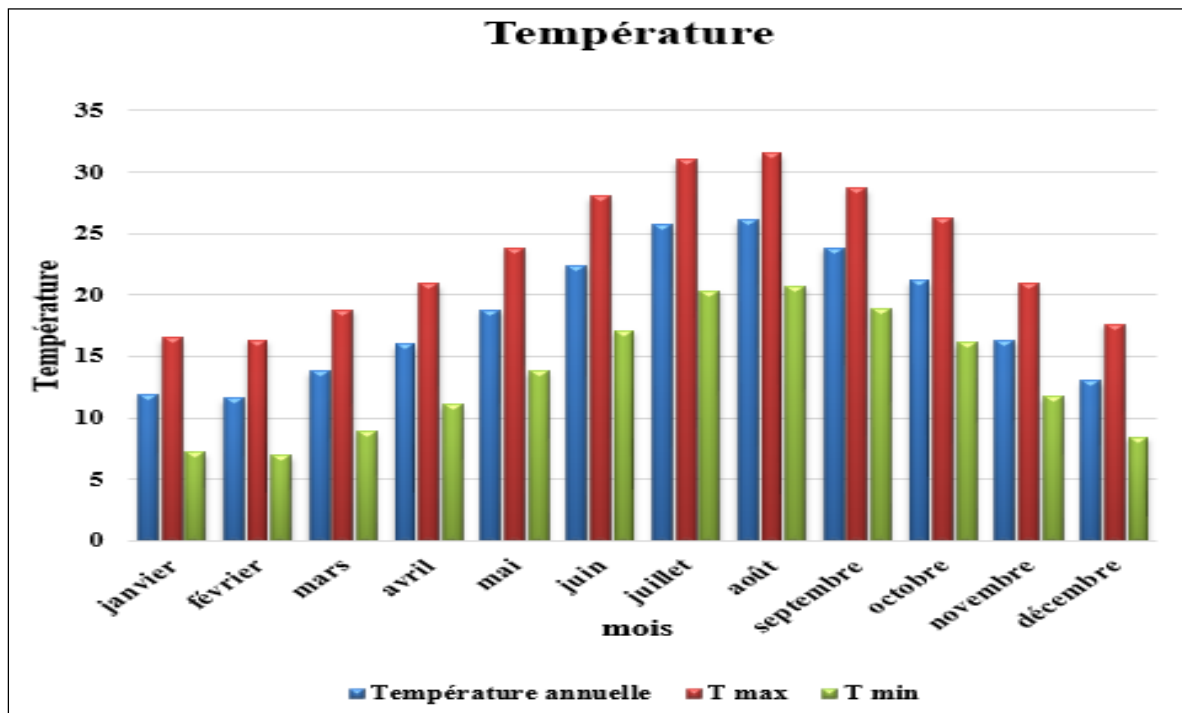


Figure 4.32 : Moyennes mensuelles des températures durant la période 2000-2015 (ONM)

L'humidité :

Les valeurs sont relativement homogènes, quoique les variations soient très petites entre les différentes valeurs, nous notons un maximum au mois d'août (78,6 %) et un minimum en janvier (71,5 %).

Dans l'atmosphère existe toujours une certaine quantité d'eau et cette humidité relative diminue la consommation d'eau de l'arbre en ralentissant sa transpiration, avec une atmosphère humide, une essence peut se contenter d'une moindre quantité de pluie (Boudy.1952).

-Les vents :

Les vents sont de faible intensité, les vents dominants sont d'ouest, leur fréquence est de 116 j/an répartis essentiellement durant la mauvaise saison entre octobre et avril, pendant la saison estivale les vents les plus fréquents sont ceux de l'est avec une période moyenne de 78j/an de juin en septembre (Figure 4.33).

Les vents agissent sur les conditions d'existence des arbres, ils ont une action desséchante qui accélère la transpiration. En outre, ils agissent indirectement en modifiant la

température et le taux d'humidité (Boudy.1952).

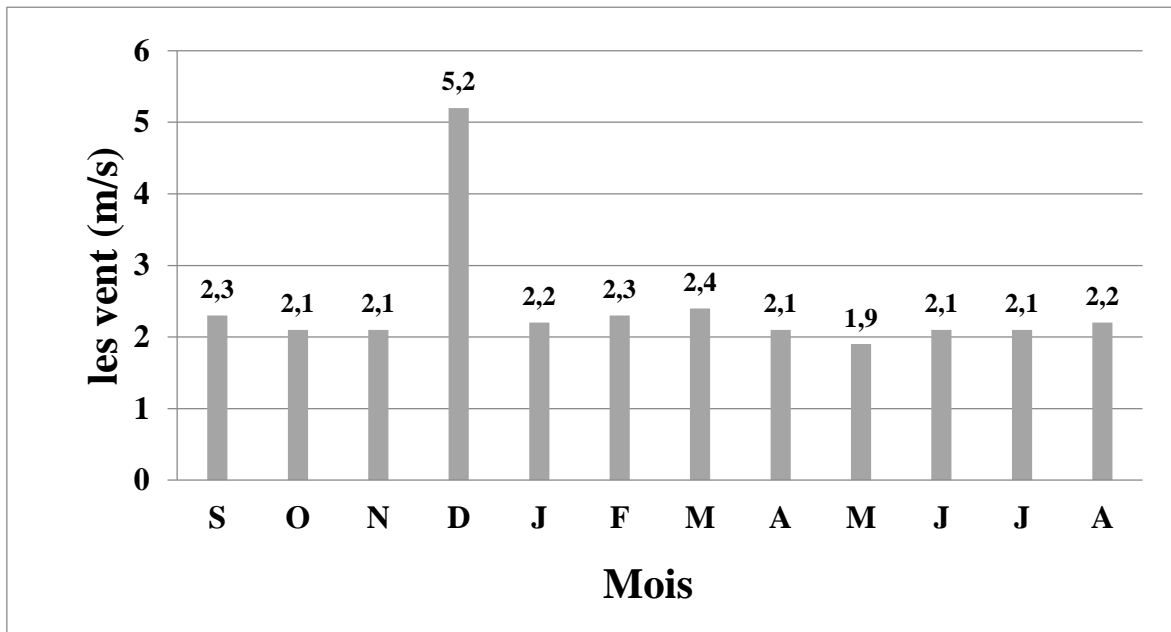


Figure 4.33 : Variation de vitesse de vent (m/s) moyenne mensuelle à la station de l'Achouat(O.N.M).(Période : 2000-2015)

La moyenne maximale de la vitesses des vents pour la période 1985-2004 est égale à 2,3 m/s ce qui est inférieure à la vitesse de 5m/s vitesse a partir de laquelle l'effet refroidissant du végétal est annulé (Brùndi et al, 1986) ce qui nous confirme que les conditions climatiques sont favorables pour l'utilisation de la couverture végétale en tant qu'outil d'amélioration des microclimats urbains dans leur volet confort thermique.

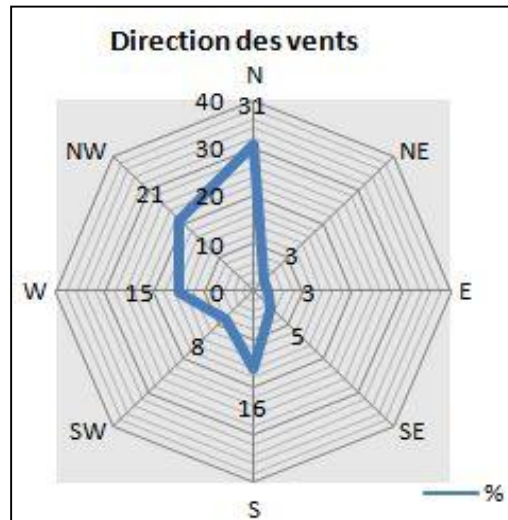


Figure 4.34 : Direction du vent

-Les précipitations :

Les pluies se manifestent essentiellement en automne et en hiver. Les précipitations y sont abondantes aux mois de décembre, janvier et février et sont quasiment nulles aux mois de juin, juillet et août (Figure 4.35).

Le maximum est atteint au mois de décembre avec 162,3 mm et le minimum au mois de juillet avec 2,6mm. La hauteur annuelle moyenne de 1200 mm à Jijel fait de la ville de JIJEL l'une des régions les plus arrosées du pays (moyennes des 40 dernières années) .

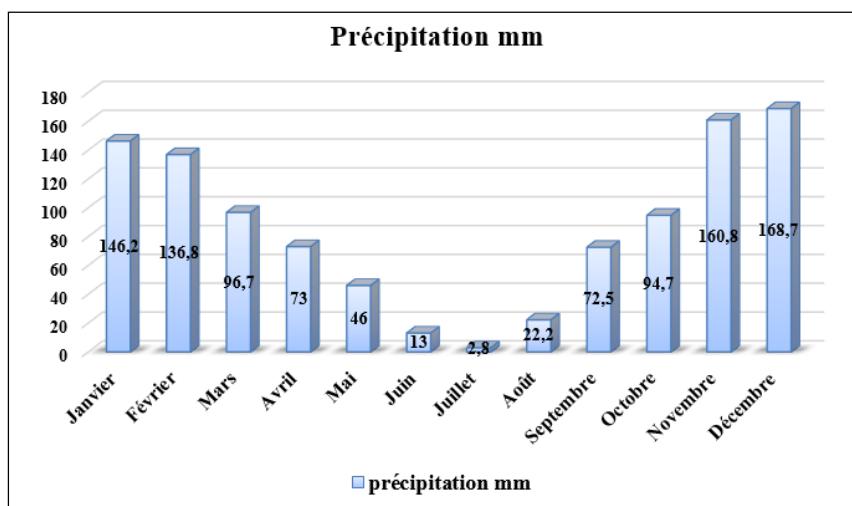


Figure 4.35 : Précipitations pluviométriques dans la wilaya Jijel durant 2000 à 2015.

4.10 Données climatologiques de la ville de Biskra :

La ville de Biskra est située au sud de l'Algérie. Son altitude est d'une moyenne de 88 m, au-dessus du niveau de la mer. Le climat de Biskra est caractérisé par un été très chaud et sec, la température moyenne est de 43.5 °C, l'humidité relative moyenne est de 12 %, (f, et un hiver très froid (température minimale moyenne de 4 °C, humidité relative maximum moyenne de 89 %. Les précipitations sont rares et ne dépassent pas les 31 jours par an. Biskra se place dans la région aride, selon l'indice d'aridité de 'Martonne'.

La station météorologique, source des données principales des valeurs climatiques caractérisant le climat, se trouve à l'aéroport de Biskra (longitude : 05° 44' E (05.73° E), latitude : 34° 48' N et altitude : + 87 m (Station météorologique de Biskra, O.N.M., 2006).



Figure 4.36 : a) et (b), Situation géographique de la ville de Biskra ; (c) carte de découpage administratif. (Alkama 2017).

-Les températures :

Le tableau et graphe suivants montrent et illustrent les températures de l'air en valeurs moyennes mensuelles des maxima (T_{max}), des minima (T_{min}) et des moyennes (T_{moy}). Ces valeurs s'étalent sur une série très fiable de 38 ans, de 1967 à 2005 (Station météorologique de Biskra, O.N.M. 2006). Elles informent que la température moyenne mensuelle des maxima la plus élevée est celle du mois de juillet où il a été enregistré la valeur de 39.7 °C, par contre la température moyenne mensuelle des minima la plus basse est celle du mois de janvier ayant comme valeur 6.9 °C. De ce même tableau, on déduit que la température moyenne annuelle des maxima est de 27.5°C, des minima est de 16.5 °C et des moyennes annuelles est de 22°C.

Les températures records enregistrées jusqu'alors sont : -1 °C en date du 30/12/1917 et du 31/01/1935 ainsi que 49.2 °C le 15/08/1931 (Seltzer P. 1946).

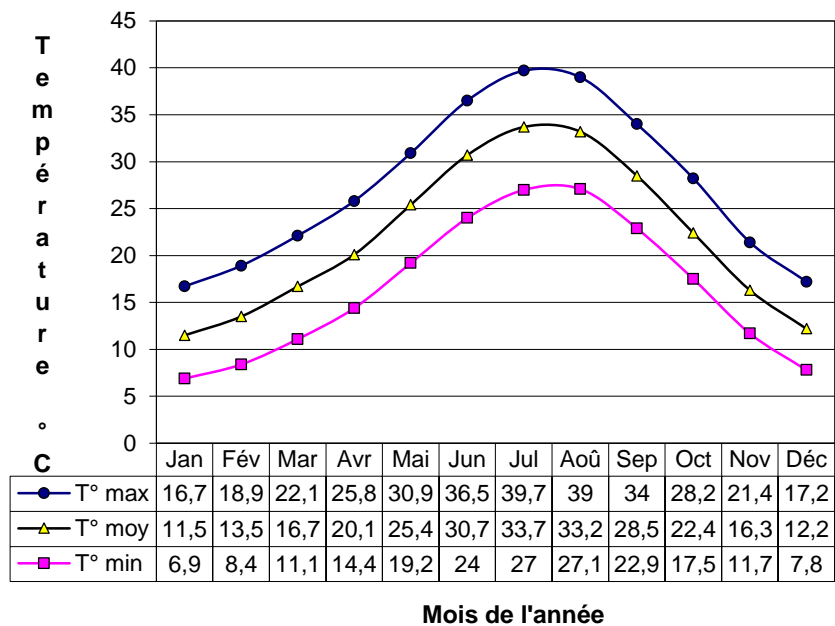


Figure 4.36 : Moyennes mensuelles des températures de l'air (période 1967-2005).

(Office national de météorologie Biskra).

L'humidité :

La figure 4.37 établie sur la base des données de l'Atlas climatologique national (O.N.M.), procure les moyennes mensuelles de l'humidité relative pendant huit heures synoptiques de la journée durant la période 1975-1984. On note que pour tous les mois de l'année, le moment de la journée le plus humide est celui de 6 heures T-U (7 h, temps légal). Par contre, le moment où l'humidité relative bat son minimum est celui de 15 heures T-U. La variation inter-mensuelle est telle que le taux d'humidité le plus bas (au cours de la journée) en décembre (42.6 %) est supérieur de 6.6 % au taux le plus élevé du mois de juillet (36 %).

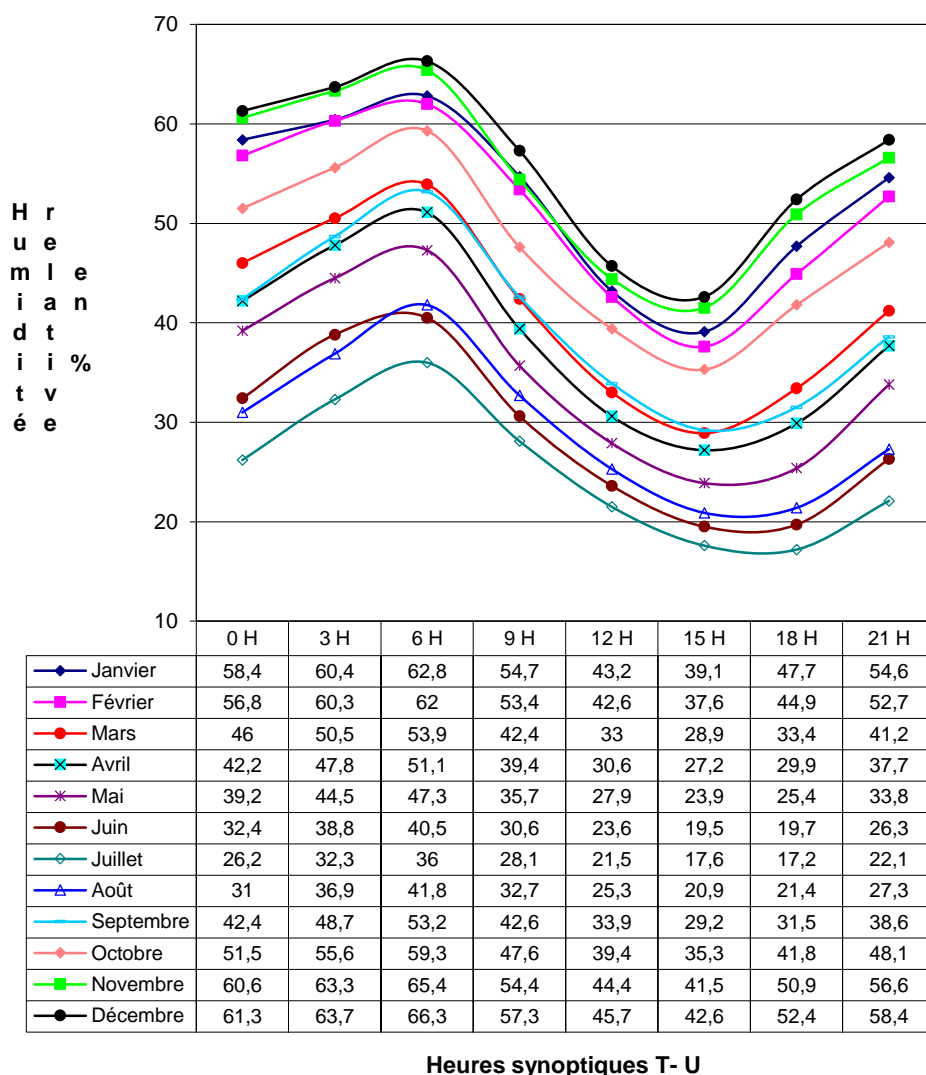


Figure 4.37 : Moyennes mensuelles des humidités relatives (période 1975-1984).

(O.N.M. Biskra).

-Les vents :

La vitesse annuelle moyenne du vent est de 4.33 m/s, dont le mois d’avril dans sa moyenne, constitue l’apogée (5.6 m/s) et les mois de septembre et octobre, le niveau le plus bas (3.8 m/s). Afin d’éviter les obstacles, cette vitesse est prise à une hauteur de 10 m au-dessus sol. La période de la journée où le vent atteint en général son niveau maximal est celle comprise entre 9 h et 15 h (temps universel). Entre 18 h et 0 h, le vent enregistre généralement des valeurs

relativement minimales. La classe des vitesses du vent max. comprise entre 6 et 10 m/s est la plus fréquente. (O.N.M.).

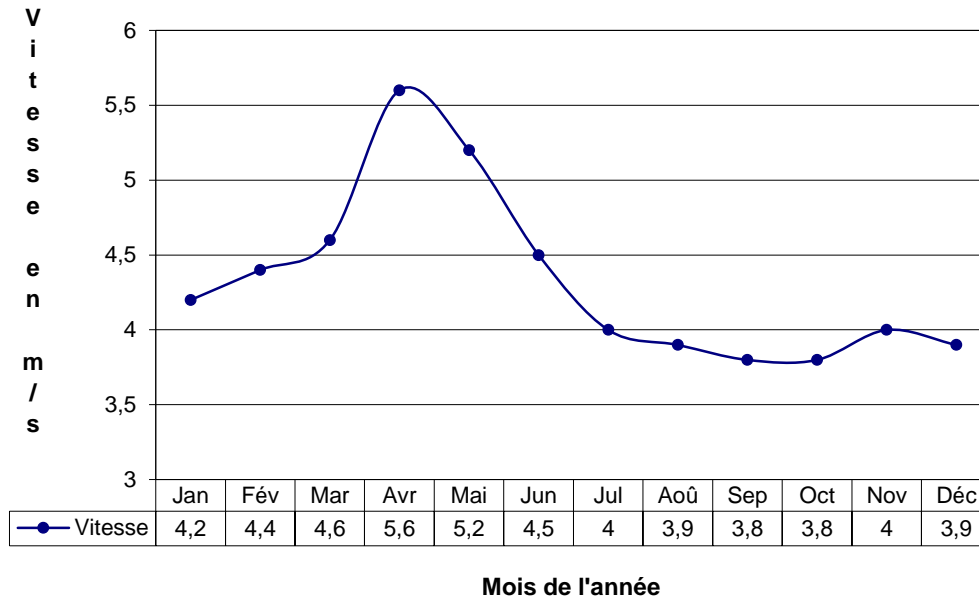


Figure 4.38 :Vitesse moyenne mensuelle du vent (période 1967-2005).

(ONM Biskra).

-Les précipitations :

Les 136 mm par an de précipitations moyennes dans la région de Biskra pendant 35 jours au cours de la période 1967-2005, sont considérées comme très faibles (Station météorologique de Biskra, O.N.M., 2006). De son côté, Seltzer P. (1946) a enregistré une moyenne de 156 mm pendant 34 jours par an durant la période 1913-1938 avec un écart moyen relatif de 0.39. Incluse dans l'intervalle de 100 à 200 mm par an, ce qui correspond parfaitement à la marge septentrionale du Sahara algérien, relative à la zone du piémont de l'Atlas saharien (frange qui s'étend du Sud des monts des Ksour jusqu'au Sud du massif de l'Aurès). Elle est due aux ultimes courants humides ayant franchis la barrière morphologique que constituent les deux massifs du Tell et de l'Atlas saharien, mais il s'agit de résidus relativement marginaux qui ne font qu'atténuer légèrement la contrainte de l'aridité. (Kouzmine Y. 2003).

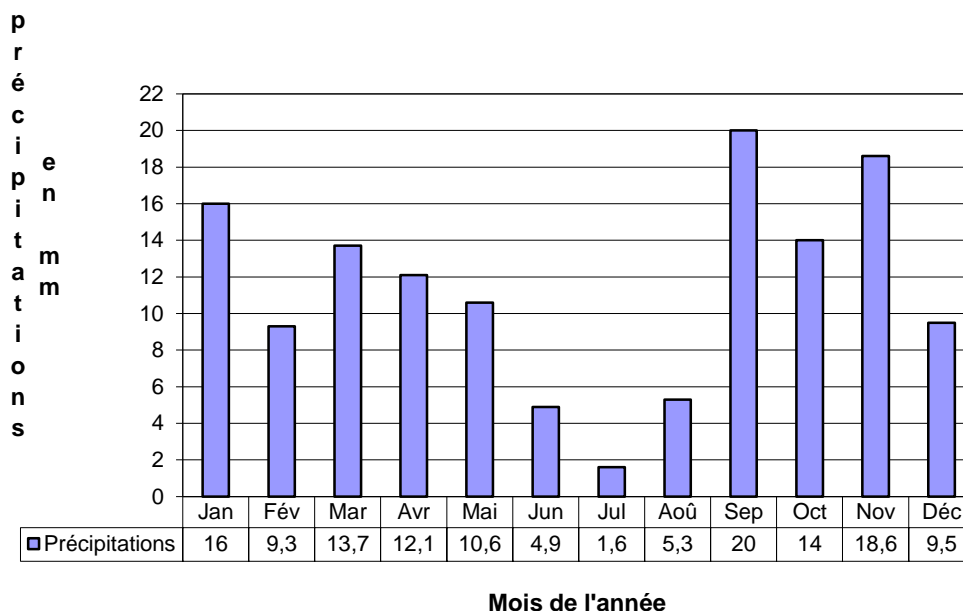


Figure 4.39 : Précipitations moyennes mensuelles (période 1967-2005).

(ONM Biskra).

-La durée d'insolation :

Les données d'insolation moyenne journalière et mensuelle sont empruntées à Capderou M. (1987). Il note qu'elles sont recueillies pendant 14 ans dans Normale climatologie (CLINO) de l'O.N.M., effectuées entre 1930 et 1967 ; 6 ans, entre la période 1960 et 1978, dans les mesures supplémentaires fournies par l'O.N.M. à Lotz et Jacob et enfin les mesures faites principalement entre 1952 et 1956 tiré de l'ouvrage "Données sur le Sahara" publiées par Dubief, c'est-à-dire sur cinq ans.

L'insolation moyenne annuelle est de l'ordre de 3417 heures ce qui fait de la localité de Biskra l'une des plus ensoleillées. Le mois de juillet culmine et totalise à lui seul 383 heures, par contre on trouve que novembre est le mois le moins ensoleillé avec 210 heures de soleil.

A deux échelles différentes, la courbe représentant la durée moyenne d'insolation quotidienne suit sensiblement celle de l'insolation mensuelle, sauf pour le mois de février en raison du nombre de jours relativement moindre.

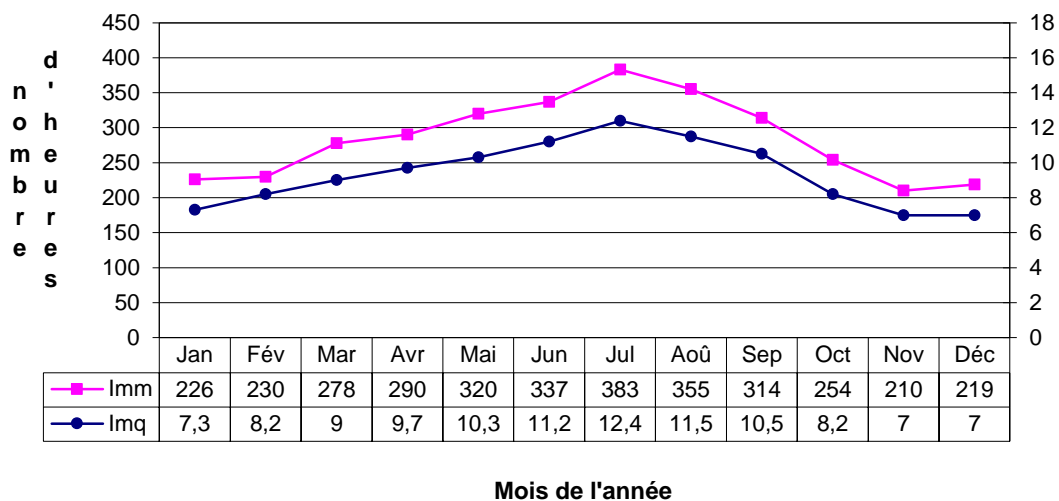


Figure 4.40 : Durée moyenne d’insolation quotidienne (Imq) et mensuelle (Imm).

(Source : Capderou M. 1987)

Conclusion :

En milieu urbain la connaissance des éléments déterminants dans la caractérisation du microclimat est indispensable à toute étude qui veut être en relation avec ce qui est climatique.

Le phénomène le plus important dans le milieu urbain responsable de la formation des microclimats semble être par excellence, le rayonnement solaire. Ce dernier procure un apport important d'énergie responsable de l'échauffement de l'air selon les conditions météorologiques (état du ciel et de l'atmosphère), la position du point dans le globe (hauteur du soleil et latitude, en ville ou en milieux naturel), la forme de l'espace (dimensions, prospect, l'ouverture au ciel) la nature du sol et de toute autre surface réceptrice (exposition, matériaux utilisés, capacité thermique, albédo, etc.), le couvert végétal, la pente, l'orientation, le relief, la proximité d'étendues liquides, etc. Le vent par la suite, jouera un rôle de dissipateur de la couche d'air ainsi constituée et ayant eu certaines caractéristiques ou d'accélérateur des échanges thermiques avec l'air environnant. C'est ce qui explique la signification microclimatique de tout ce qui encourage la stagnation aéraulique.

En ville, en plus du rayonnement net, les termes du bilan énergétique renseignent sur la chaleur engendrée par les différents processus à savoir : énergie anthropique, chaleur stockée dans les masses, chaleur sensible et chaleur latente, toutes responsables de l'augmentation de la température en ville par rapport à la campagne environnante. Une fois la chaleur est élevée une

influence directe est à constater sur la baisse du taux de l'humidité relative. L'effet du végétal quant lui, est primordial dans le rafraîchissement de la température de l'air par le processus de refroidissement par évaporation et évapotranspiration ; le ralentissement du vent et la réduction de l'exposition des surfaces au flux radiatifs.

En dernier lieu les données climatologiques des villes de Jijel en zone méditerranéenne et celle de Biskra en zone aride ont été présentés, cela nous servira à élaborer l'étude comparative de l'impact de la végétalisation des toitures sur le confort thermique intérieur des constructions à l'aide du logiciel de simulation numérique ECOTECT.

CHAPITRE 5

METHODES ET MOYENS D'INVESTIGATION

Introduction :

Ce chapitre concernant le travail expérimental réalisé dans le but de quantifier l'impact des terrasses et toitures végétalisées sur le confort thermique intérieur des constructions ainsi que sur l'atténuation de l'effet îlot de chaleur en milieu urbain a été entamé à travers la réalisation de modules expérimentaux prototypes à l'échelle humaine creusés dans le sol d'une profondeur de 2m et d'une largeur de 1.5m et recouverts avec une dalle conventionnelle en béton armé de 10cm d'épaisseur. Une étude comparative du module de référence recouvert d'une dalle en béton armé avec le deuxième module dont la couverture en dalle est recouverte une fois avec de la végétation extensive et une autre fois avec de la végétation semi intensive a été réalisée. Ces modules expérimentaux creusés dans le sol avaient pour objectif d'inhiber l'impact des parois latérales sur l'ambiance thermique intérieure permettant ainsi uniquement à la couverture d'avoir un impact sur les valeurs enregistrées.

