

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR & DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE**

Université Mentouri de Constantine

Faculté des sciences de la terre, de géographie et de l'aménagement du territoire

Département d'Architecture et d'Urbanisme

N° d'ordre :

Série :

MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Magistère

Option : Architecture Bioclimatique

THEME

**EVALUATION DE L'EFFICACITE DE RAFRAÎCHISSEMENT PASSIF
D'UNE TOITURE VEGETALE SOUS UN CLIMAT SEMI- ARIDE**

« Cas d'une terrasse à végétation extensive à Constantine »

Présenté par :

M^{elle} ABDERREZAK ADJIEL

Sous la direction de : **D^r ABDOU SALIHA**

Soutenu le :

Jury d'examen :

Président : Professeur BOURBIA FATIHA

Examineur : Docteur BOUCHAHM YASMINA

Examineur : Docteur ROUAG SAFFIEDDINE DJAMILA

Rapporteur : Docteur ABDOU SALIHA

_____ Constantine 2010 _____

Remerciements

J'adresse mes sincères remerciements à Docteur *Abdou Saliha* pour avoir dirigé ce travail, pour son soutien, ses encouragements et conseils pertinents. Ce fût un honneur et une immense joie d'avoir été encadré par elle.

Il m'est agréable de remercier Professeur *Fatiha Bourbia* mais aussi, Docteur *Yasmina Bouchahm* et Docteur *Djamila Saffiedine* pour avoir accepté d'examiner ce modeste travail et pour leurs encouragements lors de son élaboration.

Je remercie aussi Mme *Nini*, pour son soutien. Mais également tous ceux qui m'ont aidé d'une manière ou d'une autre, de par leurs judicieux conseils ou par la documentation ou les données qu'on a mis à ma disposition. Je cite :

- Mr *A.Sakhri* Directeur de la Société de Distribution d'Electricité et du Gaz de L'Est, ainsi que melle *Mahaya Amina*.
- Mr *Reziouk Nacim* représentant de la société SOPREMA- Algérie à Constantine.
- Mr *Boucharf Djamel* responsable du Service Météo d'Alger.

Je ne pourrai oublier tous mes amis et mes collègues de la post graduation 2003, 2005 dont l'aide généreuse de par la documentation ou des appareils de mesures m'a été précieuse. Mais aussi, tous les membres de ma famille qui m'ont soutenu et encouragé.

J'exprime mon entière gratitude à mes parents, ma sœur et mes frères pour leur patience, leur encouragement et leur précieuse aide lors de la réalisation de la toiture végétalisée.

*A mes chers parents, ma
sœur et mes frères.*

Résumé :

L'étalement urbain incontrôlé aux détriments des surfaces végétales ainsi que les constructions inadaptées aux lieux et aux climats ont contribué aux bouleversements climatiques actuels, à cause de la surconsommation d'énergie pour le chauffage et la climatisation. Pour cela, repenser l'urbanisme, l'architecture et les réglementations thermiques des bâtiments est devenu la devise à adopter, basée principalement sur la création de microclimat dans l'environnement immédiat des constructions. Sachant que c'est en saison estivale que le manque de sources évaporatives est le plus ressenti dans les centres urbains, mais aussi à l'intérieur des bâtiments, surtout dans les pays à climat chaud.

La végétalisation des toits constitue une substitution aux espaces verts au sol sacrifiés pour l'urbanisation, puisqu'elles permettent la restitution des surfaces végétales sur les toits, la création de microclimats et d'innombrables autres avantages ; d'ordre environnemental, écologique, économique, social et autres... Toutefois, c'est son rôle de rafraîchissement passif des bâtiments qui est le plus prisé dans la plupart des pays développés depuis quelques années. Et ce, dans le but de diminuer le recours systématique aux climatiseurs et de réduire les gaz à effet de serre et l'îlot de chaleur urbain.

En effet, la végétalisation des toits (toits jardins) est une technique ancienne très répandue dans les pays nordique ou les pays chauds comme régulateur thermique. Elle fût modernisée sous le volet du développement durable en système extensif peu coûteux et efficace. Le principal objectif à travers cette recherche est donc, de vérifier la capacité de rafraîchissement passif des bâtiments et d'évaluer le confort thermique engendré par ce système léger sous le climat semi-aride de Constantine. Pour ce faire, une toiture à végétation extensive expérimentale fût installée sur la terrasse accessible d'une habitation individuelle. Elle est constituée de 6cm de terre végétale et plantée de diverses espèces résistantes à la sécheresse de type CAM (*Crassulacean Acid Metabolism*) et d'autres plantes vivaces succulentes. Des mesures In situ de températures de l'air, températures surfaciques et humidités relatives sont effectuées. Les résultats de cette investigation attestent de la capacité de rafraîchissement passif des toits végétaux et de l'importance de la protection des surfaces des toits des radiations solaires intenses en été sous le climat semi aride. Ce rafraîchissement est induit par l'ombrage, l'évapotranspiration de la végétation mais aussi à la masse thermique du substrat.

Mots clés : Toiture végétale extensive, rafraîchissement passif, confort thermique intérieur, végétation crassulacée et succulente, climat semi aride.

SOMMAIRE

Tables des matières-----	I
Liste de figures-----	VII
Liste des tableaux-----	X
Liste des photos-----	XI

Introduction générale:

Introduction : -----	1
Problématique et hypothèses : -----	4
Méthodologie d'investigation : -----	6

Chapitre I. Stratégie de rafraîchissement passif par le végétal.

Introduction : -----	8
I. Contribution de l'étalement urbain et de l'habitat au réchauffement de la planète :-----	8
1. Manifestation du réchauffement climatique dans les centres urbains :-----	8
1.1. Qu'est ce qui cause l'îlot de chaleur urbain ?-----	10
2. La consommation énergétique du secteur du bâtiment en Algérie:-----	12
3. Consommation d'électricité des abonnés ordinaires (Commune de Constantine) :-----	14
II. Le rafraîchissement passif des bâtiments : Intégration du végétal sur, et autour du bâtiment :16	
1. Incitation au rafraîchissement passif par la réglementation thermique:-----	16
2. Contribution de l'architecture et le végétal au rafraîchissement passif :-----	19
2.1. L'architecture bioclimatique :-----	19
2.2. Le végétal et l'architecture :-----	21
2.3. Intégration du végétal dans l'espace bâti :-----	22
2.4. Statut des espaces à végétaliser attenants ou, sur les bâtiments :-----	24
3. Stratégies de rafraîchissement passif des bâtiments en intégrant la végétation :-----	25
3.1. Rafraîchissement par la végétalisation des espaces au contact des bâtiments :-----	26
3.2. Formes de végétalisation des espaces au contact et sur les bâtiments :-----	27
3.2.1. Végétalisation des transitions rue- bâtiment : -----	28
3.2.2. Végétalisation des cours et patios :-----	30
3.2.3. Création de plafonds végétaux : tonnelle, pergola, auvent :-----	31
3.2.4. Le verdissement des fenêtres :-----	32
3.2.5. La végétalisation des murs :-----	32
3.2.6. Plantation sur balcon et terrasse :-----	33

3.2.7.Les toits végétaux : -----	34
3.2.7.1.Définition du toit : -----	34
3.2.7.2.Classification des toits : -----	35
3.2.7.3.Incitations à la végétalisation des toits dans les centres urbains:-----	35
Conclusion :-----	40

Chapitre II. Les toits végétaux 1 : caractéristiques et composantes.

Introduction : -----	41
I.Les concepts de végétalisation des toits : -----	41
1.Définition du toit végétal : -----	41
2.Les différents procédés de végétalisation des toits : -----	42
2.1La végétalisation intensive :-----	42
2.2 La végétalisation extensive :-----	43
2.3 La végétalisation semi- intensive :-----	44
3. Historique sur l'apparition des toits végétaux et leur développement :-----	44
II.Les composants types des toits végétaux et leurs caractéristiques :-----	48
1. Le complexe étanchéité- isolation :-----	49
1.1L'isolation :-----	49
1.2L'étanchéité :-----	50
2. Complexe de culture :-----	50
2.1 Couche de drainage :-----	52
2.2Couche filtrante :-----	53
2.3 Substrat de culture :-----	54
2.3.1 Les propriétés physiques de la couche de culture (substrat) :-----	55
2.3.2 Les phénomènes physiques dans le sol :-----	55
2.3.2.1 L'aération du sol et la respiration des racines :-----	55
2.3.2.2Rétention de l'eau dans le sol :-----	56
2.3.3 Procédé de mise en œuvre du substrat :-----	57
3. Couche végétale :-----	58
3.1.Critères de choix des végétaux :-----	58
3.2.Critères de choix des végétaux pour les systèmes de végétalisation extensifs :-----	59
3.3.Les espèces recommandées pour la végétalisation extensive des toits:-----	60
3.4.Les espèces recommandées pour les climats chauds :-----	62
3.5.Capacité d'adaptation de la végétation aux différents stress :-----	64

3.5.1 La transpiration en situation normale :-----	65
3.5.2 Stress au déficit hydrique (sécheresse):-----	66
3.5.3 Stress thermique : Résistance aux températures élevées-----	68
3.6. Modes de mise en œuvre de la végétation sur les toits:-----	70
3.6.1 Le semis et le bouturage:-----	70
3.6.2 La plantation :-----	70
3.6.3 Les éléments prévégétalisés :-----	71
3.7. Les différents aspects des toitures à végétation extensive :-----	73
Conclusion :-----	76

Chapitre III. Les toits végétaux 2 : Contraintes de conception et dispositifs spécifiques

Introduction :-----	77
I. Les contraintes de conception des toits végétaux :-----	77
1. Les contraintes liées aux caractéristiques architecturales :-----	78
2. Les contraintes liées aux caractéristiques techniques du bâtiment :-----	79
2.1. L'élément porteur :-----	79
2.2. Les charges sur le toit :-----	80
2.3. La pente du toit :-----	82
3. Les contraintes climatiques :-----	83
3.1. Effets des paramètres climatiques :-----	83
3.1.1. L'exposition aux radiations solaires :-----	84
3.1.2. L'exposition aux vents dominants :-----	85
3.1.3. Les températures :-----	85
3.2. Les caractéristiques des différentes expositions des terrasses :-----	86
3.2.1. Exposition au sud :-----	86
3.2.2. Exposition à l'est :-----	87
3.2.3. Exposition à l'ouest :-----	87
3.2.4. Exposition au nord :-----	87
4. Les contraintes d'entretien :-----	88
5. Les contraintes d'arrosage :-----	89
II. Dispositifs spécifiques et avantages des toits végétaux :-----	91
1. Les documents graphiques des toits végétaux :-----	91
2. Aménagement des zones stériles :-----	92
3. Les dispositifs de séparation :-----	93

4. Les chemins de circulation :-----	94
5. L'évacuation des eaux pluviales :-----	94
6.-Les documents réglementaires régissant la conception des toits végétaux : -----	95
6.1.En Allemagne :-----	95
6.2.En France :-----	96
6.3.En Algérie : -----	97
7.Avantages des toits végétaux : -----	97
7.1.Avantages écologiques et environnementaux : -----	98
7.2.Avantages urbanistiques et sociaux : -----	101
7.3.Le confort dans le bâtiment et l'économie d'énergie : -----	103
7.4.Avantages économiques : -----	104
Conclusion :-----	106

Chapitre IV. Les toits végétaux : Une alternative au rafraîchissement passif des bâtiments

Introduction : -----	107
I.Impact des toits végétaux sur le rafraîchissement intérieur : -----	107
1.Impact sur les températures de l'air intérieur : -----	109
2.Impact sur les températures surfaciques de la toiture :-----	113
3.Impact sur l'amplitude des températures surfaciques:-----	116
4.Impact sur le flux de chaleur : -----	118
II.Les paramètres influents sur l'efficacité thermique de la toiture végétale :. -----	120
1.Les paramètres climatiques : -----	120
1.1Type de climat : -----	121
1.2.L'humidité relative : -----	122
1.3.La vitesse du vent :-----	123
1.4.Les radiations solaires : -----	124
2. Impact des composantes de la toiture végétale et leurs caractéristiques sur le rafraîchissement intérieur : -----	126
2.1L'isolation de la toiture:-----	126
2.2Les caractéristiques du substrat : -----	128
2.2.1 L'épaisseur du substrat :-----	129
2.2.2 La teneur en eau du substrat :-----	130
2.2.3 Albédo du substrat et sa couleur :-----	131
2.3Les caractéristiques de la végétation :-----	132
2.3.1 Le pourcentage de couverture foliaire :-----	133

2.3.2 L'épaisseur de la couverture foliaire et épaisseur des feuilles:-----	135
Conclusion : .-----	136

Chapitre V. Présentation du cas d'étude

Introduction : -----	138
1.Choix du procédé de végétalisation étudié : -----	138
2.Analyse climatique et bioclimatique de la ville de Constantine :-----	139
2.1.Analyse climatique : -----	139
2.2.Analyse bioclimatique de la ville de Constantine: -----	142
3. Choix de la méthode d'investigation : -----	143
4.Choix du site d'investigation : -----	145
5.Présentation du site d'investigation : -----	146
6.Les caractéristiques de la toiture terrasse et les contraintes régissant sa végétalisation : ----	149
7.Choix de l'emplacement de la toiture végétale : -----	151
8.Choix des matériaux et de la procédure de construction de la toiture végétale : -----	152
9.Le choix des composantes de la couche de culture :-----	155
10. Le choix des espèces végétales : -----	157
10.1 Le mode de mise en œuvre de la végétation : -----	158
11. Le choix des stations de mesure : -----	162
12. Le choix de la période de mesure :-----	165
13. L'instrumentation utilisée :-----	165
14. Présentation des scénarios : -----	166

Chapitre VI. Interprétation des résultats

Introduction :-----	168
I. Evaluation de la performance thermique du toit végétal à l'extérieur du bâtiment : -----	168
1.Etude de la température, l'humidité relative et de la vitesse du vent à l'extérieur :-----	168
2.Etude des paramètres influents sur les températures surfaciques externes de la dalle:-----	172
2.1 Etude de la variation des températures externes de la dalle (22 au 25 juillet) : -----	172
2.2 Impact de la densité foliaire sur les températures externes de la dalle :-----	175
3. Etude des températures internes et externes du substrat : -----	177
3.1 Etude des températures du substrat et leur impact sur la surface de la dalle:-----	177
3.2 Analyse des amplitudes thermiques du substrat :-----	180
4. Evaluation de l'efficacité des typologies végétales et leur densité : -----	181
4.1 Effet sur les températures surfacique externes du substrat : -----	181

4.2 Effet de la végétation sur le rafraîchissement de l'air et sur l'ombrage : -----	183
4.3 Effet des typologies végétales sur les humidités relatives au dessus du toit: -----	186
II. Stratification des températures et des humidités relatives de l'air de l'extérieur vers l'intérieur :-----	188
1. Stratification des températures : -----	188
2. Stratification des humidités relatives de l'air: -----	193
III. Analyse de la performance thermique du toit végétal à l'intérieur du bâtiment : -----	196
1. Analyse des températures de l'air intérieur pour des journées estivales types :-----	196
2. Analyse de la performance thermique du toit végétal durant le mois de juillet : -----	200
2.1 Impact du toit végétal sur les températures intérieures :-----	200
2.2 Impact du toit végétal sur l'humidité relative de l'air intérieur:-----	205
2.3 Analyse de l'écart entre les températures de l'air intérieur et extérieur (ti- te) : -----	206
3. Etude des paramètres influents sur le rafraîchissement intérieur :-----	208
3.1. Impact des températures de l'air extérieur sur le rafraîchissement intérieur : -----	208
3.2. Impact de la teneur en eau du substrat et son épaisseur : -----	211
3.3. Impact de la ventilation sur le rafraîchissement intérieur : -----	213
4. Evaluation du confort thermique intérieur dans les deux chambres : -----	214
4.1 Comparaison des températures par rapport aux plages de confort : -----	214
4.2 Représentation des résultats sur le diagramme de St Szockolay :-----	217
Conclusion :-----	219
Conclusion générale :-----	222
Propositions:-----	225
Pistes de recherches : -----	227
Bibliographie-----	229
Annexes-----	239
Résumés-----	264

Liste des figures :

Figure I- 1 . Structure de l'atmosphère au dessus de la ville d'après T.R.Oke (1973) -----	10
Figure I- 2 . Consommation finale d'énergie par secteur en Algérie en 2006 -----	13
Figure I- 3. Consommation d'électricité des abonnés ordinaires dans la commune de Constantine -----	14
Figure I- 4. Consommation d'électricité mensuelle moyenne par abonné ordinaire (2009-commune de Constantine)-----	15
Figure I- 5 . Mur et toit végétal, Station de métro Flon (Lausanne, Suisse)-----	20
Figure I- 6 . A gauche structure en saule. A droite, végétalisation en lierre après une année (Allemagne, 2004-2005)-----	22
Figure I- 7. Divers aménagements complémentaires aux espaces verts collectifs-----	25
Figure I- 8. Transitions rue- bâtiment ; Quartier Vauban, Fribourg en Brisgau -----	28
Figure I- 9. Plantation dans la ruelle du Mile End à Montréal- Canada-----	29
Figure I- 10. A gauche : Pavé engazonné. A droite : Escalier verdi -----	29
Figure I- 11. Variations des paramètres décrivant les facteurs d'ambiances dans une cour -----	30
Figure I- 12. Pergolas recouvertes de végétation grimpante sur des terrasses -----	31
Figure I- 13. Verdissement des bords de fenêtres par des Geranium et autres plantes-----	32
Figure I- 14. Façade recouverte d'un mur végétal.-----	33

Figure II- 1. Types de toits végétaux-----	43
Figure II- 2. Jardins suspendus de Babylone-----	45
Figure II- 3. Illustration type du chalet norvégien.-----	46
Figure II- 4. Les composantes types des toits végétaux -----	49
Figure II- 5. Les principales configurations utilisées en végétalisation extensive de toiture-----	51
Figure II- 6. drainage d'agrégat minéral (Source : www.vegetalid.com) -----	53
Figure II- 7. drainage en gravillons -----	53
Figure II- 8. Drainage en polystyrène expansé recouvert du filtre-----	53
Figure II- 9. Bacs pré-cultivé à réserve d'eau-----	53
Figure II- 10. Les trois états de l'eau dans le sol -----	57
Figure II- 11. A gauche : Soufflage du substrat à l'état meuble. A Droite : Répartition manuelle du substrat meuble-----	58
Figure II- 12. Iris pumila sur toiture végétalisée -----	62
Figure II- 13. Feuilles de laurier rose avec des stomates protégés par des poils (Nerium oleander) -----	67
Figure II- 14. Adaptation à la sécheresse des plantes CAM. (Exp. Sedum, cactus, anans...)-----	68
Figure II- 15. Poils glandulaires, à la surface d'une feuille de Lavande-----	69
Figure II- 16. Micro- motte de Sedum album (Coral carpet) -----	71
Figure II- 17. Rouleaux pré-végétalisés-----	72
Figure II- 18. Système modulaire en plateau (Green Grid System)-----	72
Figure II- 19 . Tapis pré-végétalisés (ELT System).-----	72
Figure II- 20. Bacs pré-végétalisés à réserve d'eau sur toit plat ou en pente -----	72
Figure II- 21. différents aspects des toits végétaux selon le choix de végétaux.-----	74
Figure II- 22 . Evolution de l'aspect dans le temps et à travers les saisons (variétés de sedums) :--	74

Figure III- 1. Terrasse délimitée par deux murs et aménagée en jardin avec des plates bandes plantées-----	79
--	----

Figure III- 2. Différentes configurations d'un toit végétal -----	79
Figure III-3. Système de retenue GEORASTER d'Ecovegetal pour pente moyenne à forte (jusqu'à 60%) -----	83
Figure III- 4. Plate bande installée à l'ombre sur une terrasse- patio en ville. -----	84
Figure III-5. Systèmes d'arrosage au «goutte à goutte» intégré dans le complexe de culture.----	91
Figure III- 6. Exemple de plan de plantation d'une toiture végétalisée semi- intensive. -----	92
Figure III- 7. Aménagement de la zone stérile recouverte de gravillons -----	93
Figure III- 8. Dispositif de séparation par bande métallique-----	94
Figure III- 9. Zone stérile autour d'une entrée d'évacuation des eaux pluviales-----	95
Figure III- 10 . Amélioration du microclimat par la toiture végétalisée.. -----	99
Figure III- 11. Comparaison de la gestion de l'eau par un toit non végétalisé et un toit végétalisée -----	100
Figure III-12.Propositions d'immeubles d'habitations avec terrasses plantées par Josef Hoffmann. -----	101
Figure III- 13. Végétalisation extensive de la terrasse inaccessible d'une crèche (à La Réunion) --	102
Figure III- 14. Demande énergétique due aux échanges thermiques à travers deux toits-----	104

Figure IV- 1. Températures de l'air intérieur des bâtiments avec et sans toit végétal.-----	111
Figure IV- 2. Variations des températures de l'air intérieur (résultats de la simulations)-----	112
Figure IV- 3. Comparaison entre la température surfacique du support du toit pour le (cas A) et (Cas B). Graphe (a) journée à ciel clair. Graphe (b) journée à ciel couvert. -----	115
Figure IV- 4. Profil des températures de l'air et températures surfaciques intérieures des toits avec dalle en béton (toit de référence et toit végétalisé) -----	116
Figure IV- 5. Profil des températures surfaciques extérieures maximales et minimales des surfaces externes des toits du campus. A gauche le toit végétal, à droite le toit de référence ---	117
Figure IV- 6. Les amplitudes thermiques diurnes moyennes ; des températures de l'air (T_A), des températures surfaciques externes du toit de référence (T_R) et du toit végétal (T_G).-----	118
Figure IV- 7. Flux de chaleur à travers les toit végétal (à droite) et le toit de référence (à gauche) suivant les différente stations. .-----	119
Figure IV- 8. Flux de chaleur total à travers le toit du (Cas A) et (Cas B) : graphe (a) journée à ciel clair; graphe (b) journée à ciel couvert. -----	120
Figure IV- 9. La réduction des températures surfaciques extérieures du toit végétal, pour les 9 climats.-----	122
Figure IV- 10. Analyse de la corrélation existant entre la température de l'air dans la couche de végétation et les radiations solaires (le matin et l'après midi) pour différents indices de couverture foliaire. .-----	126
Figure IV- 11. Flux de chaleur total diurne à travers le toit végétal pour différentes épaisseur d'isolation (Polystyrène) .-----	127
Figure IV- 12. flux de chaleur selon différentes épaisseurs de substrat. .-----	130
Figure IV- 13. Le flux de chaleur à travers le toit végétalisé selon la teneur en eau du substrat. ---	131
Figure IV- 14. le calcul moyen de l'indice de couverture foliaire du Soja. -----	133
Figure IV- 15. Flux de chaleur total diurne à travers le toit végétalisé pour différents indice de couverture foliaire (LAI) en Grèce.-----	134

Figure V -1 . Situation de la ville de Constantine-----	140

Figure V- 2. Localisation du site d'investigation (Ech. : 1/2000)-----	146
Figure V- 3. Orientation de l'habitation testée-----	146
Figure V- 4. Plans et coupes du 2 ^{ème} étage et de la terrasse (Ech: 1/200)-----	148
Figure V- 5. Projection stéréographique des masques d'ombres sur la dalle recouvrant la chambre 1 et la chambre 2.-----	152
Figure V- 6. Implantation de la toiture végétale sur la terrasse (ECH : 1/200)-----	152
Figure V- 7. Coupe schématique sur le plancher de référence et la toiture végétale-----	155
Figure V- 8. Plan de plantation et espèces végétales choisies -----	160
Figure V-9. Représentation des points de mesures stratifiés dans les espaces testés et leurs caractéristiques -----	163
Figure V- 10. Eplacement des stations de mesure sur la terrasse et à l'intérieur des chambres.-	164