- 1^{er} module avec toiture conventionnelle en béton armé (sans végétation).
- 2^{ème} module avec toiture recouverte de végétation extensive.
- 3^{ème} module avec toiture recouverte de végétation semi intensive.

Ces modules expérimentaux ont servi pour les campagnes de mesures in-situ réalisées durant le mois d'août 2012 à Jijel, cette période étant considérée comme chaude et significative pour déterminer l'impact des différents types de végétalisation de terrasses et toitures sur les microclimats urbains ainsi que sur le confort thermique intérieur des constructions et par conséquent sur l'efficacité énergétique des bâtiments.

Les résultats de ces campagnes de mesures in situ seront analysés afin d'en tirer les conclusions finales.

Afin d'étendre le champ d'investigation et de corrélérer les résultats obtenus à l'échelle de la ville le même scénario sera réalisé à l'aide d'outils de simulation numérique que sont ECOTECH pour la performance énergétique et le confort intérieur des constructions et ENVI met qui est un logiciel tridimensionnel de simulation pour les conditions de confort au niveau microclimatique.

5.1. Présentation de la ville de Jijel :

La ville de JIJEL fait partie du contexte méditerranéen avec des ressemblances avec les autres villes nord et sud de ce bassin. Chacune de ces villes garde sa spécificité tout en se fondant dans l'identité méditerranéenne : l'eau, la végétation, la lumière sont toujours omniprésents dans les cités du pourtour de cette mer. La caractéristique principale et dominante de cette région est l'existence de trois éléments : la mer, les cotes, les forêts et montagnes. La signification du mot MEDI-TERRA est au milieu des terres, cette région a toujours été le carrefour de plusieurs civilisations.

JIJEL s'inscrit dans ce contexte méditerranéen riche et complexe, aussi ce chapitre concerne la présentation de la ville dans son environnement régional, son historique ses données urbanistiques et climatologiques, la nature et la densité de son couvert végétal seront présentés à l'aide de la carte végétale de la ville.

Jijel dont la fondation revient aux phéniciens a connu de nombreuses civilisations qui s'y sont succédé depuis l'époque berbère.

Située au nord-est du pays et distante d'environ 359 Km de la capitale Alger, 96 Km de Bejaia et 146 Km de Constantine, la ville de Jijel et le chef-lieu de la wilaya qui porte le même nom et qui couvre une superficie de 2398 Km² et comprise entre les méridiens 5° 25 et 6°30 Est de Greenwich et entre les parallèles 36°10 et 36°50 hémisphère Nord, la région appartient au domaine des Babors.

La wilaya est limitée au nord par la mer méditerranée au sud par Mila, au sud est par Constantine et au sud-ouest par Sétif. Skikda délimite la partie est tandis que Bejaia borde la partie ouest (Figure 5.1).

Jijel représente l'un des plus importants points de liaisons par terre, par mer et par son port qui a toujours été dirigé vers l'import-export et aussi par sa richesse en produits de la mer. Elle est reliée à Bejaia et Skikda par la RN43 et à Constantine par la RN 27. Cette dernière liaison permet à la ville de retrouver sa fonction de transit par rapport aux villes avoisinantes de l'intérieur vers ou elle assure l'acheminement des marchandises en plus de la liaison par chemin de fer au niveau de Ramdane Djamel permettant à la ville de retrouver son rôle de comptoir commercial, en outre elles expliquent en tant qu'uniques grandes voies de

communications le développement de l'accessibilité à l'intérieur des wilayas limitrophes plus par l'est que par l'ouest.

Jijel devient de plus en plus fonctionnelle, elle est assujettie aux intérêts économiques qui la façonnent et la transforment en augmentant la circulation routière et l'activité économique, de plus la région jouit de potentialités naturelles certaines, son paysage pittoresque, accueillant fait de couleurs et de diversités ou se succèdent falaises, caps, promontoires, presqu'îles, grottes et bien d'autres merveilles.

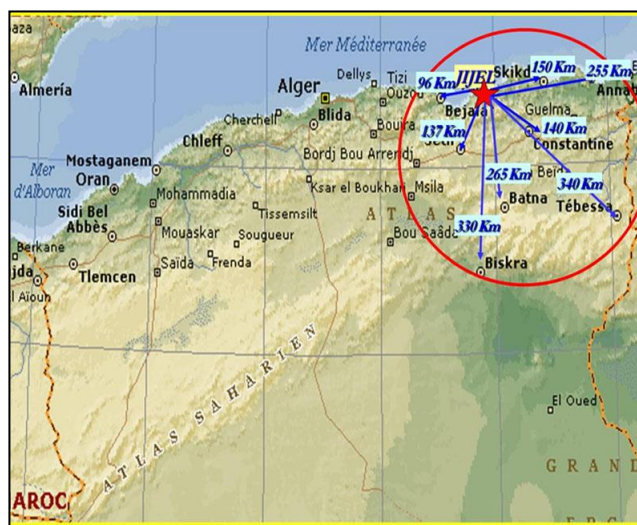


Figure 5.1 : JIJEL, situation dans l'Algérie. (Direction du tourisme de la wilaya de Jijel)

5.2. Historique de la ville de Jijel :

Le nom de la ville, IGILGILL, trouve son origine dans l'antiquité pré-romaine, puis romaine, divers noms lui ont été attribués suite aux diverses occupations qui se sont succédées, soit : Gigel , Djidjel , Djidjeli et enfin Jijel.

Cette ville devient colonie romaine sous l'empereur Auguste faisant partie de la Mauritanie césarienne puis de la Mauritanie sétifiène. La décadence progressive de l'Empire romain, facilite la libération des populations berbères de Kabylie orientale.

Au début du 19^{ème} siècle les « Frères Barberous » Aroudj et Kheireddine, firent leur apparition à Jijel où ils projetaient de faire un centre de concentration et de ravitaillement.

C'est de Jijel, où il avait établi son quartier, que Aroudj a pris la mer pour faire la conquête d'Alger en 1516 .



Figure 5.2 : Centre colonial de Jijel. (Web site Jijel Info)

La ville par sa situation géographique et les valeurs des paramètres climatologiques régionales offre des conditions favorables pour le développement dense du couvert végétal.



On remarque pratiquement l'inexistante du couvert végétal au niveau des quartiers arabo-musulmans d'où le manque d'intérêt porté à ses quartiers par la colonisation.

Figure 5.3 : Quartier arabo musulman à Jijel (Auteur).

Après 1611, les Espagnoles essayèrent quelques tentatives d'invasion de Jijel sans résultat jusqu'en 1839, date de la conquête par les Français.

De par son histoire mouvementée en raison de son ouverture sur la Méditerranée, la région de Jijel a été le carrefour de plusieurs civilisations dont les traces se retrouvent çà et là, telles que les ruines romaines de Chobae à Ziama Mansouriah.



Figure 5.4 : Végétation côtière à Jijel avant réalisation port de pêche. (Auteur)

La végétation dense était partout présente sur le littoral de la wilaya de Jijel (Figure5.4).

5.3. Structure urbaine :

L'espace urbain de la ville de Jijel présente une multitude de tissus urbains qui se sont développés surtout durant la période post coloniale.

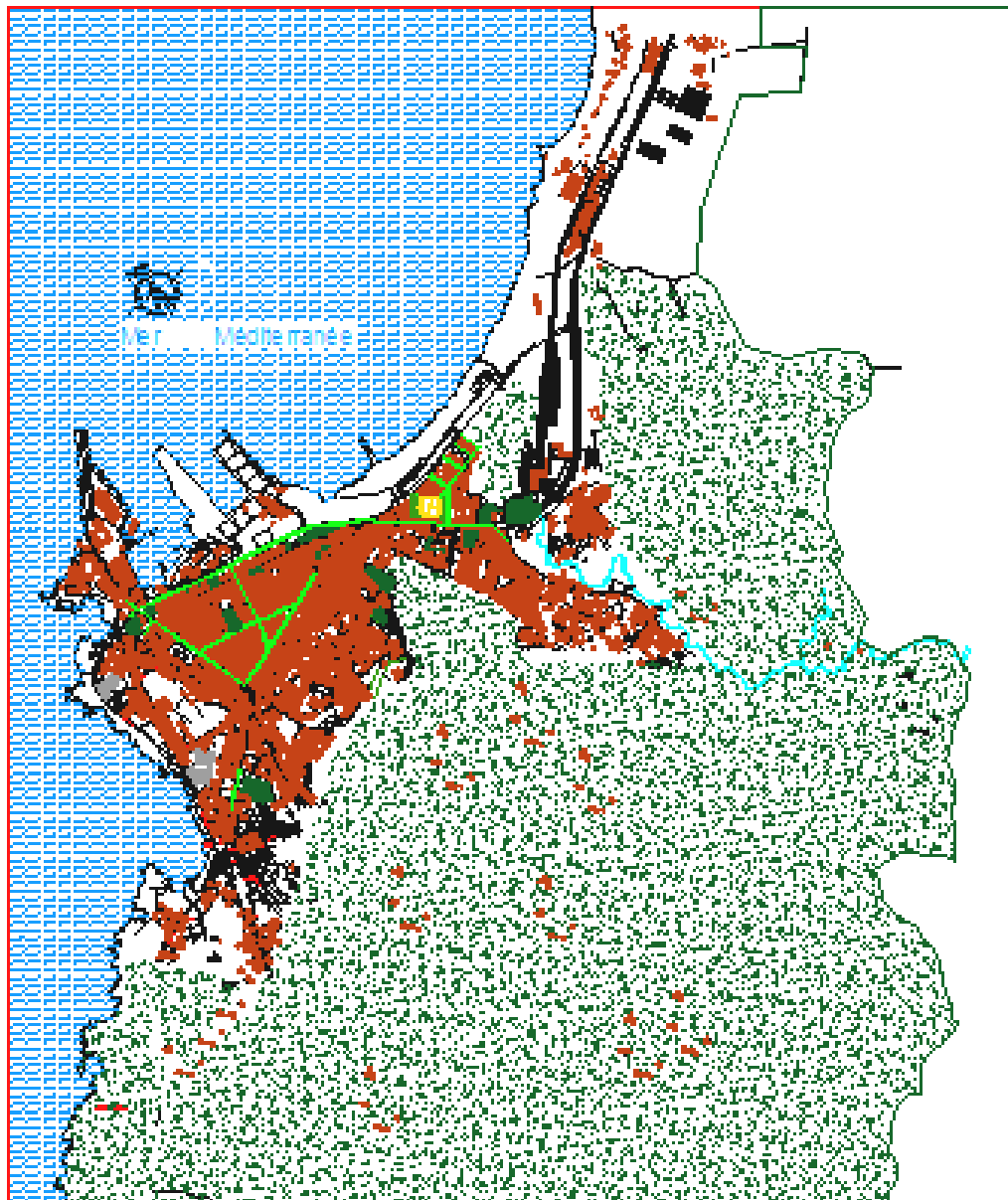
1. Tissu urbain en damier avec rues orthogonales ceinturées de façon triangulaires par trois grandes avenues Emir Abdelkader, Abdelhamid benbadis et l'avenue du 1 novembre.
2. Tissu spontané sur la partie sud du centre-ville, faubourg, pépinière et crête
3. Les zones d'habitat urbaines nouvelles apparues après 1974 quand la ville de Jijel fut doté d'un plan d'urbanisme directeur, se situant dans la partie sud et sud ouest de la ville, les trois zones d'habitat urbaines se caractérisent par des constructions et habitations de type collectif économique ainsi que par des groupes de constructions spontanées.

Il convient de noter que l'extension urbaine de la ville de Jijel a été faite au détriment de la couverture végétale existante et qu'aucune stratégie de préservation du couvert végétal n'a été adoptée ni envisagée (figure 5.5 et 5.6)

5.4 Le couvert végétal à Jijel :

En Afrique du Nord, comme d'ailleurs dans tous les pays à climat sec et chaud, la forêt exerce une influence incontestable et régulatrice sur le climat local, cette action est beaucoup plus marquée que dans les pays d'Europe à climat plus régulier, on a pu constater dans les stations météorologiques forestières d'Algérie que la température moyenne était plus basse en forêt, que l'humidité était plus élevée, que la présence d'un massif forestier important tendait à accroître la pluviosité moyenne de 8% sans toutefois que le nombre de jours de pluie fut augmenté (Boudy.1952).

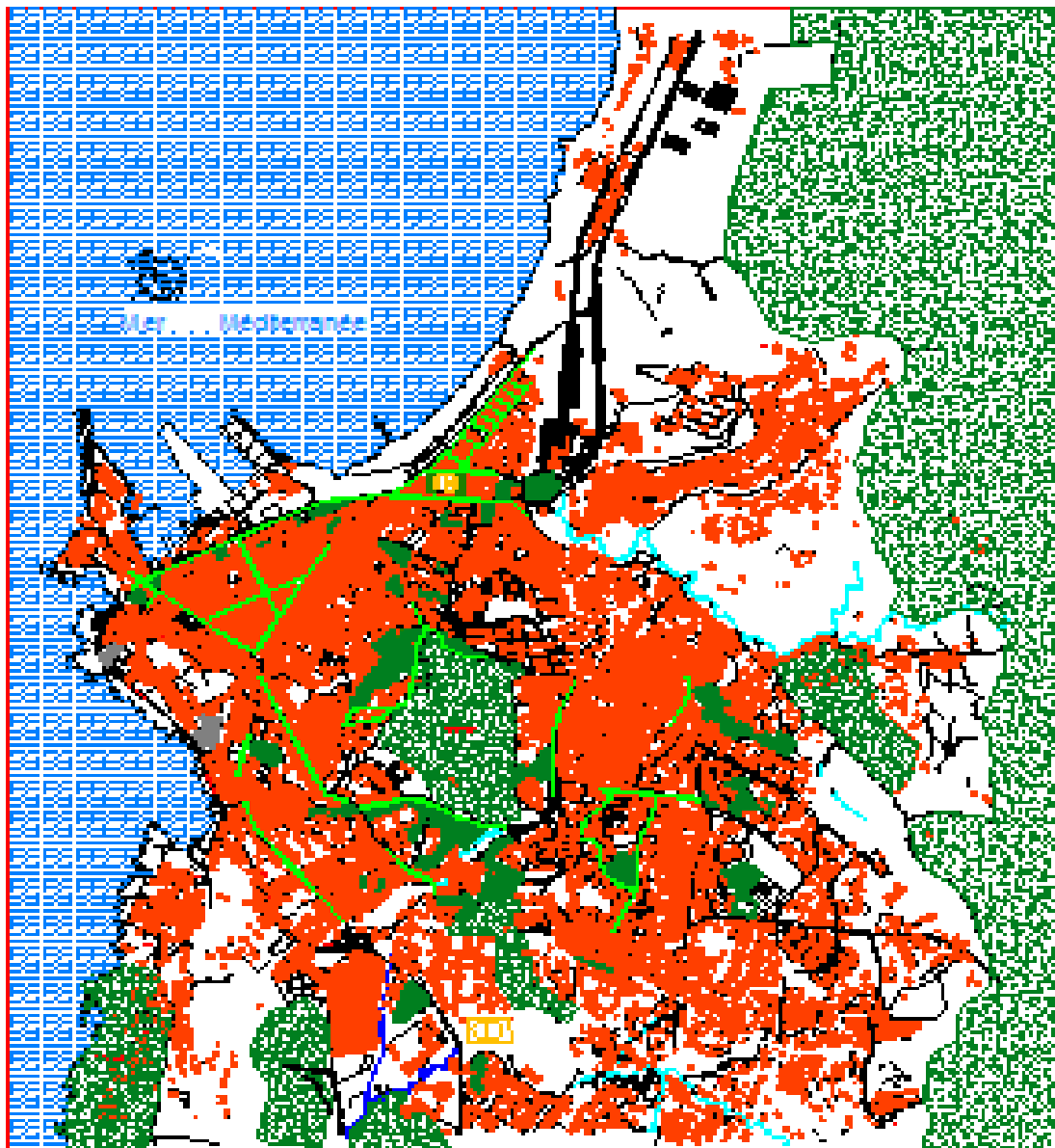
Avec un environnement naturel presque intact, la région de Jijel jouit d'une couverture végétale très épaisse. En effet le couvert forestier est omniprésent et formait une ceinture autour de la ville de Jijel, sa présence est très remarquée au niveau de la ville surtout dans les zones non urbanisées tel que la zone militaire ainsi que la bande allant de la crête ouest vers el haddada en passant par le lycée el kendy et ben achour.



LEGENDE :

-  Le bâti
-  Arbre d'alignement
-  La Couverture Végétale
-  Forêt arborée

Figure 5.5 : La ville de JIJEL et sa couverture végétale en l'année 1976 .Echelle 1/25000
(Source Agence Nationale du Cadastre. Antenne de JIJEL)



LEGENDE :

-  Le bâti
-  Arbre d'alignement
-  La Couverture Végétale
-  Forestière

Figure 5.6 : La ville de JIJEL et sa couverture végétale en l'année 2006. Echelle 1/25000 (Agence Nationale du Cadastre. Antenne de JIJEL)

5.5. Travail expérimental in situ à Jijel :

La ville de Jijel située au nord-est de l'Algérie a été choisie comme site pour notre étude comprise à latitude 36.47°N et longitude 5.46°E et est caractérisée par un climat méditerranéen chaud et humide l'été froid et pluvieux l'hiver. La figure 5.7 montre la situation géographique de la ville de Jijel.



FIGURE 5.7 : Situation géographique de la ville de Jijel..

Afin d'effectuer notre travail expérimental, deux modules expérimentaux ont été réalisés sur un site situé juste aux premiers abords de la ville de Jijel de la façon suivante :

Excavation de deux modules en pleine terre de $1.50\text{m} \times 1.20\text{m} \times 2.00\text{m}$, la journée du 26/08/2012 le premier module qu'on dénommera module de référence a été couvert avec une dalle de béton armé nue de 5cm d'épaisseur le deuxième recouvert avec une dalle de même type recouverte de végétal tapissant constituée de lierre rampant qui est une essence endémique de la région de Jijel nécessitant peu d'entretien.

Une deuxième expérience a été réalisée le 29/08/2102 avec le premier module de référence et le deuxième module avec dalle en béton armé mais recouverte avec une couche de substrat de 5cm et du même type de végétal rampant qu'est le lierre, ce concept est dénommé végétalisation extensive de toiture. Ce travail vient en complément d'un travail de recherche sur l'impact du végétal urbain sur le microclimat de la ville de Jijel.

Le végétal type lierre est une plante résistante à feuilles persistantes, grimpante et rampante à la fois, sa croissance est plus rapide que les autres espèces et entre en concurrence avec ces dernières par l'ombre portée de ses feuilles et par le phénomène d'allélopathie qui se manifeste par des émissions gazeuses ou de pluviaux-lessivât qui empêchent la germination d'autres espèces. C'est pour cette raison et afin de favoriser la multiplication d'autres espèces sur les terrasses et toitures végétalisées que sa plantation est recommandé en second lieu [20]. Le lierre à feuilles vertes présente une activité photosynthétique plus intense que le lierre à feuilles panachées à travers des échanges gazeux plus importants et une absorption plus grande du rayonnement solaire. L'exposition de ces racines à l'orientation nord engendre de faibles besoins d'irrigation et d'arrosage.

Les valeurs de températures ont été relevés aussi bien au niveau des surfaces supérieures et inférieures des toitures des modules expérimentaux qu'au niveau de l'ambiance intérieure de ces modules, ces valeurs seront comparés en premier lieu entre elles et avec les valeurs de température du site et de la station météorologique en second lieu.

5.5.1 Protocole de mesures :

L'évaluation de l'incidence des toitures végétalisées sur le microclimat de la ville de Jijel s'est basé sur l'analyse fine des valeurs de températures relevées aussi bien au niveau des surfaces supérieures et inférieures des toitures des modules expérimentaux qu'au niveau de l'air intérieur de ces modules, ces valeurs seront comparés en premier lieu entre elles et avec les valeurs de température du site et en second lieu avec les valeurs de température de la station météorologique d'El achouat.

Les mesures de température et d'humidité sur site ont été relevés avec un thermo hygromètre portable type Testo 625 avec lecture instantanée des données sur écran numérique avec une plage de mesure de -200 à $+1370$ °C et un écart de $\pm 0.5\%$ (Figure 5.8.a).

L'acquisition des différentes données de température ont été réalisés avec un thermomètre de type Testo 925 connectable aux différentes sondes avec lecture instantanée sur écran numérique avec une plage de mesures de -50 à $+1000$ °C et un écart de $\pm 0.5\%$ (Figure 5.8 b).

Les mesures de température au niveau des surfaces supérieures et inférieures des modules expérimentaux ont été effectués avec une sonde de contact à réaction rapide avec thermocouple de type K (Référence Testo 0602 1293) étendue de mesures à $+500$ °C (Figure 5.8.c).

Les mesures de température d'ambiance des modules ainsi que la température sous substrat ont été réalisées avec avec une sonde de surface, d'immersion et de pénétration à réaction rapide avec thermocouple de type K (Référence Testo 0602 0393) étendue de mesures -60 à $+400$ °C (Figure 5.8.d).

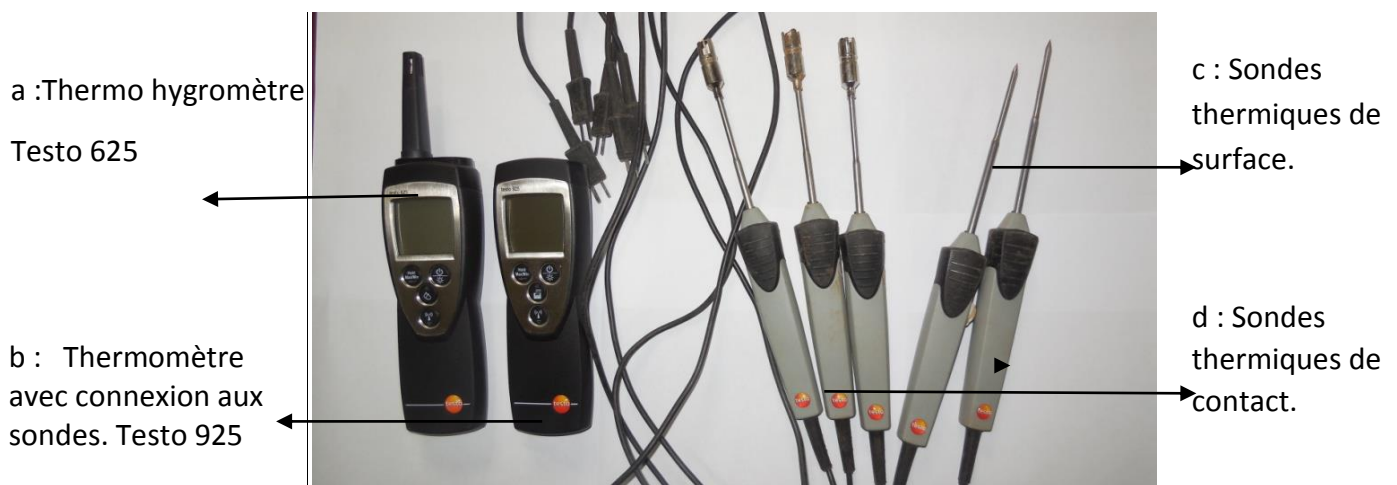


Figure 5.8 : Instruments de mesures

5.5.2 Choix du site d'expérimentation et configuration des modules expérimentaux :

La localisation du site d'expérimentation (Figure 5.9) et la configuration des modules expérimentaux (Figure 5.10) se sont basés sur les paramètres suivants :

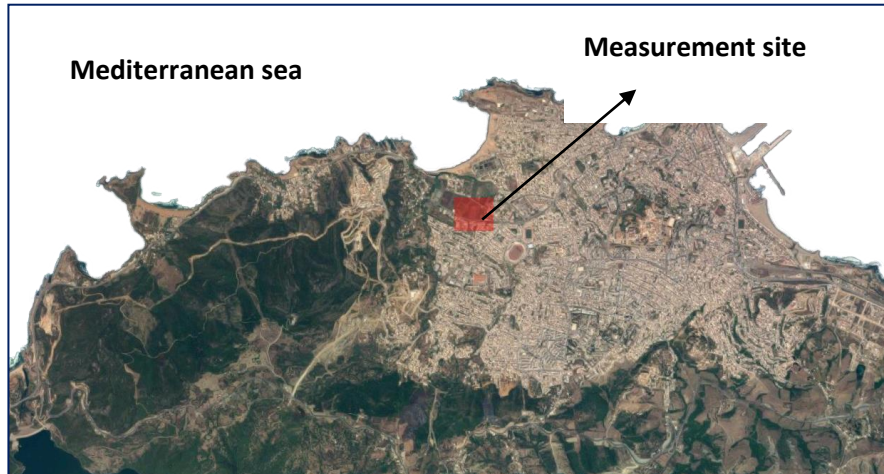


Figure 5.9 : Plan de situation du site d'expérimentation localisé à Bouremel, Jijel.

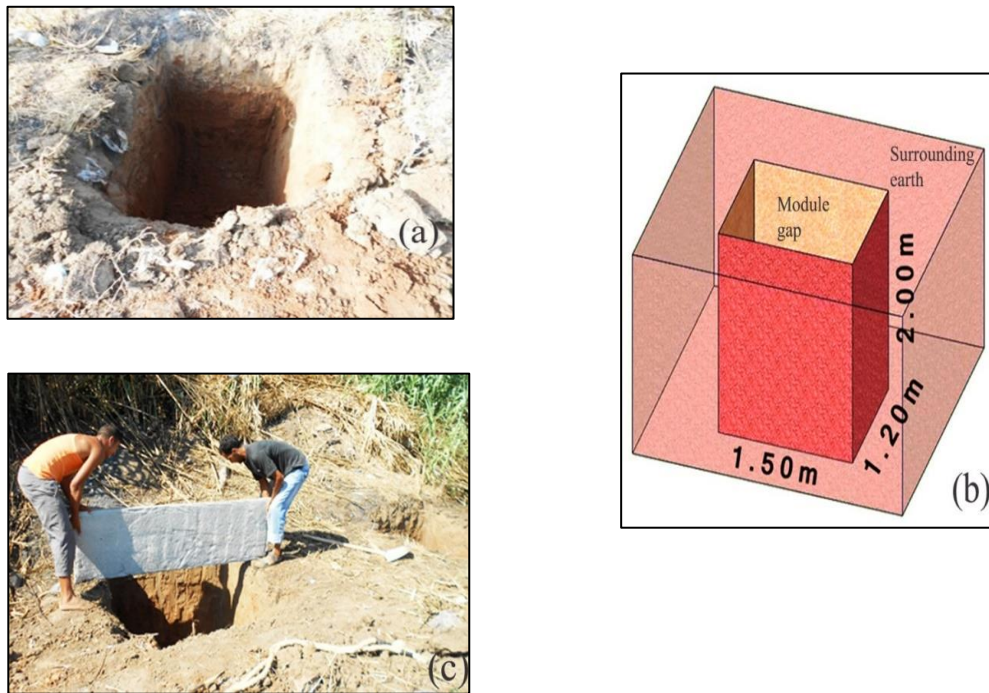


FIGURE 5.10 : module sur site experimental : (a) module découvert, (b) volumétrie et dimensions du module, (c) : Installation d'une dalle préfabriquée en béton armé pour couvrir le module.

- **Absence de constructions** : Le site d'expérimentation a été choisi aux abords immédiats de la structure urbaine et dans les limites de la ville de Jijel, ce choix d'un site libre et relativement plat a été motivé par l'absence de constructions pouvant jouer un rôle de masque solaire ou d'exacerbation de l'influence du rayonnement solaire par réflexion sur les différentes constructions.

- **Modules expérimentaux enterrés avec toitures exposés** : Ces modules expérimentaux enterrés ont été réalisés afin d'inhiber l'impact des parois et permettre de quantifier uniquement l'incidence de la toiture sur les valeurs de température enregistrées.

- **Choix des points de mesures** :

La valeur de la température de surface supérieure au centre des terrasses des modules expérimentaux nous permet d'évaluer le paramètre de stockage thermique ainsi que les capacités de réflectivité du rayonnement solaire (bilan radiatif) amplifiant l'effet ICU.

La valeur de température inférieure des terrasses des modules expérimentaux nous permet d'évaluer l'incidence de la toiture végétalisée sur l'isolation thermique des modules expérimentaux.

Les températures d'ambiance relevées nous permettent de quantifier l'impact de la terrasse végétalisée sur le confort thermique intérieur des modules et ainsi évaluer l'incidence du recours aux procédés de rafraîchissements actifs énergivores et émetteurs de gaz à effet de serre.

5.5.3 Périodes, conditions climatiques et séquences de mesures :

La période de mesure choisie pour ce travail de recherche a été le 26 et 29 Aout 2012, car elle est considérée comme période chaude d'été pour la ville de Jijel. Le ciel était clair et les conditions étaient anticycloniques, la moyenne de la vitesse du vent était de 3m/s, celle de l'humidité relative était de 72 %.

En respect des critères mentionnés ci-dessus, nous avons procédé aux mesures des différentes valeurs sur les modules expérimentaux selon le protocole suivant.

- Prise de mesure des valeurs de température chaque heure de 8h à 19h aux points suivants :

Module expérimental de référence avec dalle en béton armé nue (Figure 5.11) :

- Température de surface supérieure de la dalle en béton armé ($T_{sup.1}$).
- Température de surface inférieure de la dalle en béton armé ($T_{inf.1}$).
- Température d'air intérieure du module expérimental ($T_{in.1}$).

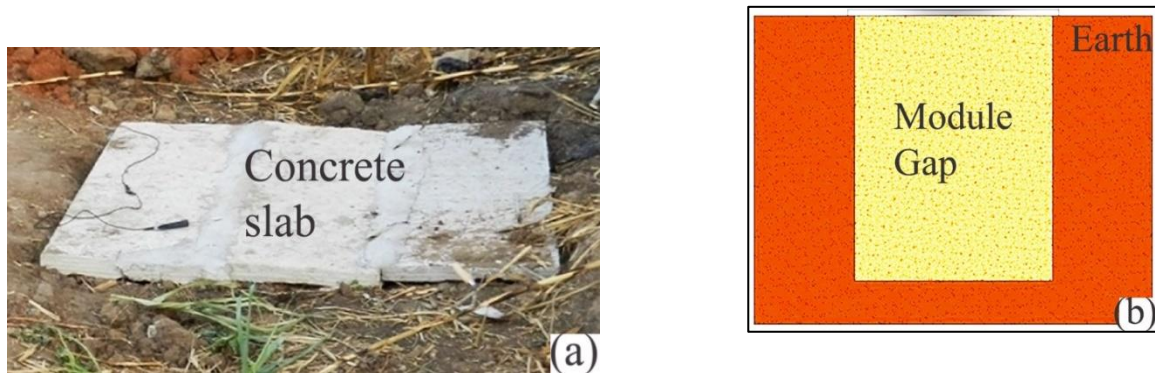


FIGURE 5.11 : Module experimental de reference avec dalle en béton armé nue. (a) vue aérienne(b) coupe verticale.

Module expérimental avec dalle recouverte de végétation rampante (Figure 5.12):

- Température de surface de la végétation($T_{sup.2}$).
- Température de surface inférieure de la dalle en béton armé($T_{inf.2}$).
- Température d'air intérieur du module expérimental($T_{in.2}$)

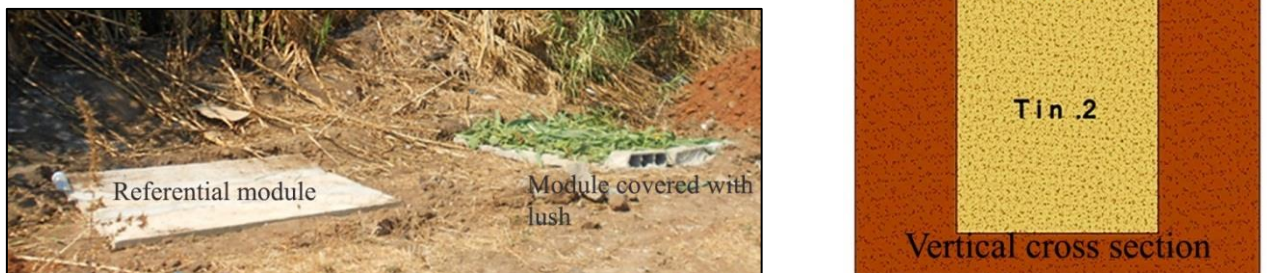


FIGURE 5.12: Module experimental avec dalle en béton armé recouverte de vegetation rampante.

Module expérimental avec dalle recouverte de végétation extensive (Figure 5.13):

- Température de surface de la végétation($T_{sup.3}$).
- Température de surface supérieure de la dalle en béton armé sous substrat(T_{sub3}).
- Température de surface inférieure de la dalle en béton armé($T_{inf.3}$).
- Température d'air intérieur du module expérimental($T_{in.3}$).



FIGURE 5.13 : Module expérimental avec dalle en béton armé, (a) recouvert de végétation extensive, (b) module de référence (c) coupe verticale

5.5.4 Résultats des mesures :

A : Module expérimental avec dalle conventionnelle en béton armé . Résultats des mesures de température de surface supérieure, surface intérieure et air intérieur :

Tableau 5.1 : Fiche de mesures sur toiture conventionnelle en béton armé du 26/08/2012

Heures	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	Tm
T° air site (°C)	30.1	35.3	35.6	36.7	34.3	33.4	33.4	33.9	33.6	30.5	30.8	30.3	33.1
°° Hum	49.8	49.8	49.2	49.8	56.2	57.7	57.7	65.3	60.2	68.1	66.1	72.4	
T° station météo(°C)	27.8	28.1	28.8	31.0	31.1	31.0	31.2	31.3	30.2	29.3	28.2	27.8	29.6
T1 surf sup (°C)	31.9	37	43.4	43.9	44.5	44.1	43.7	44.3	42.2	36.5	34.8	33.7	40.0
T2 surf inf (°C)	28.8	34.6	35.7	39.4	39.8	39.7	39.5	41.6	39.3	35.6	33.7	33.1	36.7
T3 ambiance (°C)	27.8	31.2	31.4	37	37.7	35.9	34.4	34.7	33.7	32.3	30.7	29.6	33.0

B : Module expérimental avec dalle conventionnelle en béton armé recouverte de couverture végétale rampante. Résultats des mesures de température de surface supérieure végétation, surface sous végétation, surface intérieure et air intérieur (grille de collecte des données) :

Tableau 5.2 : Fiches de mesures sur toiture avec couverture végétale rampante du 26/08/2012

Heures	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	Tm
T° air site (°C)	30.1	35.3	35.6	36.7	34.3	33.4	33.4	33.9	33.6	30.5	30.8	30.3	33.1
°/° Hum	49.8	49.8	49.2	49.8	56.2	57.7	57.7	65.3	60.2	68.1	66.1	72.4	
T°station météo (°C)	27.8	28.1	28.8	31.0	31.1	31.0	31.2	31.3	30.2	29.3	28.2	27.8	29.6
T0 surf. Végétation(°C)	30.1	34.9	37.2	39	40.8	38.7	37.9	39.9	36.2	32.1	31.2	29.1	35.5
T1 sous végétation (°C)	27.8	32.7	37.7	36.4	36.5	36.8	36.5	41.6	37.3	34.2	31.8	30.6	34.9
T 2 surf inf (°C)	26.3	29.6	34.5	36.7	38.2	38.7	39	39.6	37.5	34.8	32.6	30.1	34.8
T 3 ambiance (°C)	27.9	30.6	30.8	32.2	31.9	31.4	30.1	29.5	29.4	29.1	28.9	28.2	30.0

C : Module expérimental avec dalle conventionnelle en béton armé . Résultats des mesures de température de surface supérieure, surface intérieure et air intérieur :

Tableau 5.3 : Fiche de mesures sur toiture conventionnelle en béton armé du 29/08/2012

Heures	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	Tm
T° air site (°C)	29.1	30.2	33.7	35.3	36.2	37.4	36.8	36.4	35.7	34.9	33.8	32.3	34.3
°° Hum	38.4	39.4	35.3	32.7	47.2	39.8	40.4	41.2	43.3	46.2	46.4	48.6	
T°station météo (°C)	28.2	29.0	31.7	32.9	33.4	33.9	34.1	34.3	33.8	31.6	29.9	28.7	32.2
T1 surf sup (°C)	32.1	36.8	39.6	42.4	48.7	49.9	48.7	46.4	43.3	39.7	37.4	35.4	41.7
T2 surf inf (°C)	29.5	32.7	35.3	38.3	40.4	43.7	43.9	43.6	40.3	38.1	36.0	34.1	37.9
T3 ambiance (°C)	26.0	27.7	27.3	27.4	30.4	32.2	33.8	34.9	34.4	33.9	33.5	33.0	31.2

D : Module expérimental avec dalle conventionnelle en béton armé recouverte de couverture végétale extensive . Résultats des mesures de température de surface supérieure végétation, surface sous substrat, surface inférieure et air intérieur :

Tableau 5. 4 : Fiches de mesures sur toiture avec couverture végétale extensive du 29/08/2012

Heures	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	Tm
T° air site (°C)	29.1	30.2	33.7	35.3	36.2	37.4	36.8	36.4	35.7	34.9	33.8	32.3	34.3
°° Hum	38.4	39.4	35.3	32.7	47.2	39.8	40.4	41.2	43.3	46.2	46.4	48.6	
T°station météo (°C)	28.2	29.0	31.7	32.9	33.4	33.9	34.1	34.3	33.8	31.6	29.9	28.7	32.2
T0 surf végétation (°C)	31.3	30.9	33.8	37.9	42.1	41.6	39.3	36.1	31.7	29.1	28.3	27.1	34.1
T 1 sous substrat (°C)	25.4	27.9	28.9	30.9	33.0	33.8	33.0	33.7	32.6	31.8	31.4	30.2	31.0
T 2 surf inf (°C)	25.5	26.3	29.9	33.8	35.5	36.2	34.6	33.0	31.7	30.3	29.9	29.3	31.3
T 3 ambiance (°C)	24.3	24.8	25.2	26.7	28.5	29.0	29.7	29.9	29.3	28.7	28.2	27.3	27.6

5.6 Comparaison des résultats des mesures entre modules avec dalle nue et dalle avec végétation rampante :

5.6.1 : Comparatif mesures sur module expérimental en couverture dalle béton armée nue du 26/08/2012

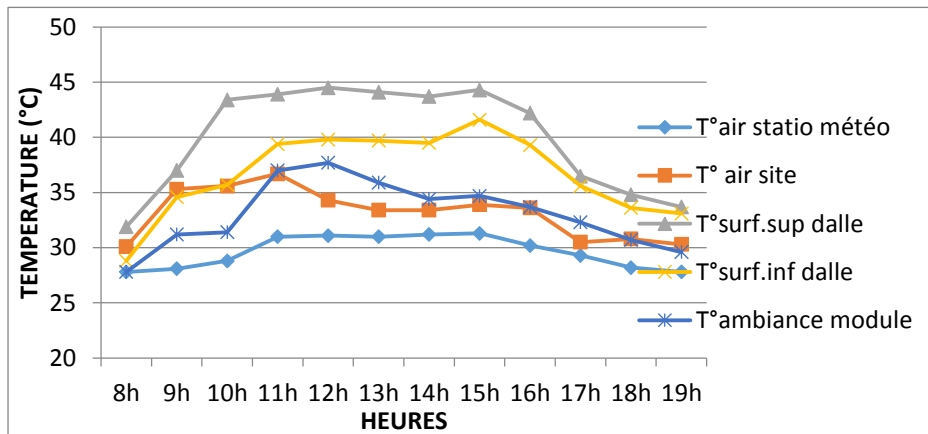


Figure 5.14 : Variation température module avec dalle en béton armé nue.

5.6.2 : Comparatif mesures sur module expérimental en couverture dalle béton armée couverte avec végétation rampante 26/08/2012

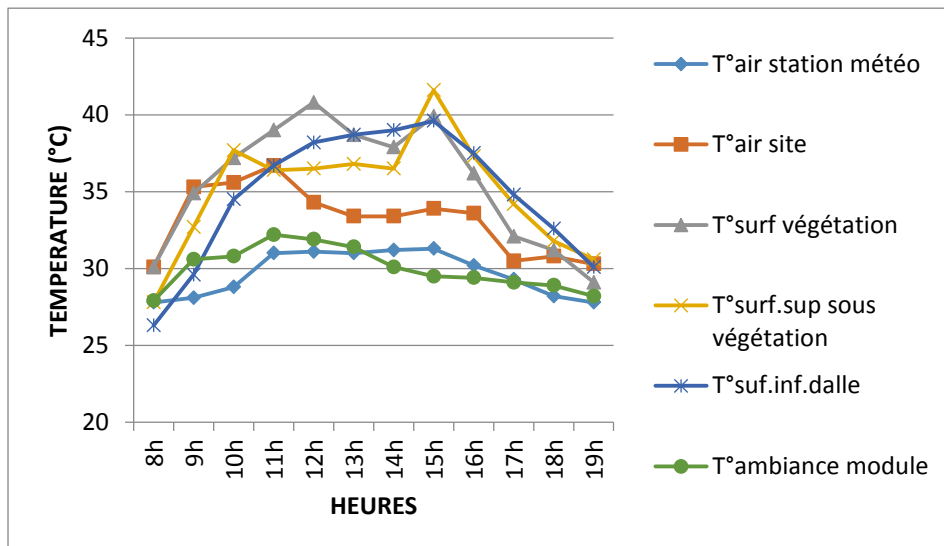


Figure 5.15 : Variation température module avec végétation rampante.

5.6.3 : Comparatif mesures sur module expérimental en couverture dalle béton armée nue du 29/08/2012

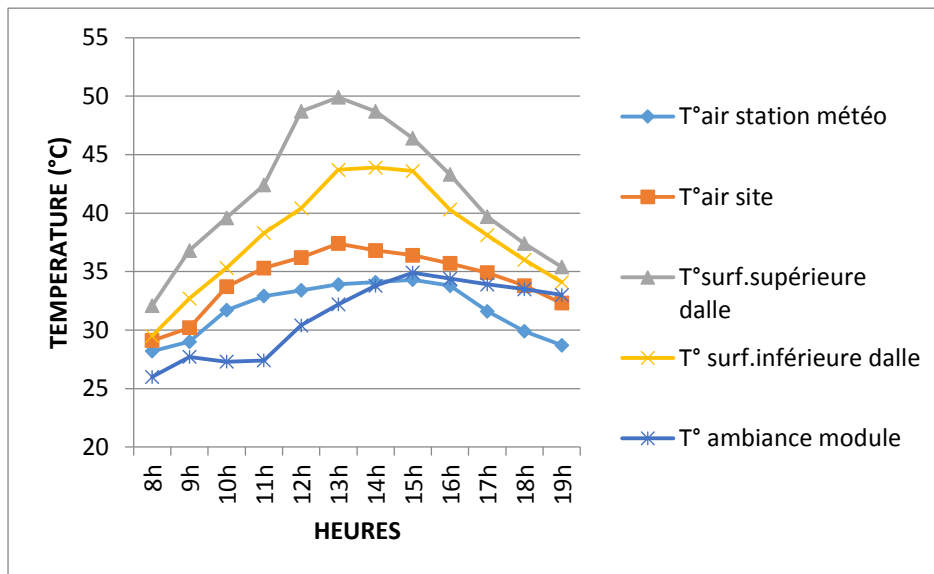


Figure 5.16 : Variation température module avec dalle en béton armé nue.

5.6.4 : Comparatif mesures sur module expérimental en couverture dalle béton armée couverte de végétation extensive du 29/08/2012

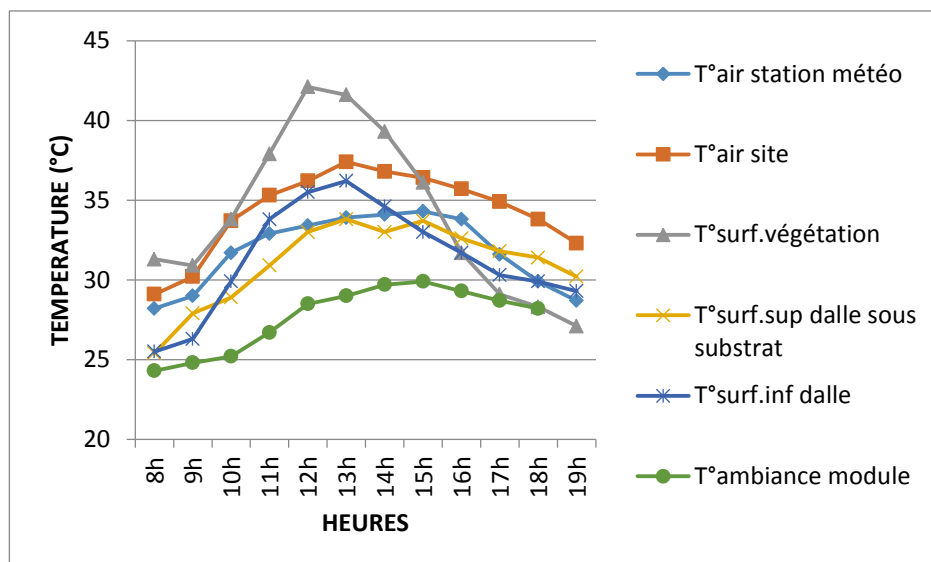


Figure 5.17 : Variation température module avec végétation extensive.

Tableau 5.5 : comparatif des valeurs de température de surface supérieure du module avec dalle en béton armé nue et module avec végétation rampante :

Heures	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	Tm
T°sup. Dalle béton	31.9	37	43.4	43.9	44.5	44.1	43.7	44.3	42.2	36.5	34.8	33.7	40.0
T°sup végétation rampante.	30.1	34.9	37.2	39	40.8	38.7	37.9	39.9	36.2	32.1	31.2	29.1	35.5
Ecart ΔT°	1.8	2.1	6.2	4.9	3.7	5.4	5.8	4.4	6.0	4.4	3.6	4.6	4.4

Tableau 5.6 : Ecart de température entre température de surfaces supérieures toit conventionnel en béton armé et toit avec végétation rampante (26/08/2012).

Ecart t°	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
T1 - T0	1.8	2.1	6.2	4.9	3.7	5.4	5.8	4.4	6.0	4.4	3.6	4.6	
Moyenne	4.40												

Tableau 5.7 : comparatif des valeurs de température de surface inférieure de dalle en béton armé du module avec dalle en béton armé et module avec végétation rampante :

Heures	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	Tm
T° inf.dall béton armé	28.8	34.6	35.7	39.4	39.8	39.7	39.5	41.6	39.3	35.6	33.7	33.1	36.7
T° inf.dalle avec végétation rampante.	26.3	29.6	34.5	36.7	38.2	38.7	39	39.6	37.5	34.8	32.6	30.1	34.8
Ecart ΔT°	2.5	5.0	1.2	2.7	1.6	1.0	0.5	2.0	1.8	0.8	1.1	3.0	1.93

Tableau 5.8 : Ecart de température entre température de surfaces inférieures du module avec toit conventionnel en béton armé et toit avec végétation rampante (26/08/2012).

Ecart t°	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
T2 - T2'	2.5	5.0	1.2	2.7	1.6	1.0	0.5	2.0	1.8	0.8	1.1	3.0	
Moyenne	1.93												

Tableau 5.9 : comparatif des valeurs de température d'air intérieur du module avec dalle en béton armé et module avec végétation rampante :

Heures	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	Tm
T°int. module avec dalle nue.	27.8	31.2	31.4	37	37.7	35.9	34.4	34.7	33.7	32.3	30.7	29.6	33.0
T°int.module végétation rampante	27.9	30.6	30.8	32.2	31.9	31.4	30.1	29.5	29.6	29.1	28.9	28.2	30.0
Ecart Δ T°	-0.1	0.6	0.6	4.8	5.8	4.5	4.3	5.2	4.1	3.2	1.8	1.4	3.0

Tableau 5.10 : Ecart de température entre températures d'ambiances du module avec toit conventionnel en béton armé et toit avec végétation rampante (26/08/2012).

Ecart t°	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
T3 - T3'	-0.1	0.6	0.6	4.8	5.8	4.5	4.3	5.2	4.1	3.2	1.8	1.4	
Moyenne	3.0												

5.7 Comparaison des résultats des mesures entre modules avec dalle nue et dalle avec végétation extensive :

5.11 :Tableau comparatif des valeurs de température de surface supérieure de couverture du module avec dalle en béton armé et module avec végétation extensive :

Heures	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
T°sup. Dalle béton	32.1	36.8	39.6	42.4	48.7	49.9	48.7	46.4	43.3	39.7	37.4	35.4	41.7
T°sup végétation extensive	31.3	30.9	33.8	37.9	42.1	41.6	39.3	36.1	31.7	29.1	28.3	27.1	34.1
Ecart ΔT°	0.8	5.9	5.8	4.5	6.6	8.3	9.4	10.3	11.6	10.6	9.1	8.3	7.6

5.12 : Ecart de température entre température de surface supérieure toit conventionnel en béton armé et toit avec végétation extensive (29/08/2012).

Ecart t°	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
T1 - T0	0.8	5.9	5.8	4.5	6.6	8.3	9.4	10.3	11.6	10.6	9.1	8.3	
Moyenne	7.6												

5.13Tableau comparatif des valeurs de température de surface inférieure de dalle en béton armé du module avec dalle en béton armé et module avec végétation extensive :

Heures	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
T° inf.dall béton armé	29.5	32.7	35.3	38.3	40.4	43.7	43.9	43.6	40.3	38.1	36.0	34.1	37.9
T° inf.dalle avec végétation extensive	25.5	26.3	29.9	33.8	35.5	36.2	34.6	33.0	31.7	30.3	29.9	29.3	31.3

Ecart ΔT°	4.0	6.4	5.4	4.5	4.9	7.5	9.3	10.6	8.6	7.8	6.1	4.8	6.65
------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	-----	-----	-----	-----	-------------

5.14 :Ecart de température entre température de surfaces inférieures du module avec toit conventionnel en béton armé et toit avec végétation extensive (29/08/2012).

Ecart t°	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
T2 - T2	4.0	6.4	5.4	4.5	4.9	7.5	9.3	10.6	8.6	7.8	6.1	4.8	
Moyenne	6.65												

5.15Tableau comparatif des valeurs de température d'air intérieur du module avec dalle en béton armé et module avec végétation extensive :

Heures	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
T°int. module avec dalle nue.	26.0	27.7	27.3	27.4	30.4	32.2	33.8	34.9	34.4	33.9	33.5	33.0	31.2
T°int.module végétation extensive.	24.3	24.8	25.2	26.7	28.5	29.0	29.7	29.9	29.3	28.7	28.2	27.3	27.6
Ecart ΔT°	1.7	2.9	2.1	0.7	1.9	3.2	4.1	5.0	5.1	5.2	5.3	5.7	3.57

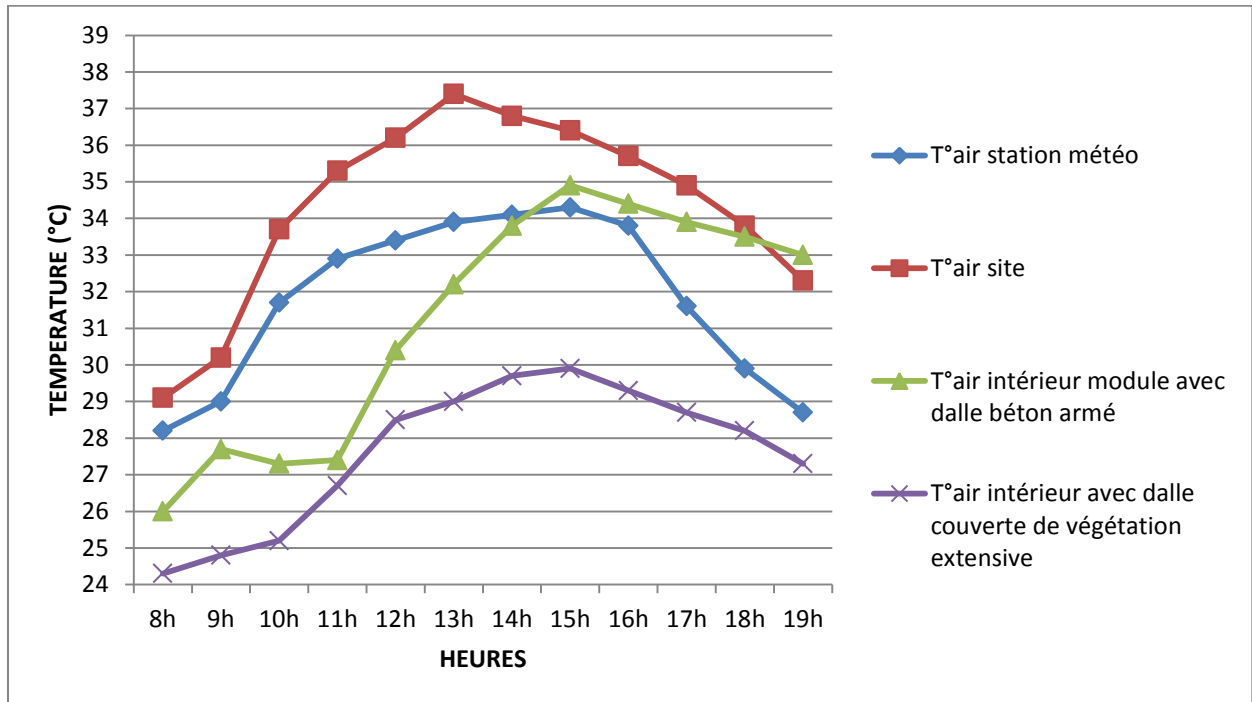


Figure 5.18 : Variation de température d'ambiance, module avec dalle en béton armé nue et module avec dalle en béton armé couverte de végétation extensive comparativement à température d'air station météorologique et site

5.8 Simulation numérique avec le logiciel ECOTECH :

Afin d'étendre le champ d'investigation à l'échelle de la ville et corréler les résultats obtenus au niveau du travail expérimental in situ, nous allons aborder au niveau de cette partie un travail de simulation numérique selon différents scénarios selon la manière suivante :

Un premier travail à l'aide du logiciel ECOTECH V5/5 ou nous avons choisi un bâtiment se trouvant dans la même zone méditerranéenne qui est la ville de JIJEL ou a été effectué le travail expérimental. Le premier scénario consiste en deux simulations la première sur un bâtiment avec toiture en béton armé nue le deuxième sur un bâtiment avec toiture végétalisée avec comme objectifs de déterminer l'impact de la toiture végétale sur les conditions de confort thermique intérieures. La même simulation a été effectuée sur un bâtiment similaire au niveau d'une ville au climat aride qui est Biskra, l'objectif étant de déterminer la différence d'impact de la toiture végétale entre la zone aride et la zone méditerranéenne.

5.9 Cas d'étude en zone méditerranéenne :

5.9.1 Présentation du cas d'étude :

Il s'agit d'un bâtiment à usage hôtelier situé dans la même zone géographique ou nous avons effectué le travail de mesures in situ sur les modules expérimentaux tel que présentés dans le chapitre précédent. Les conditions climatiques du site d'étude situé à Jijel sont les mêmes présentés au niveau du chapitre 4. Nous utiliserons ce même bâtiment pour la simulation numérique en zone aride en suivant la même démarche énumérée ci-dessous mais dans des conditions de climat aride présentés dans le chapitre précédent.

Logiciel de simulation complet qui associe un modèleur 3D avec des analyses solaire, thermique, acoustique et de coût. ECOTECH est un outil d'analyse simple et qui donne des résultats très visuels. ECOTECH a été conçu avec comme principe que la conception environnementale la plus efficace est à valider pendant les étapes conceptuelles du design. Le logiciel répond à ceci en fournissant la rétroaction visuelle et analytique, guidant progressivement le processus de conception en attendant que les informations plus détaillées soient disponibles. Ses sorties étendues rendent également la validation finale de conception beaucoup plus simple en se connectant par interface à Radiance, EnergyPlus et à beaucoup d'autres outils plus spécialisés.