Figure VI- 1. Température de l'air, humidité relative et vitesse du vent, mesurées à 1m des deux toits: -----	169
Figure VI- 2. Variation quotidienne des températures surfaciques externes du toit végétal (V1) et du toit de référence (V2) (du 22 au 25 juillet)-----	173
Figure VI- 3. Températures surfaciques maximales et minimales des toits de la chambre 01 (S1) et la chambre 02 (V1)-----	173
Figure VI- 4. Amplitudes thermiques des surfaces externes des toits des chambre 01 (S1) et 02 (V1) (du 22 au 25 juillet)-----	173
Figure VI- 5. Variation des températures surfaciques externes de la dalle sous diverses densités foliaires (le 23 juillet)-----	176
Figure VI- 6. Variation des températures surfaciques du substrat et températures externes des toits testés (le 23 juillet)-----	178
Figure VI- 7. Amplitude thermiques des surfaces du substrat et des surfaces externes des toits testés (le 23 juillet).....	181
Figure VI- 8. Variation des températures surfaciques du substrat sous diverses densités foliaires--	182
Figure VI- 9. Variation des températures à 1m du toit végétal, au contact du feuillage et la surface externe du substrat pour diverse densité foliaire -----	184
Figure VI- 10. Variation des taux d'humidité relative au contact du feuillage pour diverses espèces végétales-----	187
Figure VI- 11. Stratification des températures de l'air et des températures surfaciques moyennes à l'intérieur et l'extérieur des deux chambres testées (du 22-25 juillet)-----	189
Figure VI- 12. Stratification des humidités relatives moyennes à l'intérieur et l'extérieur des deux chambres testées (du 22-25 juillet)-----	194
Figure VI- 13. Variation des températures de l'air intérieur des chambres 01 et 02 (juin)-----	197
Figure VI- 14. Ecart des températures de l'air entre la chambre 01 et 02 (juin)-----	197
Figure VI- 15. Variation des températures de l'air intérieur des chambres 01 et 02 pour une journée type de juillet (le 23 juil.)-----	199
Figure VI- 16. Ecart des températures de l'air entre la chambre 01 et 02 (le 23 juillet)-----	199
Figure VI- 17. Comparaison des températures moyennes de l'air intérieur et des surfaces internes et externes des toits des chambres 01 et 02 (du 22 au 25 juillet)-----	201
Figure VI- 18. Ecart des températures moyennes de l'air intérieur entre la chambre 01 et 02 (du 22 au 25 juillet)-----	201

Figure VI- 19. Différence de température moyenne entre la surface externe et interne des deux toit testés ($T_{\text{surf. int}} - T_{\text{surf. ext}}$) (du 22 au 25 juillet)-----	201
Figure VI- 20. Différence entre les températures moyennes de l'air intérieur et des surfaces externes des toits (du 22 au 25 juillet)-----	202
Figure VI- 21. Ecart des températures surfaciques moyennes des deux chambres (du 22 au 25 juillet)-----	204
Figure VI- 22. Moyenne des taux d'humidités relatives dans les deux chambres (du 22-25 juillet)-----	205
Figure VI- 23. Ecart journalier (a) et écart horaire moyen (b) entre les températures de l'air extérieur et intérieur (ti- te) (du 22 au 27 juillet) -----	206
Figure VI- 24. Variation des températures de l'air intérieur du 22- 27 juillet dans les deux chambres -----	209
Figure VI- 25. Ecart de températures de l'air entre les deux chambres (du 22 -27 juillet)-----	209
Figure VI-26. Comparaison des températures de l'air intérieur des deux chambres avec les limites de confort (Humphrey) (journée type de juin)-----	215
Figure VI-27. Comparaison des températures de l'air intérieur des deux chambres avec les limites de confort (Humphrey) (moyenne du 22 au 27 juillet)-----	216
Figure VI- 28. Comparaison des températures de l'air intérieur des deux chambres avec les limites de confort (Humphrey) pour des journées fraîches (moyenne du 26 au 27 juillet)-----	217
Figure VI- 29. Représentation sur le diagramme de Szockolay des températures de l'air moyennes des deux chambres pour des journées caniculaires (du 22 au 23 juillet)-----	218
Figure VI- 30. Représentation sur le diagramme de Szockolay des températures de l'air moyennes des deux chambres pour des journées fraîches (du 24 au 25 juillet)-----	218
Figure VI- 31. Représentation sur le diagramme de Szockolay des températures de l'air moyennes des deux chambres pour des journées fraîches (du 26 au 27 juillet) -----	218

Liste des tableaux :

Tableau II- 1. Les plages d'épaisseur du substrat de culture-----	55
Tableau II-2. Caractéristiques des variétés de Sedums les plus utilisés en végétalisation des toitures -----	61
Tableau II- 3. Types d'associations des végétaux et l'épaisseur du substrat correspondante ----	63
Tableau II- 4. Période de mise en œuvre et taux de couverture de la végétation-----	73

Tableau III- 1. Surcharges des différentes formes de végétalisations des toits -----	81
Tableau III- 2. Entretien et arrosage des systèmes de végétalisation-----	88

Tableau IV- 1. Résultats des températures de l'air dans le bâtiments avec et sans toit végétal durant la période sans conditionnement de l'air -----	111

Tableau V- 1. Récapitulatif des caractéristiques des espaces testés-----	148
Tableau V- 2. Avantages et inconvénients caractérisant les espèces végétales choisies -----	158
Tableau V- 3. Présentation de l'appareillage de mesure utilisé pour cette investigation-----	166

Tableau VI- 1. Les températures surfaciques moyennes du substrat pour (du 22 au 25 juillet). 180

Liste des photos :

Photos II- 1. Evolution à travers les saisons de la couverture foliaire de la toiture du CNFPH---75

Photo V-1. Vue aérienne du site d'investigation-----145

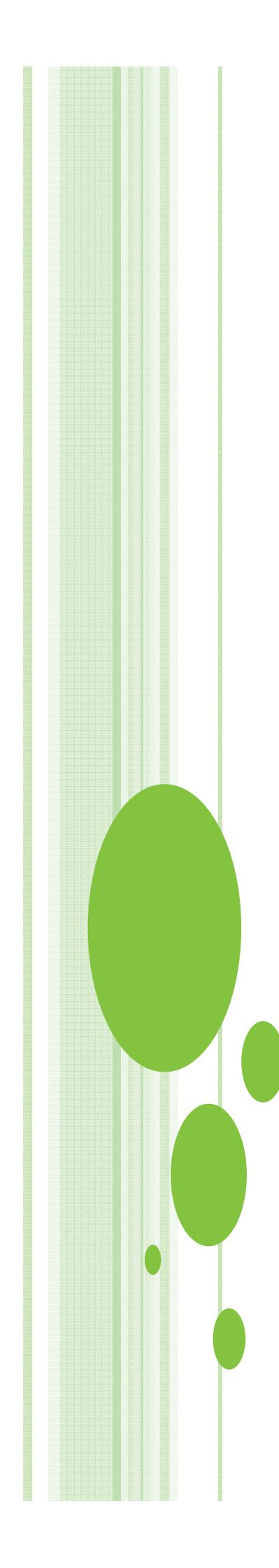
Photo V-2. A gauche : Façade principale (Sud- Ouest). A droite : Façade postérieure (Nord- Est)-
-----146

Photo V- 3. Les matériaux utilisés et les étapes de la construction de la toiture végétale-----154

Photo V- 4. Aspet de la toiture végétale après installation (fin mars 2010) -----161

Photo V- 5. Aspet de la toiture végétale en juillet 2010 -----161

Photo V- 6. Aspect de la toiture végétale en novembre 2010 -----161

The left side of the page features a decorative vertical bar composed of several overlapping elements: a thin green line, a wider green bar with a fine grid pattern, and a semi-transparent green bar with horizontal lines. To the right of these bars are five solid green ovals of varying sizes and orientations, arranged in a vertical cluster.

Introduction générale

Introduction :

Autrefois, nos ancêtres démunis de moyens technologiques développés pour se rafraîchir en été, ont appris à puiser de la nature les ressources leur permettant de créer des intérieurs confortables et sains. Il semble que l'omniprésence de l'élément végétal autour et à l'intérieur des constructions dépassait l'intérêt esthétique ou ornemental. Elle constitue plutôt une solution bioclimatique, efficace pour défier l'aridité du climat et adoucir l'air à l'extérieur et à l'intérieur des bâtiments.

Le constat effectué à nos jours révèle que nos demeures souffrent de surchauffes incontournables en été, pouvant même se révéler mortelle. L'élite scientifique s'accorde à attribuer la responsabilité de l'inconfort ressenti en période estivale à deux éléments principaux ; l'architecture inadaptée aux lieux et aux climats et le manque d'espaces verts.

En effet, les étendues de verdure considérées comme régulateur thermique, grâce à l'ombrage et l'évapotranspiration qu'elles procurent sont réduites et/ou carrément inexistantes dans certaines villes. Richard Rogers¹ considère que c'est notre trafic et notre avidité personnelle qui ont contribué au rétrécissement de cet espace. Sachant que les pays à climat chaud souffrent encore plus de ce manque de verdure. En Algérie, toutes les villes enregistrent un déficit flagrant d'espaces verts et l'exemple de Constantine est représentatif. Avec son climat semi aride, la ville a une couverture végétale ne représentant que 7.5% de la surface totale de la wilaya, avec un Ratio total de seulement 1.12m²/personne. Ce dernier est parfois nul dans certains quartiers, et le plus élevé n'est que de 2.93m²/personne (quartier Sidi Mabrouk)². Comparé à Dubaï, ville désertique, qui a un ratio total de 4.47m²/personne³, l'Algérie en est encore loin pour pouvoir créer des microclimats agréables dans les centres urbains déjà denses et rafraîchir passivement les intérieurs.

D'autre part, l'avènement de l'architecture internationale et l'urgence de loger des milliers de personnes dans les plus brefs délais ont favorisé la généralisation d'une architecture qui fait abstraction des paramètres climatiques, à l'encontre de la façon de bâtir de nos ancêtres. Le patrimoine bâti a montré donc sa défaillance surtout en régions chaudes. Comme solution, les habitants des centres urbains livrés à eux-mêmes dans des appartements non seulement exigus mais aussi générant un inconfort thermique continu été comme hiver, trouvent rapidement une

¹ **Richard Rogers**, « *Des villes pour une petite planète* », éd. Le Moniteur, 2000.

² **Hinda Bacha Nasrouche**, *Approche écologique, une ville saine pour un développement durable- cas de Constantine*- Mémoire de magistère, Université de Constantine, 2007.

³ **Debache Benzegouta, S.** «*La nature et la ville*», cours Post-Graduation, Université de Constantine, 2007-2008.

issue légitime selon leurs moyens en abusant de l'usage d'appareils énergivores. Les climatiseurs finissent donc par se greffer aux façades à la recherche d'un semblant de confort et de bien être aux détriments de l'esthétique et de la préservation de l'environnement.

Il est clair que les conséquences de l'urbanisation désordonnée, des rejets excessifs des gaz à effet de serre et de la minéralisation inconsciente et irresponsable de nos villes au détriment des surfaces végétales ne sont pas négligeables. On a délibérément participé à la modification du microclimat dans les centres urbains, en augmentant la température de l'air d'après les estimations de 2 à 6°C⁴ par rapport aux campagnes avoisinantes. Un phénomène dénommé « *îlot de chaleur urbain* » et souvent défini comme « *une oasis à l'envers* » puisqu'il participe à son tour à augmenter la consommation énergétique pour la climatisation. En 1992, Akbari et al. ont démontré que l'augmentation de la demande en électricité dans 6 villes américaines est de 2- 4% pour chaque élévation de la température maximale de 1°C par rapport au seuil de 15- 20°C⁵.

Les matériaux recouvrant murs, trottoirs ou bâtiments sont en grande partie responsables du réchauffement des centres urbains, à l'encontre du rafraîchissement passif obtenu par le comportement biologique des plantes grâce à l'absorption des radiations solaires et leur transformation en chaleur latente. Alors que les matériaux inertes recouvrant l'enveloppe du bâtiment par exemple, réfléchissent une partie du rayonnement solaire, l'autre partie est absorbée, stockée puis restituée la nuit sous forme d'énergie sensible. Il se trouve que la fraction d'énergie solaire absorbée par les murs et les toits, augmente d'une part la température de l'air du secteur urbain dense de plusieurs degrés. Et d'autre part, agit sur le confort thermique intérieur en fonction des caractéristiques des matériaux (albédo, inertie, couleur...), des caractéristiques architecturales et urbanistiques (orientation, configuration du plan de masse, présence d'occultations minérales ou végétales...) et de l'environnement immédiat de ce dernier.

A l'origine, le rôle principal de l'enveloppe du bâtiment est de créer un environnement intérieur sain et agréable pour le bien être des occupants. Or, la plupart du temps cette enveloppe (murs et toit) constitue des points faibles, générant à eux seuls des sources d'inconforts thermiques en toute saison à cause des échanges thermiques importants entre l'intérieur et l'extérieur.

⁴ **Alain Liébard et André De Herde**, *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques ; Concevoir, édifier et ménager avec le développement durable*, Le Moniteur 2005

⁵ **H.Akbari, M.Pomerantz et H. Taha**, «*Cool Surfaces and Shade Trees to Reduce Energy Use and Improve Air Quality in Urban Areas*», Elsevier Science, Solar Energy, Vol. 70, n°3, 2001, pp. 295–310.

Le toit reste de loin la partie la plus confrontée aux aléas climatiques, puisque l'incidence du rayonnement solaire par une claire journée d'été, la perte de chaleur par émission de grande longueur d'onde pendant la nuit d'hiver, la pluie et la neige sont autant de phénomènes qui affectent le toit plus que n'importe quelle autre partie du bâtiment⁶. Par conséquent, ce dernier englobe les plus importantes pertes de chaleur en hiver avec 30% des déperditions totales⁷, mais aussi reçoit pour une journée d'été dans les régions arides, la plus grande partie des gains de chaleur par rapport aux murs⁸. Ces gains sont dus aux radiations solaires intenses et verticales mais aussi aux radiations réfléchies par les surfaces adjacentes, qui élèvent les températures surfaciques externes du toit. Celles-ci peuvent atteindre en été les 65°C et parfois plus au Canada⁹, ce qui se répercute directement sur la consommation énergétique pour la climatisation. Par ailleurs, d'après Liu Karen¹⁰, la variation brusque des températures surfaciques des toits, détériore ces derniers à long terme et diminue leur longévité, ce qui affecte leur efficacité de protection des espaces intérieurs de la chaleur et du froid.

De ce fait, afin de limiter les effets tragiques des pics de chaleur et le recours systématique aux climatiseurs, des stratégies de rafraîchissement passif à travers le toit ont été testées sous divers climats. Telles que les toitures réfléchissantes (par Tibbetts et Baker (1967), Akbari et al (2001), Eleftheria et Jones (2006)...), les toitures recouvertes d'eau (par Eleftheria et Jones (2006)...), les toitures radio- évaporatives (Benchikh, 2007), les plafonds verdis (pergolas) et les toitures végétalisées (Eleftheria et Jones, 2006...).

Des avantages comme des inconvénients ont été attribués à chacune des stratégies proposées. Cependant, la végétalisation des toits restent la solution la plus efficace, vu le nombre d'avantage qu'elle procure ; économique, environnemental, esthétique, urbanistique, sociale. Mais c'est surtout le rôle de régulateur thermique à l'extérieur et à l'intérieur des bâtiments qui est le plus prisé. Dans ce sens, la NASA pense que la plantation des forêts urbaines et la création de « toits vivants » au sommet des immeubles serait un moteur de rafraîchissement puissant et semble être l'outil le plus efficace pour réduire la température du sol¹¹. Mais aussi, la démarche

⁶ **GIVONI, B.** « *L'homme, l'architecture et le climat* », Edition Le Moniteur, Paris, 1978. p. 163.

⁷ **ADEME** (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), « *Réussir un projet d'urbanisme durable* », éd. Le Moniteur, Paris, 2006.

⁸ **Emad H.Amer**, « *Passive Options for Solar Cooling of Buildings in Arid Areas* », Energy, vol .31, 2006, pp.1332-1344

⁹ **Karen Liu**, « *Vers des systèmes de couvertures durables* », NRCC-48173f, NRC-CNRC, Canada, 2005. Fichier PDF, [En ligne], In <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca>.

¹⁰ **Karen Liu**, « *Sustainable Building Envelope- Garden Roof System* », NRC-CNRC, NRCC-47354, Canada, 2004, Fichier PDF, [En ligne] <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/ircpubs>.

¹¹ **Stéphanie Philippides**, (page consultée en 01-2008), [En ligne] In- www.notre-planete.info.

HQE « *Haute Qualité Environnementale* » recommande des toitures végétales pour favoriser l'inertie et l'isolation de la toiture et réguler le confort hygrométrique intérieur¹².

Problématique et hypothèses :

Le concept de végétalisation des toits n'est pas nouveau, les peuples anciens maîtrisaient des techniques leurs permettant de faire pousser des végétaux sur les toits, dans un but plus utilitaire qu'ornemental. La toiture jardin, toiture végétalisée, toiture pelouse diffèrent selon leurs noms, techniques de pose et normes respectives mais gardent la même efficacité d'un toit écologique qui peut durer éternellement¹³. Qu'elle soit intensive avec une profonde couche de terre (de 20-50cm) ou extensive avec une petite couche de substrat (5-10 cm, nouvelle technique), une toiture verte construite selon les règles est une toiture couverte d'un complexe de culture et de végétation.

La végétalisation des toits est une technique ancienne, modernisée depuis quelques années selon les volets principaux de la durabilité à savoir ; la minimisation de l'impact du bâtiment sur l'environnement, l'économie d'énergie grâce à sa performance en tant qu'isolant, l'allongement de la durée de vie des systèmes de couvertures mais aussi l'augmentation de la surface végétale dans les centres urbains.

Plusieurs études ont été effectuées pour évaluer la réelle participation des toitures jardins dans la consommation énergétique et la réduction des températures de l'air intérieur. La demande énergétique pour la climatisation est réduite grâce à l'ombrage, l'isolation, et surtout l'évapotranspiration et la masse thermique qu'elles procurent¹⁴. La végétation réduit donc, le rayonnement solaire incident sur la toiture et transforme l'énergie solaire en énergie latente qui humidifie l'air extérieur et diminue les fluctuations de température au dessus du toit rafraîchissant ainsi l'intérieur du logement.

Le comportement thermique de la toiture à végétation extensive, quand au rafraîchissement intérieur passif, fût étudié sous différents climats. Plusieurs chercheurs (Theodosiou (2003), Alexandri et Jones (2008) et d'autres) affirment qu'un environnement sec favorise l'évapotranspiration et la capacité de rafraîchissement des toits végétaux. Ils ont trouvé que les toits végétaux sont plus efficaces sous un climat chaud et aride par rapport à un climat froid ou humide, puisque la transpiration des végétaux est accélérée sous ces climats.

¹² ADEME, «*Réussir un projet d'urbanisme durable*», *Le Moniteur*, Paris 2006

¹³ David Wright, «*Soleil, Nature, Architecture*», éd. Parenthèse-1979.

¹⁴ Karen Liu, «*Vers des systèmes de couvertures durables*», NRCC-48173f, NRC-CNRC, Canada, 2005. Fichier PDF, [En ligne], In <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca>.

Par ailleurs, sachant que la transpiration des végétaux est régulée par l'ouverture et la fermeture de leurs stomates, qui sont eux-mêmes stimulées par les conditions climatiques de l'environnement immédiat (humidité relative, température de l'air, luminosité et vitesse du vent). Les recherches traitant l'impact des toits végétaux sur le rafraîchissement intérieur des bâtiments sous le climat chaud et sec, évoquent souvent, hormis la masse thermique du substrat et l'ombrage, la transpiration des végétaux comme un élément important quand à l'augmentation des humidités relatives au dessus des toits et à la diminution des températures à l'intérieur des bâtiments. Cependant, la typologie végétale testée ou ces caractéristiques ne sont pas évoquées (exemple de recherches de Theodosiou (2003), et Spala et al (2008) en Grèce et d'autres).

Or, les plantes recommandées pour les toitures à végétation extensive dans les régions chaudes ou arides doivent impérativement être des succulentes de type CAM (*Crassulacen Acid Metabolism*)¹⁵. C'est-à-dire, une végétation qui a la capacité de résister à la sécheresse en réduisant sa transpiration durant les journées les plus chaudes, et ce en fermant leurs stomates et en préservant l'eau dans leurs feuilles charnues.

Considérant cela, que sera alors, l'apport réel d'une toiture plantée de végétation de type CAM quand au confort hygrothermique à l'intérieur des bâtiments, puisque celle-ci réduit sa transpiration durant les journées chaudes? Malgré ses adaptations physiques et morphologiques, la végétation de type CAM, participera t-elle réellement à diminuer les fluctuations de températures surfaciques du toit? Peut-on réellement considérer une toiture à végétation extensive comme stratégie passive de rafraîchissement des bâtiments sous un climat semi aride, comme celui de Constantine?

Les objectifs visés par la présente recherche consistent en : la compréhension de l'apport du végétal quand au confort thermique intérieur, la maîtrise des concepts de végétalisation des toits en particulier le procédé extensif, et la vérification de la capacité de rafraîchissement intérieur procurée par ces toits. En particulier les toits verdis par des succulentes de type CAM sous un climat semi- aride en Algérie.

De premier abord, les hypothèses suivantes sont émises :

¹⁵ **François Lassalle**, «*Végétalisation extensive des terrasses et toitures : 34 réalisations exemplaires*», éd. Le Moniteur, Paris, 2006.

- La toiture végétalisée plantée d'espèces végétales de type CAM (crassulacées), qui réduisent leur transpiration en période chaude comme adaptation au stress thermique, peut contribuer au rafraîchissement intérieur passif.
- C'est l'ensemble couche de substrat et strate végétale qui constitue une couche protectrice de la surface du toit en la protégeant des radiations solaires intenses, ce qui réduit les fluctuations des températures surfaciques du toit, et procure le rafraîchissement intérieur.
- La densité de la couverture foliaire a un impact sur les températures surfaciques externes du toit.

Méthodologie d'investigation :

Afin d'aboutir à l'objectif fixé et de vérifier les hypothèses émises. La présente étude est structurée autour des parties suivantes :

La partie théorique : est basée sur une recherche bibliographique et documentaire qui permet une meilleure compréhension des éléments les plus importants se rapportant au sujet, à savoir les toits végétaux. Cette partie est composée de quatre chapitres : le premier traite de la problématique de la consommation énergétique accrue ainsi que les diverses stratégies de rafraîchissement des bâtiments, intégrant le végétal autour et sur l'enveloppe du bâtiment dans le but de réduire l'usage de la climatisation.

Le deuxième et troisième chapitre : ont pour objectif la définition de tous les concepts se rapportant aux toits végétaux afin de mieux présenter les nouvelles techniques de végétalisation des toits. Pour cela des informations aussi complètes que possible doivent être traitées concernant: les composantes des toits végétaux, les caractéristiques de la végétation préconisée pour les climats secs, et les contraintes et les dispositifs essentiels à la conception de ces toits écologiques. Quand au quatrième chapitre, il représente une *literature review* ou une synthèse des résultats de recherches concernant le rafraîchissement passif obtenu par l'installation des toits végétaux mais aussi, les caractéristiques de ces derniers les plus influents sur leur efficacité thermique.

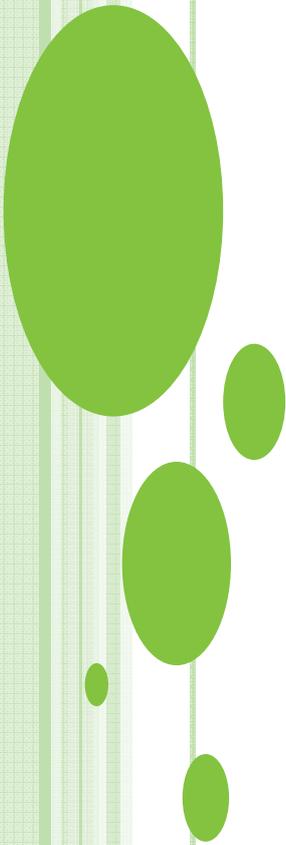
Partie investigation : concerne la présentation de l'expérimentation effectuée dans le but de vérifier les hypothèses de cette étude. Deux chapitres sont consacrés à cette partie. Le cinquième chapitre a d'abord pour objet la présentation du cas d'étude, à savoir la réalisation d'une toiture à végétation extensive expérimentale à Constantine (plantée de crassulacées). Ensuite, la méthodologie de travail et la campagne de mesure effectuées en saison estivale sont expliquées.

Le sixième chapitre est consacré à l'interprétation des résultats de l'investigation. Et en une conclusion générale.

Dans cette étude, l'investigation concerne la comparaison des températures de l'air, des températures surfaciques du toit, de l'humidité relative et de la vitesse du vent, mesurées à l'extérieur et à l'intérieur d'une chambre avec un toit végétal et une autre sans toit végétal. Et ce, afin d'évaluer la capacité de rafraîchissement du toit végétal sous le climat semi- aride de Constantine.

Chapitre I

**Stratégie de
rafraîchissement
passif par le végétal**



Introduction :

Le climat est-il vraiment entraîné de changer ? Fait-il réellement de plus en plus chaud ? Qu'est-ce qui cause ce réchauffement?... Soit autant de questions auxquelles les chercheurs ont apporté des réponses depuis quelques années. En effet, l'élite scientifique mondiale affirme que le réchauffement climatique est sûr, que la responsabilité des activités humaines est avérée, et qu'il faut agir d'urgence¹.

L'implication de l'homme à ce bouleversement climatique est due à sa consommation accrue d'énergies fossiles pour les diverses activités (transport, industrie, agriculture...), à l'étalement urbain irréfléchi dans le monde entier au détriment des forêts et des espaces verts. Mais aussi, aux constructions non adaptées au climat qui consomment de plus en plus d'énergie et génèrent d'avantage de pollutions.

Ce réchauffement est intensément ressenti dans les centres urbains, où il est dénommé «îlot de chaleur urbain». Phénomène qui favorise le recours systématique à la climatisation.

L'objectif du présent chapitre est de définir les diverses possibilités d'intégration de l'élément végétal au contact et, sur l'enveloppe du bâtiment, avec pour but, le rafraîchissement passif intérieur et la réduction de la consommation énergétique pour la climatisation. Par ailleurs, une attention particulière est portée à la végétalisation des toits et aux diverses démarches politiques incitant la vulgarisation de ce procédé écologique.

I. Contribution de l'étalement urbain et de l'habitat au réchauffement de la planète :

1. Manifestation du réchauffement climatique dans les centres urbains :

En général, les changements que le climat subit peuvent être de causes naturelles dues à des facteurs externes (forme de l'orbite terrestre, cycles solaires), ou internes (volcanisme, variabilité des échanges entre l'océan et l'atmosphère)². Cependant, l'accélération inquiétante du changement climatique actuel est sans précédent dans l'histoire connue, les chercheurs ont pu observer qu'elle puise sa source dans les profondes modifications de la chimie atmosphérique, principalement sous la pression des combustions d'hydrocarbures fossiles, qui accroît la

¹ Yves Sciama, «*Le changement climatique ; une nouvelle ère sur la terre*», Editions Petite encyclopédie LAROUSSE, France, 2007. p.7.

² Roger Dajoz, «*Précis d'écologie*», 8^e éd. Edition DUNOD, Paris, 2006. p 32.

pollution et l'effet de serre dans les centres urbains³ et laisse en arrière plan des conséquences désastreuses sur la biosphère, c'est ce qu'on appelle « **le changement global** ».

Il s'avère que ces découvertes ne sont pas récentes et les conséquences auraient pu être amoindries puisque le réchauffement de l'atmosphère a été prédit par Svente Arrhénius en 1896. Ce dernier a démontré que le doublement de la concentration de carbone dans l'air induirait un réchauffement global de 5 à 6°C⁴, un chiffre assez proche des estimations actuelles.

Tous les secteurs de l'activité humaine sont impliqués dans ce réchauffement inquiétant, de même que l'urbanisation. En effet, Odum (1971) considérait les villes comme des « *parasites de la biosphère* », et E.Torres⁵ estime que la ville génère des conséquences à plusieurs niveaux. Celles produites et ressenties dans ce même milieu (pollution de l'air, bruit, dégradation de l'ambiance urbaine), celles qui affectent la campagne environnante (pollution des nappes phréatiques, ...) et celles agissant sur le monde (contribution de l'étalement urbain au réchauffement climatique). Le concept « d'environnement » devient pour lui, difficile à appréhender dans un milieu largement artificialisé.

En fait, l'expansion des villes tant par le nombre que par l'étalement au XX^e siècle a contribué à la modification de l'environnement et du climat urbain. Une hausse de 1 à 3°C des *températures de l'air est observée* dans les centres urbains par rapport aux campagnes environnantes. Phénomène baptisé par T.Chandler dès 1965 « **d'îlot de chaleur urbain** », ce dernier est sensible la nuit et particulièrement en hiver⁶. Ce phénomène affecte donc le microclimat des centres urbains (hivers plus doux, étés plus chauds) et peut aussi avoir de graves conséquences sur la santé humaine⁷.

L'îlot de chaleur se présente sous forme de « **dôme de chaleur** » qui apparaît et se développe sous le vent (Fig. I-1). Il est caractérisé par le réchauffement de la couche de l'atmosphère au dessus d'une agglomération, et se prolonge du niveau au dessus des toits

³ On prévoit d'ailleurs le doublement du taux de CO₂ atmosphérique avant 2050, ce qui peut entraîner des conséquences graves sur l'écosystème et la santé des êtres humains.

⁴ Yves Sciama, « *Le changement climatique ; une nouvelle ère sur la terre* », Editions Petite encyclopédie LAROUSSE, France, 2007. p.10.

⁵ Emmanuel Torres, « *L'économie de l'environnement appliquée à la ville* », In « *Développement durable et territoires* », Revue semestrielle, n°37, Editions L'Harmattan, Université de Lille- France, (1^{er} semestre 2001). p.46.

⁶ Claude Chaline, « *Les étapes d'un interface complexe entre ville et environnement* » In « *Ville et environnement* », Editions Ellipses, coll. « Carrefours », Paris, 2005. p.130.

⁷ L'été 2003 a écrasé l'Ouest européen sous des températures caniculaires, causant la mort de 17 000 personnes en France (J.C.Lhomme, 2005- p.14)

jusqu'au niveau où l'influence urbaine "n'est plus ressentie"⁸. Cette couche de l'atmosphère au dessus des villes est dilatée et épaisse et occupe un volume supérieur. Elle est d'autant plus importante que la pollution augmente.

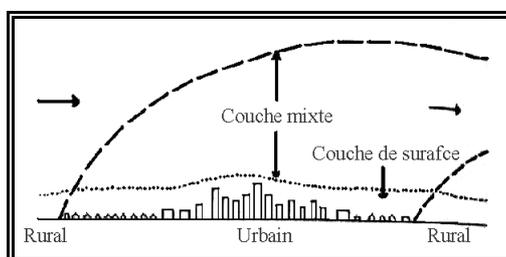


Figure I- 1. Structure de l'atmosphère au dessus de la ville d'après T.R.Oke (1973)
(Source. G.Escourrou, 1991)

1.1.Qu'est ce qui cause l'îlot de chaleur urbain ?

Les causes principales de l'apparition de l'îlot de chaleur et/ ou de son intensité sont :

- La localisation géographique, l'heure de la journée, le mois, la saison ainsi que les données climatiques qui conditionnent sont intensifié. Par exemple, les temps clairs engendrent les plus gros écarts : 8 à 10°C contre 1 ou 2°C lorsque la nébulosité est forte⁹.
- La planification et conception incorrecte, l'urbanisation accrue et le changement brusque des aménagements extérieurs, en plus de la densité urbaine. En effet, l'emprise au sol agit directement sur la quantité de radiations solaires réfléchies vers l'espace. Les recherches menées dans ce sens ont établie le lien qui existe entre la densité des plans (ρ) qui représente le ratio (surface toiture / surface totale) et les conditions climatiques locales du site considéré¹⁰.
- La forme et l'aspect de la ville qui modifient le bilan énergétique, puisque le taux élevé du rayonnement solaire stocké dans les matériaux à grande masse thermique et le blocage du rayonnement infrarouge émis, rendent l'équilibre thermique global positif dans l'environnement urbain et contribuent à son réchauffement.

⁸ Oke (1976), In Brad Bass et Bas Baskaran, «Evaluating Rooftop and Vertical Gardens as an Adaptation Strategy for Urban Areas», NRCC- 46737, Projet n° A020, Canada, 2003, p.03. Fichier PDF, [En ligne] <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/ircpubs>.

⁹ Gisèle Escourrou, «Le climat et la ville », Editions NATHAN, France, 1991, p. 65.

¹⁰ Nawel Bouakaz, «La relation entre l'îlot de chaleur urbain, phénomène du changement climatique et la densité du plan bâti : cas de la ville d'Alger», magister en architecture bioclimatique, Université Mentouri de Constantine, 2005, p.211.

- La taille des bâtiments et les matériaux de construction accroissent la rugosité et obligent l'air à s'élever. En effet, l'intensité du vent est particulièrement liée à la densité et à la configuration des bâtiments dans les centres urbains.
- La minéralisation générale (construction, bâtiments, routes...) est l'une des causes principales de l'îlot de chaleur urbain selon plusieurs auteurs (Escourrou, 1991, Santamouris et al, 2001, Banding et al 2005). Légitimement, le développement des grands pays évoluant vers un meilleur confort a grignoté sans réserves les terres agricoles et a minéralisé de grandes étendues. Ce qui empêche l'infiltration de l'eau dans les sols, ainsi que les phénomènes évaporatifs. Selon Escourrou (1991) le stockage des pluies fines (inférieures à 5mm) est assuré à 99% dans les espaces verts, qui constituent ainsi une réserve pour l'évaporation. Celui-ci tombe à 50% pour les fortes pluies, alors que pour une surface imperméable, l'eau de pluie passe directement aux réseaux d'évacuation.

En conséquent, la minéralisation globale des centres urbains agit directement sur la température de l'air qui augmente de 2 à 6°C et diminue l'humidité relative de 8-10%¹¹. Cette hausse des températures peut être bénéfique en période froide, cependant, le recours à la climatisation devient systématique en été et, c'est l'effet de boucle qui se produit avec la forte pollution et l'effet du smog qui, s'accroissent dans les centres urbains.

- L'augmentation de la population urbaine agit indirectement sur l'îlot de chaleur urbain à travers la surconsommation énergétique. Une augmentation de population de 1% seulement hausserait la consommation d'énergie de 2,2%¹². En 1973, T.R.Oke, avait trouvé le rapport suivant applicable seulement pour les villes européennes¹³:

$$\Delta t = 2,01 \log P - 4,06 \dots\dots\dots$$

Equation I- 1

- Δt : différence de température entre la ville et la campagne.
- $\log P$: logarithme de la population.

¹¹ Alain Liébard, André De Herde, «Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques ; Concevoir, édifier et ménager avec le développement durable», Edition Le Moniteur, 2005. p. 39.

¹² Jones (1992) In Matheos Santamouris, «Passive cooling of buildings», Advances of Solar Energy, ISES, James and James Science Publishers, London, 2005. p. 18.

¹³ Gisèle Escourrou, « Le climat et la ville », Editions NATHAN, France, 1991. p. 59.

- Le forçage radiatif dû à l'énergie anthropique qui libère de la chaleur (le transport, la climatisation, l'industrie, la déforestation¹⁴, les processus de combustion et le métabolisme animal). Ces activités rejettent en plus un grand nombre de poussières, d'aérosols et de polluants augmentant de *l'effet de serre urbain* ce qui réchauffe l'atmosphère. Sachant que l'effet de serre est un phénomène naturel bénéfique à la vie qui permet de maintenir des températures supportables grâce aux gaz à effet de serre (GES)¹⁵.
- La contribution des constructions dans l'augmentation de la consommation énergétique est de 40% de l'énergie mondiale, elles sont responsables en contre partie de 70% d'émissions d'oxyde de soufre et 50% de CO₂¹⁶, et donc du réchauffement des centres urbains.

2. La consommation énergétique du secteur du bâtiment en Algérie:

Les villes sont les principales sources d'émission des polluants et de ce fait, elles jouent un rôle non négligeable dans l'effet de serre. Sciama¹⁷ affirme que les logements et les bureaux consomment 35% de l'énergie produite dans le monde, ils constituent les premiers émetteurs de gaz à effet de serre (GES) avec 1,65 Gt (équivalent de carbone émis en 1990). Ceci n'est pas trop différent de l'Algérie, dont le secteur du bâtiment a consommé à lui seul 30% de l'énergie nationale produite en 2006. Alors que le secteur du bâtiment consomme plus d'énergie en Egypte et en Turquie avec 45% et 48% respectivement¹⁸.

L'Algérie a connu depuis l'indépendance une importante amélioration de la distribution d'énergie à travers le territoire national, augmentant la consommation énergétique finale. Selon le bilan énergétique national de l'année 2005, le raccordement des différents centres (urbains et ruraux) a permis l'accès à plus de cinq millions de foyers à l'électricité et plus d'un million de

¹⁴ La surface photosynthétique de la planète de 0,86 ha de forêt par personne (en 2003) est trois fois inférieure aux nécessités vitales face à la teneur en CO₂. En plus la destruction du patrimoine forestier génère à elle seule une surcharge de carbone atmosphérique d'environ 30% (J.C.Lhomme, 2005. p.17, 23)

¹⁵ Les (GES) contribuent naturellement à l'effet de serre et dont l'impact sur le climat dépend de leur efficacité à absorber les infrarouges, de leur longévité, de leur abondance ainsi que de l'importance des apports humains dans leur concentration. On retrouve, la vapeur et les fines gouttelettes (contribuant à 55%, et sans elles il ferait trop froid). Le dioxyde de carbone (CO₂) (présent à 0.038% dans l'atmosphère mais contribue à 40% dans l'effet de serre). Le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O) et l'ozone (O₃), contribuent avec 2% chacun. En plus des gaz de création humaine ; les chlorofluorocarbures (CFC) et les hydrofluorocarbures (HFC). (Roger Dajoz, 2006.p. 10,13).

¹⁶ Der Petrocian, (2001) In, Matheos Santamouris, «Passive cooling of buildings», Advances of Solar Energy, ISES, James and James Science Publishers, London, 2005. p. 01.

¹⁷ Yves Sciama, «Le changement climatique ; une nouvelle ère sur la terre», Editions Petite encyclopédie LAROUSSE, France, 2007. p.78.

¹⁸ Adel Mourtada, «Consultation nationale sur les perspectives d'application de la réglementation thermique et énergétique des bâtiments neufs», MED-ENEC, Tunis, 2008, Fichier PDF (consulté en Octobre 2008).

foyers au gaz naturel. Son taux national d'électrification est passé de 53 % en 1975 à 95 % en 2005¹⁹.

D'après Hamouda et Malek, (2006), cette croissance soutenue depuis l'indépendance s'est accompagnée d'une évolution remarquable de la consommation énergétique nationale passant de 5 Millions de TEP²⁰ en 1970 à 36 Millions de TEP en l'an 2005. Quand à la consommation par habitant, elle se traduit par une augmentation de 0,3 TEP/hab à un peu plus de 1 TEP/hab actuellement. Il s'avère qu'avec le projet de réalisation d'un million de logements, la demande d'énergie pourrait doubler d'ici 2020 (60 à 70 Millions de TEP).

En Algérie, le secteur des ménages et autres a connu une augmentation de la consommation énergétique de 6,4% de 2004 à 2005. Ce secteur totalise 52,3% de la consommation finale d'énergie, le reste est réparti entre le secteur du transport 23,9 % et le secteur de l'industrie et le BTP (bâtiment et travaux publics) avec 23,8 % (Fig. I-2).

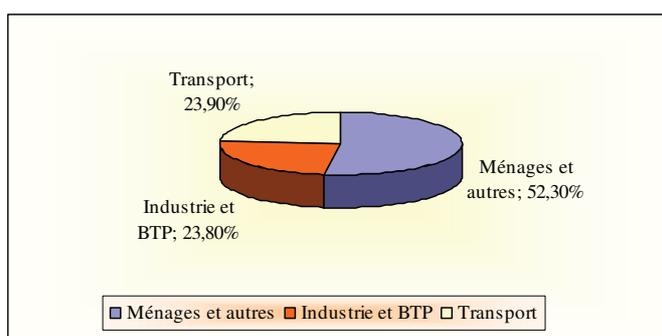


Figure I- 2. Consommation finale d'énergie par secteur en Algérie en 2006
(Source. C.Hamouda et A.Malek, 2006. Réadaptée par auteur)

Les bâtiments sont donc énergivores, puisque leur consommation pour les divers équipements domestiques (éclairage, production d'eau chaude sanitaire, chauffage, climatisation...) est accentuée. Ajouté à cela, le développement d'une architecture moderne internationale, non adaptée au climat et au lieu a engendré un inconfort thermique général dans les bâtiments (en été et en hiver) favorisant le recours systématique et prolongé du chauffage et surtout de la climatisation.

Dans ce sens, on a enregistré une augmentation de la consommation domestique en électricité par rapport à la consommation nationale finale de 19.2% à 30.17% durant la période

¹⁹ C.Hamouda et A.Malek, « Analyse théorique et expérimentale de la consommation d'énergie d'une habitation individuelle dans la ville de Batna », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 9, n°3, (2006). pp.211- 228.

²⁰ TEP : énergie contenue dans une tonne de pétrole.

1996 à 2002²¹. La demande croissante en énergie électrique pour ce secteur est en moyenne de 1000 GWh par an, ce qui pourrait impliquer selon Hamouda et Malek (2006) la réalisation d'une centrale électrique de 200 MW, exigeant des investissements importants.

3. Consommation d'électricité des abonnés ordinaires (Commune de Constantine) :

La société de Distribution de l'électricité et du Gaz de l'Est algérien enregistre une hausse continue du nombre d'abonnés en électricité et Gaz dans la commune de Constantine. Sachant que, les abonnés ordinaires en électricité comptent les ménages et les non ménages (petits commerces, boutiques, bureaux des secteurs privés...) dont la consommation est à basse tension. Ces derniers ont augmenté depuis les dernières années dans la commune de Constantine de 88 215 abonnés (Janvier 2006) à 94 640 abonnés (Décembre 2009)²².

La consommation d'électricité par les abonnés ordinaires de 2006 à 2009 dans la commune de Constantine suit étroitement l'augmentation du nombre d'abonnés. Cependant, on remarque tout de même que les histogrammes de ces quatre dernières années (Fig. I-3) ont le même profil et sont fonction de la saison et du mois.

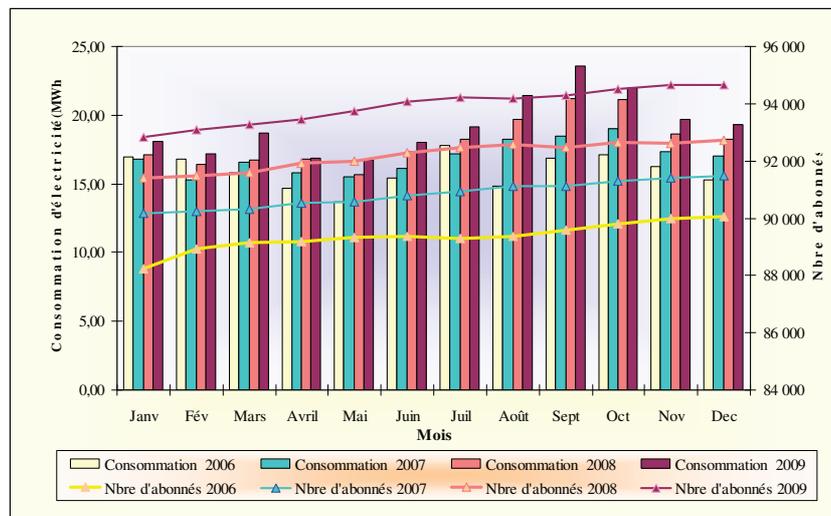


Figure I- 3. Consommation d'électricité des abonnés ordinaires dans la commune de Constantine (Source. Données de la Direction de Distribution de l'électricité et Gaz Est - conception auteur)

La consommation d'électricité des abonnés ordinaires semble partagée en;

²¹ Karima Benhalillou, «Impact de la végétation grimpante sur le confort hygrothermique estival du bâtiment ; Cas du climat semi aride », Mémoire de magistère, université de Constantine, 2008. p.24-25

²² Aissaoui.S, «Consommation d'électricité basse tension», Récapitulatif de la consommation en électricité des abonnés ordinaires, Direction de Distribution de l'électricité et Gaz Est, Constantine, 2009.

- Une forte augmentation de la consommation d'électricité à partir du mois de mai, jusqu'au mois de juillet, septembre, parfois même octobre (cas de l'année 2007). Ces mois enregistrent les pics de consommation annuelle en électricité.
- Une baisse de la consommation d'électricité à partir du mois septembre durant les quatre années malgré l'augmentation continue du nombre d'abonnés. Par exemple, pour l'année 2009, la consommation diminue fortement du pic de 23,58 MWh en septembre à 19,27 MWh en décembre soit une baisse de 4.30MWh alors qu'on note un enregistrement de 359 nouveaux abonnés ordinaires durant cette période²³.
- Une augmentation lente (parfois une stabilisation) de la consommation d'électricité des abonnés ordinaires de décembre à mai.

D'autre part, on remarque que la consommation d'électricité mensuelle moyenne par abonné dans la commune de Constantine en 2009 suit cette évolution. Elle reste inférieure à 200 KWh de Janvier à Juin pour augmenter progressivement durant les mois les plus chauds de juillet à septembre. Puis, elle diminue progressivement jusqu'au mois de décembre (Fig. I-4).

Le pic de consommation d'électricité par abonné atteint une moyenne de 250.07 KWh au mois de septembre.

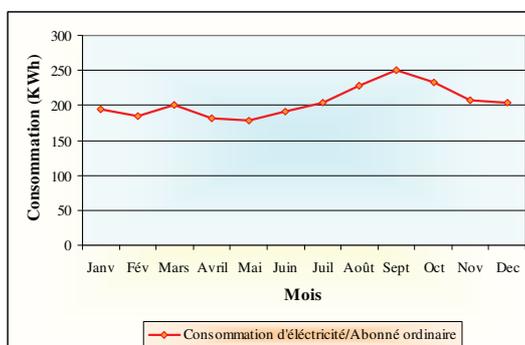


Figure I- 4. Consommation d'électricité mensuelle moyenne par abonné ordinaire (2009-2010) commune de Constantine)

(Source. Données de la Direction de Distribution de l'électricité et Gaz Est - conception auteur)

La Direction de la Distribution d'électricité et du Gaz de l'Est algérien, n'a pas d'étude spécifique sur la consommation énergétique pour la climatisation concernant le secteur du ménage. Cependant, les responsables techniques associent ces pics de ventes d'énergie

²³ Aissaoui.S, «Consommation d'électricité basse tension», Récapitulatif de la consommation en électricité des abonnés ordinaires, Direction de Distribution de l'électricité et Gaz Est, Constantine, 2009.

d'électricité (correspondant à la consommation des abonnés ordinaires) à l'augmentation de l'utilisation de la climatisation durant les mois les plus chauds.

Sachant que les différents usages consommant l'énergie dans le secteur domestique en Algérie sont à²⁴ :

- 60% pour le chauffage.
- 20% pour l'éclairage, l'électroménager, l'audio visuel, et la climatisation.
- 15% pour l'eau chaude sanitaire.
- 5% pour la cuisson.

On note que la consommation d'énergie pour la climatisation est évaluée avec la consommation pour l'éclairage et l'électroménager à (20%), alors qu'on considère souvent qu'elle est très importante en été puisqu'il arrive que la demande dépasse l'offre et de ce fait, des coupures d'électricité se produisent en cette saison.

Il est à noter qu'en Amérique, la dépense énergétique pour la climatisation est de 6%, alors qu'au Japon elle est déjà responsable de pics de consommation énergétique en été²⁵. Ceci représente un phénomène préoccupant puisque à mesure que le climat se réchauffe, on consommera de plus en plus d'énergie pour refroidir les bâtiments, alors que cette énergie générera de nouvelles émissions qui aggraveront la situation atmosphérique. Un climatiseur qui refroidit une pièce en réchauffe d'autres ou l'air extérieur. En ville, cela peut aboutir à un réchauffement perceptible de l'air ambiant dans les rues, sans oublier les gaz à effet de serre rejetés.

II. Le rafraîchissement passif des bâtiments : Intégration du végétal sur, et autour du bâtiment :

1. Incitation au rafraîchissement passif par la réglementation thermique:

Selon Gauzin-Müller²⁶, l'implication de l'architecture et de l'urbanisme dans les pays d'Europe en faveur de la qualité environnementale est institutionnalisée sous forme de normes, réglementations et même, incitations financières. La Scandinavie, l'Allemagne, puis la France,

²⁴ **Chitour.CH.E**, In **Karima Benhalilou**, *«Impact de la végétation sur le confort hygrothermique estival du bâtiment»*, Mémoire de magistère, Université de Constantine, 2008. p.24-25.

²⁵ **Yves Sciama**, *«Le changement climatique ; une nouvelle ère sur la terre »*, Editions Petite encyclopédie LAROUSSE, France, 2007. p.81.

²⁶ **GAUZIN-MÜLLER, Dominique**. *«L'architecture écologique ; 29 exemples européens »*. Editions Le Moniteur, Paris, 2001. p. 130.

se sont dotées de réglementations strictes dont les objectifs sont : la réduction sensible de l'effet de serre grâce à d'importantes économies d'énergie ; l'amélioration du confort d'hiver en limitant les effets des parois froides, les infiltrations et les ponts thermiques. Et l'amélioration du confort d'été, en assurant une ambiance supportable dans le bâtiment non climatisé et en réduisant les charges de climatisation des bâtiments climatisés.

En France, la Réglementation Thermique des bâtiments neufs (RT 2005)²⁷ a amélioré la précédente (RT 2000). Elle a pour principal objectif l'amélioration de la performance énergétique d'au moins 15% par rapport à (RT 2000) (40% en 2020)²⁸. On a rajouté dans cette nouvelle réglementation la prise en compte de la consommation pour le refroidissement dès la conception. Et ce, en limitant les hausses de la température intérieure afin d'assurer le confort d'été et limiter le recours à la climatisation.