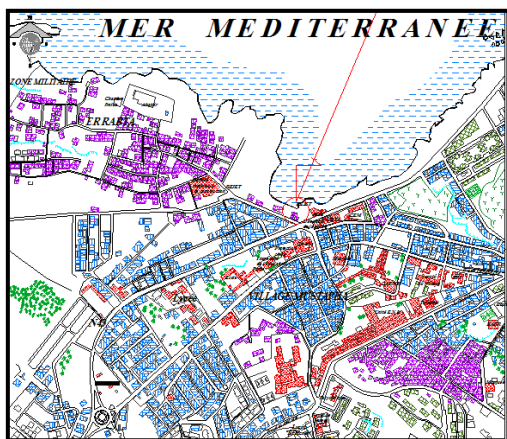


Figure 5.19 : Plan de situation cas d'étude

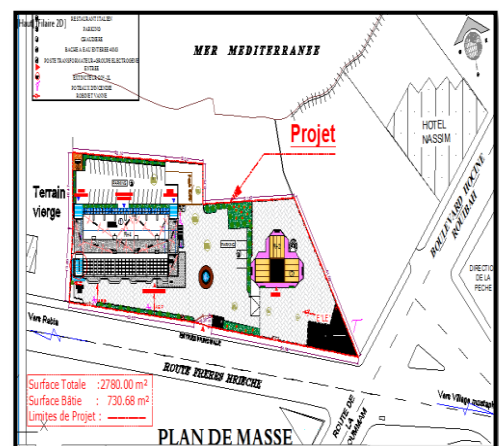


Figure 5.20 : Plan de masse du projet.

5.9.2 : Présentation de l'échantillon d'étude :

La conception des suites est un thème se rapportant directement au confort des individus, dans cet exemple elle possède une chambre à coucher, un séjour confortablement meublé avec une petite table à manger ainsi qu'un balcon équipé de sièges. La salle de bain présente une belle dimension : Une kitchenette, une douche avec une grande baignoire ovale sur pieds occupe le centre de la pièce.

Pour appliquer notre étude nous avons choisi comme objet de simulation, une suite située au 4^{ème} étage, et orientée en sud-ouest.

La conception des suites est un thème rapportant directement au confort des individus,

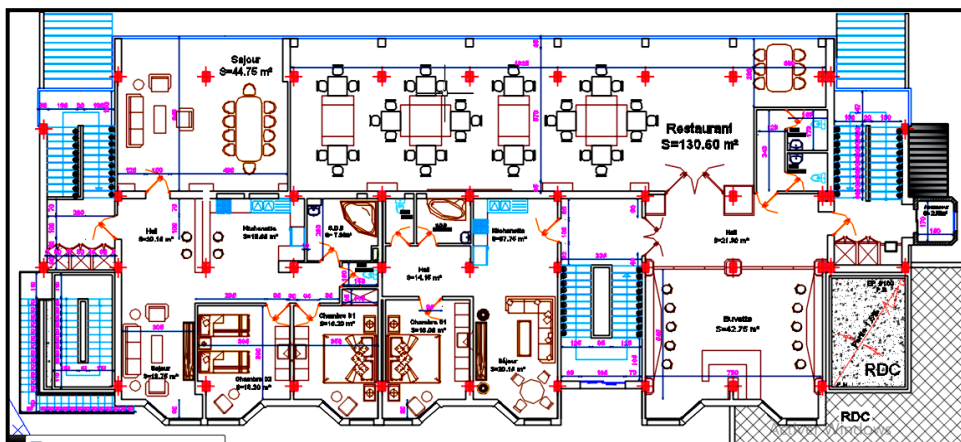


Figure 5.21 : plan d'étage courant de l'hôtel.

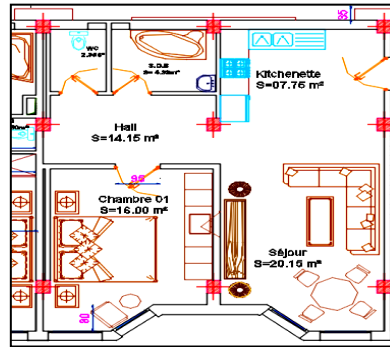


Figure 5.22 : Plan de la suite.

La salle de bain présente une belle dimension : Une kitchenette, une douche avec une grande baignoire ovale sur pieds occupe le centre de la pièce.

Pour appliquer notre étude nous avons choisi comme objet de simulation, une suite située en 4^{ème} étage, et orientée en sud-ouest.

5.9.3 Les critères d'analyse pour les suites :

Deux facteurs principaux participent à l'analyse typologique de l'enveloppe qui sont ; la forme tridimensionnelle globale du bâtiment et le type de son enveloppe résumé dans les toitures et les Matériaux de construction. Alors cette analyse est basée sur les critères suivants :

- **Forme** : surface +proportion et emplacement.
- **toiture** : orientation et type de toit.
- **Les matériaux et les techniques de construction**

1/La forme de la suite : Déterminée par :

- **L'emplacement** : vertical et horizontal des autres pièces.
- **Surface et proportion** : qui représente le rapport entre la largeur et la profondeur.

<p>Surface : 63.60m²</p> <p>Proportion : 9.10/7.15=1.27</p>
--

- **Orientation** : La dalle extérieure est orientée vers le sud –ouest.
- **le type de dalle extérieur** : La dalle extérieure est une dalle composée de : béton armé et corps Creus.
- **les matériaux** : Les matériaux sont l'élément essentiel qui couvre l'enveloppe intérieure, extérieure, verticale ou horizontale d'un bâtiment, ayant un rôle esthétique et structurel qui peut créer des ambiances intérieures agréables par la régulation de l'environnement extérieur.

Dans notre cas ils ont utilisé principalement un type de dalles avec une épaisseur de 20 cm.

	Epaisseur (mm)	Densité (kg/m ³)	Chaleur Spécifique (j/kg.k)	Conductivité thermique (w/m.k)
Enduit ciment	20	1900	864	0.8
Brique ext..	150	650	1008	0.39
Lame d'air	50	1	1000	0.28
Brique int.	100	650	1008	0.39
Enduit ciment	10	1900	864	0.8

Tableau 5.16 : Propriétés physiques des matériaux.

5.9.4 Les démarches de simulation par le logiciel ECOTECH :

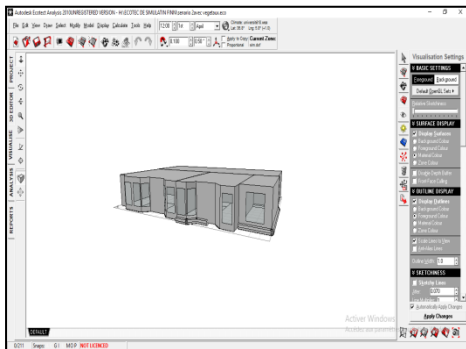


Figure 5.23 : capture écran volumétrie 1.

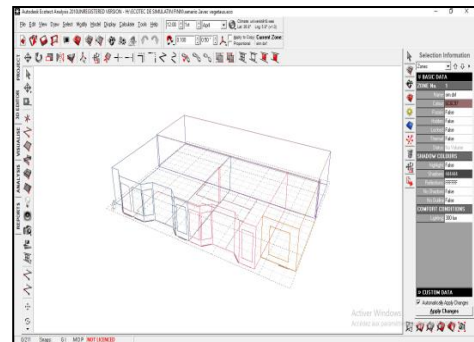
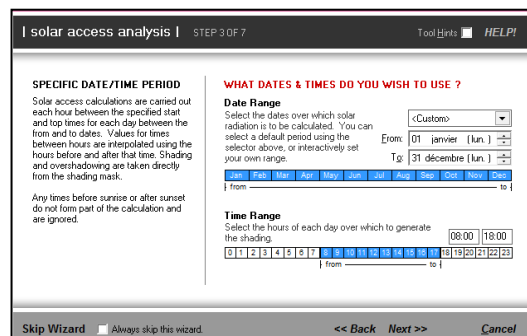


Figure 5.24 : Capture écran volumétrie 2.



simulation

Figure 5.25 : période de

1-Importer les plans AUTOCAD (enregistrée sous format DXF à l'ECOTECT).

- Dessiner en 3D le projet d'étude

2- Choisir les matériaux de construction de chaque élément

- Définir les différentes propriétés de chaque zone (données générales, propriétés thermiques).

3-Télécharger les données climatiques de la région de Jijel.

- Donner un nom au dessin ;

- Fixer le type du bâtiment étudié, fixer le Nord et l'environnement du bâtiment (urbain, rural, etc.).

4-Définir le paramètre à mesurer (température.).

- Définir la période et l'heure d'étude.

- Lancer l'analyse

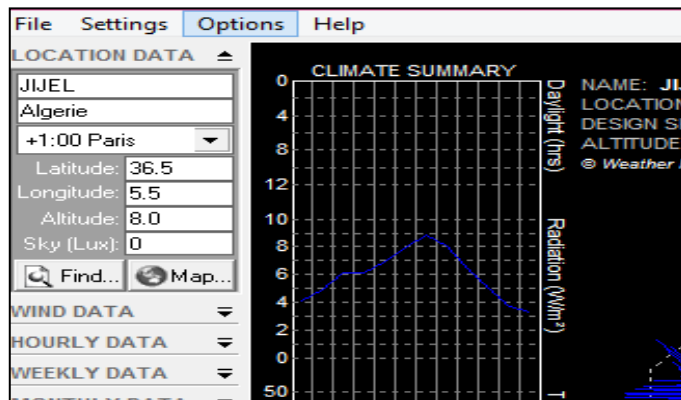


Figure 5.26 : Données

de simulation

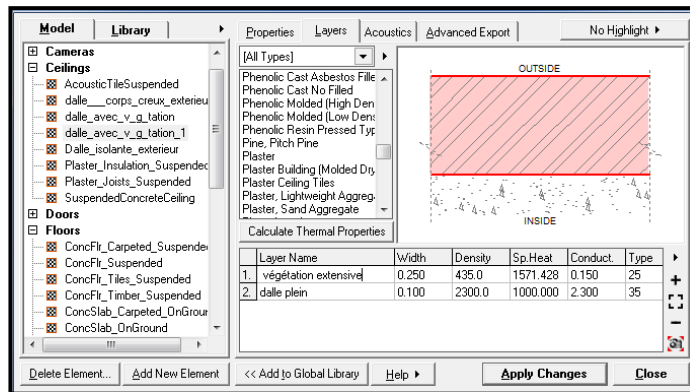


Figure5.27 : Données matériau et végétation.

5.10 Simulation numérique avec le logiciel ENVIMET :

Un deuxième travail a été effectué à l’aide du logiciel ENVI-met sur deux bâtiments avec toiture végétale au niveau de la ville de Jijel dans un environnement urbain engendrant la formation de l’îlot de chaleur urbain et ceci afin de déterminer l’impact de la toiture végétale extensive sur les conditions microclimatiques locales. Nous avons utilisé le logiciel tridimensionnel non hydrostatique ENVI-met développé par Michael Bruse. Ce freeware nous a servi dans la simulation réalisée sur le site d’étude selon le scénario de deux bâtiments avec toiture végétale pour la journée d’été du 10/08/2017.

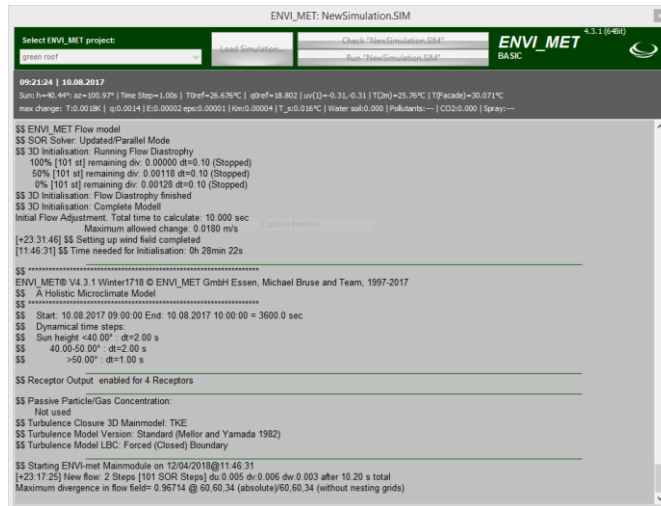


Figure 5.28 : Capture d’image simulation numérique avec ENVI-met.

Le site se caractérise par un faible ratio de la surface au sol couverte par la végétation. Les bâtiments de 12 mètres de hauteur objet de notre étude étaient recouverts de toitures vertes avec un substrat de 50 cm et du gazon d’une hauteur de 50 cm. ENVI-met ne simule pas la présence d’eau dans le substrat mais seulement l’effet d’ombre et la transpiration des plantes. La végétation simulée se caractérise par son albédo de 0.2 et un ratio de densité foliaire de $3\text{m}^2/\text{m}^3$. Afin d’enregistrer les paramètres microclimatiques quatre récepteurs ont été placés : les récepteurs C1 et C2 ont été posés au-dessus des toits, le récepteur C3 au niveau de la pelouse tandis que le récepteur C4 a été placé au niveau du sol avec surface minérale.

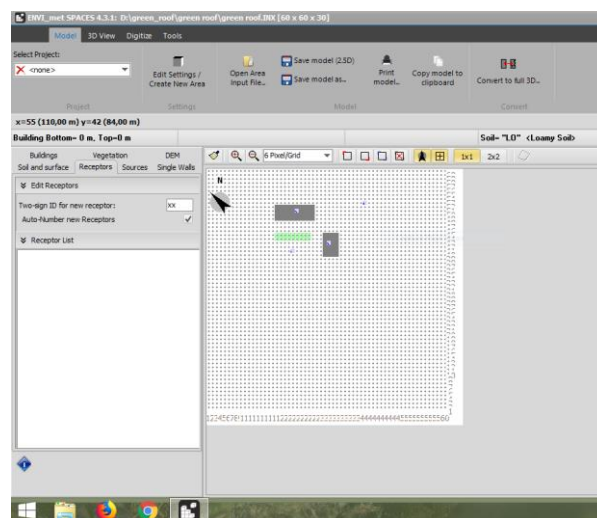


Figure 5.29 : Plan de situation des récepteurs sur le site d’étude.

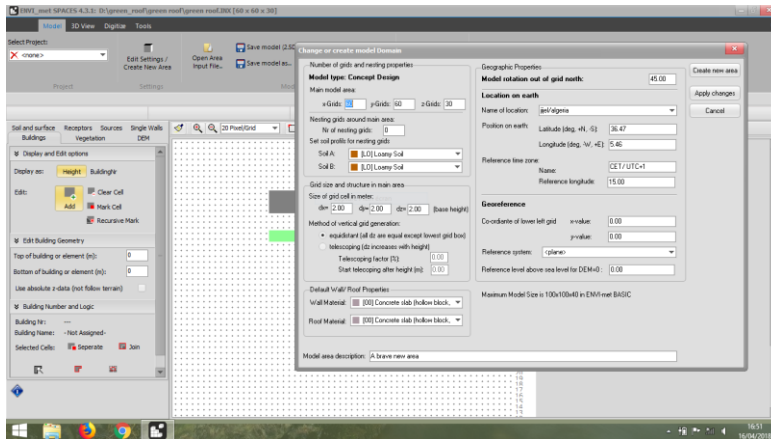


Figure 5.30 : Paramètres utilisés lors lancement simulation.

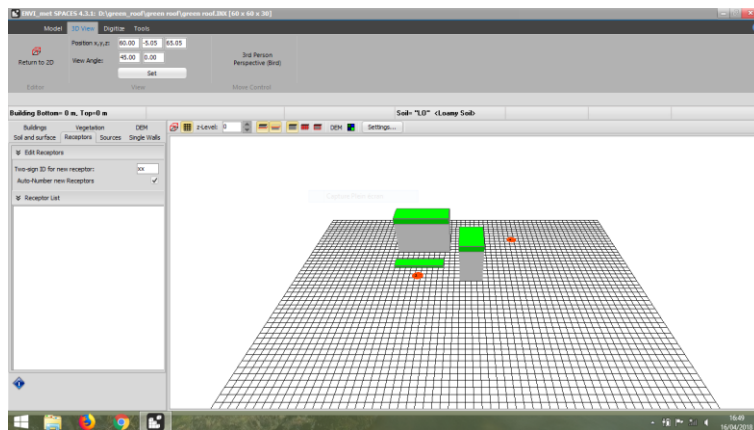


Figure 5.31 : Vue en 3D du cas d'étude.

5.11 Résultats obtenus :

5.11.1 La température de l'air :

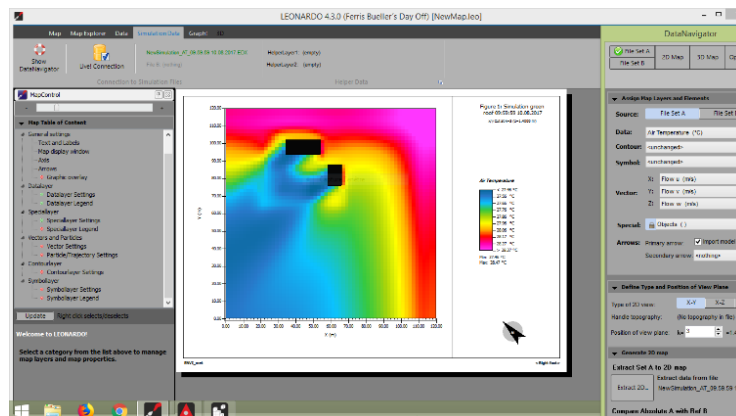


Figure 5.32 : variation température de l'air.

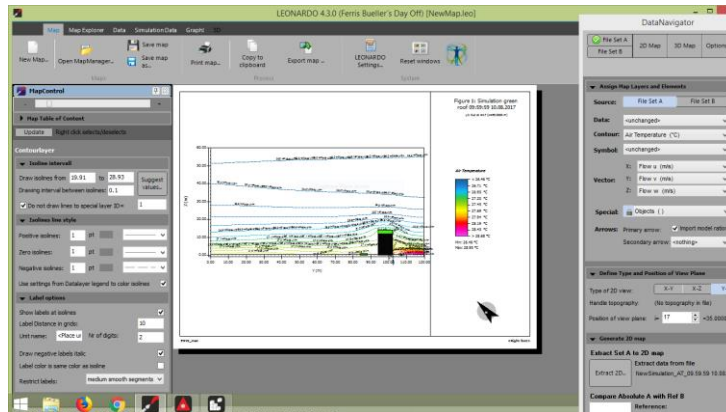


Figure 5.33 : Température de l'air au niveau du site.

5.11.2L'humidité relative :

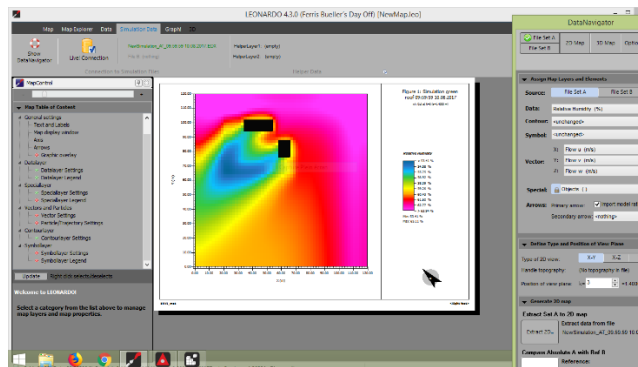


Figure 5.34 : variation humidité relative.

5.11.3La vitesse du vent :

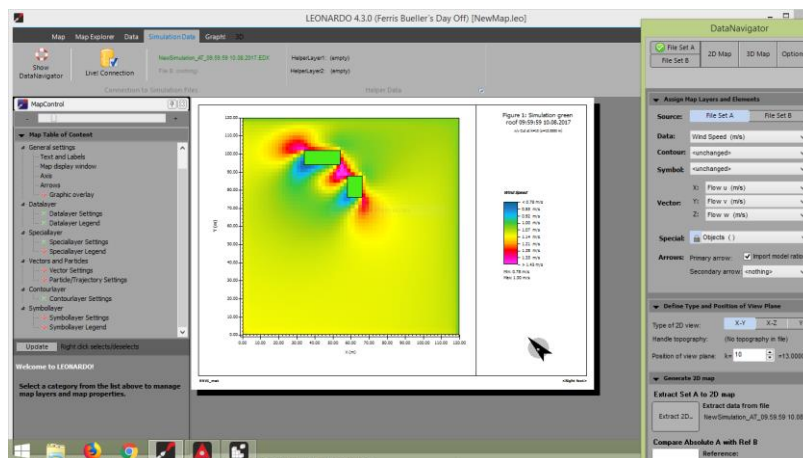


Figure 5.35 : variation vitesse du vent.

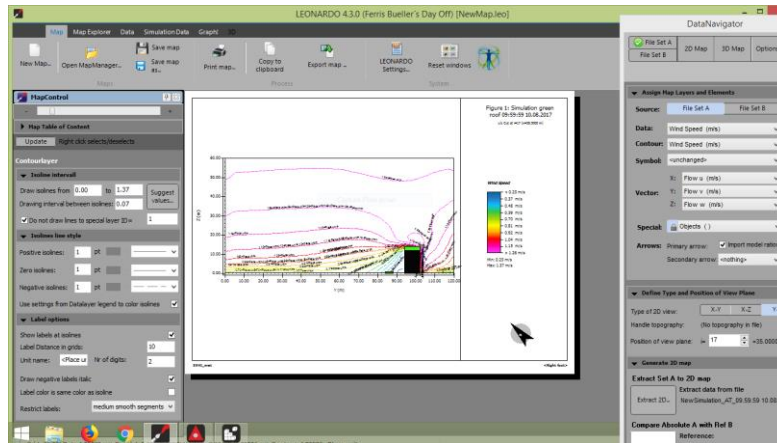


Figure 5.36 : Vitesse de l'air au niveau du site.

Les toitures vertes sont préconisées en site à forte densité urbaine pour le rafraîchissement de la température ambiante. Wong N.H et al(2002) ont constaté une atténuation de 4,05 °C de la température de l'air à 1,0 m au-dessus des toitures pour un climat chaud comme Singapour. Alexandri.E.(2002) en utilisant le logiciel Phoenix a démontré que la végétalisation rafraîchit la température à la surface des toitures avec une baisse de 19,9 °C pour le climat méditerranéen d'Athènes.

Conclusion

Les résultats obtenus au niveau du travail expérimental montrent clairement l'incidence de la toiture couverte avec de la végétation extensive sur le confort thermique intérieur ainsi que sur la réduction des températures de surfaces des constructions. Ces résultats sont confirmés par la simulation numérique à l'aide du logiciel ECOTECT. La simulation avec ENVI met concerne l'impact de la toiture végétale au niveau microclimatique urbain. Les valeurs constatées au niveau des résultats confirment nos hypothèses de départ quant à l'impact des toitures vertes sur les microclimats des villes. Nous allons aborder dans le chapitre suivant une analyse fine des résultats obtenus à travers une étude comparative des données recueillies in situ en les corrélant avec les résultats numériques.

CHAPITRE 6

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Introduction :

Nous allons aborder dans ce chapitre en premier lieu une analyse comparative des résultats obtenus aussi bien au niveau du travail expérimental réalisé in situ sur les modules avec dalle en béton armée nue et module avec dalle en béton armé recouverte de végétation ceci nous permettra de quantifier l'impact de la végétation extensive sur les conditions de confort intérieur et par conséquent l'incidence sur la consommation énergétique des constructions.

En second lieu nous entamerons l'analyse des résultats obtenus à l'aide des outils de simulation numérique et ceci afin d'étendre le champ d'investigation et de corréler les conclusions à l'échelle urbaine avec une grille de lecture permettant d'évaluer l'impact de la toiture végétalisée sur la réduction de la consommation énergétique et l'amélioration des conditions microclimatiques au niveau de nos villes.

6.1 Résultats et discussions travail expérimental in situ :

6.1.1 Comparatif entre module avec dalle en béton armé nue et module avec dalle en béton armé recouverte de végétation rampante (26/08/2012).

6.1.1.1 Comparatif des valeurs de température des surfaces supérieures :

Le comparatif des valeurs de température de surface supérieure des modules ainsi que les températures d'air relevés à la station météorologique et sur site sont montrés au niveau de la figure 6.1. Le tableau 6.1 montre l'écart de température relevés entre les surfaces supérieures du module couvert avec une dalle en béton armé nue et celui avec dalle recouverte avec une végétation rampante

Tableau 6.1 : Ecart de température entre température de surfaces supérieures toit conventionnel en béton armé et toit avec végétation rampante (26/08/2012).

Ecart t°	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
T1 - T0	1.8	2.1	6.2	4.9	3.7	5.4	5.8	4.4	6.0	4.4	3.6	4.6	
Moyenne	4.40												

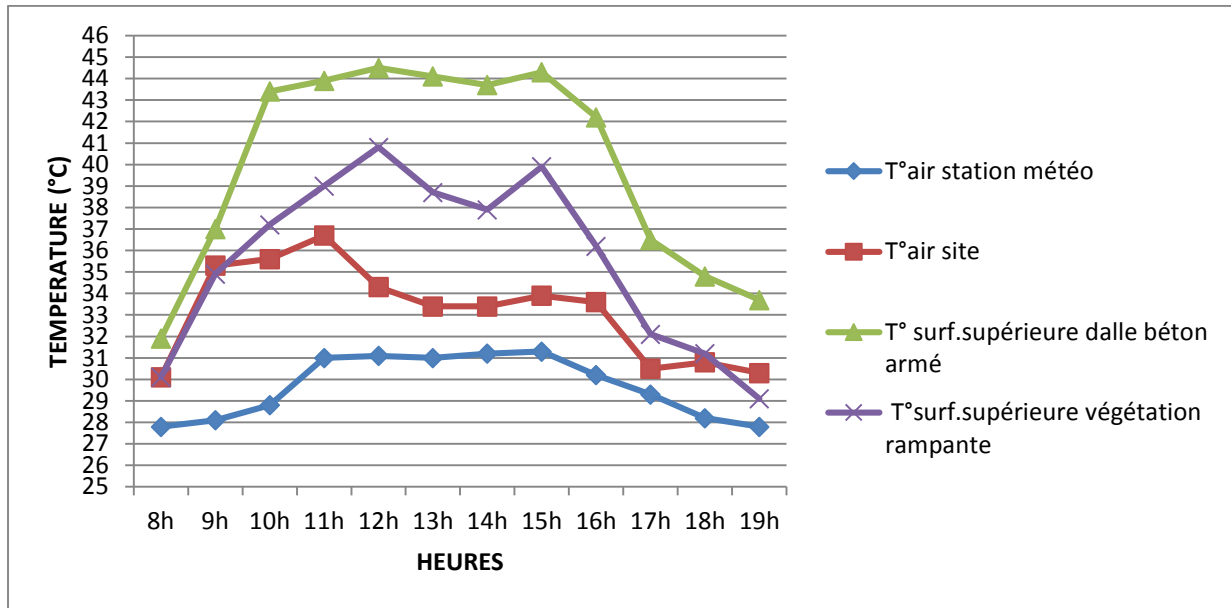


Figure 6.1 : Variation de température, de surfaces supérieures de dalle en béton armé nue et végétation rampante comparativement à température d'air station météorologique et site.

Une augmentation rapide des températures de surface par rapport aux valeurs relevés au niveau de la station météorologique est observé dès les premières heures de la journée de 8h à 10h..Ceci démontre un stockage thermique rapide au niveau des terrasses en béton armé du au rayonnement solaire et explique l'effet de ville qu'on ressent dès le début de journée en ville. Nous remarquons aussi que les valeurs relevées sur site sont plus élevées que celles enregistrées à la station météo démontrant ainsi que le site d'expérimentation se trouvant en milieu urbain est impacté par le tissu urbain environnant recouvert de surfaces minérales et présente des températures plus élevées que la périphérie.. L'écart de température entre les surfaces supérieures des terrasses des modules montrent une surchauffe importante au niveau de la dalle en béton armé nue par rapport à la dalle recouverte de végétation rampante. Cet écart important montré sur le tableau 6.1 est observé de 9h à 15h et culmine à 10h et à 16h avec un Δt° respectifs de 6.2°C et 6°C. La moyenne des écarts de température relevée est de 4.4°C sachant que la moyenne des températures des surfaces est de 40°C pour la terrasse en béton armé et de 35.5°C pour la terrasse recouverte de végétation rampante. Nous observons ainsi une diminution significative de la température de surface supérieure de l'ordre de 10% .Ceci s'explique par l'effet évapotranspiration et d'ombrage porté sur la terrasse recouverte par la végétation de type lierre rampant qui est une espèce endémique de la région de Jijel. Cet effet modifie l'albédo et réduit les températures de surface des terrasses et toitures de la ville.

6.1.1.2. Comparatif des valeurs de température des surfaces inférieures :

Tableau 6.2 : Ecart de température entre température de surfaces inférieures du module avec toit conventionnel en béton armé et toit avec végétation rampante (26/08/2012).

Ecart t°	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
T2 - T2	2.5	5.0	1.2	2.7	1.6	1.0	0.5	2.0	1.8	0.8	1.1	3.0	
Moyenne	1.93												

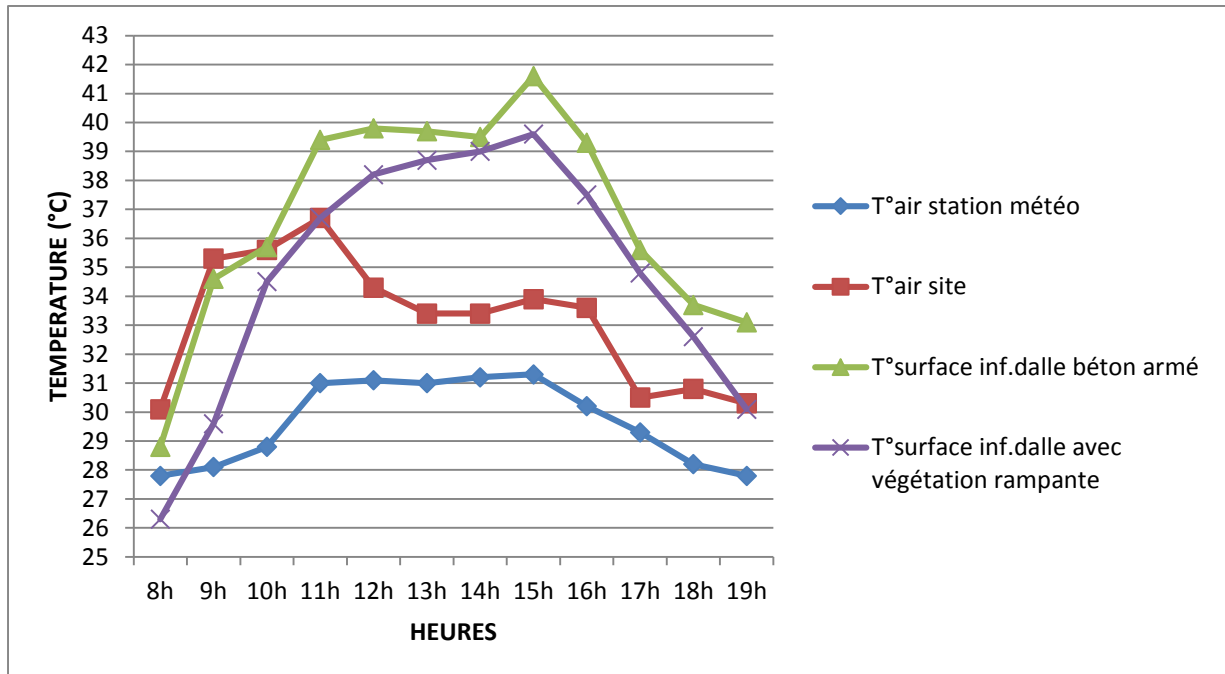


Figure 6.2 : Variation de température, de surfaces inférieures de dalle en béton armé nue et dalle avec végétation rampante comparativement à température d’air station météorologique et site

A partir de la figure 6.2, nous observons toujours le même phénomène d’augmentation rapide des températures de surface inférieure des modules dès les premières heures de la journée (8h-10h) avec un effet culminant à 15h avec des valeurs de 41.6°C pour la terrasse en béton armé et 39.6°C pour la terrasse recouverte en végétation rampante. Le tableau 6.2 nous montre les écarts de température avec une moyenne de 1.93°C pour la journée ce qui nous donne un gain de l’ordre de 5%. Ce faible écart s’explique par la faible capacité d’isolation de la végétation rampante qui tout en améliorant les températures de surface supérieure ne peut

rivaliser avec une couche d'isolation conventionnelle. Ceci nous amène à dire que ce type de végétation rampante associée bien sur a un une membrane d'étanchéité est a un film anti racinaire est intéressant pour les terrasses et toitures des espaces non habités de la ville tel que entrepôts,salles de sports, abris, auvents,etc...

6.1.1.3. Comparatif des valeurs de température d'air intérieur des modules :

Le comparatif des températures d'air intérieur des modules montré au niveau de la figure 6.3 nous permet toujours d'observer l'augmentation rapide des valeurs de température 8h-12h pour le module de référence avec terrasse en béton armé nue et 8h-11h pour le module avec terrasse recouverte de végétation rampante.

Tableau 6.3 : Ecart de température entre températures d'ambiances du module avec toit conventionnel en béton armé et toit avec végétation rampante (26/08/2012).

Ecart t°	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Tin 1 - Tin 2	-0.1	0.6	0.6	4.8	5.8	4.5	4.3	5.2	4.1	3.2	1.8	1.4
Moyenne	3.0											

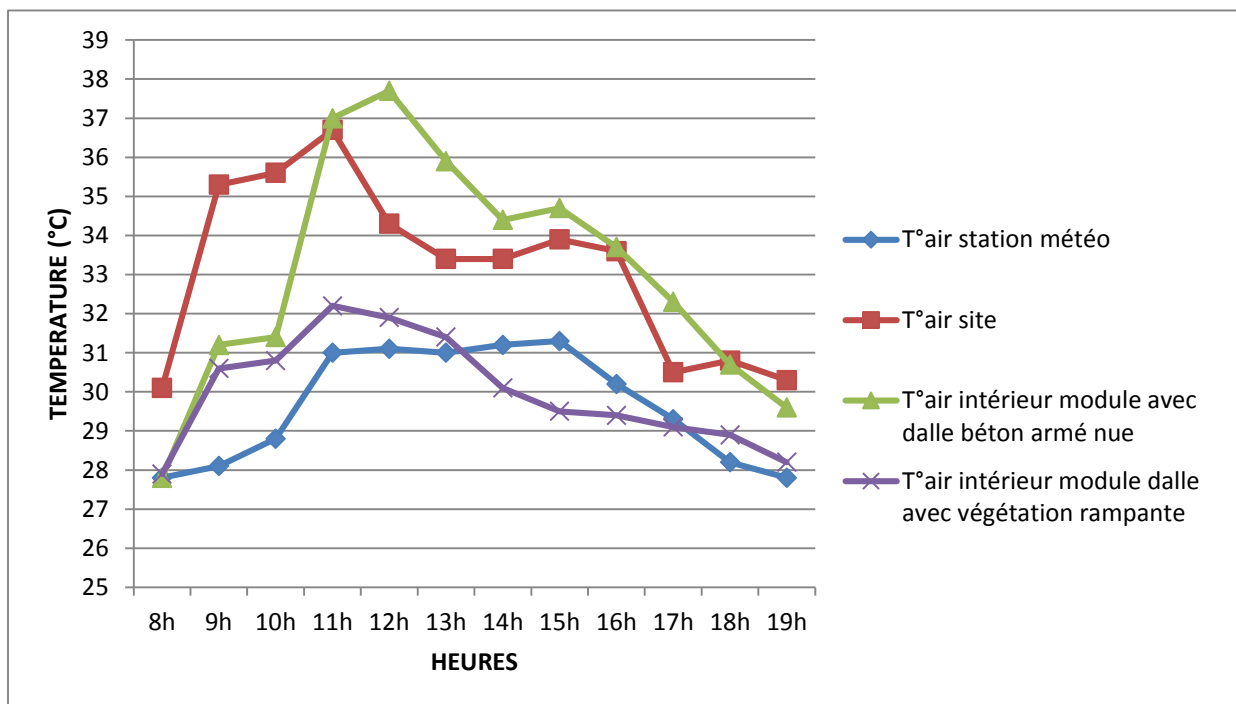


Figure 6.3 : Variation de température d'ambiance, module avec dalle en béton armé nue et module avec dalle en béton armé couverte de végétation rampante comparativement à

température d'air station météorologique et site.

Les valeurs numériques des températures ou nous remarquons qu'à 10h la température d'air intérieure est de 31.4°C pour le module de référence et de 30.8°C pour le module avec végétation rampante d'où un faible écart Δt° de 0.6°C, le tableau 6.3 montre l'écart de température d'air intérieur, celui-ci est significatif à partir de 11h ou l'écart Δt° est de 4.8°C et de 5.8°C à 12h cela est expliqué par l'effet retard dans la transmission de chaleur. La température moyenne de température d'air intérieur est de 33°C pour le module de référence et de 30°C pour le module avec terrasse recouverte de végétation rampante avec un écart moyen de l'ordre de 3°C ce qui représente une amélioration de 9% des conditions de confort intérieur ce qui est significatif par rapport à la consommation énergétique des constructions ainsi qu'à la réduction des émissions des gaz à effet de serre.

6.1.2 Comparatif entre module avec dalle en béton armé nue et module avec dalle en béton armé recouverte de végétation extensive (29/08/2012).

6.1.2.1. Comparatif des valeurs de température des surfaces supérieures :

A partir de la figure 6.4 nous pouvons observer les fluctuations des températures de surface supérieures des terrasses du module de référence comparé aux valeurs relevés sur le module recouvert de végétation extensive aussi bien au niveau de la végétation que sous le substrat de 5cm. L'analyse de ce comparatif nous permet d'observer le même phénomène constaté lors du premier travail effectué le 26/08/2012 à savoir l'augmentation rapide par rapport aux données relevées à la station météorologique d'El Achouat et cela dès les premières heures de la journée des valeurs de températures aussi bien pour la surface supérieure de la terrasse en béton armé que pour le site d'étude.

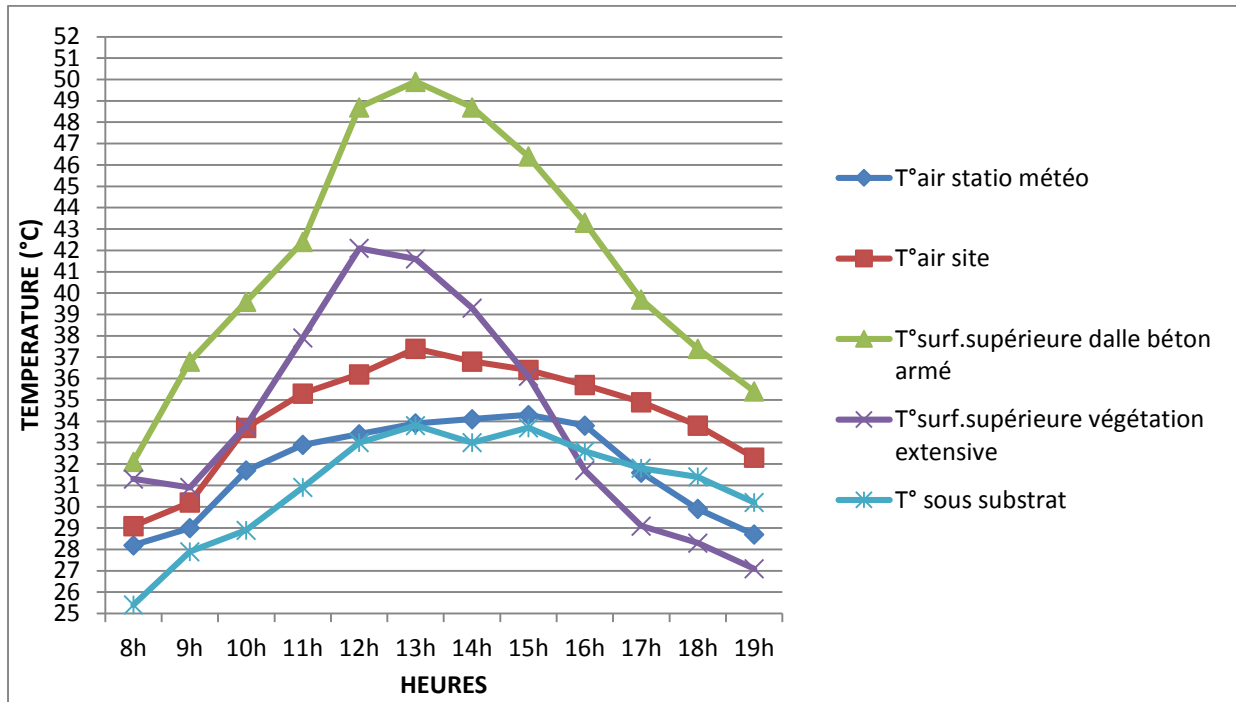


Figure 6.4 : Variation température surfaces supérieures dalle béton armée nue, végétation extensive et sous substrat comparativement à température d’air station météorologique et site

Tableau 6.4 Ecart de température entre température de surface supérieure toit conventionnel en béton armé et toit avec végétation extensive (29/08/2012).

Ecart t°	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
T1 - T0	0.8	5.9	5.8	4.5	6.6	8.3	9.4	10.3	11.6	10.6	9.1	8.3	
Moyenne	7.6												

Les valeurs numériques nous donnent pour 9h.une température de surface supérieure de la terrasse en béton armé de 36.8°C et 30.9°C pour la végétation extensive alors que la température sous substrat est de 27.9°C soit un écart de 5.9°C pour les valeurs de surfaces supérieures .Cet écart atteint 11.6°C à 16h pour une température de 43.3°C au niveau de la terrasse en béton armé nue et 31.7°C pour la terrasse avec végétalisation extensive ce qui représente un gain de l’ordre de 7.3%.Nous remarquons aussi qu’a 13h la température à la station météo est de 33.4°C , de 37.4 sur site, de 41.6 °C à la surface de la végétation alors qu’elle est sous substrat de 33°C ce qui témoigne des bonnes capacités d’isolation de ce dernier. Le tableau 6.4 nous donne les différents écarts ainsi que la moyenne quotidienne des températures de surfaces supérieures des terrasses des modules, l’analyse de valeurs moyennes

quotidiennes nous permet d'avancer que la terrasse avec végétation extensive permet un gain en termes de température de surface de l'ordre de 18%. Notre travail expérimental nous a permis aussi de remarquer qu'en plus des avantages qu'offre la végétalisation extensive des terrasses et toitures, une amélioration significative sur le microclimat peut être obtenue par la généralisation à l'ensemble des terrasses de la ville de ce type de végétation en choisissant des espèces à haut indice de feuille (High LAI. Leaf Area Index) et en optimisant la fonction d'évapotranspiration en favorisant l'accès à l'eau des plantes. En plus d'autres stratégies de rafraîchissement passif des espaces urbains, la végétalisation extensive de 50% des surfaces construites de la ville nous permettrait de réduire de 9% la température réfléchi exacerbant l'effet ICU.

6.1.2.2. Comparatif des valeurs de température des surfaces inférieures :

L'analyse des valeurs de températures des faces inférieures des terrasses au niveau de la figure 6.5 nous permet d'observer un écart significatif entre la terrasse en béton armé nue et la terrasse en béton armé recouverte de végétation extensive. Les valeurs numériques du tableau 9 nous donne dès 9h des températures de 32.7°C pour le module de référence et 26.3°C pour le module avec végétation extensive d'où un écart de 6.4°C, ces valeurs sont respectivement à 15h de 43.6°C et 33°C avec un écart de 10.6°C. La moyenne des températures de surfaces inférieures pour cette journée sont de 37.9°C pour le module de référence, 31.3°C pour le module avec végétation extensive,

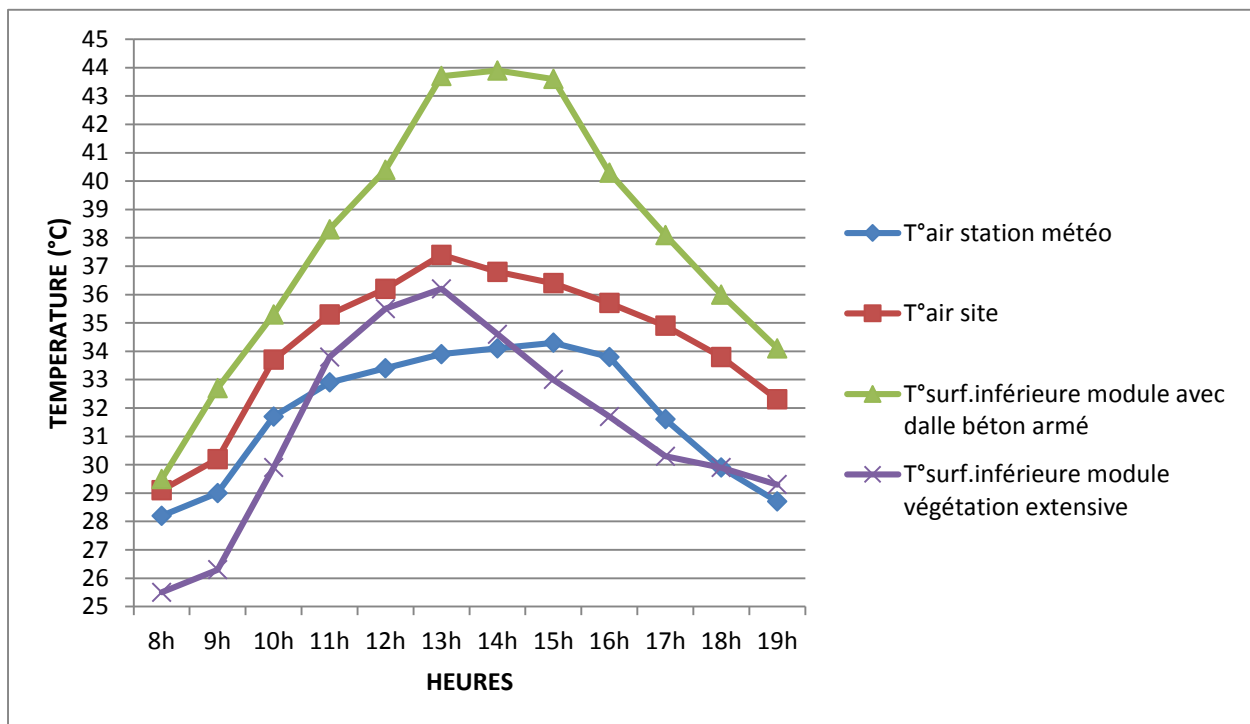


Figure 6.5 : Variation de température, de surfaces inférieures de dalle en béton armé nue et dalle avec végétation extensive par rapport à température d'air station météorologique et site.

Tableau 6.5 Ecart de température entre température de surfaces inférieures du module avec toit conventionnel en béton armé et toit avec végétation extensive (29/08/2012).

Ecart t°	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
T2 - T2	4.0	6.4	5.4	4.5	4.9	7.5	9.3	10.6	8.6	7.8	6.1	4.8	
Moyenne	6.65												

Le tableau 6.5 nous donne une moyenne des écarts Δt° de 6.65°C , le gain calculé par rapport aux moyennes journalière des deux terrasses s'élève à 17%. Ce qui confirme les bonnes capacités d'isolation de ce type de végétation extensive composé de végétation et d'une couche de substrat de 5cm, qui viendrait en plus d'une isolation thermique conventionnelle plus performante avec tous les effets positifs sur les conditions de confort intérieur et réduction du recours aux procédés de rafraîchissement actifs énergivores et fort émetteurs de gaz à effet de serre.

6.1.2.3. Comparatif des valeurs de température d'air intérieur des modules :

La journée du 29/08/2012 est considérée comme chaude avec une moyenne de température de 34.4°C pour le site d'expérimentation et 32.2°C pour la station météorologique d'El Achouat. L'analyse de la figure 6.6 relative aux valeurs de températures d'air intérieur des deux modules expérimentaux fait ressortir un écart significatif à partir de 11h avec une augmentation nette de la température du module avec terrasses en béton armé par rapport à celui recouvert de végétation extensive.

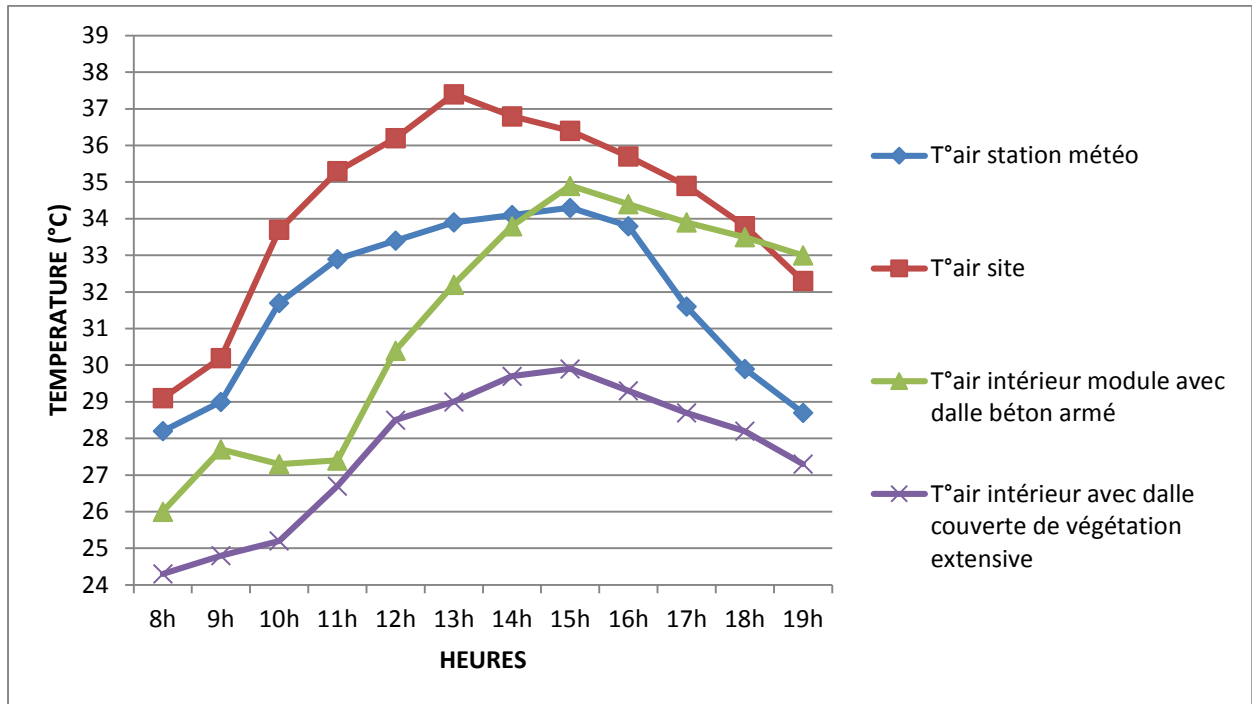


Figure 6.6 : Variation de température d’ambiance, module avec dalle en béton armé nue et module avec dalle en béton armé couverte de végétation extensive comparativement à température d’air station météorologique et site.

Tableau 6.6 Ecart de température entre température de surfaces inférieures du module avec toit conventionnel en béton armé et toit avec végétation extensive (29/08/2012).

Ecart t°	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
T2 - T2	4.0	6.4	5.4	4.5	4.9	7.5	9.3	10.6	8.6	7.8	6.1	4.8	
Moyenne	6.65												

Les valeurs numériques pour 13h sont de l’ordre de 32.2°C pour le module de référence et de 29°C pour le module végétalisé d’où un Δt° de 3.2°C. Au niveau du tableau 6.6 nous pouvons observer que cet écart Δt° atteint 5°C à 15h et 5.7°C à 19h. La moyenne des températures d’air intérieur relevées au niveau des modules est de 31.2°C pour le module de référence et de 27.6°C pour le module végétalisé avec un écart moyen Δt° de 3.57°C. A partir de cela on peut observer que l’écart devient important à partir de 12h et va en augmentant pour atteindre 5.7°C à 19h.

Le rapport de la moyenne de l’écart des températures par rapport à la moyenne relevée au niveau du module de référence fait ressortir une amélioration des conditions de confort thermique intérieur de 11% en faveur du module avec terrasse végétalisée, en période critique.

Cette proportion est de 14% à 15h et 17% à 19h. Cela démontre encore une fois la capacité d'isolation de la végétation extensive optimisée par l'ombrage du feuillage et l'épaisseur du substrat, au vu des avantages liés à ce type de végétalisation il serait intéressant qu'il vienne en supplément d'une isolation conventionnelle ce qui augmenterait encore le procédé de rafraîchissement passif des espaces. Nous pouvons avancer que la couverture de la totalité des terrasses et toitures en végétation extensive de la totalité de la ville nous permettrait de réduire de 11% la surcharge moyenne de consommation électrique due à la climatisation, cette proportion va de 14 à 17% en période critique, une couverture de 50% des constructions réduirait de 5,5% la surcharge moyenne due à la climatisation. Nous tenons à préciser que la stratégie de rafraîchissement passif des espaces en vue de réduire la consommation énergétique et atténuer l'effet îlot de chaleur urbain viendrait en complément d'autres stratégies.

Le travail expérimental réalisé sur site au niveau de la ville de Jijel avec un climat méditerranéen montre une augmentation des valeurs de températures relevées au niveau du milieu urbain par rapport à celles enregistrées à la station météorologique située en zone rurale ce qui confirme l'existence du phénomène ICU urbain au niveau de la ville. Nous avons montré que l'incidence des terrasses et toitures avec végétation extensive contribue significativement à l'atténuation de l'effet ICU, elle permet une atténuation moyenne des températures des surfaces supérieures des constructions de l'ordre de 18% contribuant ainsi au rafraîchissement des températures autour des toits par le premier paramètre qui est la modification de l'albédo des surfaces urbaines. Cet effet peut être optimisé par la multiplication des espèces végétales à indice de feuille élevé ainsi que par l'accès à l'eau des végétaux favorisant le phénomène d'évapotranspiration. Le second paramètre mis en évidence par notre travail est la performance d'isolation par l'amélioration significative des conditions de confort intérieur avec une amélioration moyenne de l'ordre de 11% et atteignant même 17% aux heures chaudes de la journée, ce qui réduit significativement la surcharge de consommation énergétique due au recours à la climatisation.

Cette stratégie de rafraîchissement des espaces urbains au vu des avantages liés au rafraîchissement de l'air autour des terrasses et toitures, isolation acoustique, meilleur drainage des eaux de pluies, réduction de la vitesse du vent, lutte contre la pollution atmosphérique, préservation et réintroduction de la biodiversité en milieu urbain, longévité accrue des toitures est intéressante à promouvoir. La végétalisation extensive des terrasses et toitures a recours à des espèces végétales locales, disponibles, peu coûteuses, résistantes aux périodes de sécheresse, avec de faibles besoins en entretien d'autant plus que la faiblesse du poids du substrat fait qu'elle peut être envisagée sur les structures existantes sans redimensionnement de ces dernières.

6.2 Analyse résultats simulation numérique confort intérieur et consommation énergétique : Cas d'étude en zone méditerranéenne. Ville de Jijel.

Nous analysons les résultats obtenus à l'aide du logiciel ECOTECH pour le cas de la ville de Jijel qui nous renseignent sur l'effet de la toiture couverte de végétation extensive sur l'amélioration du confort thermique intérieur ainsi que son impact sur la réduction de la consommation énergétique en période estivale pour les besoins de climatisation et en période hivernale pour les besoins en chauffage.

6.2.1 Effet de la toiture végétale sur le confort thermique intérieur en période estivale :

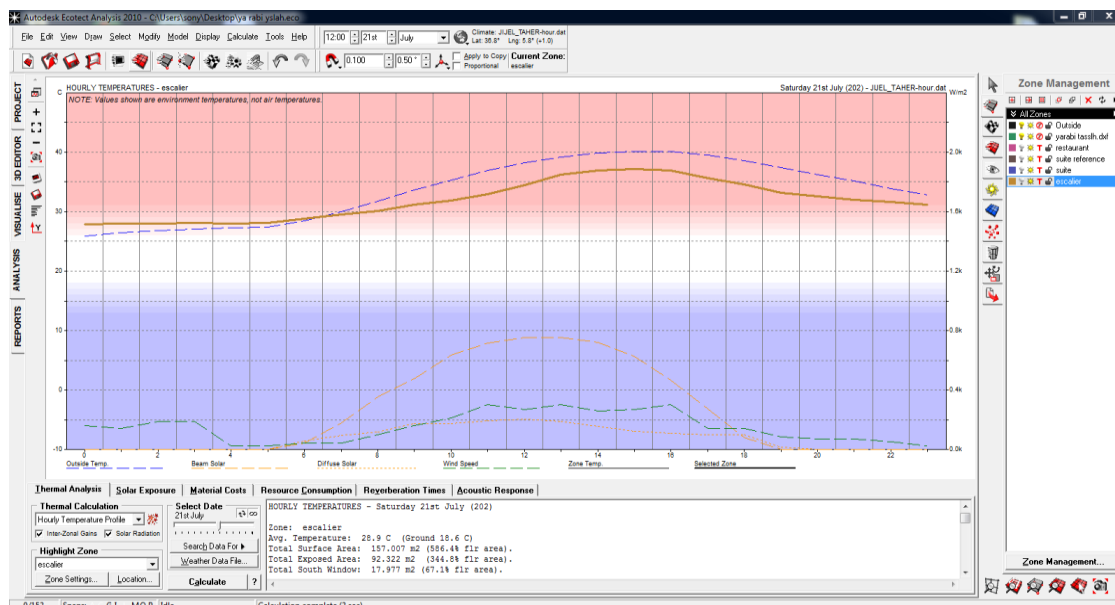


Figure 6.7 : Comparatif de température extérieure et intérieure espace avec toiture nue.