Les directives de la RT 2005, sont claires et précises. Elles insistent sur la valorisation de la conception bioclimatique pour assurer un meilleur confort et réduire les besoins pour le chauffage et le refroidissement (orientation au sud, inertie du bâtiment...) ; la prise en compte du microclimat autour du bâtiment ; valorisation des toitures végétalisées, la prise en compte de l'éclairage naturel, le recours aux énergies renouvelables, et la limitation du recours à la climatisation. D'après la RT 2005 : « *un bâtiment climatisé, n'aura pas le droit de consommer plus qu'un bâtiment identique non climatisé* ».

En Algérie, La mise en application de la loi 99.09 relative à «*la maîtrise de l'énergie dans le secteur du bâtiment*» s'est concrétisée par la promulgation le 24 avril 2000 du décret exécutif n°2000-90 «*portant réglementation thermique dans les bâtiments neufs*». L'objectif de celui-ci est d'introduire l'efficacité énergétique dans les bâtiments²⁹. Selon le Décret n°2000-90 : «*Les systèmes de climatisation d'été doivent comporter des dispositifs automatiques qui régulent la fourniture du froid en fonction, soit du climat intérieur soit du climat extérieur*»³⁰.

²⁷ La RT 2005, impose que le bâtiment neuf doit être à basse consommation avec moins de 100KWh/m² et par an. La RT 2010 imposera de nouvelles exigences relatives à l'utilisation de l'énergie renouvelable et une consommation de 30-50 KWh/m² par an («*Normes et réglementations*»), (Page consultée le 30-12-2009) [En ligne] www.pages.energies.com).

²⁸ **Ministère de l'emploi de la cohésion sociale et du logement**, «*La Réglementation Thermique 2005*», Fichier PDF, (Consulté le 29/04/08) [En ligne] www.CSTB-rt-batiment.fr.

²⁹ **Kamel Dali**, «*Mise en application de la réglementation thermique des bâtiments* », la Lettre, Bulletin trimestriel de l'APRUE, n° 10, (Dec. 2006), Fichier PDF, (En ligne] www.aprue.org.dz

³⁰ **Décret exécutif n°2000-90**, «*portant Réglementation Thermique dans les Bâtiments Neufs* », Journal officiel de la république algérienne- (**Art.15**), Fichier PDF. p.32-33.

Ceci reste assez ambigu et n'incite pas les concepteurs ou les usagers à diminuer le recours systématique à la climatisation. Alors que Dali (2006), estime que la mise en application de cette réglementation permettra d'après les estimations, de réduire les besoins calorifiques des nouveaux logements de l'ordre de 40% pour les besoins en chauffage et en climatisation. D'autre part, pour M.Arfa (responsable du CNERIB), le but de cette réglementation est d'atteindre l'efficacité énergétique via la maintenance du niveau de confort situé d'après l'OMS (Organisation mondiale de la santé) entre 18°C et 25°C³¹.

Dans le cadre de cette réglementation, trois documents techniques réglementaires (DTR) ont été préparés par le Centre National de la Recherche de l'Industrie du Bâtiment (CNERIB); **DTR.C 3-2**³², **DTR.C 3-4**³³ et le **DTR.C 3-31**³⁴.

Cette réglementation dont la finalité est le renforcement de la performance énergétique globale du bâtiment, reste générale puisqu'elle ne donne pas de détails ou approche de conception pour aboutir à un rafraîchissement passif des constructions. Elle laisse de larges possibilités aux architectes, aux bureaux d'études et maîtres d'ouvrage de choisir entre les performances thermiques globales du bâtiment aussi bien dans le choix des matériaux que la conception du cadre bâti. Alors que les connaissances des architectes maîtres d'oeuvres sont malheureusement limitées en architecture bioclimatique.

Toute fois, dans un cadre expérimental, une maison témoin passive a été conçue par le CNERIB et retenue par le programme de l'Union européenne qui en assure le financement³⁵. Celle-ci, se devait de répondre à des impératifs tant technologiques qu'environnementaux par l'application des mesures passives. Dont on distingue : l'orientation (le sud est privilégié), l'ombrage naturel (par les plantations), la ventilation naturelle, l'isolation de l'enveloppe, double vitrage, l'éclairage naturel, l'utilisation des lampes à basse consommation et l'isolation optimale des parois et de la toiture.

³¹ Nahla Rif, «L'habitat durable en Algérie », (page consultée en Oct. 2008), [En ligne] <http://adelahfir.blogspot.com>.

³² **DTR.C 3-2** traitant «Les règles de calcul des déperditions calorifiques d'hiver pour les bâtiments à usage d'habitation».

³³ **DTR.C 3-4** traitant «Les règles de calcul des apports calorifiques d'été pour les bâtiments».

³⁴ **DTR.C 3-31** traitant «La ventilation naturelle des locaux à usage d'habitation».

³⁵ Nahla Rif, *op. cit.*, [En ligne].

2. Contribution de l'architecture et le végétal au rafraîchissement passif :

2.1.L'architecture bioclimatique :

L'adaptation de l'architecture aux conditions climatiques ne date pas d'aujourd'hui, Vitruve avait déjà, dans son traité de l'architecture, prit en considération ces paramètres. Et l'architecte grec Hippodamos de Millet (V^e siècle av. J.C.) adoptait des préceptes qui prenaient en compte le climat et qui furent repris par les romains et Byzantins³⁶. Ensuite, l'expansion de l'islam a favorisé cette architecture qui intègre les paramètres climatiques dans l'architecture. Ce savoir spontané était basé sur des observations et était constamment amélioré. Un microclimat était ainsi artificiellement créé. Ce n'est qu'aux années 50 qu'on a pu expliquer scientifiquement ces adaptations issues de l'observation et de l'expérience.

C'est autour de la méditerranée que l'adaptation était la plus importante. Le climat y est chaud et sec, avec un rayonnement solaire intense en été, des vents violents et parfois à de fortes averses en hiver. La protection contre le froid y était secondaire par rapport à la protection contre les fortes chaleurs, qu'il ne fallait surtout pas laisser pénétrer à l'intérieur des habitations. Donc, on créait un microclimat grâce à l'utilisation de peinture blanche ou teintes claires pour les murs; l'ombrage des constructions et des rues, l'orientation des rues vers les brises marines et protection contre les vents du sud. Mais aussi, la création des puits de lumière à l'intérieur des maisons, où la végétation et le point d'eau étaient omniprésents, afin de maintenir un minimum de fraîcheur grâce à l'évaporation qui consomme de l'énergie (chaleur latente).

Cette adaptation de l'architecture au climat est dite aujourd'hui «*bioclimatique*». Et bâtir avec le climat est devenu une nécessité afin d'améliorer le confort intérieur (hygrothermique) et diminuer les coûts dus à l'utilisation des systèmes énergivores tels les climatiseurs.

Ailleurs, des tendances d'architecture écologique s'inscrivant dans la démarche du développement durable sont nées. Parmi ces tendances, on retrouve les partisans du *low- tech* (adepte d'une philosophie qui rejette la rigidité et la froideur des constructions modernes). Ses concepteurs font participer les habitants à la conception et même à la réalisation. Ils favorisent les matériaux naturels ; bois (Peter Hüber à Stuttgart, Lucian Kroll en Belgique) ou en terre (Sverre Fehn en Norvège, Jouda et Perraudin en France). Certains concepteurs ont favorisés le développement des bâtiments aux façades et toitures végétalisées (Fig. I-5). Une autre tendance

³⁶ Gisèle Escourrou, « *Le climat et la ville* », Editions NATHAN, France, 1991. p. 17.

regroupe les adeptes de l'architecture *High-tech*, symbolisée par les immeubles et grands équipements spectaculaires en métal et verre, qui ont opté pour l'introduction des énergies renouvelables dans leurs constructions (Norman Foster, Renzo Piano, Richard Roger...) ³⁷.



Figure I- 5 . Mur et toit végétal, Station de métro Flon (Lausanne, Suisse)
(Source. www.canevaflor.com)

En Allemagne et en Autriche, tous les acteurs s'appliquent depuis la fin des années 80 dans une démarche environnementale empirique. Alors, qu'en France, au Royaume Uni, et en Scandinavie, l'approche est fondée sur des grilles d'objectifs souvent quantifiés. Telle que, *La grille d'évaluation britannique Breeam* ³⁸ ; *La grille Hollandaise DBCA* ³⁹ ; *La haute qualité environnementale (HQE)* en France. L'objectif de la HQE est fondé sur la recherche de qualités : environnementale, architecturale, fonctionnelle... La démarche HQE, recommande pour une bonne gestion de l'énergie (cible n°4) et la limitation des besoins en climatisation ; le recours aux systèmes de rafraîchissement passif et l'utilisation d'une inertie lourde pour le confort d'été ; mais surtout, *des toitures végétales* pour favoriser l'inertie et l'isolation de la toiture et réguler le confort hygrothermique ⁴⁰ (Voir Démarche HQE en annexe I).

Au cours des années 90, plusieurs autres systèmes d'évaluation de la qualité environnementale des bâtiments, fondés sur des logiciels informatiques ont été créés. Tels que :

³⁷ **Dominique Gauzin- Müller**, « *L'architecture écologique ; 29 exemples européens* ». Editions Le Moniteur, Paris, 2001. p.16-17.

³⁸ **Breeam** : (Building Research Establishment's Environmental Assessment Method) basée sur la définition de plusieurs objectifs devant être remplis par le bâtiment dont ; la consommation d'eau, l'impact environnementaux des matériaux, l'utilisation du terrain (surfaces végétalisées et surfaces imperméabilisées...)

³⁹ **DBCA** : Dont l'objectif est de réaliser des bâtiments selon la démarche environnementale. Elle établit une hiérarchie entre les différents niveaux d'interventions et elle caractérise quatre échelles d'objectifs et de résultats. **A** : Bâtiment autonome avec un impact minimum sur l'environnement, **B** : Bât. Avec un impact environnemental très réduit, **C** : Bât. Conventionnel avec une correction des nuisances environnementales, **D** : projet de bât. Conventionnel.

⁴⁰ **ADEME** (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), « *Réussir un projet d'urbanisme durable* », Editions Le Moniteur, Paris, 2006. p86.

Escale (par le CSTB), Equer (Ecole des Mines de Paris), Papoose (BET, Tribu), Team (par Ecobilan).

2.2. Le végétal et l'architecture :

Dans le temps, partout dans le monde la végétation a beaucoup été utilisée comme matériau de construction. En méditerranée, par exemple, Casanovas et Graus⁴¹ expliquent qu'on retrouvait dans les zones rurales des cabanes construites avec *des murs végétaux* en céréales ou roseaux trouvés sur place, généralement ligaturés et assemblés autour d'une armature sommaire en bois. Dans les plaines ou les zones littorales se sont essentiellement des habitations très pauvres d'agriculteurs ou de pêcheurs avec *des toitures végétales* recouvertes en ajonc, d'oyat, d'osier, de graminées ou de pailles de riz, de seigle ou de blé sous forme de bottes aplatis mais épaisses (10 à 25cm), bien isolantes mais le plus souvent saisonnières.

Le souci de construire avec le végétal, de l'insérer dans l'architecture est perçu différemment : agrément et embellissement des façades selon certains, cache misère pour d'autres, utilitaire ou technique (ombrage...)... Aujourd'hui c'est son rôle bioclimatique qui est le plus recherché. Dans ce sens, Blumenthal⁴² s'interroge sur la possibilité de considérer le végétal comme élément de composition architecturale, voire même comme matériau de construction avec, la construction de jardin terrasse planté et de façade verte.

Certains ont carrément opté pour l'architecture verte « *green architecture* », une démarche dite *écologique, esthétique et économique* qui met en œuvre des systèmes de constructions basés sur le végétal et les matériaux naturels (terre, bois et végétal). Telles que les structures végétales souples obtenues à partir de branches de saules plantées dans le sol. Technique ancienne redécouverte et développée par Marcel Kalberer (Allemagne) qui construit avec, depuis 1984 des abris naturels : tunnel, coupole, pavillon, palais, cathédrale... (Fig. I-6)

L'architecte Simon Veles (Colombie) utilise quand à lui, le bambou pour ces diverses propriétés. Il réunit la tradition colombienne et le design structurel, l'écologie et la technologie la plus avant-gardiste dans l'utilisation de ce matériau⁴³.

⁴¹ **Xavier casanovas et Ramon Graus**, «Au sujet des valeurs bioclimatiques dans la réhabilitation de l'architecture traditionnelle méditerranéenne » In « Connaître l'architecture traditionnelle pour la mettre en valeur », Outil 1, Fichier PDF, [En ligne] www.rehabimed.net. p. 18, 24. pp 78-86.

⁴² **Max Blumenthal**, « *Le végétal et l'architecture* », Revue Technique et Architecture, N° 313. Edition Regirex, France, (Janv. - Fév. 1977). p. 26.

⁴³ **Article**, «Architectures ; Ici, ailleurs, autrement», (Page consultée le 09.2005), [En ligne]



Figure I- 6 . A gauche structure en saule. A droite, végétalisation en lierre après une année (Allemagne, 2004-2005)
(Source. www.wondertree.co.uk)

Sans oublier tout de même le mouvement moderne, qui éloignât dans un premier temps, le végétal comme référence formelle et ornemental explicite de l'objet construit. Puis, instaura selon Emmanuel Caille⁴⁴, un dialogue contemplatif à l'image des croquis de Le Corbusier. En effet, dans ces croquis, on distingue «le bâtiment, le soleil et un arbre» ; le paysage verdoyant filant sous les pilotis ; la toiture percée du «pavillon de l'Esprit nouveau contournant un arbre sacré» ; «la maison Savoye» qui repose sur l'herbe sans rien déranger ; il proposa même des toitures plantées de graminées « Pavillon d'accueil » ou toit herbeux « Couvent de la Tourette ». Pour le Corbusier : « La nature que les pilotis n'ont pu garder intacte, on la lui rend en terrasse »⁴⁵.

Pendant, en absence de toutes ces techniques, les citoyens peuvent simplement profiter de la verdure en plantant des arbres devant leur maisons ou dans les patios et en arrangeant des plantes dans des jardinières.

2.3.Intégration du végétal dans l'espace bâti :

Lorsque la végétation est introduite dans le milieu urbain ou rural, elle accompagne l'architecture. Soulier⁴⁶ conseille pour la création d'ensembles urbains intégrant la végétation, la recherche d'un certain équilibre et harmonie entre les masses, les surfaces, les formes, les lignes, les couleurs et les matières... :

- Soit entre végétaux eux-mêmes, lors de la création d'un ensemble vert.
- Soit entre végétaux et volumes architecturaux.

www.fondationpourlarchitecture.be.

⁴⁴ Emmanuel Caille, «Façades et toitures végétales», Revue AMC- Le Moniteur Architecture, n° 126, Juin- Juillet 2002.

⁴⁵ Roland Rainer, « Les extérieurs vivants », «s. éd.», Suisse, 1972. p.157.

⁴⁶ Louis Soulier, « Espace vert et urbanisme », 2^e éd. «s. éd.», «s.l.». « s. d. ». p. 82.

L'intégration du végétal dans un aménagement urbain n'est pas toujours facile, à cause du manque des espaces libres à céder aux espaces verts. Mais aussi, Yu et Wong⁴⁷ ajoutent à ces deux composantes du milieu urbain (bâti, végétation), l'importance des caractéristiques du climat. Ils considèrent que l'interaction entre «les constructions, le climat et la végétation» est cruciale pour les solutions environnementales récentes. Puisque la présence de végétation urbaine a d'une part, un impact sur le microclimat et d'autre part, elle est menacée par le développement rapide des villes où, le bâti et la végétation deviennent des compétiteurs en terme d'occupation du sol.

L'homme⁴⁸ considère que le seul véritable moyen pour lutter contre l'emballement de l'effet de serre outre la réduction des émissions de carbone, est l'accroissement des surfaces forestières. Pour lui, il faudra 5 fois la capacité photosynthétique de la terre actuelle pour stabiliser la biosphère et préserver l'intégrité de la vie. Pour cela, les pays développés continuent à chercher les diverses possibilités d'intégrer le végétal dans les espaces urbains déjà denses. Dans ce sens, Saint- Marc⁴⁹ proposait déjà, de donner autant d'importance à l'aménagement végétal du territoire qu'à son aménagement minéral, et à l'urbanisme végétal qu'à l'urbanisme minéral. La solution pour lui consistait en l'accroissement du « capital vert », dont l'expansion ne doit pas être seulement horizontale mais aussi verticale.

En effet, alors que les lierres, les vignes vierges et les mousses ont depuis toujours recouverts les habitations, le plus souvent de manière plus spontanée qu'intentionnelle. Leur utilisation dans les projets s'est multipliée ces dernières années en tant que : paroi, revêtement, filtre ou autres. En contrôlant le développement de cette végétation, les bâtiments s'embellissent avec les saisons tout en étant protégés des aléas climatiques.

Donc, tout espace minéral peut recevoir la végétation lorsque l'espace lui étant réservé au sol vient à manquer. Blumenthal⁵⁰ recommande pour les maisons individuelles, des patios lorsque la surface dispensée au jardin est fortement réduite, mais aussi des « jardins d'hiver », le « patio- serre- puit de lumière », ainsi que des « fenêtres » aménagées pour recevoir des plantes. Toutes ces tendances à la végétalisation des espaces urbains ne sont pas nouvelles. En

⁴⁷ **Chen Yu et Wong Nyuk Hien**, « *A green experiment conducted in the tropical climate* », PLEA 2006 – 23ème Conférence, Genève, 6-8 September, 2006.

⁴⁸ **Jean- Christian Lhomme**, « *La maison économe* », Editions Delachaux et Niestlé SA, Paris, 2005. p.16, 23.

⁴⁹ **Philippe Saint Marc**, « *La socialisation de la nature* », 7^e éd. Editions Stock, France, 1975.p.246

⁵⁰ **Max Blumenthal**, « *Le végétal et l'architecture* », Revue Technique et Architecture, N° 313. Edition Regirex, France, (Janv. - Fév. 1977). p. 27.

méditerranée, le végétal implanté dans les espaces de proximité ou attenants aux bâtiments était déjà considéré comme expression de confort et de régulation des excès climatiques par l'ombrage d'été, la protection contre le vent et l'humidification de l'air.

2.4. Statut des espaces à végétaliser attenants ou, sur les bâtiments :

L'arbre urbain est un élément vivant qui génère le repos, il est doté d'une grande charge symbolique. Très sensible au rythme des saisons, le végétal en milieu urbain, devient élément de référence qui contraste avec la démesure des projets architecturaux, à l'image froide et inerte du monde urbain (minéral). Le citadin en quête d'évasion et de nature ne peut s'épanouir dans un environnement uniquement minéral. Il aime à retrouver à proximité de son habitation des espaces verts où il vient chercher détente et convivialité, profiter de la fraîcheur des ombrages, des jeux de lumière et des couleurs, entendre d'autres bruits, sentir d'autres odeurs... Le végétal est l'unique matériau capable de créer ces ambiances, d'où la nécessité **d'interpénétration des formes minérales et végétales**⁵¹.

Ces aménagements ne doivent pas se limiter à des parcs fermés et distants des habitations. La nouvelle tendance de végétalisation des centres urbains concerne aussi bien les espaces attenants aux bâtiments que l'enveloppe même de ces derniers. Alors, qu'on pense souvent que la végétalisation de l'enveloppe du bâtiment appartient au propre chef du propriétaire pour un bien-être complètement privé, celle-ci peut avoir un intérêt public et être classifiée parmi les espaces verts publics.

En effet, les espaces verts changent de typologie selon la fonction du bâtiment qu'ils accompagnent. Dans les zones pour habitats collectifs, Larcher et Gelgon⁵² distinguent deux types d'espaces verts collectifs dans les centres urbains : les **jardins ou espaces verts d'immeubles**⁵³ insérés le plus souvent entre les bâtiments, et les différents **aménagements complémentaires**.

⁵¹ C.T.U.R (Centre d'Etude des Transports et du Tourisme), «*Végétal et entrées des villes*», Edition C.T.U.R, France, 1993. p 54.

⁵² J.L.Larcher, T. Gelgon, «*Aménagement des espaces verts urbains et du paysage rural*», 3^e éd. Edition TEC & DOC, Paris, 2000. p 159-161.

⁵³ Regroupent : les accès et liaisons entre les bâtiments, les voies de dessertes, parkings, les pistes cyclables, la circulation vers et entre les centres d'activités, les cheminements arborés, les terrains de jeux, de repos... Ajouté à cela : l'habillage des zones de stationnement et de circulations et l'aménagement de jardins ou d'espaces verts pour lotissements (aires de jeux, espaces boisés ou engazonnés, cheminement arborés...). Donc se sont des espaces verts de voisinage.

Les aménagements complémentaires sont des verdissements attenants ou carrément sur les bâtiments. Ils regroupent d'après Larcher et Gelgon ; *l'habillage des bâtiments* par l'aménagement des *balcons et terrasses* ainsi que *l'habillage des murs* (Fig.I-7) avec des plantes grimpantes, des arbres et des végétaux arbustifs dans le but est d'intégrer et d'harmoniser l'ensemble de l'espace collectif.



Figure I- 7. Divers aménagements complémentaires aux espaces verts collectifs
(Source. A gauche et au milieu : A.P.Furlani, 1996- A droite : www.intemper.com)

Il s'agit donc selon la théorie de Larcher et Gelgon, de considérer l'embellissement et l'aménagement d'un espace complètement privé (balcon, terrasse, mur) comme espaces verts collectifs à partir du moment où tout le monde peut profiter de la mise en valeur des constructions mais aussi du confort en tout genre que le verdissement des ces espaces minéraux procure (surtout le confort hygrothermique). Il s'avère que Soulier⁵⁴ n'est pas de cet avis, puisqu'il considère que le verdissement des espaces extérieurs de la maison tel que le verdissement des fenêtres, balcons, loggias, patios et jardins sur le toit-terrasse comme des *espaces verts*, mais *complètement privés*.

3. Stratégies de rafraîchissement passif des bâtiments en intégrant la végétation :

Les chercheurs se sont impliqués ces dernières années à trouver les meilleures stratégies afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre et l'effet d'îlot de chaleur urbain causés par l'urbanisation et le secteur du bâtiment. Selon Akbari et al⁵⁵, la modification de l'environnement urbain a des effets directs et indirects sur la réduction de la consommation énergétique pour le bâtiment. (Cette modification correspond à un aménagement d'ordre minéral ou végétal)

Les solutions les plus recommandées peuvent être regroupées selon deux catégories :

⁵⁴ Louis Soulier, « Espace vert et urbanisme », 2^e éd. «s. éd.», «s.l.», « s. d. », p. 82.

⁵⁵ H.Akbari, M.Pomerantz et H.Taha, «Cool Surfaces and Shade Trees to Reduce Energy Use and Improve Air Quality in Urban Areas», Elsevier Science, Solar Energy Vol. 70, N^o. 3, 2001, pp. 295–310.

Le traitement et l'aménagement des espaces urbains et des espaces au contact du bâtiment : c'est la possibilité de *création de microclimat* qui diminue de l'effet d'îlot de chaleur urbain et par là, elle a un impact sur le confort thermique intérieur et la consommation énergétique pour la climatisation.

Ces espaces peuvent être traités par l'augmentation des surfaces végétales, le recours aux surfaces claires, les toitures et murs végétalisés, et la circulation d'eau via fontaines ou autres, qui semblent donner de bons résultats, s'ils sont déployés à grande échelle. D'autre part, ces solutions doivent être adaptées au climat. En effet, avant toute conception, il faut évaluer convenablement, selon Shahidan et Jones⁵⁶ les climats afin de fournir les solutions adéquates au phénomène d'îlot de chaleur urbain.

Adopter des techniques passives ou actives pour la construction des bâtiments afin d'atteindre le confort thermique en été sans faire recours à la climatisation, par des matériaux de construction lourds, la protection solaire (stores, volets, rideaux...), tour à vent, puit canadien, surfaces claires... mais aussi par la végétalisation des espaces au contact du bâtiment (pergolas, auvent...) et de l'enveloppe même de celui-ci (mur végétal, toit végétal).

3.1. Rafraîchissement par la végétalisation des espaces au contact des bâtiments :

La présence de la végétation dans l'environnement immédiat des constructions est plus efficace que sa concentration dans un parc éloigné des habitations, puisque celle-ci a un impact beaucoup plus important sur la diminution de la température aux abords et à l'intérieur des constructions. En effet, plusieurs chercheurs ont démontré que l'augmentation de la couverture végétale des quartiers résidentiels, ou des espaces proches des habitations réduirait efficacement l'usage de la climatisation, (tels que Givoni, 1989, Akbari et al, 1992, Sailor en 1995, 1998, Santamouris, 2005...). Alors que Wong et al.⁵⁷, la recommande sur l'enveloppe même du bâtiment pour qu'elle ait un effet sur l'économie d'énergie.

Cependant, la mise en place de la végétation, le choix de l'espèce végétale et la surface verte, sont importants puisque les économies d'énergies ne se concrétiseront que si les arbres et

⁵⁶ Mohd Fairuz Shahidan, Philip Jones, «Plant Canopy Design in Modifying Urban Thermal Environment: Theory and Guidelines», PLEA 2008, 25^{ème} conférence, Dublin, 22-24 Oct. 2008. pp179.