La journée du 21 juillet est considérée comme la journée la plus chaude de l'année on observe à partir des résultats de la simulation numérique à l'aide du logiciel ECOTECH une augmentation rapide des températures dès 6 heures du matin ce qui confirme l'effet de ville et le phénomène îlot de chaleur urbain constaté au niveau des différentes études réalisées.

L'écart de température au maxima de la température extérieure constatée à 14h30 qui est de 40°C et 37°C pour l'ambiance thermique intérieure nous indique une situation d'inconfort au niveau de l'espace objet de notre étude couvert avec une dalle en béton armée nue ce qui

peut engendrer des besoins importants en rafraîchissements actifs par le biais de la climatisation avec une surconsommation énergétique évidente.

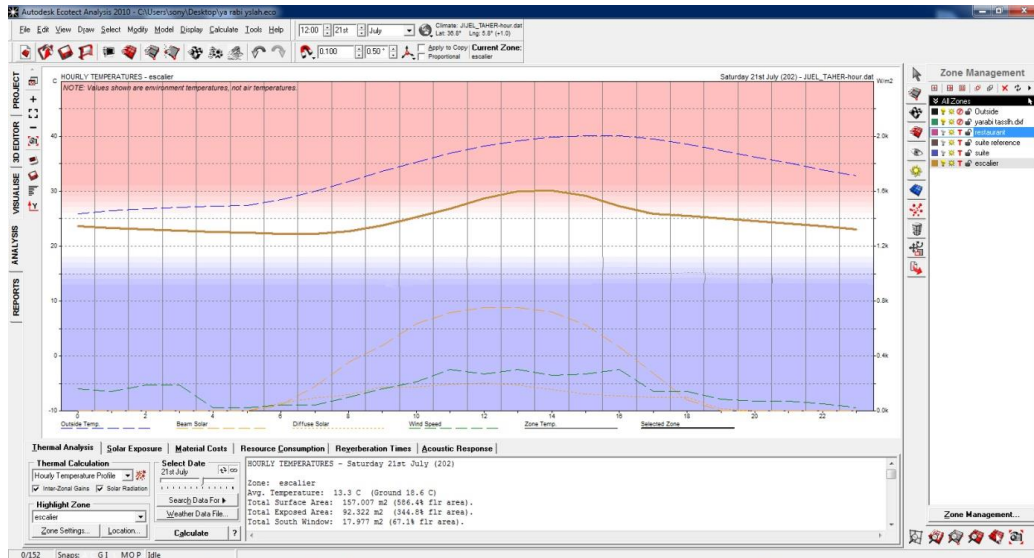


Figure 6.8 : Comparatif de température extérieure et intérieure espace avec toiture végétale extensive.

Pour l'espace étudié recouvert d'une toiture avec végétation extensive, le même phénomène est observé au niveau du microclimat extérieur, par contre au niveau de l'intérieur des constructions aux heures les plus chaudes un écart de 10°C est observé pour une température extérieure de 40°C et intérieure de 30°C ce qui nous donne un gain de 25% d'amélioration du confort thermique intérieur, cela est justifié par le recouvrement de la toiture par une végétation type extensif. Ces résultats obtenus à l'aide de la simulation numérique avec le logiciel Ecotect confirment les résultats obtenus au niveau du travail expérimental in situ et nous permettent d'étendre le champ d'investigation aux espaces urbains ce qui nous conforte dans nos recommandations émises au niveau de la conclusion générale.

6.2.2 Impact de la toiture végétale sur la consommation énergétique en période estivale :

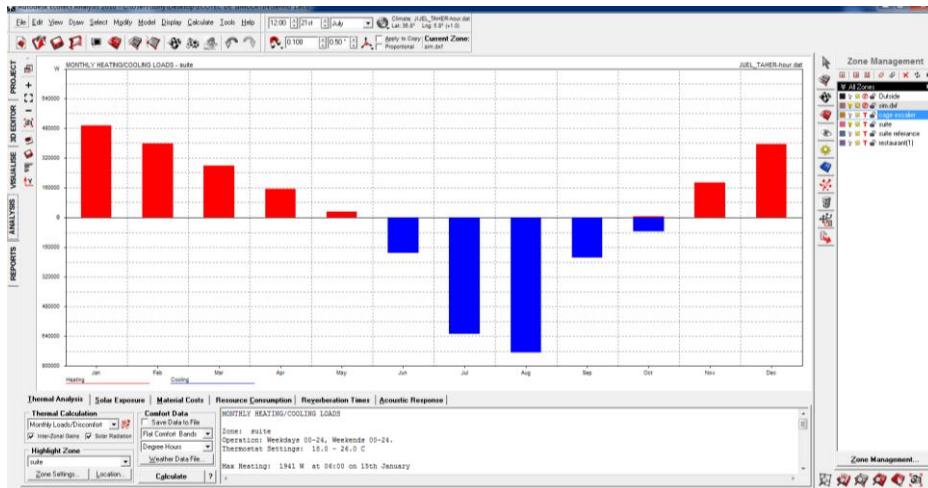


Figure 6.9 : besoins mensuels en énergie pour chauffage/climatisation de l’espace étudié.

Les résultats de la simulation numérique évaluent les besoins en énergie électrique pour la climatisation de 640000 à 700000 W pour les mois de Juillet et Aout ce qui est excessif ,la couverture végétale permettrait de réduire ces surcharges de consommation de 11% réduisant ainsi les couts d’exploitation et soulageant le réseau d’alimentation d’électricité.

6.2.3 Effet de la toiture végétale sur le confort thermique intérieur en période hivernale :

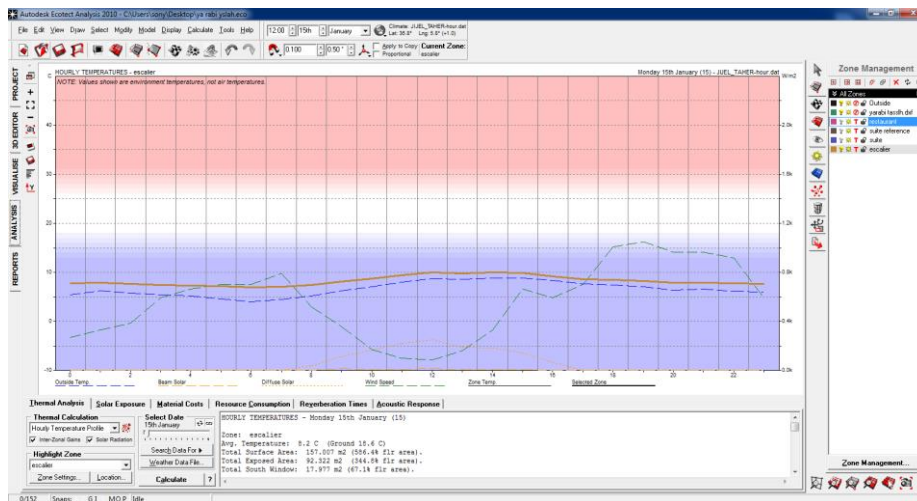


Figure 6.10 : Comparatif de température extérieure et intérieure espace avec toiture nue.

Pour la période hivernale et pour la journée considérée comme la plus froide de l’année,

La moyenne des températures est de 10°C, l’analyse du graphe des températures nous indique des températures intérieures très froides dans un seuil inacceptable, cela est dû à l’effet

refroidissant et amplifiant de la toiture nue en béton armé totalement exposée aux aléas climatiques, ceci occasionne des besoins importants en chauffage pour ramener l'ambiance intérieure a un niveau de confort acceptable.

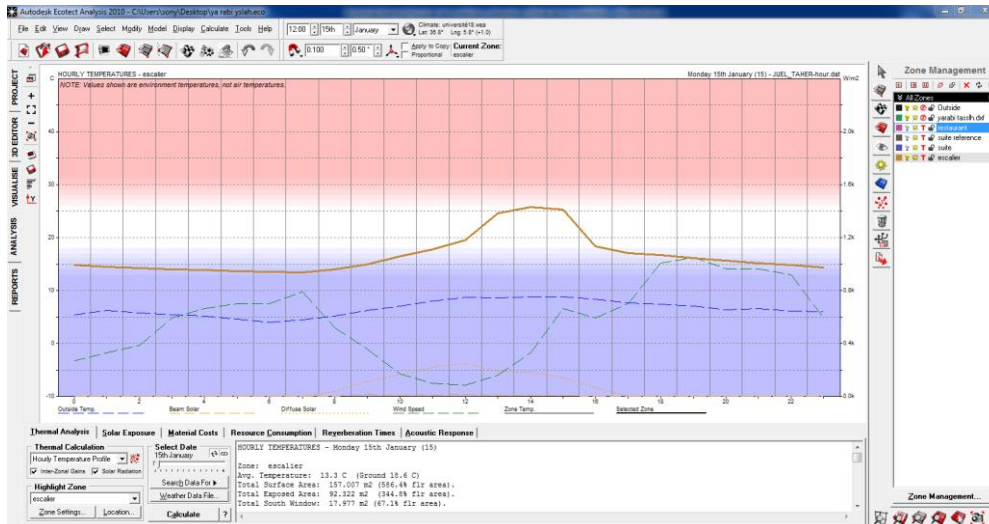


Figure 6.11 : Comparatif de température extérieure et intérieure espace avec toiture végétale extensive.

Pour le scénario de la suite recouverte de toiture avec végétation extensive on observe une nette amélioration des conditions de confort malgré des températures extérieures très fraîches avec une moyenne de 8°C pour cette journée du 15 janvier considérée comme la plus froide de l'année, la moyenne des températures intérieures est de 15°C ce qui nous donne un gain de l'ordre de 45% par rapport aux besoins de chauffage des espaces habités.

La toiture recouverte de végétation permet aussi de disposer d'ambiances thermiques en zone de confort évitant de recourir en permanence à des systèmes actifs énergivores et émetteurs de gaz à effet de serre. Le logiciel de simulation numérique ECOTECT s'avère être un outil efficace d'aide à la prise de décision en ce qui concerne les matériaux et types d'isolation à prévoir ainsi que pour les couts d'exploitation liés à l'énergie des bâtiments.

6.2.4 Impact de la toiture végétale sur la consommation énergétique en période hivernale :

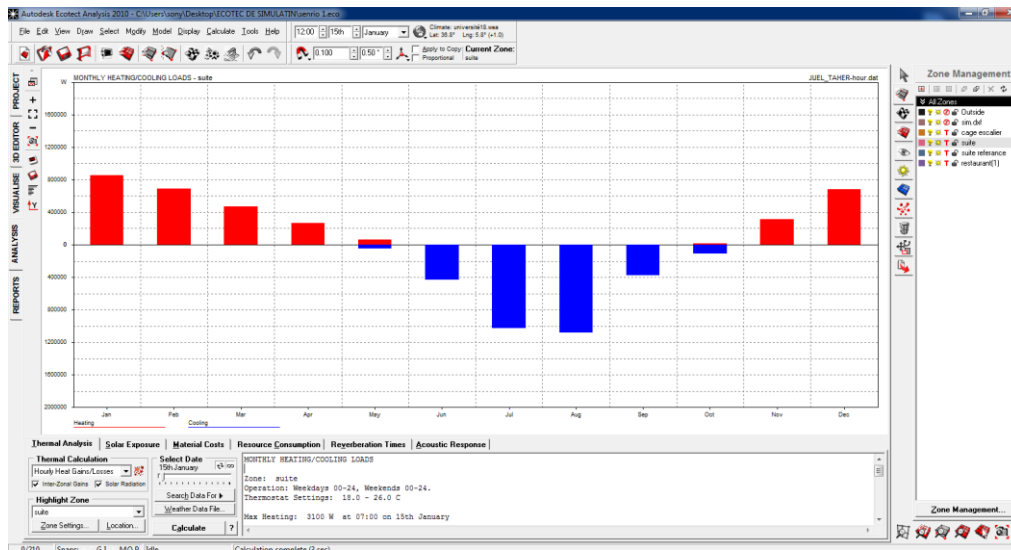


Figure 6.12 : besoins mensuels en énergie pour chauffage/climatisation de l'espace étudié.

Les besoins en chauffage pour le mois de janvier sont évalués par l'outil de simulation numérique ECOTECT à 800000 W soit un besoin quotidien de 26666 W, la couverture des espaces habités nous permettrait un gain aux heures les plus critiques de l'ordre de 45% par rapport à la surconsommation énergétique due aux besoins de chauffage nécessaires pour atteindre une situation de confort acceptable pour les usagers des espaces habitables.

6.3 Analyse résultats simulation numérique confort intérieur et consommation énergétique : Cas d'étude en zone aride. Ville de Biskra.

A ce niveau nous allons procéder à l'analyse des résultats obtenus au niveau du cas de la ville de Biskra qui représente un échantillon de la zone à climat aride, ces résultats nous renseignent sur l'incidence de la toiture couverte de végétation extensive sur l'amélioration du confort thermique intérieur ainsi que son impact sur la réduction de la consommation énergétique en période estivale pour les besoins de climatisation et en période hivernale pour les besoins en chauffage.

Il faut préciser que le même modèle de bâtiment à savoir l'hôtel choisi au niveau de la ville de Jijel présentant les mêmes caractéristiques architecturales et constructives qui a été adopté, ce qui nous permet d'avoir des résultats significatifs pouvant être sujet à comparaison.

6.3.1 Effet de la toiture végétale sur le confort thermique intérieur en période estivale :

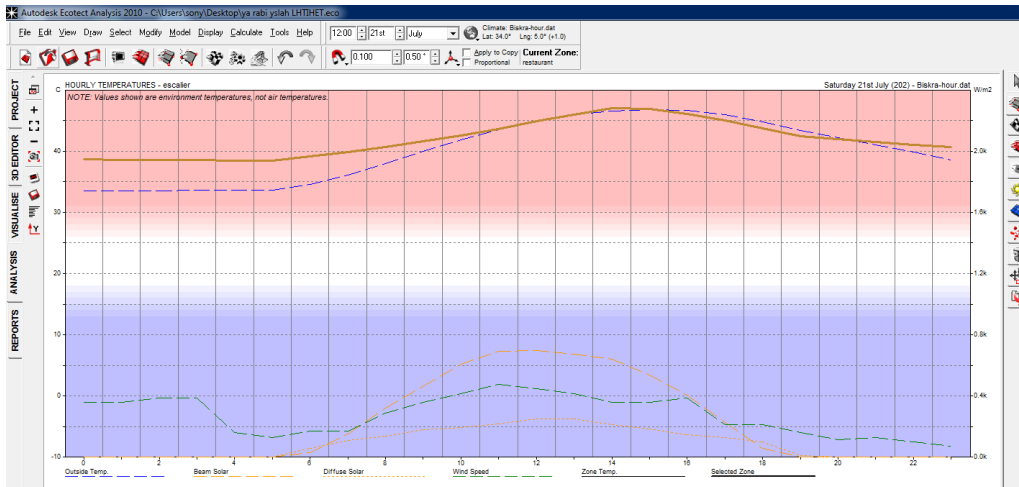


Figure 6.13 : Comparatif de température extérieure et intérieure espace avec toiture nue.

On observe le phénomène effet de ville dès les premières heures de la journée avec une augmentation rapide des températures dès 7 heures du matin ce qui confirme l'incidence du rayonnement solaire sur le confort microclimatique des zones urbaines en ce climat aride. L'écart de température constatée à la tranche horaire 14h00-15h00 est négligeable pour des températures intérieures et extérieures de l'ordre de 47°C pour l'ambiance thermique intérieure nous indiquant une situation d'inconfort à la limite du supportable ce qui engendrer des besoins importants en rafraîchissements actifs avec une surconsommation énergétique importante.

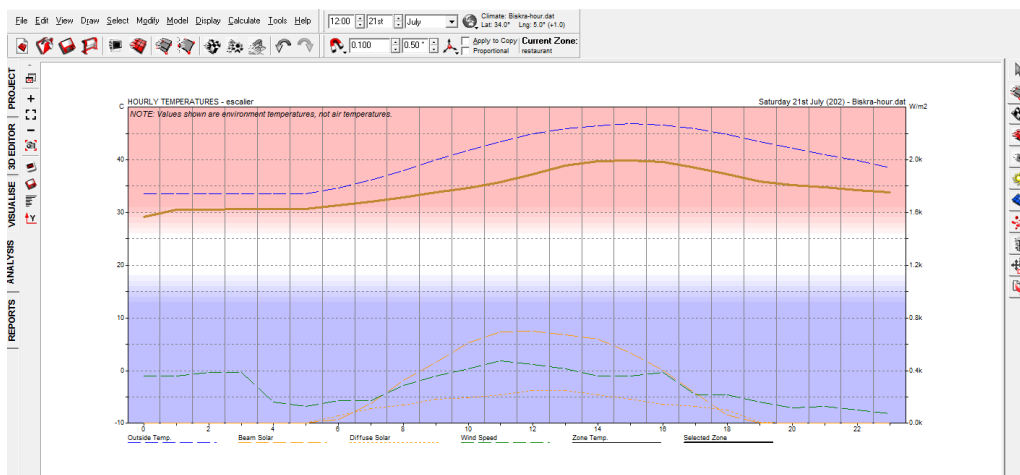


Figure 6.14 : Comparatif de température extérieure et intérieure espace avec toiture végétale extensive.

Pour l'espace étudié recouvert d'une toiture avec végétation extensive, le même phénomène est observé au niveau du microclimat extérieur, par contre au niveau de l'intérieur des constructions aux heures les plus chaudes un écart de 7°C est observé pour une température extérieure de 47°C et intérieure de 40°C ce qui nous donne un gain de 15% d'amélioration du confort thermique intérieur, cela est justifié par le recouvrement de la toiture par une végétation type extensif.

6.3.2 Impact de la toiture végétale sur la consommation énergétique en période estivale :

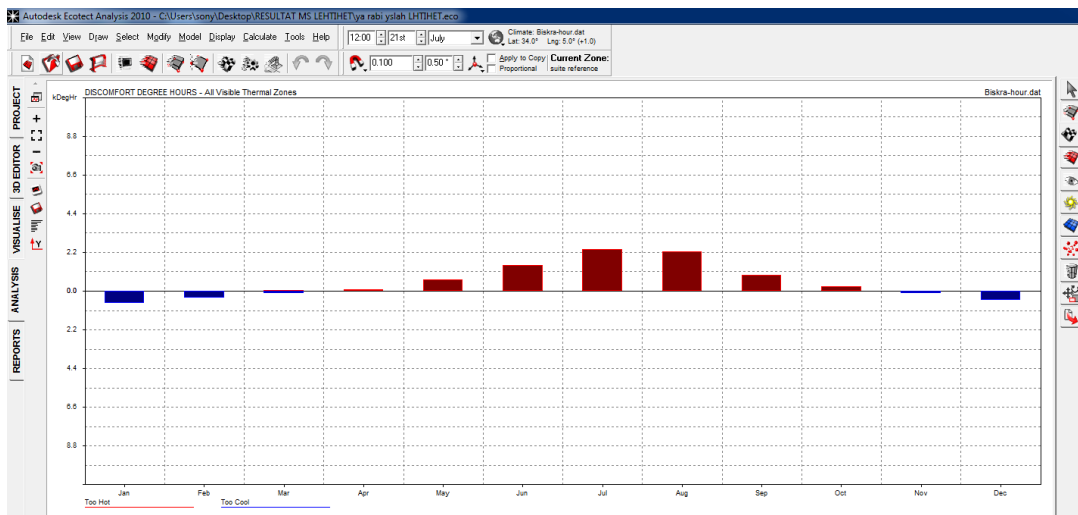


Figure 6.15 : besoins mensuels en énergie pour chauffage/climatisation de l'espace étudié.

Le graphe montre les besoins de la consommation énergétique pour le rafraîchissement des espaces intérieurs pour la période estivale et qui montre clairement des besoins accrus pour la période mai septembre avec un différentiel de température de 22 degré pour le mois de Juillet et 23 degré pour le mois d'aout ce qui laisse supposer des besoins importants en systèmes de rafraîchissement actifs qui peuvent être atténués par le recours à la végétation pour son ombre portée et son évapotranspiration.

6.3.3 Effet de la toiture végétale sur le confort thermique intérieur en période hivernale :

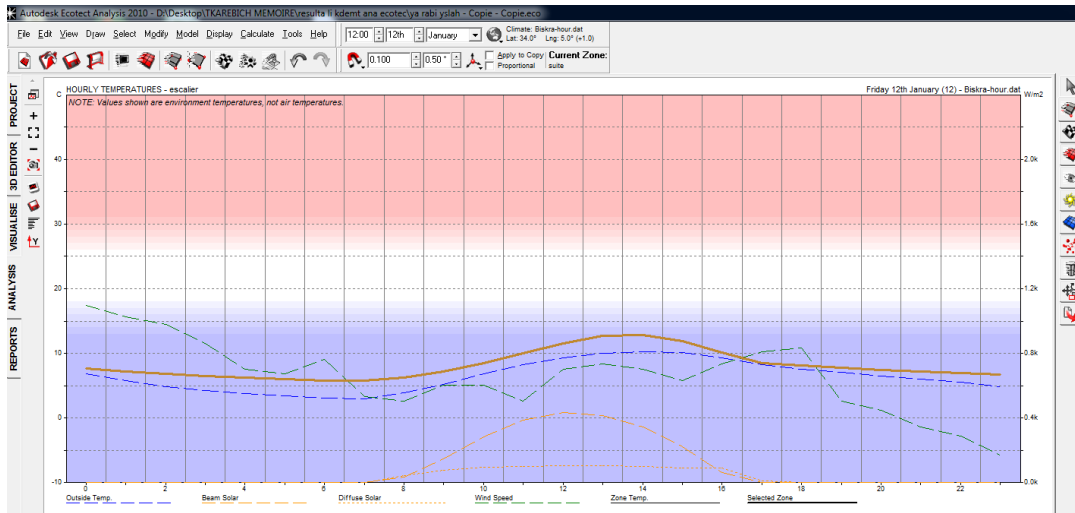


Figure 6.16 : Comparatif de température extérieure et intérieure espace avec toiture nue.

Pour la période hivernale et pour la journée considérée comme la plus froide de l'année, la moyenne des températures est de 8°C pour cette journée hivernale très fraîche du 12 janvier. L'analyse du graphe des températures nous indique des températures intérieures très froides dans un seuil inacceptable, cela est dû à l'effet refroidissant et amplifiant de la toiture nue en béton armé totalement exposée aux aléas climatiques, d'où des besoins importants en chauffage pour ramener l'ambiance intérieure à un niveau de confort acceptable.

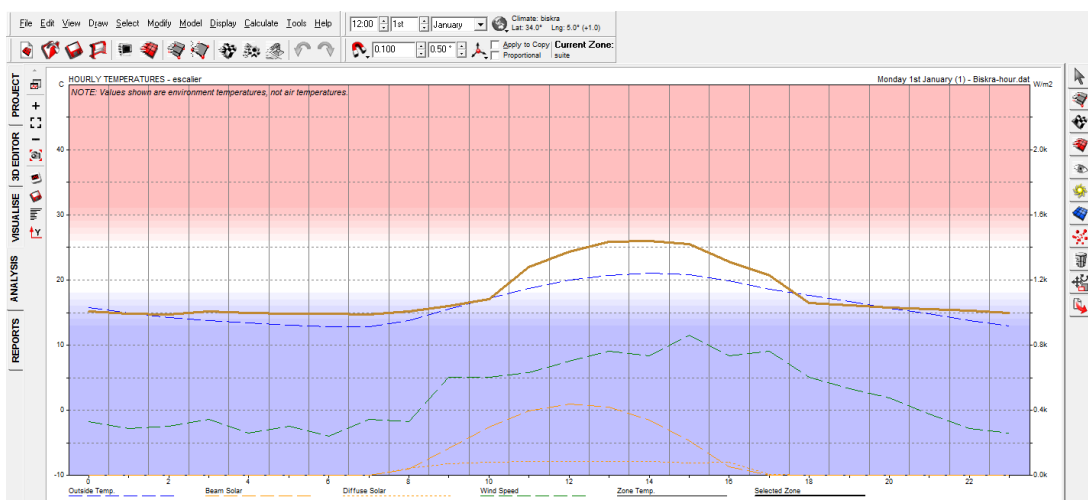


Figure 6.17 : Comparatif de température extérieure et intérieure espace avec toiture végétale extensive.

Pour le scénario de la suite recouverte de toiture avec végétation extensive on observe une nette amélioration des conditions de confort malgré des températures extérieures très fraîches avec une moyenne de 15°C pour cette journée du 1 janvier, la moyenne des températures intérieures est de 20°C ce qui nous donne un gain de l'ordre de 25 % par rapport aux besoins de chauffage des espaces habités.

6.3.4 Impact de la toiture végétale sur la consommation énergétique en période hivernale :

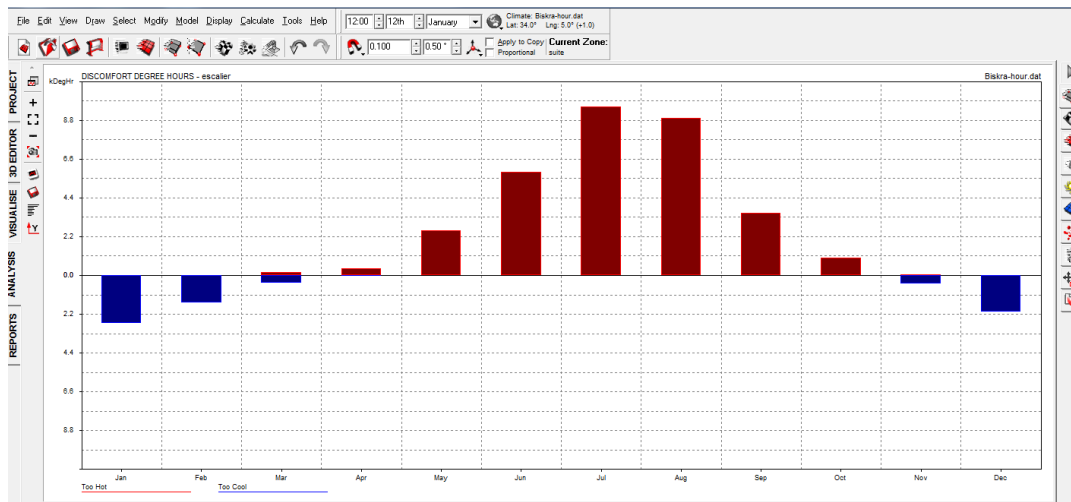


Figure 6.18 : besoins mensuels en énergie pour chauffage/climatisation de l'espace étudié.

6.4 Analyse résultats simulation du microclimat :

Les résultats obtenus à l'aide du logiciel de simulation numérique ENVI met mettent en valeur l'impact de la toiture végétalisée sur les conditions microclimatiques locales à l'échelle d'un quartier, cet outil tridimensionnel s'avère un moyen d'investigation efficace pour déterminer les valeurs climatiques autour des toits ainsi qu'au niveau piétonnier.

L'analyse des résultats obtenus permettent d'avancer que la toiture végétalisée contribue significativement à atténuer l'effet de chaleur urbain au niveau microclimatique en créant une couche fraîche sur les toits en modifiant l'albédo de ces dernières. Elles s'avère être un paramètre végétal parmi tant d'autre à mettre en œuvre d'où la nécessité d'une végétalisation supplémentaire au niveau piétonnier à l'aide d'arbres ,arbustes devant porter de l'ombre sur les parois verticales évitant ainsi l'effet de surchauffe .Les pelouses quant à elles sont primordiales pour créer l'évapotranspiration nécessaire à un meilleur rendement des arbres

évitant la réflexion du rayonnement solaire des rues et voies vers les canopées.

6.4.1 Effet des toitures végétalisées sur la température de l'air :

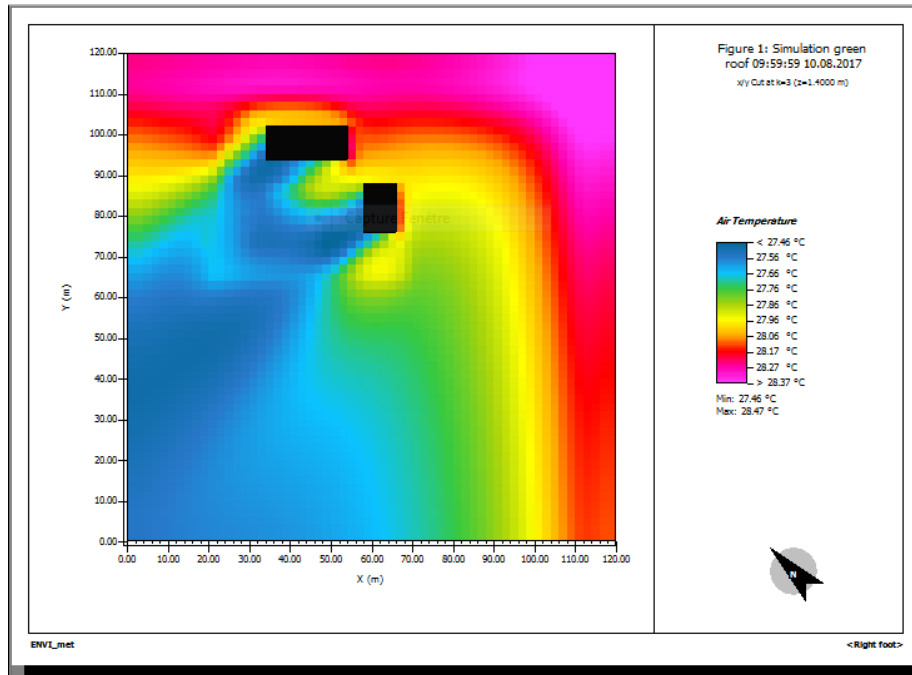


Figure 6.19 : Température à 1,40 m du sol.

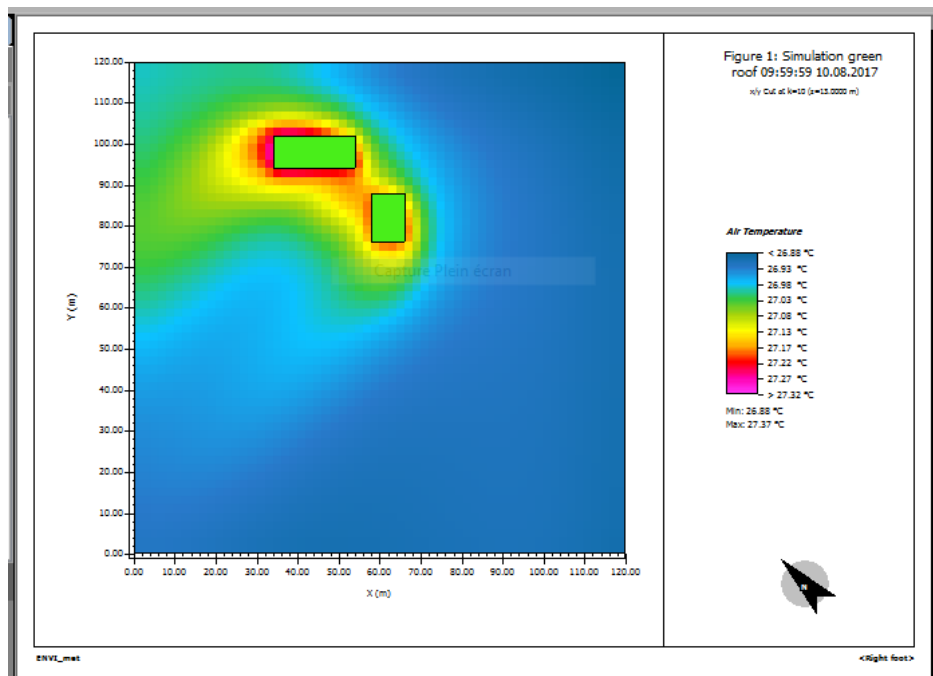


Figure 6.20 : Température à 13,00 m au-dessus du toit.

Nous constatons que la température pour le récepteur 4 au niveau du sol est de 28.17°C tandis que les récepteurs C1 et C2 au niveau de la toiture indiquent une température de 27.03 avec une couronne fraîche autour des toits ce qui confirme l'effet rafraichissant des toitures vertes.

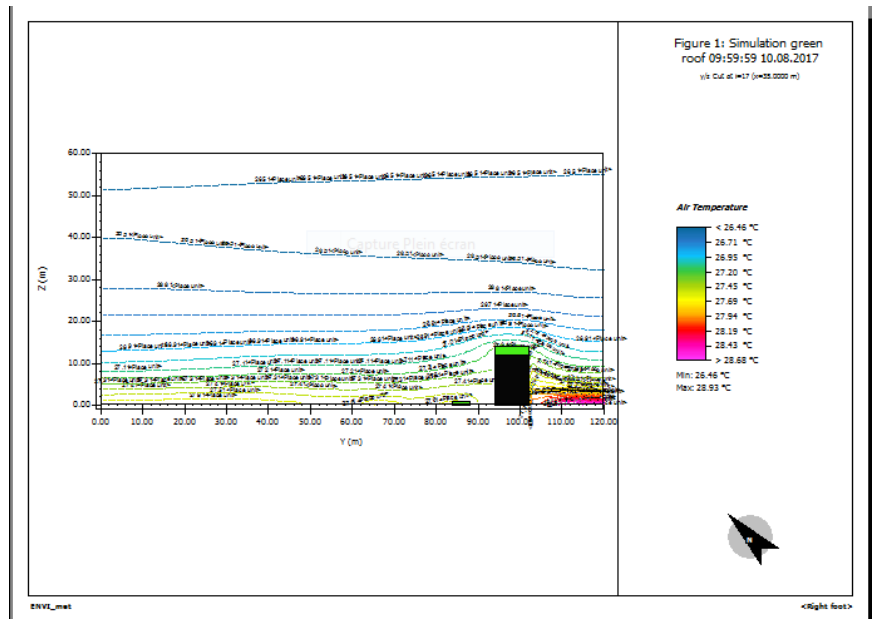


Figure 6.21 : Température de l'air du scénario toiture avec couverture végétale.

Les températures les plus élevées sont constatées à l'est des bâtiments ce qui confirme l'effet de ville dès les premières heures de la journée ainsi que la surchauffe des surfaces minérales au niveau piétonnier. Le spectre des températures nous permet d'observer à travers la couleur respective des iso lignes l'effet de la toiture végétale sur les microclimats urbains, nous pouvons aussi confirmer qu'il faut un ratio important de toitures végétales pour impacter significativement le microclimat, ce qui confirme les conclusions déjà avancées au niveau du travail expérimental in situ.

6.4.2 Effet des toitures végétalisées sur l'humidité relative :

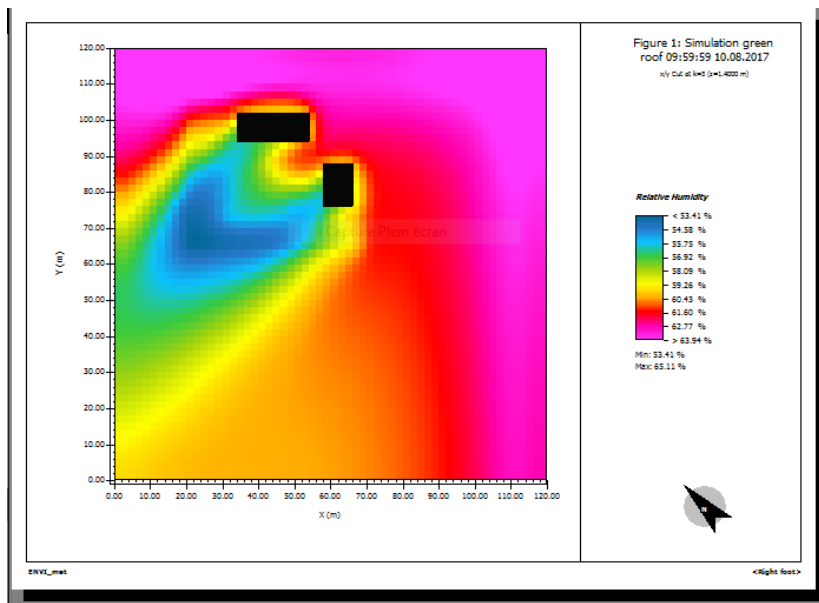


Figure 6.22 : Humidité relative à 1.40m du sol

Les résultats numériques à 1.40m nous indiquent des valeurs de 61% du côté est à 9h00 du matin et 54 % du côté ouest ,cela est dû à l'ombre portée par le bâti.

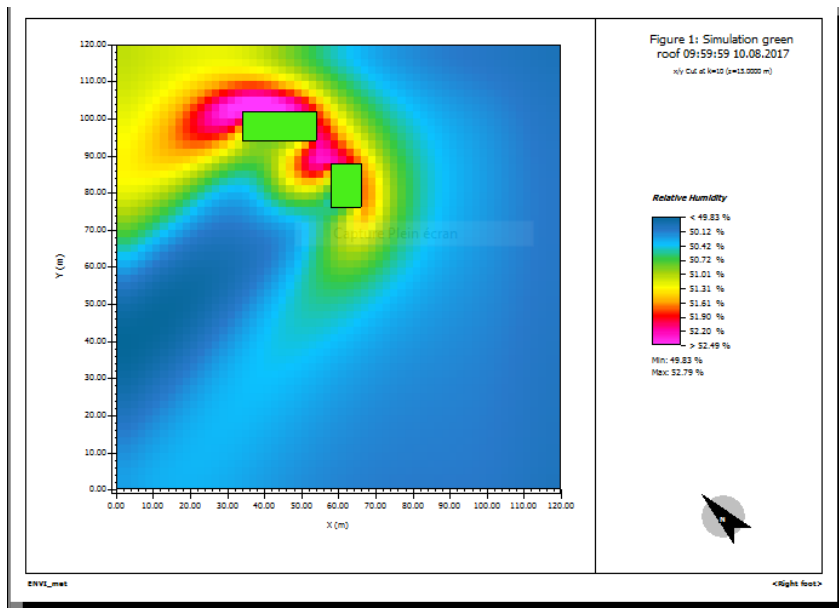


Figure 6.23 : Humidité relative à 13.00 m de hauteur.

Nous remarquons pour les récepteurs C1 et C2 au niveau des toitures un niveau d'humidité relative de 51% alors qu'au niveau du récepteur C4 qui est au niveau du sol la valeur est de 49.83 % ce qui nous indique l'effet humidifiant de la toiture verte qui va aller en s'amplifiant à mesure que la durée d'insolation va augmenter favorisant ainsi le phénomène d'évapotranspiration des végétaux. L'humidité relative dépend aussi de la distance par rapport

à la végétation et de l'importance du rayonnement solaire.

6.4.3 Effet des toitures végétalisées sur la vitesse du vent :

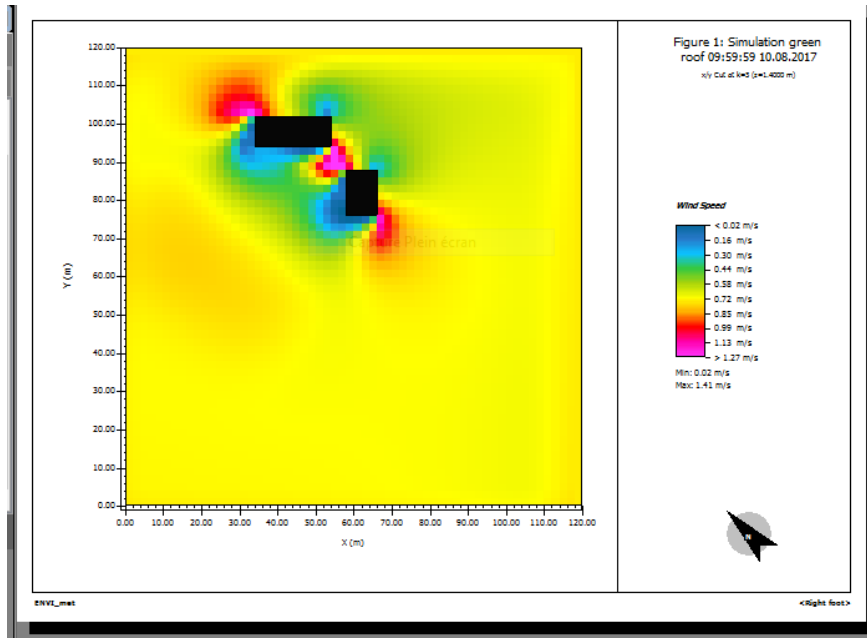


Figure 6.24 : Vitesse du vent à 1.40m.

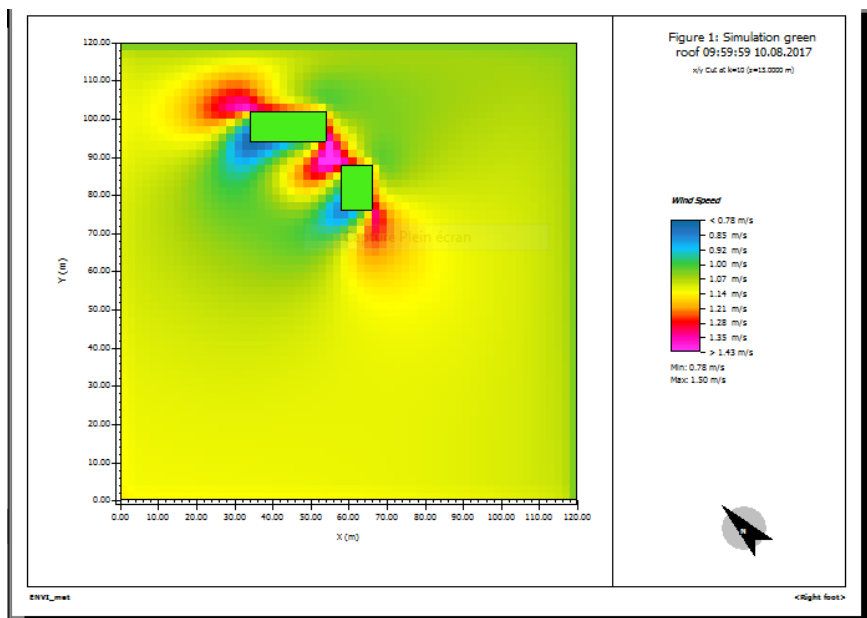


Figure 6.25 : Vitesse du vent à 13.00 m.

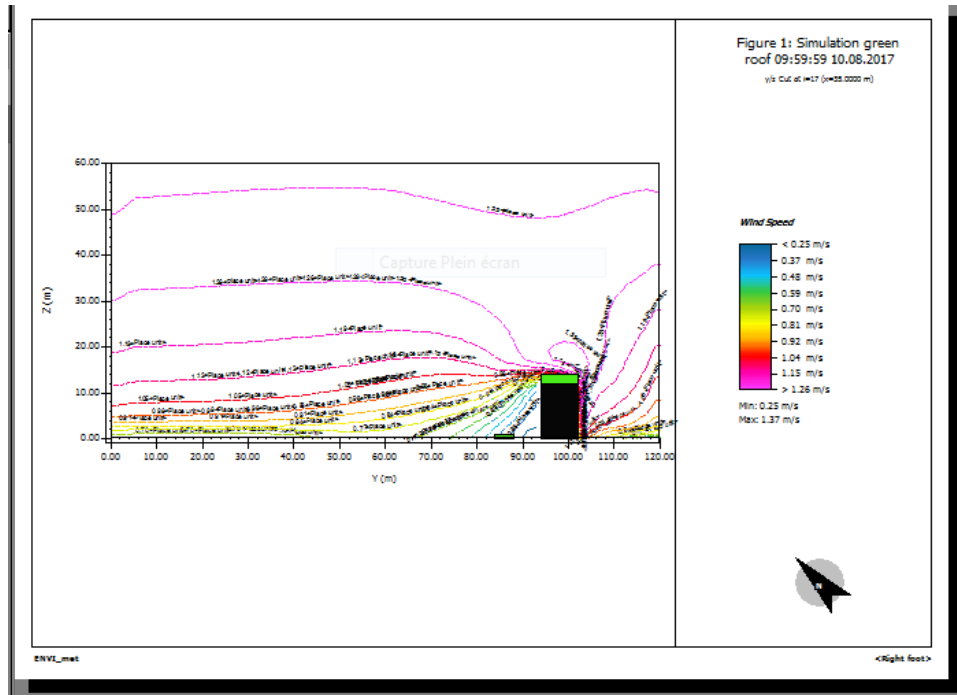


Figure 6.26 : Vitesse du vent du scénario toiture avec couverture végétale.

La journée du 10/08/2017 est caractérisée par une faible moyenne de la vitesse du vent de 1.28m/s néanmoins nous observons l'effet brise vent du bâti qui réduit significativement la vitesse du vent de 1.15 m/s à 0.48 m/s. L'effet réducteur de la vitesse du vent par la couverture végétale a été démontré à travers plusieurs études réalisées de par le monde. Nous constatons que l'effet de réduction de la vitesse de l'air se limite au niveau de la toiture et ses environs immédiats, son impact dépend de la hauteur de la végétation et de son indice foliaire.

Conclusion

Les résultats démontrés dans l'investigation expérimentale confirment l'existence du phénomène îlot de chaleur urbain au niveau de la ville, ce qui a des conséquences directes sur les charges climatiques et le confort thermique à l'intérieur des bâtiments ainsi que sur leur demande énergétique. Nous avons montré que l'incidence des terrasses et toitures avec végétation extensive contribue significativement à l'atténuation de l'effet ICU, elle permet une atténuation moyenne des températures des surfaces supérieures des constructions de l'ordre de 18% contribuant ainsi au rafraîchissement des températures autour des toits par le premier paramètre qui est la modification de l'albédo des surfaces urbaines. Cet effet peut être optimisé par la multiplication des espèces végétales à indice de feuille élevé ainsi que par l'accès à l'eau des végétaux favorisant le phénomène d'évapotranspiration. Le second paramètre mis en évidence par notre travail est la performance d'isolation par l'amélioration significative des

conditions de confort intérieur avec une amélioration moyenne de l'ordre de 11% et atteignant même 17% aux heures chaudes de la journée.

Le comparatif des résultats obtenus en climat méditerranéen à la ville de Jijel par rapport à ceux obtenus en climat aride à la ville de Biskra montrent un meilleur rendement de la toiture végétalisée en climat méditerranéen ceci s'explique par la facilité d'accès à l'eau des plantes par une meilleure pluviométrie ainsi qu'un taux d'humidité plus élevé favorisant l'évapotranspiration des végétaux et de meilleurs échanges gazeux avec l'atmosphère.

Afin d'étendre le champ d'investigation et de corrélérer les résultats obtenus à l'échelle de la ville le même scénario a été réalisé à l'aide d'outils de simulation numérique que sont ECOTECT pour la performance énergétique et le confort intérieur des constructions et ENVI met qui est un logiciel de simulation pour les conditions de confort au niveau microclimatique. Les résultats numériques ont confirmé les phénomènes observés au niveau du travail expérimental et montrent que la toiture avec couverture végétale extensive constitue un moyen efficace parmi tant d'autres d'améliorer les conditions de confort thermique des bâtiments par leur pouvoir isolant ainsi que les conditions microclimatiques locales par la modification de l'albédo des surfaces urbaines couplé à la capacité évapotranspirante des végétaux avec une économie potentielle d'énergie. Cette optimisation des enveloppes passe aussi par la végétalisation des parois verticales des constructions que par l'intégration du végétal sous forme d'arbre et de pelouse afin de rafraîchir l'ensemble des espaces intérieurs et extérieurs dans le but d'une réduction significative de la consommation énergétique en milieu urbain.

Cette stratégie de rafraîchissement des espaces urbains au vu des avantages liés au rafraîchissement de l'air autour des terrasses et toitures, isolation acoustique, meilleur drainage des eaux de pluies, réduction de la vitesse du vent, lutte contre la pollution atmosphérique, préservation et réintroduction de la biodiversité en milieu urbain, longévité accrue des toitures est intéressante à promouvoir. La végétalisation extensive des terrasses et toitures a recours à des espèces végétales locales, disponibles, peu coûteuses, résistantes aux périodes de sécheresse, avec de faibles besoins en entretien d'autant plus que la faiblesse du poids du substrat fait qu'elle peut être envisagée sur les structures existantes sans redimensionnement de ces dernières.

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

Les projections climatiques prévoient une amplification du réchauffement global de la planète ce qui a pour conséquence une augmentation de la consommation énergétique des bâtiments. La recrudescence d'événements extrêmes comme les canicules peut avoir des conséquences écologiques, sanitaires et économiques dramatiques à l'échelle des villes. La minéralisation généralisée des zones urbaines en remplaçant la végétation et les zones humides par du béton et de l'asphalte développe au niveau des villes des problèmes liés au phénomène d'îlot de chaleur comme les pics de pollution et la surconsommation énergétique due à la climatisation générant une augmentation de la température des rues au niveau des piétons. Les terrasses et toitures végétalisées peuvent être une technique optimale pour réduire l'effet îlot de chaleur urbain, ombrageant le toit en le protégeant des radiations solaires directes, augmentant le rafraîchissement par évaporation et réduisant ainsi la demande énergétique. L'objectif principal de cette thèse est de caractériser l'incidence de la terrasse avec couverture végétale extensive sur l'amélioration des microclimats des villes dans un contexte climatique méditerranéen comparativement à la zone aride.

Le préambule de ce travail est consacré majoritairement à la bibliographie qui a permis de dresser un panorama à travers la présentation des connaissances théoriques relatives à la végétation en milieu urbain et de présenter un certain nombre de travaux se rapportant au plus proche de la question. L'effet du végétal sur le confort thermique des usagers à travers les échanges gazeux avec l'atmosphère par le biais du phénomène de l'évapotranspiration a été expliqué. Différentes études scientifiques réalisées à travers le monde ont été présentées, la totalité s'accordent à caractériser l'impact de la végétalisation des toitures sur l'amélioration des conditions de confort intérieur des constructions ainsi que leur impact sur l'environnement immédiat de celles-ci. Il était nécessaire de définir le concept et les caractéristiques techniques des toitures végétales à travers l'histoire ainsi que leur évolution à ce jour, chose qui fut faite au niveau du troisième chapitre. Les éléments de climatologie et leurs caractéristiques ont été définis au niveau du quatrième chapitre de cette partie.

Les travaux expérimentaux réalisés au niveau d'un site au niveau de la ville de Jijel au climat méditerranéen ont été présentés au niveau du cinquième chapitre et qui

consistent en des campagnes de mesures in situ a été effectué sur des modules expérimentaux réalisées à une échelle humaine le premier doté de terrasse en béton armé nue le second de terrasse couverte de végétation extensive avec comme espèce le lierre qui est une plante rampante et grimpante à la fois. Les résultats démontrés dans l'investigation montrent une augmentation des valeurs de températures relevées au niveau du milieu urbain par rapport à celles enregistrées à la station météorologique située en zone rurale ce qui confirme l'existence du phénomène ICU urbain au niveau de la ville le phénomène ce qui a des conséquences directes sur les charges climatiques et le confort thermique à l'intérieur des bâtiments ainsi que sur leur demande énergétique. Nous avons montré que l'incidence des terrasses et toitures avec végétation extensive contribue significativement à l'atténuation de l'effet ICU, elle permet une atténuation moyenne des température des surfaces supérieures des constructions de l'ordre de 18% contribuant ainsi au rafraîchissement des températures autour des toits par le premier paramètre qui est la modification de l'albédo des surfaces urbaines. Cet effet peut être optimisé par la multiplication des espèces végétales à indice de feuille élevé ainsi que par l'accès à l'eau des végétaux favorisant le phénomène d'évapotranspiration. Le second paramètre mis en évidence par notre travail est la performance d'isolation par l'amélioration significative des conditions de confort intérieur avec une amélioration moyenne de l'ordre de 11% et atteignant même 17% aux heures chaudes de la journée. Izard et al (2004) citent que la végétation doit couvrir un minimum de 30% de la surface urbanisée pour avoir un effet sur le plan thermique et hygrothermique du microclimat.

Afin d'étendre le champ d'investigation et de corréler les résultats obtenus à l'échelle de la ville le même scénario a été réalisé à l'aide d'outils de simulation numérique que sont ECOTECT pour la performance énergétique et le confort intérieur des constructions et ENVIMET qui est un logiciel de simulation pour les conditions de confort au niveau microclimatique. Les résultats numériques ont confirmé les phénomènes observés au niveau du travail expérimental et montrent que la toiture avec couverture végétale extensive constitue un moyen efficace d'améliorer les conditions de confort thermique des bâtiments par leur pouvoir isolant ainsi que les conditions microclimatiques locales par la modification de l'albédo des surfaces urbaines couplé à la capacité évapotranspirante des végétaux avec une économie potentielle d'énergie entre deux choix d'aménagements pour un même projet. Néanmoins il faut préciser que cette stratégie doit être associée à une végétalisation aussi bien des parois verticales des

constructions que des espaces urbains par l'implantation d'arbres et de pelouses afin d'optimiser l'action de rafraîchissement au niveau des villes et améliorer les conditions de confort au niveau piétonnier de plus les résultats numériques suggèrent que l'impact des toitures végétales sur le microclimat des villes est beaucoup plus ressenti pour les espaces urbains avec des constructions de faible hauteur.

Le comparatif des résultats obtenus par le logiciel de simulation numérique ECOTECT en climat méditerranéen à la ville de Jijel par rapport à ceux obtenus en climat aride à la ville de Biskra montrent un meilleur impact de la toiture végétalisée en climat méditerranéen sur le confort thermique des constructions. Ceci s'explique par la facilité d'accès à l'eau des plantes par une meilleure pluviométrie ainsi qu'un taux d'humidité plus élevé favorisant l'évapotranspiration des végétaux et de meilleurs échanges gazeux avec l'atmosphère.

La végétalisation extensive des terrasses et toitures a recours à des espèces végétales locales, disponibles, peu coûteuses, résistantes aux périodes de sécheresse, avec de faibles besoins en entretien d'autant plus que la faiblesse du poids du substrat fait qu'elle peut être envisagé sur les structures existantes sans redimensionnement de ces dernières. Comparativement à une toiture minérale qui s'échauffe au soleil, la toiture végétale joue le rôle d'une toiture froide très performante. La couleur et la texture du feuillage permettent une absorption du rayonnement solaire dont une partie est évacuée par évapotranspiration. Nous pouvons aussi avancer qu'il faut un ratio important de toitures végétales pour impacter significativement le microclimat à travers la diminution de la consommation énergétique et la réduction des émissions des gaz à effet de serre par la prolifération des toitures vertes créant une couronne fraîche autour des toits, ce qui confirme les conclusions déjà avancées au niveau du travail expérimental in situ.

Les outils de simulation numérique ont démontrés leur efficacité sous réserve d'inclure des données fiables. Aussi les champs d'investigation concernant les effets des toitures avec couverture végétale sont vastes et nombreux et des applications et axes de recherche relatifs à l'urbanisme environnemental et aux bâtiments peuvent être envisagées, cela peut être par la détermination des ratios de végétalisation nécessaire, des hauteurs des constructions pour avoir un impact significatif sur l'amélioration des microclimats des villes, la nature des espèces végétales à recommander pour nos climats.

Face aux nouveaux phénomènes extrêmes que connaît le climat de la terre par les périodes de canicule récurrentes ou les tranches pluviométrique torrentielles. Cette

Conclusion générale et recommandations

stratégie de rafraîchissement des espaces urbains ouvre plusieurs perspectives de recherches au vu des avantages liés au rafraîchissement de l'air autour des terrasses et toitures lié à une longévité accrue de ces dernières , isolation acoustique, meilleur drainage des eaux de pluies par le différé d'écoulement, réduction de la vitesse du vent, lutte contre la pollution atmosphérique, préservation et réintroduction de la biodiversité en milieu urbain.