⁵⁷ WONG Nyuk Hien et al., «Exploring the Thermal Benefits of Plants in Industrial Areas with Respect to the Tropical Climate», PLEA 2006, 23^{ème} conférence, Genève, 6-8 Sep. 2006.

la végétation sont plantés de façon conforme, sinon les coûts énergétiques pourraient augmenter⁵⁸.

Pour Bass et Baskaran⁵⁹, la position de la végétation par rapport au bâtiment est très importante. Lorsque celle-ci recouvre les surfaces du bâtiment, l'évaporation peut réduire le besoin de climatisation grâce à la réduction de la température de l'air ambiant au contact du bâtiment.

Il est donc de plus en plus urgent de végétaliser les espaces les plus proches des constructions afin d'en bénéficier le plus efficacement possible, au lieu de consacrer un budget assez conséquent pour la création, l'entretien et la gestion de jardins ou parcs publics. Dans ce sens, le label ECODOM⁶⁰ préconise une protection à l'ensoleillement direct par une bande d'au moins trois mètres de large de végétalisation au sol ou d'écrans solaires sur les 2/3 de la périphérie du bâtiment⁶¹. La création de ces espaces extérieurs ombrés, protège le bâtiment et le sol des radiations solaires, et le font bénéficier du rafraîchissement due à la production de chaleur latente grâce à l'évaporation. Sans oublier l'intérêt esthétique significatif de la végétation et la possibilité de réduction du CO₂ dans les milieux urbains.

3.2. Formes de végétalisation des espaces au contact et sur les bâtiments :

Autour des constructions, la végétation prend des formes diverses : isolée (arbres, arbustes), tapissante (gazon, herbes)...comme elle peut constituer une seconde enveloppe du bâtiment (mur végétal, toit végétal). Dans toutes ces formes, la végétation protège le bâtiment en réduisant les transferts de chaleur par convection et les gains par rayonnement ce qui améliore le comportement énergétique grâce à l'évapotranspiration qui rafraîchit l'air ambiant extérieur et intérieur des bâtiments.

⁵⁸ J.F.Dwyer et coll. (1992) In Article, «Le besoin de nature urbaine : un rapport de recherche», (page consultée le 27.06.2002), [En ligne] <http://www.evergreen.ca>.

⁵⁹ Brad Bass et Bas Baskaran, «Evaluating Rooftop and Vertical Gardens as an Adaptation Strategy for Urban Areas», NRCC- 46737, Projet n° A020, Canada, 2003, p.03. Fichier PDF, [En ligne] <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/ircpubs>.

⁶⁰ Label ECODOM : créé en 1997 dans les DOM (Département français d'Outre Mer) dans le but est d'éviter la climatisation artificielle et les dérives énergétiques dans l'habitat, tout en apportant un confort thermique optimal. Ce label définit donc les grandes lignes de la climatisation naturelle (la bioclimatisation) basée sur la ventilation naturelle et une bonne protection solaire. Cette démarche vise l'amélioration de la qualité thermique et des performances énergétiques dans les logements neufs collectifs et individuels adaptée au climat de la Guyane (Amérique du Sud).

⁶¹ Alain Liébard, André De Herde, «Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique », Editions Le Moniteur, Paris, p.306

3.2.1. Végétalisation des transitions rue- bâtiment :

Dans le cadre de la création de quartier durable, une approche écologique d'aménagement fut adoptée dans les pays européens comme l'Allemagne. Celle-ci a favorisé le traitement des aménagements extérieurs et des prolongements du bâti par des espaces de transitions (rue – bâtiment) entre *l'espace public* de la rue et *l'espace privé* du logement. Ceux-ci, se sont développés pour répondre aux nouvelles exigences en matière de développement durable en intégrant le concept énergétique. C'est-à-dire concevoir des quartiers durables dans le respect total de l'environnement, de la qualité de vie, de l'équité sociale et surtout en assurant des gains énergétiques par différentes solutions, parmi lesquelles : le verdissement des espaces de proximité qui peuvent être des *espaces collectifs*⁶² ou des *espaces privés*⁶³.

L'exemple de «*du quartier Vauban, Fribourg- en- Brisgau*» (Fig. I-8) est représentatif par la forte présence de végétation dans les aménagements extérieurs (plantations et revêtements perméables). Celle-ci a pour principal but, la création de microclimat aux abords des constructions : ombrage, rafraîchissement, protection contre le bruit, abri contre le vent... Ce verdissement est renforcé par les toitures plates végétalisées⁶⁴.

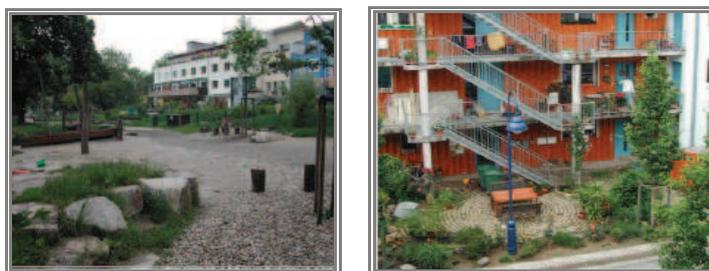


Figure I- 8. Transitions rue- bâtiment ; Quartier Vauban, Fribourg en Brisgau
(Source. Plan Directeur de Quartier n° 29298)

A Montréal, le «*Projet-pilote Îlot de Fraîcheur*»⁶⁵ initié par le Centre d'Ecologie Urbaine de Montréal et par les citoyens, milite pour le verdissement d'espace de transition dans la ville. Son objectif est de créer des îlots modèles visant la lutte contre îlot de chaleur urbain, le réchauffement climatique et la pollution atmosphérique. Ce projet de verdissement comprend des plantations du domaine privé et public par des arbres, des vignes, des fleurs et des arbustes,

⁶² (Accès à l'immeuble, escalier extérieur, coursives, abri à vélos, terrasse collective, jardins...)

⁶³ (Jardinnet ou terrasse surélevée, jardin privatif en prolongement des logements du premier niveau...).

⁶⁴ **Plan directeur de quartier n°29298 B**, «*Aménagements extérieurs et concept énergétique*», Les constructions Pac La Chapelle - Les Sciers. Fichier PDF (consultée le 11.01.2008), p. 94-95.

⁶⁵ **Article**, «*Îlot de fraîcheur*», (page consultée le 13-01-2008), [En ligne], www.ecologieurbaine.net.

spécialement sur les trottoirs, les marges de recul ainsi que les cours avant et arrière. Mais aussi, par la construction de toits verts et toits blanc et la récupération d'eau de pluie (Fig. I-9).



Figure I- 9. Plantation dans la ruelle du Mile End à Montréal- Canada
(Source. www.ecologieurbaine.net)

Selon ces différents projets pilotes à travers le monde, les espaces attenants ou sur les bâtiments devraient être planter impérativement mais de façon réfléchie. La végétation devrait être utilisée au maximum et partout où cela est possible. On pourrait même l'utiliser dans des micros- surfaces. Watson et Camous⁶⁶ recommandent par exemple, l'utilisation de blocs de pavage engazonnés, pouvant être utilisés pour stabiliser les accotements et pour créer des aires de stationnements ou de repos attrayantes, bioclimatiques et écologiques (Fig. I-10). Alors qu'au Canada, la nouvelle tendance consiste à intégrer une végétation dite hors sol avec une nouvelle façon de verdir les petits espaces urbains tels que les toits, les balcons, les terrasses ou les escaliers. La Figure (I-10) montre des escaliers en colimaçon verdis grâce à un tuyau flexible rempli de substrat.



Figure I- 10. A gauche : Pavé engazonné. A droite : Escalier verdi
(Source. A gauche : Rairies Montrieux, 2008 www.rairies.com. A droite : www.rooftopgardens.ca)

⁶⁶ Donald Watson, Roger Camous, «L'habitat bioclimatique», Edition L'Etincelle, Canada, 1986. p.34.

3.2.2. Végétalisation des cours et patios :

Roland Rainer⁶⁷ définit les cours intérieures comme des espaces clos entre quatre murs, libérés de toute contrainte extérieure. Communément appelées «patios» dans l'architecture méditerranéenne, ces derniers ont une fonction bioclimatique surtout lorsqu'ils sont dotés de structures végétales⁶⁸. En effet, selon Shady Attia⁶⁹, la conception des patios jardins dans les maisons traditionnelles en pays islamiques n'a pas qu'un but ornemental ou religieux, elle obéit à un but de contrôle du microclimat autour et dans le bâtiment. Dans ce sens, une étude a démontré qu'il y a une différence de température de 4°C à 7°C entre la cour plantée et le toit de la maison grâce à l'effet de la végétation, qui permet aussi d'après Shady Attia (2006), d'absorber la poussière et la saleté dans ces cours et patios et réduit les réverbérations. La figure (I-11) montre l'impact de la végétalisation des cours sur les paramètres décrivant les facteurs d'ambiances dans le milieu urbain.

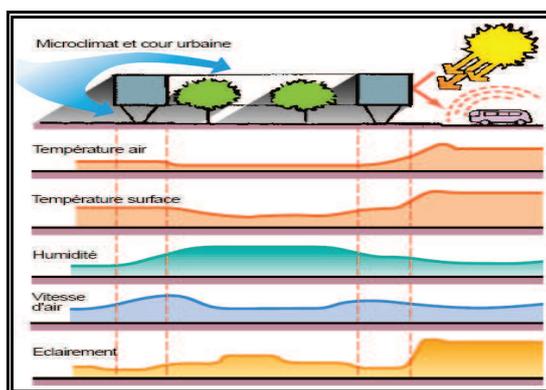


Figure I- 11. Variations des paramètres décrivant les facteurs d'ambiances dans une cour
(Source. ARENE, www.arena.fr)

Dans le cadre de la réhabilitation de quartier anciens en Europe, et afin d'améliorer le microclimat et combattre l'imperméabilité dans des zones de constructions très denses, on a procédé au verdissement des cours d'immeubles. A Copenhague par exemple, une politique systématique de restructuration des cours d'immeubles de la première ceinture urbaine a été lancée dès les années 70 par le conseil municipal. Elle a permis de créer dans les parties les plus

⁶⁷ Roland Rainer, «Les extérieurs vivants », « s. éd. », Suisse, 1972. p. 53.

⁶⁸ Dans les cours d'Anatolie, d'Espagne ou de Chine, les plantes sont disposées dans des pots pouvant être déplacés comme dans les appartements en fonction de leur besoin en soleil ou d'ombre ou carrément pour les protéger du froid en hiver (Roland Rainer, 1972- p.53).

⁶⁹ Shady Attia, «The Role of Landscape Design in Improving the Microclimate in Traditional Courtyard-Buildings in Hot Arid Climates», PLEA 2006, 23ème conférence, Genève, 6- 8 Sept. 2006.

denses de la ville environ 1ha de jardins d'immeubles par an, alors qu'à Munich la surface des cours reverdiées atteint 65 ha⁷⁰. Une politique qui doit être suivie dans tous les centres urbains.

3.2.3. Création de plafonds végétaux : tonnelle, pergola, auvent :

La végétation est soumise à une ascension vers la lumière, certaines plantes ont besoins de s'accrocher à des structures particulières qu'elles recouvrent sous différentes formes (horizontales ou verticales). Parmi les structures horizontales qui servent de support à des plantes grimpantes on retrouve : la pergola⁷¹, la tonnelle⁷², le berceau⁷³ et l'auvent. Ces derniers définissent un nouveau ciel et simulent le couvert des arbres.

D'après Chemetoff et al⁷⁴, les plantes grimpantes n'entravent pas l'espace mais le transforment et le décoorent (Fig.I-12). Ces structures horizontales permettent d'améliorer le confort selon les saisons. En été, elles apportent de l'ombre sous l'espace qu'elle recouvre en atténuant la lumière puissante du soleil en été, ce qui peut être profitable pour le confort thermique intérieur. Ces surfaces végétales ne font pas que prévenir des réflexions mais contribuent aussi au rafraîchissement par évapotranspiration⁷⁵. Cependant, les plafonds verdis doivent être conçues de manière à empêcher le maintien d'air chaud en dessous de la végétation.

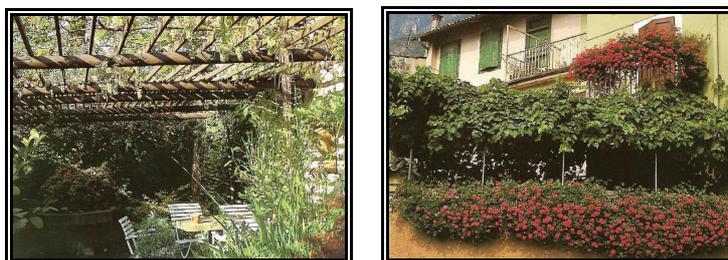


Figure I- 12. Pergolas recouvertes de végétation grimpante sur des terrasses
(Source. A. P. Furlani, 1996)

⁷⁰ Dominique Gauzin- Müller, «L'architecture écologique», Edition Le Moniteur, Paris, 2001. p.64-65.

⁷¹ La pergola est une construction faite de poutres horizontales, elle libère le sol et dessine l'espace

⁷² La tonnelle est un abri à sommet pointu ou arrondi qui repose sur des colonnes

⁷³ Le berceau est un treillage en voûte garni de verdure qui couvre un chemin (David Stevens, 1988. p.44)

⁷⁴ Alexandre Chemetoff, Jacques Coulon et Alain Marguerit, « Le végétal et l'architecture », Revue Technique et Architecture, N° 313, Edition Regirex, France, (Janv.- Fév. 1977). p. 102.

⁷⁵ N. Chrisomallidou, M. Chrisomallidis, T. Theodosiou, « Principes de conception et applications », In «Concevoir des espaces extérieurs en environnement urbain : une approche bioclimatique», projet RUROS, CRES, Grèce, 1998- 2002. p.44.

3.2.4. Le verdissement des fenêtres :

Dans le cas où l'habitation (appartement) ne possède pas un espace extérieur suffisant à planter (balcon, loggia, terrasse...), on peut recouvrir entièrement un bord de fenêtre étroit par des plantes pouvant constituer des écrans végétaux (Fig. I-13). En général, ce sont les espèces les plus résistantes qu'on met sur les fenêtres. Le verdissement des fenêtres permet de donner une note de verdure dans l'appartement et d'égayer aussi l'extérieur de la maison.

Ce verdissement peut s'avérer très bénéfique pour le confort thermique intérieur. En effet, une étude faite par Bass et al en 1997 sur des jardins verticaux recouvrant des fenêtres et des murs à Toronto, a révélée que le potentiel d'ombrage de la verdure est plus efficace pour réduire la température de surface de la fenêtre (vitrage) et l'énergie solaire transmise à l'intérieur du bâtiment⁷⁶.



Figure I- 13. Verdissement des bords de fenêtres par des Géranium et autres plantes
(Source. A. P. Furlani, 1996)

3.2.5. La végétalisation des murs :

En été, c'est plutôt l'échauffement des parois et de l'air qu'on doit réduire, les plantes grimpantes peuvent tapisser directement un mur (Fig. I-14) ou s'accrocher à un treillage. Elles jouent de ce fait, le rôle d'enveloppe thermique (vigne vierge,) surtout par la mise à l'ombre des parois. Les plantes grimpantes permettent donc de protéger les supports qu'elles recouvrent des méfaits de la pluie et des alternances brutales de températures. Elles atténuent aussi, d'après Furlani (1996) et Bonduel (2005), les réverbérations excessives (émission de grande longueur d'onde) qui surchauffent l'espace pendant les heures d'insolation. Ce revêtement végétal constitue donc un isolant préventif des murs.

⁷⁶ Karima Benhalilou, « Impact de la végétation sur le confort hygrothermique estival du bâtiment ». Mémoire de magistère. Université de Constantine. 2008. p.117-119.



Figure I- 14. Façade recouverte d'un mur végétal
(Source. A gauche : www.ec.gc.ca. A droite : www.canevaflor.com)

La température moyenne des murs protégés par des arbres ou autres plantes peut être réduite de 15°C ⁷⁷. Selon Watson et Camous, lorsque la température du mur est abaissée, moins de chaleur est transmise vers l'intérieur. Donc, si une couverture de lierre montée sur treillis permet de réduire de 50% du rayonnement solaire qui frapperait le mur orienté Ouest, on peut estimer que l'on obtiendra une réduction des gains de chaleur d'environ 550 kJ/m^2 au cours d'une journée d'été⁷⁸.

Une expérimentation faite par Benhalilou⁷⁹, a révélé le rôle important du mur végétal sur le rafraîchissement intérieur sous un climat semi aride. L'écart moyen trouvé entre les températures intérieures de deux maisons (orientées Sud- Sud Ouest ; l'une recouverte à 100% de vigne vierge vraie et l'autre sans végétation) est de 2.33°C avec un écart maximal de 4.4°C . Cependant, on ne peut transposer les résultats des recherches sur tous les bâtiments, mais elles nous permettent néanmoins de conclure que l'utilisation d'écrans végétaux est un moyen efficace de réduire la consommation d'énergie employée pour le rafraîchissement des bâtiments.

3.2.6. Plantation sur balcon et terrasse :

Les balcons et terrasses représentent l'extension de l'espace intérieur. Chemetoff et al⁸⁰ affirment que ces espaces entre ciel et terre échappent à un rôle spécifique : ils peuvent être des pièces d'extérieur à part entière ou, un débordement libérateur d'un salon renfermé. Pour eux, et d'après le vécu des gens, le balcon est un lieu du possible, partant du débarras au jardin

⁷⁷ TAREB, «*Intégration architecturale*» In «*The Low Energy Architecture Training Course*», London Metropolitan University, 2004. p.26. Fichier PDF, [En ligne], www.iee-library.eu

⁷⁸ Donald Watson, Roger Camous, «*L'habitat bioclimatique* », Edition L'Etincelle, Canada, 1986. p.37

⁷⁹ Karima Benhalilou, «*Impact de la végétation sur le confort hygrothermique estival du bâtiment* », Mémoire de magistère, Université de Constantine, 2008. p.164, 173.

⁸⁰ Alexandre Chemetoff, Jacques Coulon et Alain Marguerit, «*Le végétal et l'architecture* », Revue Technique et Architecture, N° 313, Edition Regirex, France, (Janv.- Fév. 1977). p. 98-99.

merveilleux (Fig. I-7). Plusieurs types de végétalisations peuvent être prévus dans des pots sur les balcons et les terrasses, à savoir : des plantes grimpantes aromatiques ou ornementales pour cacher les murs de communications, habiller les façades, protéger du vis-à-vis ou constituer des brises-vents. Ceci a l'avantage de modifier favorablement l'environnement et de créer un microclimat⁸¹.

3.2.7. Les toits végétaux :

Le toit est la partie du bâtiment la plus exposée aux conditions climatiques. Sachant que, la température au dessus du toit affecte la température de la basse atmosphère, puisqu'il se trouve que certains toits d'immeubles (les tours) sont directement au niveau de celle-ci. La réduction des températures sur les toits peut réduire les températures de l'air extérieur et par là, la consommation énergétique pour le conditionnement de l'air en été et en hiver⁸².

C'est ce qui a rendu la végétalisation des couvertures horizontales ou inclinées des bâtiments une alternative au rafraîchissement des centres urbains et des bâtiments. Cette pratique devient de plus en plus recommandée et même exigée dans les centres urbains des villes développées vu le manque d'espaces verts au sol. La végétalisation des toits et son apport sur le rafraîchissement intérieur seront l'intérêt de la présente recherche.

3.2.7.1. Définition du toit :

Le toit est la partie supérieure d'un bâtiment. C'est une couverture qui met le bâtiment à l'abri des intempéries (pluie, neige, grêle, vent et soleil). Le toit doit être d'abord muni de membrane d'étanchéité afin d'éviter les infiltrations de l'eau à l'intérieur du bâtiment, puis doté de différents revêtements qui protègent celle-ci (dalle en bois, carrelage, tuiles, gravillons...).

Le terme toiture-terrasse vient de ce que, dans l'antiquité, la toiture ainsi dénommée était recouverte de terre⁸³. C'est une couverture dont la pente est inférieure à 15%⁸⁴. D'après, Mouchel et Balayer (1978), la toiture terrasse trouva d'abord son application en Grèce, en

⁸¹ Philippe Bonduel, « Jardins de poche », Editons Solar, Paris, 2005.

⁸² Brad Bass et Bas Baskaran, «Evaluating Rooftop and Vertical Gardens as an Adaptation Strategy for Urban Areas», NRCC- 46737, Projet n° A020, Canada, 2003, p.03. Fichier PDF, [En ligne] <http://irc.nrc-nrc.gc.ca/ircpubs>.

⁸³ A.Mouchel et T.Balayer, «La couverture : Etanchéité des toitures- terrasses», Editions Eyrolles, Paris, 1978. p.237.

⁸⁴ Classification selon la réglementation française ; DTU. N°43 (Oct.75), qui classe la toiture-terrasse comme suit : pente nulle, toiture terrasse plate (pente de 1 à 5%), toiture-terrasse rampante (pente de 5 à 15%), et toiture inclinée (pente > 15% à géométrie complexe telle que les paraboloides hyperboliques) (In A.Mouchel & T.Balayer, 1979, p.237)

Egypte, en Perse et dans tout le bassin méditerranéen avant de s'étaler au Nord d'Europe et en Amérique.

Les toitures-terrasse peuvent dispenser sans frais supplémentaires des espaces utilisables pour divers usages (restaurants, jardins et solariums...). Elles augmentent l'espace utilisable et permettent de profiter de panoramas qu'on ne peut voir au niveau du sol.

3.2.7.2. Classification des toits :

Les toitures sont classées en général selon leur accessibilité et selon leur pente. D'après le Centre National de la Recherche de l'Industrie du Bâtiment (CNERIB)⁸⁵, la classification en Algérie selon l'accessibilité regroupe :

- Les toitures terrasses inaccessibles.
- Les toitures terrasses accessibles à la circulation piétonnière et au séjour.
- Les toitures terrasses techniques ou « à zone technique ».
- Les toitures terrasses accessibles à la circulation et au stationnement des véhicules légers.
- Les toitures terrasses accessibles à la circulation et au stationnement des véhicules lourds.
- Les toitures terrasses-jardins.

D'autres part, la classification selon les pentes comportent : les toitures à pente nulle ($P \leq 2\%$), les toitures plates ($2\% \leq P \leq 5\%$) et les toitures inclinées ($P \geq 5\%$).

3.2.7.3. Incitations à la végétalisation des toits dans les centres urbains:

Dans les zones urbaines du monde entier, la végétalisation de grandes surfaces permet de diminuer partiellement le phénomène d'îlot de chaleur urbain et les fortes pollutions comme elle influe positivement sur le microclimat et le bâtiment.

Voici quelques exemples de pays développés qui ont opté pour l'instauration de règlements, méthodes incitatives ou pénalisations afin de généraliser l'installation des toitures végétales.

- **L'Allemagne** : est l'un des premiers pays à avoir développé le principe de la végétalisation des toitures⁸⁶. Ceci a été stimulé en grande partie par la *législation locales* et une

⁸⁵ CNERIB, «Travaux d'étanchéité des toitures : terrasses et toitures inclinées (support en maçonnerie)», Document Technique Règlementaire, D.T.R. E4-1, CNERIB, Alger, 2005. p.2.

réglementation appropriée sur la construction de ces toitures. D'autre part, plusieurs provinces et villes allemandes se sont appropriées des méthodes incitant à la végétalisation des toits. Celles-ci sont inscrites soit dans les **codes de bâtiment** ou dans les **POS** (Plan d'Occupation du Sol) de plusieurs communes. D'autres villes les intègrent dans les **plans d'aménagement ou Plan d'Urbanisme** comme composante de l'environnement tel que Stuttgart qui a adopté cette solution depuis plus de quinze ans⁸⁷. Quand à Fribourg, c'est plutôt les **décrets municipaux** qui imposent ce genre de toitures⁸⁸.

Depuis la fin des années 1980, des **incitations financières et des subventions** sont proposées pour encourager l'installation des toitures végétalisées. A Berlin, par exemple, la ville prend à sa charge 60% des dépenses liées aux toitures végétalisées et à l'installation de traitement de l'eau de pluie⁸⁹.

Toutes les villes allemandes perçoivent, par contre, **une taxe** sur les surfaces imperméabilisées raccordées à une canalisation. Selon Gauzin-Müller (2001), d'autres communes préfèrent appliquer une **réduction à la taxe** sur les surfaces imperméabilisées lorsque les toitures sont végétalisées (avec une baisse d'environ 50% à Fribourg, Aix-la-Chapelle, Paderborn et Giessen); alors que d'autre adoptent la **gratuité** tel qu'à Hildesheim. De nombreuses villes appliquent depuis déjà plusieurs années un **principe de compensation ou de pénalisation** concernant la présence ou non de toiture végétalisée.