La végétalisation de nos espaces aussi bien au niveau des toitures qu'au niveau piétonnier permettra une augmentation des surfaces évapotranspirantes ainsi qu'une meilleure perméabilisation des espaces de nos villes atténuant les conséquences dramatiques dues aux périodes de canicule ou de pluies torrentielles.

Références Bibliographiques

ADJIEL A. (2010) Evaluation de l'efficacité énergétique du rafraichissement passif d'une toiture végétale sous in climat semi aride" Cas d'une terrasse végétale extensive à Constantine".Mémoire de Magistère.Université de Constantine.Algérie.

ADOLPHE L. (2002). SAGACités. Vers un système d'aide à la gestion des ambiances urbaines.Presses universitaires de france. pp.173-182

AKBARI H. and KOLOKOTSA D. (2016). Three decades of urban heat islands and mitigation technologies research. Energy and buildings. 133: p. 834-842.

AKBARI H. (2009).Cooling our communities. A guidebook on tree planting and light-colored surfacing. United States Environmental Protection Agency EPA, Berkeley (CA) USA.

AKBARI H. POMERANTZ M.and TAHA H. (2001).Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. Solar Energy. 70(3): p. 295-310.

AKIHIDO K, AGUNG BUDI H. (1998). Study on Areal Evapotranspiration in Asia-Pacific Region: Toward GIS-oriented hydrologic Database for comparative Hydrology Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University, 6p.

ALEXANDRI E.and al. (2008) Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. Building and Environment 43:480-493.

ALEXANDRI E.and JONES P. (2006) Ponds, green roofs,pergolas and high albedo materials;Wich cooling technique for urban spaces. PLEA.23^{ième} conference, Genève, 6-8 sep.

ALI-TOUDERT F. et Mayer H. (2007). Effects of asymmetry, galleries, overhanging facades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons.Solar Energy, 81(6) :742 – 754.

ALKAMA D. (2017) stratégie d'amélioration du confort thermique d'une place publique dans une saharienne "Biskra/Algérie".Revue des énergies renouvelable.Vol.19.N°3.pp.465-480.

ATIK T. (2014).Effets des toitures vertes sur le microclimat urbain à Alger.Conférence IBPSA France-Arras.

BAHADORI M. N. (1985).An improved design of wind towers for natural ventilation and passive cooling. Solar Energy. 35(2): p. 119-129.

BALAY O. (2006). Le végétal donneur d'ambiances : Jardiner les abords de l'habitat

en ville . Thèse doctorat : Urbanisme mention Architecture. Université de Grenoble, France, 502 p

BASS B.and BASKARAN B. (2001) Evaluating rooftop and vertical gardens as an adaptation strategy for urban areas. National research council. Canada.

BELANGER C. (2015). « *Critères techniques visant la construction des toits végétalisés* ». Régie du bâtiment, Québec, 24 p.

BEN CHEIKH H.and BOUCHAIR A. (2004). Passive cooling by evapo-reflective roof for hot dry climates. *Renewable Energy*. 29(11): p. 1877-1886.

BENHALILOU K. (2008).Impact de la vegetation grimpante sur le confort hygrothermique estival du batiment.Cas du climat semi aride.Mémoire de Magistère.Université de Constantine.Algérie.

BENNADJI A. (1999). Adaptation climatique ou culturelle en zones arides : cas du sud-est algérien.Thèse de doctorat.Université Aix Marseille.France.

BERNDTSSON J. C. (2010). Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: a review. *Ecological Engineering*. 36(4): p. 351-360.

BOIVIN M.A. (1999). Influence de l'épaisseur du substrat de culture et du microclimat sur l'acclimatation de six espèces vivaces en système de végétalisation de toiture Sopranature.Mémoire pour l'obtention du grade de maître es sciences,Faculté des sciences de l'agriculture et de l'alimentation.Université Laval.Canada.p2-3.

BOUCHAIR A. (2015). Vernacular Architecture: Hot Arid Climate Control, in *Encyclopedia of energy engineering and technology*, S. Anwar, Editor, CRC Press: Boca Raton, Fla. p. 2030-2050.

BOUCHAIR A. (2015).Sustainability features of vernacular architecture in Southern Algeria. *Signals and Systems: A Primer with MATLAB®*,: p. 163.

BOUCHAIR A. and al. (2013). Compact cities as a response to the challenging local environmental constraints in hot arid lands of Algeria. *Energy Procedia*. 42: p. 493-502.

BOUCHAIR A. (2004). Decline of urban ecosystem of m'zab valley. *Building and Environment* 39.719-732.

BOUCHAIR A. and DUPAGNE A. (2003). Building traditions of Mzab facing the challenges of re-shaping of its built form and society. *Building and Environment*,. 38(11): p. 1345-1364.

BOUDY P. (1952). Guide du Forestier en Afrique du Nord. Edition La Maison Rustique, Paris.494 p.

BOUKHABLA M. ALKAMA D. and BOUCHAIR A. (2013). The effect of urban morphology on urban heat island in the city of Biskra in Algeria. International Journal of Ambient Energy. 34(2): p. 100-110.

BOUSSOUALIM A. (2002). Contribution à la caractérisation de l'impact et de l'incidence du microclimat sur l'usage et les activités en espace extérieur.Cas de Blagnac.Thèse de doctorat.Ecole polytechnique de l'université de Nantes.France.

BOUTABBA S.D. (2007).Confort thermique urbain entre mesure et perception.Thèse de magistère. Département architecture.Université de Biskra.391p.

BOUYER J. (2009). Modélisation et simulation des microclimats urbains. Etude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments. Thèse de doctorat. École Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes.

BOWLER D.E. (2010). Urban greening to cool towns and cities : A systematic review of the empirical evidence. Landscape and Urban Planning, 97(3),pp. 147-155.

BRUNDI W. et al (1986). Untersushung des einflusses von bebanung und bewachs auf das klima und die lufthygienischen verhaltnisse in bayerischen grosstated stadklima bayern,lhrstuhl fur bioklimatologic und angewandte meteotologieb der Universitat Munchen (in German)

BRUSE M.and SKINNER C. J. (1999).Rooftop greening and local climate: a case study in Melbourne. In Proceedings of the 15th International Congress of Biometeorology & International Conference on Urban Climatology.

CAPDEROU M (1987). Atlas solaire de l'algérie. Office des publications universitaires.Alger.

CASTELTON H.F et al. (2010) Green roofs: building energy saving and the potential retrofit. Energy Building.45.pp 1582-1591.

CÉCILE M. (2013). Modélisation de la végétation urbaine et stratégies d'adaptation pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville. Thèse doctorat : Océan, Atmosphère et surfaces continentales. Institut National Polytechnique Toulouse,106 p.

CHEMERY L. (2006).Petit atlas des climats: Larousse.

CHEMERY L. et DUCHENE-MARULIAZ P. (1987). Atlas Climatique .Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), Février 1987, 182 p.

CHEN J. M. (2013). Effects of vegetation heterogeneity and surface topography on spatial scaling of net primary productivity. *Bio géosciences*, 4880 p.

CHENG V. E. NG. and GIVONI B. (2005). Effect of envelope colour and thermal mass on indoor temperatures in hot humid climate. *Solar Energy*. 78(4): p. 528-534.

CLERGEAU P. et BLANC.N. (2013)Trames vertes urbaines : de la recherche scientifique au projet urbain. Edition du moniteur. Paris. 339p.

COME D.G. et CORBINEAU F. (2006).Dictionnaire de la biologie des semences et des plantes. Edition TEC & DOC, Paris. P. 182.

CORDIER A. et al (1997) Morphologie, végétal et microclimat urbains : cas d'Aix en Provence et de Nîmes. Laboratoire A.R.T.O.P.O.S, Tome 1 : le contexte, analyse urbaine. Marseille ; Ecole d'Architecture de Marseille Luminy, 52 p.

CUNY M.A. (2014). Implantation de végétation en ville : quels sont les enjeux pour l'environnement, la santé et les pistes d'actions .Congrès Paysage Urbanisme et Santé. Rennes , 25 p.

DAJOZ R. (2006). Précis d'écologie.Paris.p.02.

DAMAGNEZ J. (1970). L'utilisation de l'énergie solaire dans les échanges énergétiques au niveau du couvert végétal. *Bulletin de la COMPLES* n° 18, pp 55-62.

DE LEMPS A.H. (1970). La végétation de la terre. Editions Masson et Cie, Paris. pp. 17-18.

DE MUNCK. (2013).Modélisation de la végétation urbaine et stratégie d'adaptation pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville. Thèse de doctorat. Institut national polytechnique de Toulouse. France.

DEPECKER P. (1985) Constitution et Modes de Transfert d'un Savoir Scientifique dans le Champs de l'Architecture : le Cas de la Thermique. Thèse de doctorat, INSA, Lyon. 411 p.

DIMOUDI A.and NIKOLOPOULO M. (2003). Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits. *Energy and buildings*. 35(1): p. 69-76.

DUCHAUFOUR P.et al. (2001) Introduction à la science du sol: sol,vegetation,environnement. Edition Dunod.Paris. p. 77.

DUNNET N. (2005) in Tobias Emilsson.Extensive vegetated roofs in Sweden establishment,development and environmental quality.Thèse de doctorat,Swedish University of Agricultural Sciences.p. 09.

DUNNETT N. and KINGSBURY N. (2008). Planting green roofs and living walls: Timber Press Portland, OR.

DURAND-DASTES F. (2000). Le concept d'événement spatial. In: *Espace géographique*, tome 29, n°3. pp. 200-217.

ESCOURROU G. (1981) Climat et environnement. Les facteurs locaux du climat. Coll. Géographie. In: Hommes et Terres du Nord, Géographie physique. p. 87.

EMMANUEL R. and KRUGER E. (2012). Urban heat island and its impact on climate change resilience in a shrinking city: The case of Glasgow, UK. *Building and Environment*, 53: p. 137-149.

EMILSSON T (2005). Extensive vegetated roofs in Sweden establishment development and environmental quality. Thèse de doctorat. Swedish university of agricultural sciences.

FANGER P O. (1972). Thermal comfort. MC Grow hill. New York.

FAURIE C. et al (2006). Ecologie: approche scientifique et pratique. 5^{ème} édition TEC & DOC Paris.

FURLANI A.P. (1996). Comment fleurir terrasse et balcons. Edition de Vecchi. Paris. p. 25.

GANDEMER J. and Guyot A. (1976) Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti. C.S.T.B. Science des bâtiments, Nantes.

GEORGET P. (1966). La floriculture. Editions Dunod, Paris. Pp. 260-261.

GRANT G. et al (2003). Green roofs: their existing status and potential for conserving biodiversity in urban areas » English Nature Report no. 498.

GRUN. W. (1977). La verdure sur les façades et les toitures. *Revue Techniques et Architecture*, n° 313 Jan-Fév. Edition Regirex. France.

GIRIDHARAN R. and KOLOKOTRONI M. (2009). Urban heat island characteristics in London during winter. *Solar Energy*. 83(9): p. 1668-1682.

GIVONI B. (1978). L'homme, l'Architecture et le Climat, Edition du Moniteur, Paris. Traduction de J. L. Izard, 460 p.

GIVONI B. 1989. Urban design in different climates. WCAP-10, WMO/TD-NO. 346.

GUYOT A. AUDURIER-CROS A. MAURIN D. GROGUHE M. (1985). Le végétal et

l'architecture. Rapport final de recherche, GROUPE ABC, Ecole d'Architecture de Marseille-Luminy ,148p.

GUYOT G. (1996). Climatologie de l'environnement, de la plante aux écosystèmes. Paris : Masson,505 p.

GUYOT G. (1997). Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing / Mesures physiques et signatures en télédétection. Proceedings of the 7th International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, Courchevel, France, 7-11 April.

HAMEL P., DAALY E. and FLETCHER T.D.(2013). Source-control stormwater management for mitigating the impacts of urbanisation on baseflow: A review. Journal of Hydrology, 485, pp. 201-211.

HANSON. RONALD L. (1991) Evapotranspiration and droughts.US Geological Survey Water-Supply Paper 2375,pp 99-104.

HOPPE P. (1999).The Physiological Equivalent Temperature an Universal Index for the Asserment in the Thermal Environment. Proceddings of the 15 International Congress of Biometeorlogy & International Conference of Urban Climatology . Macquarie University, Sydney, Austria, 6p, November 8-12.

HOUGHTEN F. C. and YAGLOU C.P. (1923).Determining Lines of Equal Comfort. AHSVE Transaction, Volume 29, p163.

HOYANO A. (1988) Climatological uses of plants for solar control and the effects on the thermal environment of a building. *Energy and Buildings* 11, Elsevier Sequoia, pp 181-199.

MORILLE B. (2014). Influence des dispositifs végétalisés sur la consommation énergétique des bâtiments à l'échelle du quartier . international conférence on countremeasures to Urban Heat Island-Venice. Nantes, 23 p.

IZARD J.L. (1997) Morphologie, végétal et microclimat urbain; cas d'Aix en Provence et Nimes. Tome 2 : Les mesures. Rapport Final de Recherche Programme Ecologie Urbaine, 110 p.

IZARD J. L. et DESTOBELEIRE G. (1998) Rôle de la végétation dans le microclimat urbain:utilisation de la thermographie.Actes EPIC 98 .2ème conférence européenne Performance énergétique et Qualité des Ambiances dans le Bâtiment ; Lyon 19-21 Novembre 19981 pp 749-755.

IZARD J. L. (2000). Le végétal urbain. Programme "SAGACITES" ; rapport interne, fevrier 2000. Laboratoire ABC, Ecole d'Architecture de Mareille.110 p.

IZARD J. L. et LEHTIHET K. (2001). Leaf Area Index Compilation et recueil de textes

et articles, laboratoire ABC. Ecole d'Architecture de Marseille, 110p.

JAFFAL L et al (2012) A comprehensive study of the impact of green roof on building energy performance. *Renewable energy*.43.pp 157-164.

JAN E. (1998). Leaf distribution in large trees and stands of the flood plain forest in southern Moravia. *Tree physiology*, 18, Heron publishing-Victoria, Canada , pp . 727-737.

JANCOVICI J M. (2003) Le réchauffement climatique. Que risquent les écosystèmes? Web site: [Http://www.manicore.com/contact.html](http://www.manicore.com/contact.html).

JAREGUI E. (1991) Influence of a large urban park on temperature and convective precipitation in a tropical city. *Energy and Buildings*, 15-16, pp. 457-463.

JONES et JONES. (2003) La physiologie végétale. Edition De Boeck, Bruxelles. P.452.

KAOULA D. and BOUCHAIR A. (2017). Evaluation of environmental impacts of hotel buildings having different envelopes using a life cycle analysis approach. *Indoor and Built Environment*: p. 1420326X16683235.

KOUZMINE Y. (2003). L'espace saharien algérien, dynamiques démographiques et migratoires », Laboratoire Théma -Université de Franche-Comté.

KJELGREN R K. et MONTAGUE T. (1998). Urban tree transpiration over turf and asphalt surfaces. *Atmospheric Environment*. Volume 32 N°1, Elsevier Science Ltd, pp. 35-41.

KJELGREN R .K. et CLARK J .R. (1994). Urban microclimates and growth of sweetgum street trees. *Arboricultural journal* , Volume 18, pp.401-417.

KJELGREN R. K. et CLARK J.R.(1993) Growth and water relations of liquidambar styraciflua .in an urban park and plaza. In *Structure and function trees, the center of urban horticulture*, University of Washington Seattle, USA, pp.401-417;

KLEINOD B. STRICKLER F. and CORDIER J. P. (2001). Végétalisation des toitures:[technique et réalisation]: E. Ulmer.

KOLOKOTSA D. PSOMAS A. and KARAPIDAKIS E. (2009). Urban heat island in southern Europe: The case study of Hania, Crete. *Solar Energy*. 83 (10): p. 1871-1883.

LAMBERTS R. (1988). Heat transfer through roofs of low cost Brazilian houses, University of Leeds.

LARCHER J.L. et GELDON.T (2000). Aménagement des espaces verts urbains et du paysage rural. Edition TEC & DOC. Paris. pp. 7-8.

LASSALE F. (2006). Végétalisation extensive des terrasses et toitures: guide technique: conception et mise en oeuvre, aspects réglementaires, données économiques, exigences et solutions: Edition Le Moniteur.

LEGET R.F. et CRAWFORD C.B. (1967). Arbres et immeubles. In Digest de la construction CBD 62, Canada.

LEHTIHET M. C. (2018). The Impact of Extensive Green Roofs on the Improvement of Thermal Performance for Urban Areas in Mediterranean Climate with Reference to the City of Jijel in Algeria. American Institute of Physics Conference Proceedings.1968.030063.

LEHTIHET M. C. (2007). Modification des microclimats des villes avec référence à la ville de Jijel. Mémoire de magistère. In Département d'architecture. Université de Jijel.138p.

LEHTIHET K. (2000). Comparative Microclimatic Analysis of in situ Measurement and images in Infrared Thermal Imaging of two Urban spaces of the Marseilles'City. The third symposium on the urban environment American Meteorological Society. Davis, California.14-18 August 2000, pp. 173-174.

LEHTIHET K. (2003). Analyse microclimatique d'espaces méditerranéens, cas de la ville de Marseille. Thèse de Doctorat. Laboratoire ABC. Ecole Polytechnique de Nantes. 281 p.

LIN B.and al. (2008). Numerical simulation studies of the different vegetation patterns' effects on outdoor pedestrian thermal comfort. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 96 (10): pp. 1707-1718.

MC PHERSON E. G. (1994) Cooling urban heat islands with sustainable landscapes. In The Ecological City, Preserving and Restoring Urban Biodiversity. University of Massachusetts Press, Boston, MA. pp. 151-171

MAYER H. et MATZARAKIS A. (1997) The urban heat island seen from the angle of human meteorology. Proceedings of International Symposium on monitoring and management of urban heat island. Fujisawa, pp. 84-95.

MILLER CHAGAS, P.P. (1980).Configurations urbaines : Apports énergétiques et microclimats. Etude des espaces extérieurs de 3 ensembles à Strasbourg .Association pour la recherche près l'Institut d'Architecture et d'Urbanisme de Strasbourg, 182 p.

MILLET J.R.SACRE C.GANDEMER et BARNAUD G. (1992).Guide sur la climatisation naturelle de l'habitat en climat tropical humide. Tome 1 : Méthodologie de

prise en compte des paramètres climatiques dans l'habitat et conseils pratiques. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment. Paris, 132p.

MONTERUSSO et al. (2007) Thermal performance of green roofs in cold climate. thèse de master en sciences. Queen's university Kingston, Ontario, Canada. P.28.

MUCCHIELLI A. (1996). Dictionnaire des méthodes qualitatives en sciences humaines et sociales. Paris : Armand Colin, 275p.

NASCIMENTO W.C. et SCHMID A.L. (PLEA 2008) From the modern toits jardins to the current green roofs a hit become classic. PLEA 25^{ième} conference. Dublin. 22-24 Octobre pp. 684.

NAYAK J. and al. (1982). The relative performance of different approaches to the passive cooling of roofs. *Building and Environment*. 17(2): p. 145-161.

NIACHOU A. and al. (2001). Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy and buildings*. 33(7): p. 719-729.

N H.WONG (2003). The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore. *Energy and Buildings*. 35. pp 353-364. OKE T.R. (1973) . City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* 7, pp.769-779.

NOILHAN J. (1980): A model for net all wave radiation flux at the surfaces of a building, *Building Environment*. 16, 259-266.

NOWAK D.J. GREENFIELD E.J. et al. Carbon storage and sequestration by trees in urban and community areas of the United States. *Environmental Pollution*, 2013. 178(0), p. 229-236.

OFFICE NATIONAL de la METEOROLOGIE. (2012). Données climatiques de Jijel: El Achouat. Jijel.

OKE T.R. (1989). The micrometeorology of the urban forest . *J. Phil R. Sec. Land*, B324, pp.335-349;

OULDBOUKHITINE.S.E et al (2001) Assessment of green roof thermal behaviour a couple heat and mass transfer model. *Building Environment*. 46- pp 2624-2631.

OSMUNDSO T. (2003) Human-Driven Extensive Green roof Design. Master of landscape architecture, Virginia Polytechnic Institute & State University, p.16.

PENICAUD H. (1978). Microclimats Urbains Etudiés sous l'Angle de Confort à l'Extérieur des Bâtiments. Plan de Construction, RAUC, Paris, pp.4-49.

PIDWIRNEY M. (2000). Fundamentals of Physical Geography: Introduction to Hydrology (Actual and Potential Evapotranspiration), Department of Geography, Okanagan University College.

PRIYADARSINI R. HIEN W.N. and WAI DAVID C.K. (2008). Microclimatic modeling of the urban thermal environment of Singapore to mitigate urban heat island. *Solar Energy*. 82(8): p. 727-745.

QUEZEL P. and MEDAIL F. (2003). *Ecologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen*.

SAITOH I. ISHIHARA O. et al (1990/1991) Study of the effect of green areas on the thermal environment in an urban area. *Energy and Buildings*, 15 /16, pp 493-490.

SHASHUA L. and HOFFMAN M.E. (2000) Geometry and orientation aspects in passive cooling of canyon streets with trees. In proceeding of PLEA 2000, Cambridge, up. Pp.483-488.

SEBTI M. ALKAMA D. and BOUCHAIR A. (2013). Assessment of the effect of modern transformation on the traditional settlement 'Ksar' of Ouargla in southern Algeria. *Frontiers of Architectural Research*. 2(3): p. 322-337.

SELTZER P. (1946) *Le climat de l'Algérie*. Institut de météorologie et de Physique du globe. Edition Typo litho et Carbonel.j. 219 p.

SILVA C. M. GOMES M. G. and SILVA M. (2016). Green roofs energy performance in Mediterranean climate. *Energy and buildings*. 116: p. 318-325.

SODHA M. and al. (1981). Experimental validation of thermal model of open roof pond. *Building and Environment*, 16(2): p. 93-98.

SODHA M. and al. (1980). Heating and cooling buildings by flow of water over the roof. *Applied Energy*. 7(1): p. 229-242.

TAFFE P. (1997). A Qualitative Response Model of Thermal Comfort . *Building and Environment* , Elsevier Science, Volume 32, N°2, pp.115-121.

TAHA H. (1997). Urban climates and heat islands : albedo, evapotranspiration and anthropogenic heat. *Energy and Buildings*, 25:99–103.

TAKAKURA T. KITADE S. and GOTO E. (2000). Cooling effect of greenery cover over a building. *Energy and buildings*. 31(1): p. 1-6.

THEODOSIOU G.T. (2003). Summer period analysis of the performance of plant roof

as a passive cooling technique. *Energy and Buildings*.35, pp. 909-919.

UPMANIS H. ELIASSON I.LINDQVIST S. (1998).The influence of green areas on nocturnal temperatures in a high latitude city (Goteborg, Sweden). *International Journal of climatology* , pp 81-700.

VERMA R. BANSAL N. and GARG H. (1986). The comparative performance of different approaches to passive cooling. *Building and Environment*. 21(2): p. 65-69.

VINET J. (2000). Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain, caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, 245 p.

VU T C. et al. (1998).Reduction in air conditioning energy caused by a nearby park, *Energy and Building*, 29, pp.457-463.

YAGHOUBI M. SABZEVARI A. (1991). IN ADDITION, GOLNESHAN A. Wind towers: measurement and performance. *Solar Energy*. 47(2): p. 97-106

WONG et al. (2003).Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. *Building and environment*, vol.38, pp. 261-270.

WONG N. H. and al. (2003).The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore. *Energy and buildings*. 35(4): p. 353-364.

تتنبأ المنحنيات المناخية بزيادة في الاحتماس الحراري العام. الزيادة المفاجئة في الظواهر المتطرفة كموجات الحر الشديدة يمكن أن يكون لها آثار بيولوجية صحية و اقتصادية خطيرة على مستوى المدن. غزو الاسمنت في المساحات الحضرية نجم عنه مشاكل مرتبطة بظاهرة البقعة الحضرية الحارة كارتفاع التلوث إلى ذروته و الاستهلاك المفرط للطاقة بسبب التكيف الذي يولد ارتفاعا في درجة حرارة الطرقات الذي يؤثر بشكل مباشر على المارة. يمكن للأسطح و الأسقف ذات الغطاء النباتي أن تكون تقنية مثلى من اجل الحد من تأثير البقعة الحضرية الحارة من حيث توفير الظل على الأسطح و حمايتها من أشعة الشمس المباشرة ،و الذي من شأنه أن يوفر تبريدا بالتبخر مقلصا بذلك الطلب على الطاقة.

الهدف الرئيسي من هذه الأطروحة هو توضيح اثر الأسطح ذات الغطاء النباتي الخفيف على تحسين المناخ المحلي للمدن على أساس مناخي بين المناطق المتوسطة و الجافة. من اجل دراسة هذه الظاهرة تم القيام في بادئ الأمر بإجراء تجربة مقارنة تمثلت في عمليات تسجيل قياسات موضعية تمت على وحدتين اختباريتين مصغرتين مزودتين بسطح من الخرسانة المسلحة. الأولى عارية أما الثانية عليها غطاء نباتي خفيف. توضح النتائج المحصل عليها انخفاضا في معدل حرارة الأسطح العليا للبنىات بنسبة 18% رافقها تحسن ملحوظ في الجو الداخلي بنسبة 11% و التي ارتفعت حتى 17% خلال ساعات اليوم الحارة. من اجل توسيع مجال البحث و ربط النتائج المحصل عليها على مستوى المدينة تمت إعادة نفس العملية باستعمال وسيلة المحاكاة الرقمية ECOTECT من جهة لمعرفة الفعالية الطاقوية و الجو الداخلي للبنىات. و من جهة أخرى ENVimet الذي يسمح بمحاكاة شروط الراحة على مستوى المناخ المحلي.

أكدت النتائج الرقمية المحصل عليها صحة الظواهر الملاحظة في التجربة و أثبتت أن السطح ذو الغطاء النباتي الخفيف وسيلة فعالة في توفير جو مريح من حيث الحرارة داخل المباني بفضل قدرتها على العزل، و تحسين المناخ المحلي عن طريق تغييرها لمعامل انعكاس الحرارة للمساحات الحضرية المبنية و عملية النتج التي يقوم بها النبات. هذا إضافة إلى إمكانية اقتصاد الطاقة بين تهيئتين مختلفتين لنفس المشروع.

كلمات مفتاحية: تغيرات مناخية، الفعالية الطاقوية، بقعة حضرية حارة، قياسات موضعية، محاكاة رقمية، سطح نباتي، غطاء نباتي خفيف.

ABSTRACT

Climatic projections foresee a global warming amplification. The upsurge of extreme weather events like heat waves can have severe ecologic, health and economic impacts on the scale of cities. The Cement invasion of urban zones replacing the vegetation and the wet areas with concrete and asphalt develops heat island effect related problems for instance pollution peaks and overconsumption of energy due to air conditioning, which increases roads' temperature for pedestrians. Terraces and vegetalised roofs can be an optimal technique to reduce the urban heat island effect, shading the roof by protecting it from direct sun light, increasing evaporation refreshing, thereby, reducing the energy demand.

The aim of this research work is to characterize the effects of an extensive vegetal covered terrace on improving microclimates in cities on a climatic basis comparing between Mediterranean climate and dry zones climate. In order to study this phenomenon, a comparative experiment was made, in which in situ measurements were recorded on experimental modules realized on human scale. The first one equipped with a naked reinforced concrete terrace, the second terrace is covered of extensive vegetation. The results shows an average mitigation of temperature on upper constructions surfaces on the order of 18% as well as a significant improvement of the comfortable inside temperature on the order of 11% reaching even 17% during the hottest times of the day. In order to extend the field of investigation and correlate the obtained results, the same scenario was recreated using numerical simulation method, ECOTECT on the one hand for the energetic performance and the inside comfort of constructions and ENVI met for the simulation of comfort conditions in microclimates on the other hand.

The digital results have confirmed the observed phenomena on the experiment and upholds that the extensive vegetal covered roof represents an efficient way to enhance the conditions of thermal comfort of buildings with its insulation capacity, and the improvement of local microclimate conditions with the albedo modification of urban surfaces and the vegetation evapotranspiration, in addition to a potential economy of energy between two different plan layouts of a single project.

Keywords: Climate changes, energetic efficiency, urban heat island, in situ measurements, digital simulation, vegetal roofs, extensive vegetation.