➤ **En France** : une prise de conscience des pouvoirs publics semble lentement émergée. Ainsi, plusieurs tentatives incitent à l'installation des toitures végétalisées, la première étant la **Réglementation Thermique des bâtiments neufs** de 2005. D'autre part, les **PLU** (plans locaux d'urbanisme) établissent qu'au titre de l'article 13 du règlement de PLU des communes : « *Il est possible d'envisager une bonification conditionnelle qui permet de comptabiliser dans la surface des espaces verts obligatoires à la parcelle, les toitures végétalisées* ». Ainsi le **PLU** de Paris s'appuie non pas sur un nombre minimal de mètres carrés d'espaces verts par

⁸⁶ Les surfaces végétalisées sont de 7 millions de m² pour la première décennie (1980-1990), et de 60 à 70 millions de m² pour la décennie (1990-2000). Le marché annuel de la végétalisation de toiture en Allemagne représentait jusqu'à 15 millions de m² pour l'année 2001 (dont 10% à 20% pour la végétalisation intensive et 80% à 90% pour celle extensive) (F.Lassale, 2006. p.129)

⁸⁷ **Dominique Gauzin- Müller**, «L'architecture écologique ; 29 exemples européens». Editions Le Moniteur, Paris, 2001. p.106.

⁸⁸ **Article**, «Végétalisation des bâtiments : mettons le coût- vert ! », (Paru le 19 octobre 2008, consultée le 30-12-09), [En ligne] <http://www.lyon-democrate.org>.

⁸⁹ **CSTB**, «Technique du solaire thermique. Architecture : la toiture végétalisée... à l'étranger...», (page consultée le 03-03-2008), [En ligne], www.resosol.org.

habitants, mais sur un indicateur nouveau et qualitatif le « *Coefficient de biotope* ⁹⁰ ». Celui-ci est surpondéré dans les cas où un nouveau bâtiment est construit en zone identifiée comme déficitaire en espaces verts⁹¹. En France plusieurs acteurs militent pour l'expansion de l'aménagement des toits végétaux, tel que Lassalle qui affirme : « *Il devient urgent d'obtenir enfin la possibilité d'assimiler les toitures végétalisées à des espaces verts... Il est temps que les communes acceptent d'intégrer la végétalisation dans le coefficient d'espaces verts exigé par leur Plan Local D'urbanisme* »⁹².

Un principe **d'encouragement** est aussi appliqué dans certains Plans D'urbanisme, tel que celui la zone artisanale de Landacres près de Boulogne- sur- Mer. Ce dernier octroie 10% de surface constructible supplémentaire en cas de végétalisation de l'ensemble des toitures⁹³.

- **Etats-Unis** : les villes de Chicago, Seattle et Portland ainsi que tout l'état du Maryland ont maintenant des lois concernant l'incorporation des toits verts sur les nouvelles constructions⁹⁴. Elles offrent par ailleurs des incitations fiscales aux propriétaires de bâtiment qui choisissent d'installer des toits végétaux dans le but de réduire l'écoulement des eaux pluviales⁹⁵.
- **Japon** : la ville de Tokyo exige que toute construction occupant plus de 10 000 pieds carrés (929m²) de terrain soit couverte de végétaux sur 20 % de sa surface⁹⁶. Alors que depuis déjà quelques années, tous les nouveaux gratte-ciels de Tokyo doivent obligatoirement comporter un jardin sur leurs toits⁹⁷.
- **La Suisse** : exige dans certaines villes de restituer sur le toit de chaque nouvel immeuble un espace vert équivalent à la surface occupée au sol⁹⁸. A Zurich, une obligation est faite au maître d'ouvrage de végétaliser toute nouvelle terrasse plate. Quand à la ville de Bâle, elle

⁹⁰ Si le constructeur ne peut répondre à ses obligations de restauration de zones végétalisées, il doit construire des murs et/ou terrasses ou toitures végétalisés.

⁹¹ « *Quinzième cible HQE* », (Page consultée le 12-2009), [En ligne], <http://dictionnaire.sensagent.com>.

⁹² **François Lassalle**, « *Toitures végétalisées : Un retard français que l'excellence des entreprises peine à combler* », (Page consultée le 27-12-2009), [En ligne], www.actu-environnement.com.

⁹³ **François Lassalle**, « *Végétalisation extensive des terrasses et toitures, 34 réalisations exemplaires* », Editions Le Moniteur, Paris, 2006. p. 138.

⁹⁴ **Dany Laroche et al**, « *Les toits verts aujourd'hui ; c'est construire le Montréal de demain* » Mémoire présenté à L'office de consultation publique de Montréal dans le cadre du nouveau plan d'urbanisme 2004 », Montréal, 30 juin 2004. p.14.

⁹⁵ **Roger N.Hiltten**, « *An Analysis of the Energetics and Stormwater Mediation Potential of Greenroofs* », Mémoire de master en Science, Université GEORGIA, 2005. p.01.

⁹⁶ **Article**, « *La toiture végétalisée : Une technique d'aménagement durable* », (Page consultée le 07-06-2008), [En ligne], <http://www.toiture-bio.com/toitvert.htm>.

⁹⁷ **CSTB**, « *Technique du solaire thermique. Architecture : la toiture végétalisée... à l'étranger...* », (page consultée le 03-03-2008), [En ligne], www.resosol.org.

⁹⁸ **Dany Laroche et al**, *op. cit.*, p.16.

subventionne à hauteur de 40% la végétalisation extensive de toiture sur son territoire, en ayant pour but de végétaliser annuellement l'équivalent de quatre terrains de football (20 000 à 30 000m²)⁹⁹. D'autre part, la ville de Baden en Suisse, va jusqu'à prélever une taxe de 40 francs suisses par mètre carré de surface bâtie pour les bâtiments sans végétalisation de toit et sans infiltration de l'eau pluviale¹⁰⁰.

- **Canada** : les toits verts ne sont pas traités dans le Code national du bâtiment du Canada cependant, selon Dany Laroche et al (2004), le gouvernement a annoncé le 24 mai 2004 que les toits végétaux seraient admissibles aux Programmes de Subvention pour le Financement des bâtiments Econergétiques. Le programme de financement IEE (Initiative des Innovateurs Énergétiques) peut financer jusqu'à 50% des coûts de planification et jusqu'à 25% des coûts des travaux pour les bâtiments commerciaux et institutionnels, selon l'évaluation des économies énergétiques réalisables¹⁰¹.

Toronto devient la première grande ville canadienne à rendre les toits verts obligatoires sur les nouveaux édifices. Le conseil municipal a approuvé un nouveau règlement qui stipule qu'au moins 20 % de la surface de chaque toiture des nouvelles tours de bureaux et d'appartements devront être recouvertes de végétaux ainsi que les édifices industriels et les écoles. Toronto, par cette loi, prévoit une nouvelle occasion de renforcer la nouvelle pratique de la conception intégrée de bâtiment écologique¹⁰².

En ce qui concerne **l'Algérie**, la végétalisation des toitures, une démarche bioclimatique encore négligée, n'est pas du tout prise en compte dans les Plans Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme ou les Plans d'Occupation au Sol. Et ce, dans le cadre du développement durable ou de la gestion énergétique des bâtiments, ou même dans le cadre d'augmentation des espaces verts dans les centres urbains. Elle est timidement citée dans le **(DTR. B.C.2.2)**¹⁰³ comme dalle-jardin et dans le **(DTR. E4-1)**¹⁰⁴.

⁹⁹ **François Lassalle**, «*Végétalisation extensive des terrasses et toitures, 34 réalisations exemplaires*», Editions Le Moniteur, Paris, 2006. p.130.

¹⁰⁰ **CSTB**, «*Technique du solaire thermique. Architecture : la toiture végétalisée... à l'étranger...*», (page consultée le 03-03-2008), [En ligne], www.resosol.org.

¹⁰¹ **Dany Laroche et al**, «*Les toits verts aujourd'hui ; c'est construire le Montréal de demain*» Mémoire présenté à L'office de consultation publique de Montréal dans le cadre du nouveau plan d'urbanisme 2004 », Montréal, 30 juin 2004. p.13

¹⁰² **Sylvain Michel**, «*Toitures végétalisées obligatoires à Toronto*», (Article paru le 29 Mai 2009, consultée le 29-12-09), [En ligne], www.ddmagazine.com.

¹⁰³ **(DTR. B.C.2.2)** : «Charges permanentes et charges d'exploitations».

¹⁰⁴ **(DTR. E4-1)** : «Travaux d'étanchéité des toitures terrasses et toitures inclinées».

Contrairement aux démarches de végétalisation dans les pays développés dans le cadre du développement durable, la loi de 2007 relative à la gestion des espaces verts¹⁰⁵ ne prend en considération que la végétation au sol. Elle impose que « toute production architecturale et/ou urbanistique doit intégrer et prendre en charge la nécessité de prévoir des espaces verts selon les normes » (Art.28) et que « toute demande de permis de construire est refusée si le maintien des espaces verts n'est pas assuré, ou si la réalisation du projet entraîne la destruction du couvert végétal » (Art. 16).

D'autre part, le décret exécutif portant réglementation thermique des bâtiments neufs (n° 2000-90) laisse aux concepteurs et aux maîtres d'ouvrage la possibilité de choisir les solutions capables d'améliorer la performance thermique du bâtiment sans donner de détails sur les techniques à privilégier telle la végétalisation des toits par exemple.

Par ailleurs, dans le cadre d'un vaste projet d'aménagement d'une « Trame verte » couvrant l'ensemble de l'agglomération de Constantine, la Direction de L'environnement, l'APC de Constantine et la Conservation des Forêts, ont projetés de combler un déficit d'espaces verts dans la commune de Constantine de l'ordre de 310 ha (calculé sur la base d'une norme de 10m² par habitant), sachant que le ratio actuel est de 2.96m²/hab¹⁰⁶. La végétalisation consiste essentiellement en l'aménagement d'un parc citadin (à Ain El Bey), de nouveaux jardins publics, de jardins résidentiels, de bosquets, de plantations diverses et d'accompagnements de voiries. Mais aussi par la réhabilitation des jardins existants et le boisement des berges du Rhumel et toutes les poches inconstructibles.

On voit clairement qu'aucune, notion de végétalisation des espaces de transitions Rue-bâtiment, des murs ou des toits n'est d'actualité dans les programmes de verdissement en Algérie comme à l'exemple de ce qui se fait dans les pays développés dans le cadre de la réduction de l'effet d'îlot de chaleur urbain.

Cependant, certains ministères ont opté pour une végétalisation timide des toitures de leur bâtiment, sous forme de grandes jardinières tels que le ministère de l'énergie (Hydra- Alger), ou le futur bâtiment du ministère des affaires étrangères (Alger) avec une plantation de palmier sur le toit. Ces derniers sont réalisés avec le procédé d'étanchéité SOPREMA.

¹⁰⁵ Loi n° 07-06 du 13 mai 2007 « Relative à la gestion, à la protection et au développement des espaces verts » Journal officiel de la république algérienne, Fichier PDF.

¹⁰⁶ A.Bousaid, «Pour un programme de réhabilitation des espaces verts», Journal El Watan, Algérie, Jeudi 03-1-2009, p.11.

Conclusion :

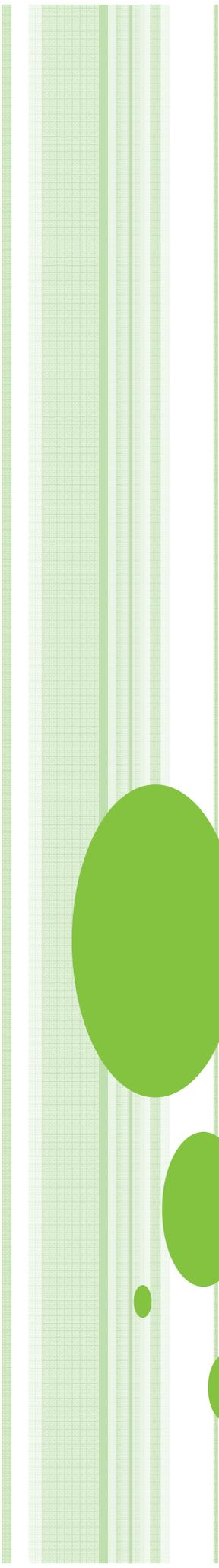
La contribution de l'étalement urbain et des constructions dans les bouleversements climatiques est évidente. Il s'avère que le secteur du bâtiment consomme plus d'énergie que les autres secteurs et qu'il dégage plus de polluants. Par ailleurs, le réchauffement des centres urbains a entraîné une surconsommation d'énergie pour la climatisation dans tous les pays, notamment en Algérie.

Pour cela, repenser l'urbanisme, l'architecture et les réglementations thermiques des bâtiments est devenu la devise à adopter, afin de diminuer de l'effet d'îlot de chaleur urbain, d'assurer un environnement urbain sain et agréable et de créer des intérieurs confortables en toute saison. Ceci peut se faire, en adaptant l'architecture au climat et en créant un microclimat dans l'environnement immédiat des constructions. La création de microclimat peut être bénéfique surtout en été, puisqu'elle permet de rafraîchir l'extérieur mais aussi l'intérieur des bâtiments par des aménagements minéraux adéquats, l'intégration des sources d'évaporation (fontaines et végétation), et l'ombrage des bâtiments procuré notamment par l'intégration de l'élément végétal au contact et sur le bâtiment.

La végétalisation des espaces au contact des bâtiments est devenue une priorité dans les pays développés (espaces de transitions Rue- Bâtiment, les cours, les patios, pergolas...). De même que l'habillage de l'enveloppe du bâtiment par des fenêtres, des murs et des toits verdis. Outre l'esthétisme, ces derniers sont considérés comme espaces verts complémentaires qui réduisent le recours systématique à la climatisation.

La végétalisation des toits est une stratégie écologique de rafraîchissement des bâtiments très prisée dans les pays développés, surtout en Allemagne. Pour cela, elle fait l'objet de diverses incitations financières et de subventions auprès des services publics ou privés afin de vulgariser son utilisation et restituer sur les terrasses les surfaces prises au sol.

Pour une meilleure compréhension du rôle important que joue le toit végétal, il est important de bien maîtriser la composition même de ce dernier et ses caractéristiques. Ce qui fera l'objet du prochain chapitre.



Chapitre II



**Les toits végétaux 1:
Caractéristiques et composantes**

Introduction :

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. Le but 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 nuit¹. 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 surtout uniformisées. Les toits horizontaux ou en pente, accessibles ou pas peuvent être directement recouverts de végétation. Ces derniers prennent différentes dénominations selon le type créé : terrasses jardins, toitures végétalisées, jardin sur dalle, toits verts... et sont considérés comme la seule possibilité de création de nouvelles surfaces de verdure dans les centres urbains.

Le présent chapitre retrace d'abord 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.

Par ailleurs, une attention particulière est portée 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 à travers ce chapitre est dû à l'adaptabilité de ce système à différentes situations : toits en pente, toits plats, construction neuve ou existante.

I. Les concepts de végétalisation des toits :**1. Définition du toit végétal :**

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

¹ Samir Abdulac, «*Traditional Housing Design in Arab Countries*», In «*Urban Housing* » sous la direction de Margaret Bentley, Edition Sevckenko, 1982, p.5, (Fichier PDF consulté le 27-02-2008), [En ligne], www.archnet.org.

Végétalisées² 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* (dite) *verte* ou *végétale* est souvent liée à sa composition ou sa fonction.

- D'après l'encyclopédie Wikipédia : 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° et rarement plus, au-delà, on parlera de mur végétalisé)³.
- L'encyclopédie Larousse, définit la *toiture végétalisée* comme étant une toiture recouverte d'un tapis végétal pour obtenir une meilleure intégration dans un site⁴.
- «*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*»⁵.

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*. 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 (Voir annexe II).

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...).

² Adivet, CSFE, SNPPA, UNPE, «*Règles Professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées* », 2^e éd., Paris, novembre 2007. p.09.

³ Encyclopédie Wikipédia, « *La toiture végétale* », (page consultée en mars 2008), [En ligne], <http://fr.wikipedia.org>.

⁴ Encyclopédie Larousse, « *La toiture végétalisée* », (page consultée le 28.12.09), [En ligne], <http://www.larousse.fr>.

⁵ Theodore Osmundson In Beau Henderson, «*Human-Driven Extensive Greenroof Design*», master of Landscape Architecture, Virginia Polytechnic Institute & State University, Juin 12, 2003. p.16.

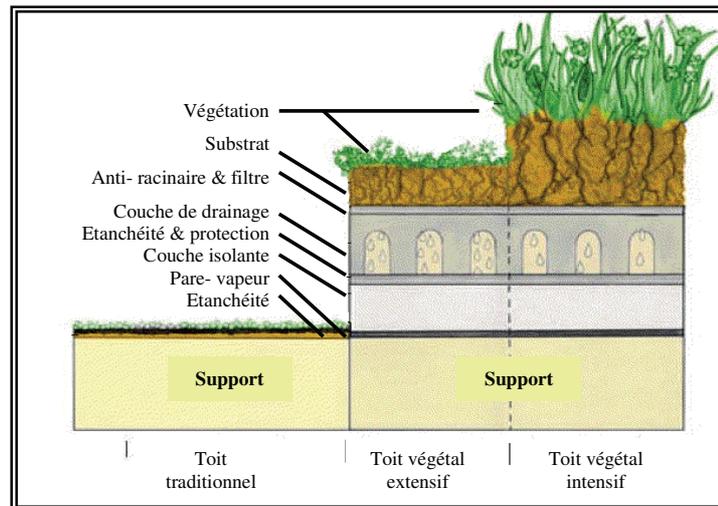


Figure II- 1. Types de toits végétaux
(Source. www.toiture-bio.com)

La terrasse à végétation intensive est caractérisée par un complexe de culture composé de terre végétale et d'un drainage (Fig. II-1). 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, qui doivent être prises 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.

2.2 La végétalisation extensive :

La végétalisation extensive⁶ 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 (mousses, succulentes, vivaces et graminées), et l'apparition des espèces voisines fait partie de la dynamique naturelle du monde végétal⁷.

⁶ **Extensive** : se rapporte à l'entretien extensif par opposition à l'entretien intensif (selon les concepts allemands) alors qu'en français, « extensive » fait référence au principe de colonisation naturelle, qui produit en quelque sorte une extension naturelle de la végétation

⁷ **François Lassalle**, «Végétalisation extensive des terrasses et toitures : 34 réalisations exemplaires», Editions Le Moniteur, Paris, 2006. p. 27.

Ce type de toit végétal (Fig. II-1) 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 adaptable 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 les 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.

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%⁸. 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. Historique sur l'apparition des 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 605-562 av. J.C⁹. Ces jardins furent construits par *Nabuchodonosor II* afin de rappeler à son épouse

⁸ **Adivet, CSFE, SNPPA, UNPE**, « Règles Professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées », 2^e éd., Paris, novembre 2007. p.10.

⁹ **Jellicoe et Jellicoe** (1987), In **Marie-Anne Boivin**, « Influence de l'épaisseur du substrat de culture et du microclimat sur l'acclimatation de six espèces vivaces herbages cultivées 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, 1999. p.2.

Amytis de Mèdes les montagnes boisées de son pays natal. Ils furent longtemps considérés comme l'une des sept merveilles du monde. La figure (II-2) représente une gravure de ces jardins faite par Maarten van Heemskerck au XVI^e siècle.



Figure II- 2. Jardins suspendus de Babylone
(Source. www.wikipédia.com)

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 haut¹⁰. 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 (Voir Annexe II).

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 (Irlande, Norvège, Suède...) sous l'appellation de *Chalet norvégien* (Fig. II-3). L'utilisation de ces toitures n'a atteint les prairies du Nord d'Amérique qu'au 19^{ème} siècle¹¹.

¹⁰ **J.L.Larcher et T. Gelgon**, « *Aménagement des espaces verts urbains et du paysage rural* », 3^e éd. Edition TEC & DOC, Paris, 2000. p 7-8.

¹¹ **Wânia Cruz do Nascimento et Aloísio Leoni Schmid**, « *From the Modern Toits Jardins to the Current Green Roofs: Can a Hit Become Classic?* », PLEA 2008, pp. 684, 25^{ème} Conference, Dublin, 22-24 Octobre 2008.

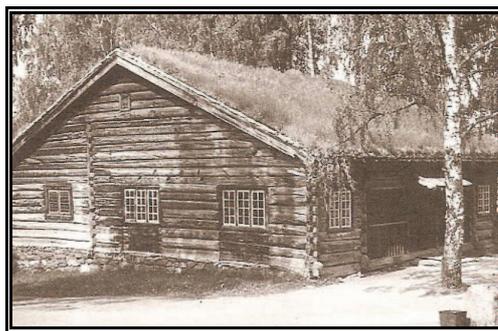


Figure II- 3. Illustration type du chalet norvégien.
(Source. François Lassalle, 2006)

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 (Gautemala et la Tanzanie), où l'on utilisait une végétalisation comparable à celle des pays nordiques¹². 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 XVIII^e siècle en Suède, le botaniste Linné a commencé à décrire des toits couverts de jubarbes à Stockholm¹³. 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 certains auteurs, 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 béton¹⁴. Ce qui est plus exact, puisque la généralisation du béton armé dans les constructions et l'apparition de toitures plates au 20^{ème} siècle (dans les années 20) avec les cinq points de l'architecture moderne a généralisé l'idée des toitures- terrasses utilitaires

¹² Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEP), « Toits végétalisés », Cahier de l'environnement, n° 216 ; Protection des eaux- protection des paysages, Berne, 1995. p.12.

¹³ ADIT-AFP, « Toitures végétalisées : un procédé ancien, des techniques d'avenir », (article paru en 2004), [En ligne], <http://www.actu-environnement.com>.

¹⁴ Dunnnett (1926), In Tobias Emilsson, "Extensive Vegetated Roofs in Sweden Establishment, Development and Environmental Quality", Thèse de doctorat, Swedish University of Agricultural Sciences, 2005. p.09

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 travail¹⁵. 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 envahi 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

¹⁵ **Wânia Cruz do Nascimento et Aloísio Leoni Schmid**, «From the Modern Toits Jardins to the Current Green Roofs: Can a Hit Become Classic?», PLEA 2008, n°: 684, 25^{ème} Conference, Dublin, 22-24 Octobre 2008.

premières directives de base de planification, d'exécution et d'entretien des systèmes de végétalisation sont publiées en Allemagne dès 1982¹⁶ par la FLL¹⁷.

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.

II. Les composants types 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'emplacement¹⁸. D'après, W.Grün, 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 thermosoudés ou collés non métalliques¹⁹.

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

¹⁶ **Marie-Anne Boivin**, « *Influence de l'épaisseur du substrat de culture et du microclimat sur l'acclimatation de six espèces vivaces herbages cultivées 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, 1999. p.2-3

¹⁷ **FLL**: en allemand : Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau, qui signifie: «Groupe de recherche sur le développement et la réalisation en paysage».

¹⁸ **Wolfgang Grün**, « *La verdure sur les façades et les toitures* », Revue Technique & Architecture, n°313, Jan.- Fev. 1977, Edition, Regirex, France, p.29-30.

¹⁹ **Article**, « *Toiture végétales* », (page consultée en mars 2009), [En ligne], www.Wikipédia.com.

protège l'élément porteur de l'humidité et des infiltrations de l'eau, et le « **complexe de culture** » qui comprend la couche de drainage²⁰, la couche filtrante et le substrat de culture. La végétation est ensuite installée selon différents modes de mise en œuvre. La figure (II-4) montre la disposition type des principales composantes de la toiture végétalisée.

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...

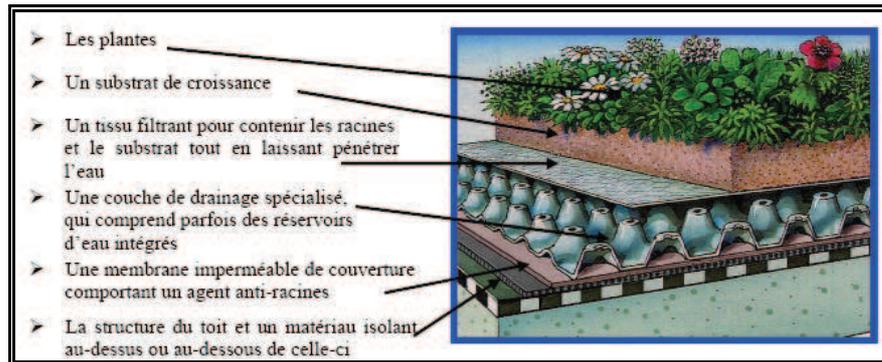


Figure II- 4. Les composantes types des toits végétaux
(Source. Dany Laroche et al, 2004)

1. Le complexe étanchéité- isolation :

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 (λ) 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

²⁰ La couche de drainage fait partie du complexe de culture seulement si celle-ci permet le développement des racines (matériaux en agrégats minéraux poreux tels que pouzzolane, pierre ponce... et non pour les matériaux synthétiques)

préparé par une couche d'imprégnation et protégé par un pare- vapeur²¹, afin d'éviter la formation de condensation sous l'isolant.

Pour les pentes ≤ 5 %, l'utilisation de panneaux isolants en isolation inversée²² est également admise selon leur Avis Technique ou Document Technique d'Application²³.

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'étanchéité²⁴. 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 Soprature 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- racines²⁵.

2. 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

²¹ Pare- vapeur : le procédé Soprature de SOPREMA, utilise une membrane souple de bitume oxydé et armé d'une toile de verre. Les lés sont soudés sur la couche d'imprégnation.

²² Isolation inversée : L'isolant est placé sur la dalle et sur l'étanchéité.

²³ **Adivet, CSFE, SNPPA, UNPE**, «*Règles Professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées*», 2^e éd., Paris, novembre 2007. p.14.

²⁴ **François Lassalle**, «*Végétalisation extensive des terrasses et toitures : 34 réalisations exemplaires*», Editions Le Moniteur, Paris, 2006. p. 86-87

²⁵ **SOPREMA- Algérie**, «*Etanchéité terrasse jardins*», vidéo In «*Etanchéité bitume modifié SBS*», [CD-ROM], Soprema- Algérie.

couche de drainage si celle-ci est constituée d'agrégats minéraux (argile expansée, pouzzolane...) pouvant être considérés comme un support de culture²⁶.

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 (Fig. II-5):

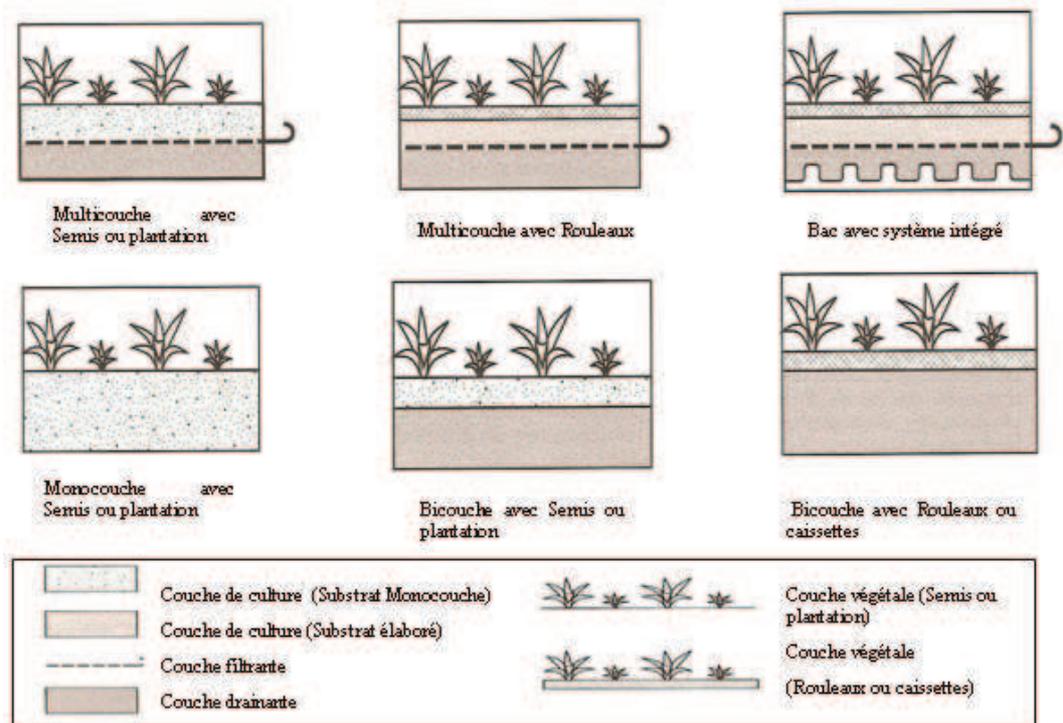


Figure II- 5. Les principales configurations utilisées en végétalisation extensive de toiture
(Source. François Lassalle, 2006. réadaptée par auteur)

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-érosion²⁷.

²⁶ François Lassalle, «Végétalisation extensive des terrasses et toitures : 34 réalisations exemplaires», Editions Le Moniteur, Paris, 2006. p.102.

²⁷ Adivet, «Questions fréquentes», (page consultée en Mars 2008), [En ligne], <http://www.adivet.net>.

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 précultivés (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 précultivées. Parfois les systèmes précultivés 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.

2.1 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) (Voir en annexe II). 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 (Fig.II-6). 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 (Fig.II-7), 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/m^3 ²⁸.

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 prémoulés²⁹. La figure (II-8) montre l'installation par la société Soprema d'un drainage en

²⁸ SOPREMA, « Sopranature, sur toiture de pentes $\leq 20\%$ », Cahier de Prescriptions de Pose (CCP), N° 02/055F, éd. Du 20 dec. 2002, France. 2002. p. 26.

plaque de polystyrène expansé (1m x 1m) pour les jardinières aménagées sur les terrasses des deux tours du Ministère de l'énergie à Hydra (Alger).

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 (Fig. II-9) (Annexe II).



Figure II- 6. Drainage d'agrégat minéral
(Source. www.vegetalid.com)



Figure II- 7. Drainage en gravillons
(Source. Sopranature, Soprema, 2008)

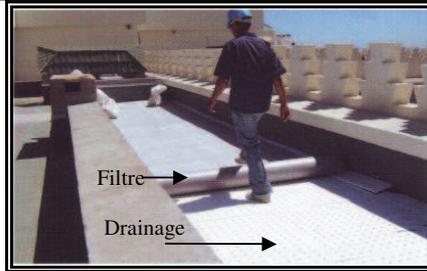


Figure II- 8. Drainage en polystyrène expansé recouvert du filtre
(Source. Soprema Algérie, Borchure 2009)

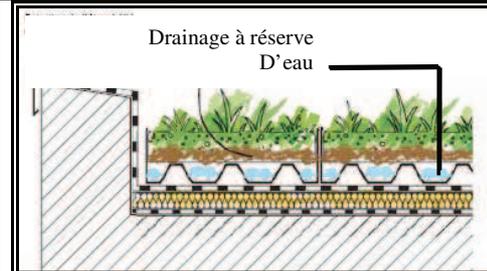


Figure II- 9. Bacs précultivé à réserve d'eau
(Source. Brochure Verdura, Eternit, 2008)

2.2 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 (voir en annexe II).

²⁹ Adivet, CSFE, SNPPA, UNPE, «Règles Professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées », 2^e éd., Paris, novembre 2007. p.11-16.

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 drainage³⁰. En général, la couche filtrante est simplement déroulée sur la surface courante (Fig. II-8) et relevée contre les reliefs ou dispositifs de séparation jusqu'au niveau supérieur de la couche de culture.

2.3 Substrat de culture :

En général, la terre végétale est constituée essentiellement d'éléments solides minéraux (cailloux, gravier, sable, limon, argile...) et d'éléments organiques tel que l'*humus*³¹.

En agriculture, un *substrat* est un mélange (terre, sable, compost, etc.) sur lequel on fait des semis³². 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 pauvre³³, 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 terre³⁴ (Annexe II).

L'épaisseur totale du substrat peut ainsi être réduite à seulement 10 cm d'épaisseur, voire moins pour les rouleaux prévégétalisés 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 plantes³⁵. Le tableau (II-1) montre les plages d'épaisseur du substrat pour différents types de végétalisation et leurs épaisseurs moyennes.

³⁰ Exemple : substrat 4 cm sur drainage 5 cm- on met une couche filtrante. Substrat 4 cm sur drainage 8 cm- on ne met pas de couche filtrante. (SOPREMA (CCP), 2002- p.26)

³¹ L'humus provient de la décomposition des végétaux, il a la capacité d'emmagasiner l'eau et les substances nutritives, il est donc hydrophile. Sa couleur noire agit sur l'absorption des rayons solaires ce qui le rend favorable au réchauffement des terres (Faurie, et al, 2006, p.87)

³² Dictionnaire Hachette, éd. Hachette livre, 2005.

³³ L'utilisation de terre végétale pauvre freine l'apparition de plantes indésirables (In, <http://fr.ekopedia.org>).

³⁴ Encyclopédie Ekopedia, «Toit vert : les composantes de la toiture végétalisée », (page consultée le 28-12-09), [En ligne], <http://fr.ekopedia.org>.

³⁵ Encyclopédie Wikipédia, « La toiture végétale », (page consultée en mars 2008), [En ligne], <http://fr.wikipedia.org>.

Tableau II- 1. Les plages d'épaisseur du substrat de culture
(Source. François Lassalle, 2006)

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

2.3.1 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 texture³⁶ des substrats est très importante pour les toitures à végétalisation extensive puisque l'intervention post- installation est très réduite. D'autre part, la structure³⁷ du substrat conditionne l'ensemble *des propriétés physiques* du sol tels que la porosité³⁸, la perméabilité³⁹ et la cohésion qui sont importantes puisqu'elles agissent directement sur l'équilibre *sol- végétation- climat*.

Par ailleurs, 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.

2.3.2 Les phénomènes physiques dans le sol :

2.3.2.1.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.

³⁶ **La texture** précise la proportion de chaque élément physique contenu dans un sol.

³⁷ **La structure**, concerne la répartition des particules, les unes par rapport aux autres, et les vides (pores) qu'elles créent. Ces derniers sont occupés par de l'air et de l'eau.

³⁸ **La porosité** ; Représente le pourcentage du volume des vides ; remplis d'air ou d'eau sur le volume total du sol.

³⁹ **La perméabilité** ; Dépend de la structure et la texture du sol, elle représente l'aptitude du sol à laisser passer l'eau vers les couches inférieures (mesurée en cm/seconde).

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 %⁴⁰. 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, quand 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%⁴¹), 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%⁴², d'autre part, des phénomènes de toxicité apparaissent à une teneur en dioxyde de carbone entre 4 à 5%⁴³.

2.3.2.2. Rétention de l'eau dans le sol :

Chaque définition d'un complexe de végétalisation des toitures doit indiquer la **Capacité Maximale en Eau** (CME)⁴⁴ 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

⁴⁰ **Claude Faurie et al.**, «*Ecologie ; approche scientifique et pratique*», 5^e éd. Editions TEC & DOC, Paris, 2006. p. 83.

⁴¹ **Philippe Duchaufour, E. Winfried et H. Blum**, «*Introduction à la science du sol : sol, végétation, environnement*», 6^e éd. Edition Dunod, Paris, 2001. p. 77.

⁴² **Ibid.**, p. 77.

⁴³ **Claude Faurie et al.**, *op cit.* p. 83.

⁴⁴ **Capacité Maximale en Eau** : représente la quantité d'eau réputée retenue par les matériaux constitutifs du complexe de végétalisation. Elle est calculé par la différence de poids d'un échantillon entre son état sec (après séchage à 105 °C jusqu'à stabilisation du poids) et son état après 24 heures de mise en eau à saturation, et ressuyage de 2 heures. Cette différence est dite «Capacité Maximale en Eau (CME)» et est exprimée en pourcentage du volume considéré. Ce protocole est applicable au complexe complet de végétalisation ou isolément à chacun des matériaux constitutifs (**Adivet, CSFE, SNPPA, UNPE, 2007, p.11**)

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 (Fig. II-10).

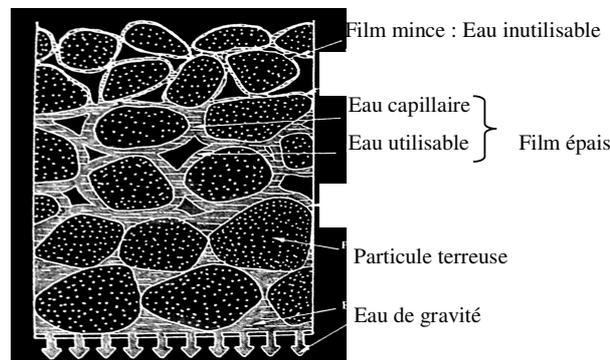


Figure II- 10. Les trois états de l'eau dans le sol
(Source. Faurie et al 2006, réadaptée par auteur)

2.3.3 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%⁴⁵. 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'épaisseur⁴⁶. 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 (Fig. II-11).

⁴⁵ SOPREMA, « Sopranature, sur toiture de pentes $\leq 20\%$ », Cahier de Prescriptions de Pose (CCP), N° 02/055F, éd. Du 20 dec. 2002, France. 2002. p. 27.

⁴⁶ La pérennité de certaines plantes se joue à une tolérance dans l'épaisseur de ± 1 cm.



Figure II- 11. A gauche : Soufflage du substrat à l'état meuble. A Droite : Répartition manuelle du substrat meuble

(Source. Sopranature, Soprema, Brochure, 2008)

3. Couche végétale :

3.1 Critères de choix des végétaux :

Larcher et Gelgon⁴⁷ 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 nouveaux⁴⁸. 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 (Skimmia japonica, photinia, Kalmia, oranger du Mexique). D'autres espèces sont plantées pour leurs effets aromatiques, médicinales ou condimentaires⁴⁹. La végétation doit s'adapter progressivement à son milieu en étant résistante à différents types de stress (thermique,

⁴⁷ J.L.Larcher et T. Gelgon, « Aménagement des espaces verts urbains et du paysage rural », 3^e éd., Edition TEC & DOC, Paris, 2000. p 127.

⁴⁸ A. Furlani Padoja, « Comment fleurir terrasse et balcons ». Editions De Vecchi S.A, Paris, 1996. p.25.

⁴⁹ Basilic (au soleil pas trop arrosés), thym, laurier, sauge, romarin, origan (à l'ombre ou à mi-ombre), coriandre, persil, menthe et ciboulette.

hydrique et lumineux) pour pouvoir accomplir son rôle esthétique, environnementale et autres. 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 choisit⁵⁰. 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.

3.2 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 plante⁵¹.

⁵⁰ Emmanuel Caille, « Façades et toitures végétales », Revue AMC, Le Moniteur Architecture, n° 126, Juin- Juillet 2002. p. 98.

⁵¹ Gravatt (2003), In Tobias Emilsson, « Extensive Vegetated Roofs in Sweden Establishment, Development and Environmental Quality », Thèse de doctorat, Swedish University of Agricultural Sciences, 2005. p.16.

- 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 maintenance⁵². 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.

3.3 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 des 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 botaniques⁵³. 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**⁵⁴, dont le mécanisme de photosynthèse est de type **CAM** (*Crassulean Acid Metabolism*). Celui-ci représente avec la photosynthèse du type **C4**⁵⁵ des adaptations aux milieux secs (voir annexe II- Types de photosynthèse).

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

⁵² Monterusso et al., (2005), In **Johnnel Kiera Lanham**, «*Thermal Performance of Green Roofs in Cold Climates*», thèse de master en science, Queen's University Kingston, Ontario, Canada, Septembre 2007. p. 28.

⁵³ Article, «*Les succulentes* », (Page consultée le 27-12-009), [En ligne] www.davarree.free.fr.

⁵⁴ **Crassulacée** : le nom vient de «*Crassus*», qui veut dire épais (www.pépinière-bouetservat.com). Mais aussi par rapport au mécanisme de photosynthèse de type CAM.

⁵⁵ Photosynthèse en **C4** : (Acide oxal- acétique) renfermant quatre atomes de carbone dans la molécule organique formée en premier lors de la fixation du CO₂

d'utilisation de l'eau par les plantes⁵⁶. 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...*⁵⁷ (Voir annexe II).

En général, les végétalisations extensives associent plusieurs espèces de Sedums pour leur aspect changeant et leur coloration originale. Le tableau (II-2) montre la principale coloration du feuillage des Sedums. 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.

Tableau II- 2. Caractéristiques des variétés de Sedums les plus utilisés en végétalisation des toitures (Source. IDM, www.vegetalid.com)

Caractéristiques des principales variétés de Sedums	
Sedum sexangulare	Feuillage vert clair, floraison jaune.
Sedum album coral carpet	Variété très tapissante, feuillage rougeâtre à vert, floraison blanche.
Sedum floriferum	Feuillage vert sombre, floraison jaune.
Sedum reflexum	Feuillage grisâtre, fleuraison jaune.
Sedum lydium	Variété tapissante, feuillage vert émeraude.

•Les plantes vivaces : (type oeillet) 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 déflouries ou enlèvement des fleurs passées.)⁵⁸

⁵⁶ Gravatt & Martin, (1992), In Tobias Emilsson, «*Extensive Vegetated Roofs in Sweden Establishment, Development and Environmental Quality*», Thèse de doctorat, Swedish University of Agricultural Sciences, 2005. p.15.

⁵⁷ Adivet, «*Principes et techniques*», (page consultée en Oct. 2009), [En ligne], <http://www.adivet.net/principes-techniques/historique.html>.

⁵⁸ P. Georget, «*La floriculture* », 3^e éd. Edition Dunod, Paris, 1966. p. 260-261.

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'entretien⁵⁹. 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 au hivers rudes (Fig. II-12).



Figure II- 12. *Iris pumila* sur toiture végétalisée
(Source. Sopranature- Soprema, brochure, 2008)

- Les graminées vivaces ou xérophiles: (type fétuque : se sont des graminées qui forme la base des prairies naturelles)) elles se multiplient facilement grâce à la production de graines. Elles ont un faible besoin en eau et leur floraison s'échelonne 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 MEPLÉ sont : *Festuca glauca*, *Stipa tenuifolia*, *Festuca scoparia*, *Dechampsia flexuosa*.

- Les plantes ligneuses : Pour les toitures à végétation extensive et semi- intensive, les Règles françaises pour la végétalisation des toits (2007) conseillent les ligneuses⁶⁰ à petit développement qui peuvent être adjointes selon l'effet désiré et le programme d'entretien accepté par le maître d'ouvrage.

3.4 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

⁵⁹ Encyclopédie Ekopedia, «Toit vert : les composantes de la toiture végétalisée », (page consultée le 28-12-09), [En ligne], <http://fr.ekopedia.org>.

⁶⁰ Ce sont des plantes qui fabriquent des tissus secondaires durs appelés xylème ou plus communément bois. On distingue parmi ces végétaux ; les arbres, les arbustes, les arbrisseaux et quelques lianes.

copieux permettant son développement quelque 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 pellette 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. Le tableau (II-3) montre ces associations type, sachant que la première espèce citée est dominante et que les vivaces désignent les herbes⁶¹.

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 II- 3. 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
Sedum- mousses- vivaces	9 à 10 cm
Sedum- graminées- vivaces	12 à 16 cm
Graminées- vivaces (pelouse sèches)	≥ 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 **xérophiles**⁶² 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. Quand aux **graminées** qui sont très résistantes à la sécheresse comme (*Koeleria glauca*, *Sesleria glauca* ou *Stipa pennata*) trouvent

⁶¹ La plupart de ces formations types sont applicables pour l'Allemagne. En France, ceci n'est utilisable que pour le climat continental et océanique, sa validité est moindre sous un climat méditerranéen sec.

⁶² **Xérophile** : caractéristique d'adaptation à la sécheresse. **Les xérophytes** : sont des plantes xérophiles ; qui s'adaptent à la sécheresse.

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 : se sont des «*végétalisations semi- extensives* » ou bien des «*végétalisations extensives assistées* »⁶³.

3.5 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 fonctionner⁶⁴. Les plantes subissent différents types de stress (hydrique, thermique et lumineux), et afin d'éviter leurs effets néfastes, les végétaux présentent des adaptations différentes.

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.

Pour la présente recherche, nous nous intéressons surtout 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.

⁶³ François Lassalle, «*Végétalisation extensive des terrasses et toitures : 34 réalisations exemplaires*», Editions Le Moniteur, Paris, 2006. p.73-74.

⁶⁴ Jones et Jones (1989), In William G. Hopkins, «*La physiologie végétale* », 2^e éd. Edition De Boeck, Bruxelles, 2003. p 452.

3.5.1 La transpiration en situation normale :

L'eau représente 70 à 90% du contenu cellulaire primaire de la plupart des végétaux⁶⁵. 90% de ce dernier est renfermé dans les feuilles jeunes et 50% pour le tronc d'un arbre caduc en saison estivale⁶⁶. 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 vivent⁶⁷. 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 du à l'évaporation de l'eau par les feuilles et la reprise qui y correspond en la puisant du sol (Voir schéma annexe II). 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'eau⁶⁸, ce qui participe à rafraîchir l'air ambiant. La transpiration se produit principalement au niveau des stomates⁶⁹ 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.

⁶⁵ Roger Dajoz, « Précis d'écologie », 8^e éd., Edition DUNOD, Paris, 2006. p 02.

⁶⁶ R.F.Legget et C.B.Crawford, « Arbres et immeubles » in Digest de la construction, N° : CBD-62-F, Canada, 1967. (Page consultée le 09-06-2008), [En ligne], http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/pubs/cbd/index_f.html

⁶⁷ On retrouve donc les espèces suivantes : *aquatiques*, *hydrophytes* (vivant dans l'eau toute l'année), *les hygrophytes* (vivant dans le milieu humide ; bananier), *les mésophytes* (besoin de quantité modérée en eau, supportent les alternances de saison sèche et humide), *les xérophytes* (vivant dans le milieu sec en permanence)

⁶⁸ Legget et Crawford (1967), In R.F.Legget et C.B.Crawford, *op. cit.*, [En ligne]

⁶⁹ **Stomates** : orifices de petite taille se trouvant souvent du coté inférieur de l'épiderme des feuilles, celles-ci permettent les échanges gazeux et de vapeur d'eau ainsi que la régulation de la pression osmotique.

3.5.2 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**⁷⁰ et doit conserver sa capacité de reprendre une croissance normale une fois réhydratée⁷¹.

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

⁷⁰ Protoplasme : Synonyme de Cytoplasme : ensemble constitué du hyaloplasme et des organelles cellulaires, dans une cellule vivante, par opposition au noyau et à la membrane. (Dic. Hachette, 2005)

⁷¹ Les plantes *reviviscentes* (*mousses et lichens*) par exemple, survivent sans dommage à un dessèchement de l'air qui provoque un abaissement de leur teneur en eau de 7%. (William G. Hopkins, 2003- p 453)

osmotique est assez faible, puisqu'elle est comprise entre 5 et 10 bar⁷², l'eau est surtout retenue par imbibition de mucilages⁷³.

- **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 ambiant⁷⁴ ; 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*)⁷⁵. 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 (Fig. II-13).

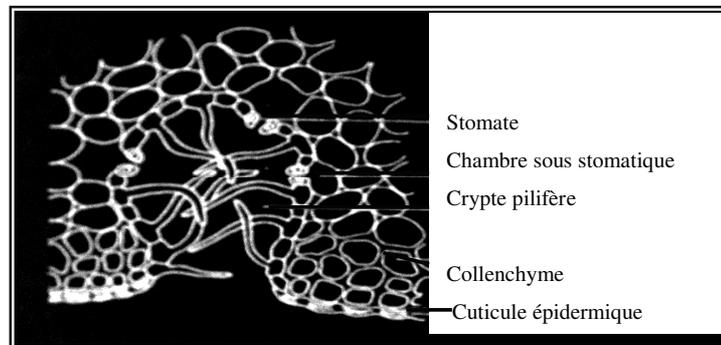


Figure II- 13. Feuilles de laurier rose avec des stomates protégés par des poils (*Nerium oleander*)
(Source. R. Dajoz, (2006), réadaptée par auteur)

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) (Fig. II-14). 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

⁷² **Claude Faurie et al.**, « *Ecologie ; approche scientifique et pratique* », 5^e éd., Editions TEC & DOC, Paris, 2006. p. 150-151.

⁷³ Mucilage : Substance végétale sécrétée par les cellules de certaines plantes qui en présence d'eau gonfle et forme une gelée (Dictionnaire Hachette 2005).

⁷⁴ Une diminution de la croissance foliaire ou transformations de celles-ci en épines ou en écailles (*Tamarix*) dans les régions arides

⁷⁵ **A.Huetz De Lemps**, « *La végétation de la terre* », Editions : Masson et Cie, Paris, 1970. p 17-18.

⁷⁶ **Ibid.**, p 19.

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'*ABA* (Acide abscissique)⁷⁷.

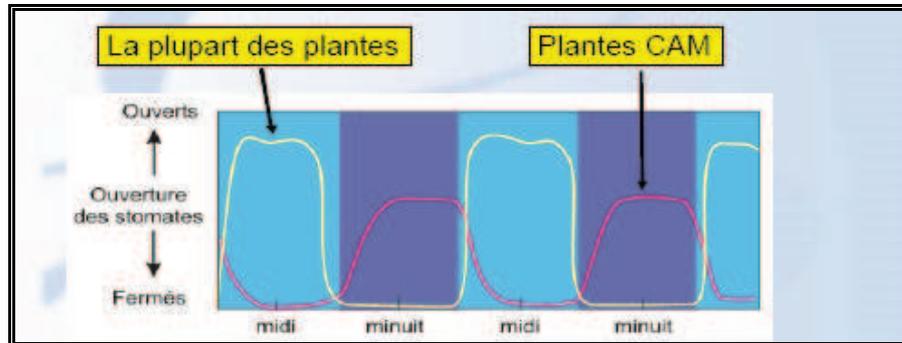


Figure II- 14. Adaptation à la sécheresse des plantes CAM. (Exp. *Sedum*, *cactus*, *anans...*)
(Source. Rafik belabi, Phillipe Faucon, 2007)

3.5.3 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 fructifier⁷⁸.

Les plantes qui doivent subir des températures élevées avec des manques d'eau sont variées. Il y a les **éphémérophytes**⁷⁹, les **reviviscentes**⁸⁰ 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

⁷⁷ William G. Hopkins, « *La physiologie végétale* », 2^e éd., Edition : De Boeck, Bruxelles, 2003. p 456.

⁷⁸ A.Huetz De Lemps, « *La végétation de la terre* », Editions : Masson et Cie, Paris, 1970. p 14- 15.

⁷⁹ Vivant dans les déserts sous de fortes températures et sans eau, elles accomplissent leur cycle de vie durant une petite période d'humidité

⁸⁰ (Mousses et lichens) qui peuvent se déshydrater et entrer en vie en latente sur les toits exposés à la chaleur.

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 Faurie et al, (2006) elle est due essentiellement au photopériodisme⁸¹ 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 *sclérophytes*) produisent par des glandes, des essences volatiles épidermiques dont l'évaporation produit un refroidissement ralentissant la transpiration (*les Cistacées*, *les Labiées*, ...) (Fig. II-15).

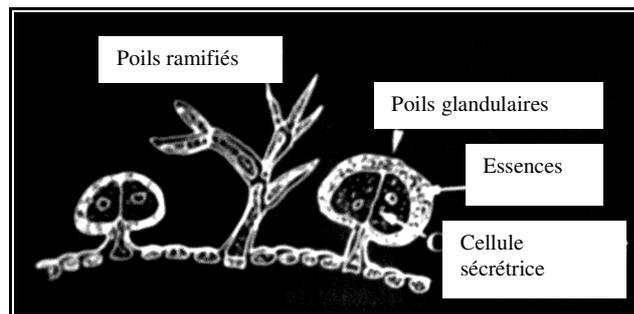


Figure II- 15. Poils glandulaires, à la surface d'une feuille de Lavande
(Source. Faurie et al, 2006)

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 cactus⁸².

⁸¹ Alternance du jour et de la nuit qui influe sur la production de la plante ; la nuit permet d'éviter l'engorgement des organes qui élaborent des matières nutritives le jour.

⁸² William G. Hopkins, « *La physiologie végétale* », 2^e éd., Edition De Boeck, Bruxelles, 2003. p 463.

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

Le mode de mise en œuvre pour la végétalisation extensive et semi intensive (jardins léger) est faite selon différents procédés dont chacun possède des avantages et des inconvénients (Annexe II). Ces procédés sont :

3.6.1. 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 œuvre 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 autres⁸³.

Le semis représente la manière de semer, c'est-à-dire de propager une espèce, une variété ou un cultivar à partir de semences⁸⁴. Le semis peut aussi concerner l'épandage de fragments de tiges ou de feuilles de Sedums⁸⁵ (*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'eau⁸⁶.

3.6.2. La plantation :

Consiste à répartir sur le substrat des plantes pré-cultivées dans des contenants (plaques, godets, micromottes ...) (Fig.II-16) 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 micromottes 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 arbustes⁸⁷.

⁸³ François Lassalle, «Végétalisation extensive des terrasses et toitures : 34 réalisations exemplaires», Editions Le Moniteur, Paris, 2006. p. 121.

⁸⁴ Daniel G.Côme et Françoise Corbinau, «Dictionnaire de la biologie des semences et des plantes», Edition TEC & DOC, Paris, 2006. p.182.

⁸⁵ Le développement des sedums sous forme de touffe adulte prend 3 à 6 mois (F.Lassalle, 2006- p. 121)

⁸⁶ SOPREMA, « Sopranature, sur toiture de pentes ≤ 20% », Cahier de Prescriptions de Pose (CCP), N° 02/055F, éd. Du 20 dec. 2002, France. 2002. p.32.

⁸⁷ Ibid. p.33



Figure II- 16. Micro- motte de *Sedum album* (Coral carpet)
(Source. www.vegetalid.com)

3.6.3. Les éléments prévégétalisés :

Utilisées pour les végétalisations extensives, ils présentent l'avantage de procurer un effet immédiat, une mise en œuvre facile, un entretien initial presque nul. En plus c'est une façon sûre de traiter les risques d'érosions dus aux pentes ou aux vents. On les trouve composés de mousses, Sedum, graminées et vivaces en différentes proportions. On distingue : les plaques, les tapis, les rouleaux et les bacs prévégétalisés.

Les rouleaux pré-cultivés : Les végétaux prennent racines dans un substrat de type extensif, sur un support en fibre de coco (5cm d'épaisseur) ou sur une trame tridimensionnelle en fil de nylon rigide (20 mm d'épaisseur) associée à un filtre en polyester non tissé⁸⁸ (Fig.II-17). Les rouleaux sont :

- Soit déroulés sur un substrat meuble d'au moins 15 mm d'épaisseur correctement nivelé⁸⁹. L'ajout d'une couche filtrante séparée est nécessaire sous le substrat.
- Soit déroulés directement sur la couche drainante : ils remplissent alors à eux seuls, les trois fonctions de couche filtrante, de couche de culture et de couche végétale.

Les plaques et tapis pré-cultivés : Plantées de sedums sur de très faibles épaisseurs, ces plaques constituent le système de végétalisation des toitures extensives le plus léger existant, dont l'épaisseur du substrat de culture peut être de seulement 25 mm, et dont le poids varie de 40 à 60 Kg/m²⁹⁰. La figure (II-19) montre le procédé de Elevated Landscape Technologie (ELT) et Xero Flor au Canada avec une épaisseur totale de 45mm.

⁸⁸ François Lassalle, «Végétalisation extensive des terrasses et toitures : 34 réalisations exemplaires», Editions Le Moniteur, Paris, 2006. p. 123.

⁸⁹ Adivet, CSFE, SNPPA, UNPE, «Règles Professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées », 2e éd., Paris, novembre 2007, p.18.

⁹⁰ Doug Banting et al., «Report on the Environmental Benefits and Costs of Green Roof Technology for the City of Toronto», Ryerson University Toronto, Ontario, October 31, 2005. p. 38.



Figure II- 17. Rouleaux prévégétalisés
(Source. www.vegetorpin.fr)



Figure II- 18. Système modulaire en plateau
(Green Grid System)
(Source. Doug Banting et al., 2005)



Figure II- 19. Tapis prévégétalisés (ELT System)
(Source. Doug Banting et al., 2005)



Figure II- 20. Bacs prévégétalisés à réserve d'eau sur toit plat ou en pente
(Sources. A gauche ; Siplat, brochure, 2008- A droite ; Verdura, Eternit, brochure 2008)

Les caissettes précultivées : Peuvent être soit :

- Des caissettes biodégradables posées côte à côte selon l'agencement souhaité sur une couche drainante uniformément répartie. Avant mise en place, les rebords des caissettes sont coupés⁹¹.
- Des contenants biodégradables en PVC recyclé à épaisseur très faibles (3 à 5 cm) avec un substrat de culture extensif⁹². Ou par des systèmes modulaires en plateaux (trays) (Fig. II- 18) dont l'épaisseur est comprise entre 75mm à 300mm⁹³.

⁹¹ SOPREMA, « Sopranature, sur toiture de pentes $\leq 20\%$ », Cahier de Prescriptions de Pose (CCP), N° 02/055F, éd. Du 20 dec. 2002, France. 2002. p. 34.

⁹² François Lassalle, « Végétalisation extensive des terrasses et toitures : 34 réalisations exemplaires », Editions Le Moniteur, Paris, 2006. p.124.

⁹³ Doug Banting et al., « Report on the Environmental Benefits and Costs of Green Roof Technology for the City of Toronto », Ryerson University Toronto, Ontario, October 31, 2005. p. 36.

- Des contenants avec une réserve d'eau intégrée dans les caissettes pré- végétalisées pour une couverture végétale immédiate. La mise en œuvre se fait par simple emboîtement des caissettes sur tous les types de toits (plats ou en pente) (Fig. II-20).

3.7 Les différents aspects des toitures à végétation extensive :

En fonction du mode de mise en œuvre retenu, l'aspect final de la végétation est obtenu après une durée variable : immédiate ou différée. Celle-ci peut s'étaler jusqu'à deux ans pour les systèmes semés, alors qu'un gazon installé dans la saison appropriée, prend dans le mois qui suit. La durée moyenne nécessaire pour que se réalise l'état d'équilibre souhaité, quel que soit le mode de mise en œuvre choisi, est de deux ans. Le tableau (II-4) montre les taux de couvertures et la période de mise en œuvre des végétaux.

Tableau II- 4. Période de mise en œuvre et taux de couverture de la végétation
(Source. F. Lassalle, 2006)

Périodes de mise en œuvre et taux de couverture				
Mode de mise en œuvre	Période de mise en œuvre ^a	Taux initial après mise en œuvre	Taux de couverture à 1 an	Taux de couverture à 3 ans
Eléments pré-cultivés (bacs, tapis et bacs...)	Toutes saisons	≥70 %	≥80 %	≥80 %
Plantation de micro mottes ou godets	Printemps ou automne ^b	≥5 %	≥60 %	≥80 %
Semis de fragments ou de graines	Printemps ou automne ^c	0%	≥ 40 %	≥80 %
^a Sauf période de sécheresse ou de gel ^b A modeler en fonction des zones climatiques (sur conseil du tenant du procédé) ^c Milieu de printemps et début d'automne				

Il s'avère que même les associations pré- cultivées des systèmes « mousses- *Sedum* » réputées sûres passent par un stade d'adaptation où la concurrence joue entre les deux catégories⁹⁴. Pendant la phase chantier, l'arrosage est obligatoire pour permettre le démarrage de la végétation, il est cependant à adapter à la technique retenue et aux conditions climatiques.

Pour la végétalisation extensive, l'aspect de la toiture peut être déterminé dès la conception selon le choix. Les spécialistes distinguent les aspects des toitures végétalisées par :

⁹⁴ François Lassalle, «Végétalisation extensive des terrasses et toitures : 34 réalisations exemplaires», Editions Le Moniteur, Paris, 2006. p.83.

l'espèce et les compositions végétales possibles, par le mode de mise en œuvre, ou par l'aspect saisonnier. Cette variété de végétalisation extensive procure un enrichissement du paysage environnant grâce aux différentes possibilités d'aménagement.



Figure II- 21. différents aspects des toits végétaux selon le choix de végétaux.
(Source. Siplat, Brochure, 2008)

- Les espèces végétales : l'aspect peut être : **uni** pour une seule espèce végétale (exemple, végétalisation à base de Sedum, ou de graminée...); **varié** pour deux espèces de la même famille (par exemple deux espèces de Sedum...); **mixte** pour différentes espèces (Fig. II-21).
- Le mode de mise en œuvre : on peut opter pour une végétalisation avec un **aspect immédiat** grâce aux éléments pré-cultivés ou du gazon à développement rapide, ou un **aspect retardé** avec le bouturage ou la plantation de fragments.
- La saison : d'après l'espèce végétale et le type de climat, les spécialistes peuvent prédirent l'aspect saisonnier qu'aura la toiture, vu qu'ils connaissent les adaptations futures de la végétation aux différents stress qu'elle aura à subir sur le toit. Ces adaptations saisonnières peuvent être marquées par des colorations complètement différentes d'une saison à une autre (Fig. II-22).



Figure II- 22. Evolution de l'aspect de la toiture à travers les saisons (variétés de sedums) :
A gauche : Hiver. A droite : été.
(Source. Siplat, brochure, 2008)

Les points forts de la végétalisation extensive sont les floraisons jaunes, blanches et rouges des différentes espèces de *Sedum*, ainsi que celles des graminées et plantes vivaces

sauvages. Dans la période de repos estivale, se sont surtout les teintes jaune, ocre et rouge qui dominent, puis elles sont remplacées par les teintes vertes et les floraisons tardives de l'automne. En hiver et au début du printemps, les associations de graminées et de vivaces présentent une discrète coloration brun-jaune avec des zones vertes. Alors que les associations de mousses et de *Sedum*, font apparaître un vert intense inattendu en cette saison⁹⁵.



Photos II- 1. Evolution à travers les saisons de la couverture foliaire de la toiture du CNFPH.
(De gauche à droite : 27 Février- 11 Mars- 24 Avril 2009)
(Source. Auteur).

La photo (II-1) montre la prolifération d'une végétation sauvage qui a envahi spontanément le toit du bâtiment du CNFPH⁹⁶ à Constantine, et dont l'aspect a changé à travers les saisons. En Février 2009, le tapis végétal est vert avec des fleurs jaunes. Après les chutes de neige en début du mois de mars 2009, ce tapis a disparu en laissant apparaître une autre végétation à priori plus résistante au gel et au stress dû au froid (coloration rouge du *Sedum album*). Ensuite, aux mois d'avril et mai, la période de la floraison fût caractérisée par une autre coloration de la végétation (rose pale). La terrasse a subi donc un changement d'aspect correspondant aux toitures à végétation extensive, grâce à l'adaptabilité des végétaux aux conditions climatiques.

Certaines sociétés vont mêmes jusqu'à proposer des aspects selon la fréquentation de la terrasse, de la visibilité de celle-ci depuis un bâtiment, ou carrément selon que le bâtiment soit dans une zone urbaine ou péri-urbaine. La société Sopranature propose des végétalisations pour ; les toits vus de loin (*Toundra –plantée de Sedum*), ceux partiellement accessibles (*Guarrigue, diverses plantes fleuries*), ceux situés en campagne ou en zone péri-urbaine donnant l'air d'une prairie sèche (*Pampa- graminées*), et les jardins légers totalement accessibles (*Green-gazon*).

⁹⁵ François Lassalle, «Végétalisation extensive des terrasses et toitures : 34 réalisations exemplaires», Editions Le Moniteur, Paris, 2006. P.27- 28.

⁹⁶ CNFPH : Centre National de Formation du personnel pour Handicapés.

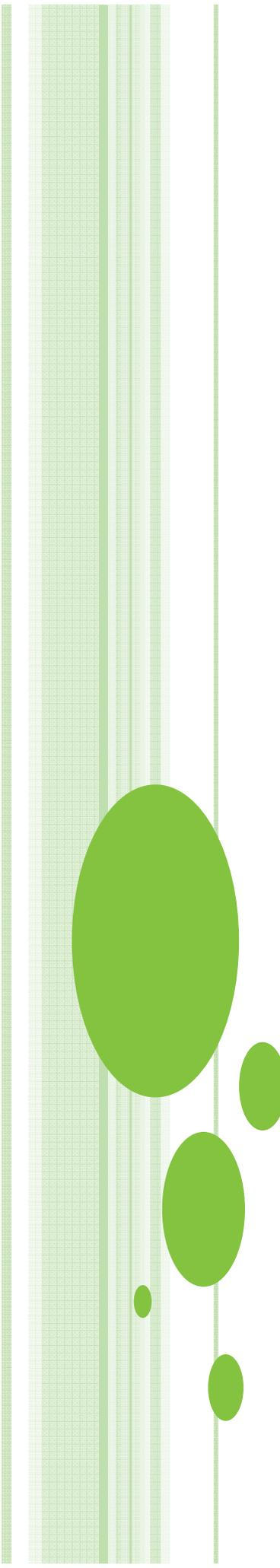
Conclusion :

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.

La végétalisation extensive 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 qu'elles peuvent survivre 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. Cependant l'analyse de certaines contraintes régissant la conception de ces toits ne peut être écartée, et ce, afin d'assurer la sécurité et la pérennité des ouvrages. Ce qui constitue l'objet du prochain chapitre.



Chapitre III

**Les toits végétaux 2 :
Contraintes de conception et
dispositifs spécifiques**

Introduction :

Longtemps spécifiés comme poumons de la ville, les jardins sur le sol avec leurs multiples avantages deviennent de plus en plus rares. L'urbanisation intense a fait que les toits des bâtiments, souvent considérés comme espaces perdus, inutiles, inutilisables et repoussants, ont une surface plus importante que celle végétale. Ils deviennent les seuls espaces dont on dispose pour récupérer la surface végétale dans les centres urbains.

Henri Sauvage préconisait d'ailleurs, des bâtiments à gradins dans lesquels chaque logement bénéficierait d'une terrasse, balcon ou loggia devant être plantés. Il recommandait pour cela, l'intégration dès la construction de bacs à plantes bien étudiés du point de vue de l'étanchéité et de l'écoulement des eaux¹.

Par ailleurs, l'aménagement d'un jardin sur balcon ou terrasse relève de son utilisation rationnelle et fonctionnelle avant tout². En effet, depuis leur conception, les terrasses et balcons doivent être agrémentés de végétation selon la fonction qu'ils reçoivent pour le bien être de chacun. Lorsqu'on dispose d'une grande surface, on devra planter des végétaux de manière à recréer le cadre typique du jardin avec : espace de repos, espace de détente, zone ombragée... Dans le cas contraire, mis à part l'agrément visuel, la terrasse végétalisée inaccessible présentera autant d'avantages d'utilité publique ou privé qu'un jardin sur le sol.

Cependant, la conception d'un toit végétal *mérite plus d'effort*. David Stevens pense que les jardins sur les toits doivent répondre à des exigences très particulières, puisqu'ils se trouvent le plus souvent dans un environnement hostile balayé par le vent³. En effet, les contraintes régissant la conception de ces toits écologiques sont aussi variées et importantes à examiner.

Le présent chapitre a pour objet de déterminer d'une part, les contraintes et les avantages de la conception d'une toiture végétalisée. Et d'autre part, de définir les caractéristiques techniques et les dispositifs spécifiques de ces toits, régis par la réglementation en vigueur.

I. Les contraintes de conception des toits végétaux :

Instaurer un paradis de verdure sur une terrasse est un vrai défi puisque les contraintes sont variées : pollution de l'air, paramètres climatiques, contraintes techniques... Il est primordial de concilier à la fois l'esthétique à la fonction de la plante et ses besoins. Pour cela,

¹ **Max Blumenthal**, « *Le végétal et l'architecture* », Revue Technique et Architecture, N° 313, Edition Regirex, France, (Jan.- Fév.)1977. p. 27.

² **Faustine M. Fazio**, « *Le jardin en terrasse et balcon* », Editions De Vecchi S.A., Paris, 1989. p.4-5.

³ **David Stevens**, « *Terrasses et petits jardins* », Editions Grüd, Paris, 1988. p25.

plusieurs facteurs doivent être pris en considération avant la conception afin d'obtenir le confort souhaité.

En France, les Règles Professionnelles pour les toitures végétalisées spécifient les contraintes suivantes:

Les exigences techniques regroupent : la localisation climatique de la toiture végétalisée (régime pluviométrique, intensité solaire, vent, gel, ...); la disposition de la toiture végétalisée dans la construction et l'environnement (zones d'ombre, surplomb); la visibilité de la toiture végétalisée (éloignement, angle de vue); l'accessibilité aux zones techniques par la création de chemins de circulation. Mais aussi, les dispositifs de sécurité et de protection des personnes; la forme géométrique et hauteur de la toiture végétalisée par rapport au sol; la pente et l'incidence du poids du complexe de végétalisation à CME (capacité maximale en eau) sur la structure portante.

Les exigences esthétique : varient selon les attentes du maître d'ouvrage par un effet immédiat ou différé selon le mode de mise en oeuvre choisis (semis de fragments, de semences, micro-mottes, godets, éléments pré-cultivés). En plus du choix des plantes et du type d'agencement (caduques, persistantes, floraison, variation des couleurs des feuillages, volume, port, texture,...)

Les exigences particulières : concernent le niveau d'entretien, fréquence d'arrosage et la rétention temporaire des eaux pluviales.

Voici quelques détails sur les contraintes les plus importantes relevant de la conception des toits végétaux :

1. Les contraintes liées aux caractéristiques architecturales :

La configuration de la toiture, ses caractéristiques architecturales, son affectation, ses dimensions et son volume peuvent être des éléments déterminants dans le choix du type de végétalisation et des caractéristiques de chaque matériau.

On peut retrouver plusieurs configurations pour une toiture végétalisée. La toiture peut être délimitée par un ou plusieurs murs latéraux (Fig. III-1), ou avec un ou plusieurs volumes adjacents; elle peut être complètement à découvert profitant de l'humidité et de la luminosité tout en étant exposée aux intempéries (cas d'une toiture sommitale sans obstacle en surélévation ou bâtiment isolé); elle peut être dominée à distance par un ou plusieurs bâtiments, d'un ou plusieurs niveaux; comme elle peut être un patio intérieur (Fig.III-2).



Figure III- 1. Terrasse délimitée par deux murs et aménagée en jardin avec des plates bandes plantées
(Source. Furlani, 1996)

Par ailleurs, la toiture végétale peut être en pente nulle ou à faible pente (0 à 5%) sommitale ou non, en pente variable (> 5%), en pente simple ou en double pente.

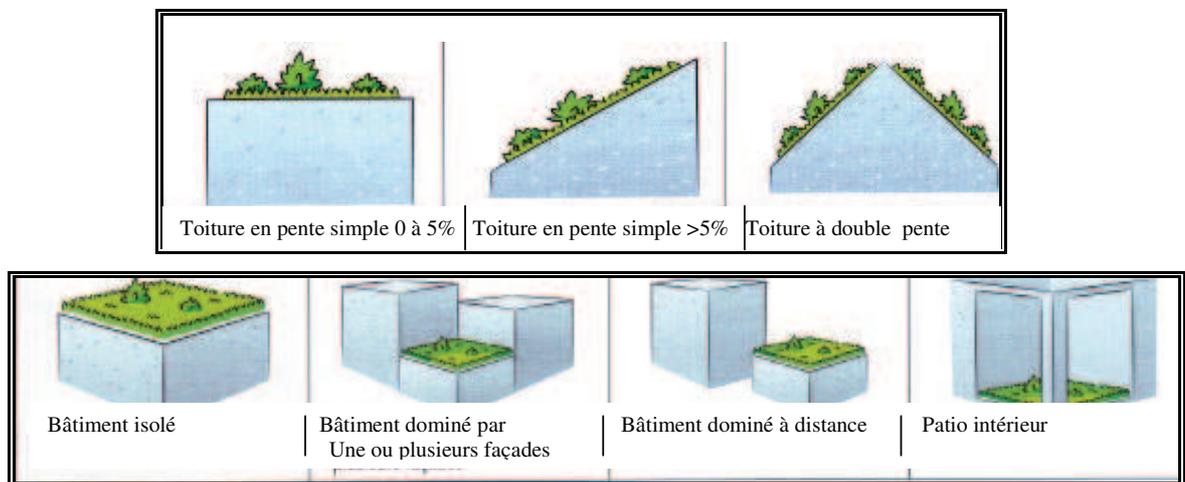


Figure III- 2. Différentes configurations d'un toit végétal
(Source. SOPRANATURE, Soprema, Brochure, 2008)

Les caractéristiques ainsi que les matériaux de construction de la toiture influent sensiblement sur le microclimat des lieux. D'une part, les terrasses fermées sur les côtés procurent des expositions abritées du vent et offrent des températures moins froides en hiver. D'autre part, les radiations réfléchies sont néfastes pour les plantes et l'accumulation de la chaleur dans les murs du bâtiment prolonge la canicule en été.

2. Les contraintes liées aux caractéristiques techniques du bâtiment :

2.1. L'élément porteur :

L'élément porteur représente la partie la plus importante du bâtiment qui détermine le type de végétalisation admis (extensif, intensif, semi- intensif) selon le matériaux le constituant (béton, bois, acier...), la charge admissible par cet élément porteur et sa pente.

L'élément porteur pour une végétalisation intensive doit être pensé pendant la conception vue la charge importante qu'il doit supporter. Alors que la végétalisation extensive et semi-intensive sont adaptables à n'importe quel type d'élément porteur avec certaines réserves pour les végétalisations semi- intensives.

D'après Lassalle (2006), la norme française (**DTU 43.1**)⁴ exige que le support d'une toiture- terrasse jardin (toiture à végétation intensive) soit en béton armé avec une pente nulle ou une pente inférieure ou égale à 5%.

Par ailleurs, la réglementation algérienne tolère les toitures- terrasses jardins sur des éléments porteurs en maçonnerie, sur dalle flottante ou sous forme adhérente en béton. Elle ne tolère l'aménagement de ces jardins que sur des toitures- terrasses plates ($2\% \leq \text{Pente} \leq 5\%$) ou en pente nulle ($\text{Pente} \leq 2\%$) dans les zones en dehors du climat de montagne et seulement des toitures plates sous un climat de montagne⁵.

Pour la végétalisation extensive, les règles professionnelles françaises de 2007, déterminent les types d'éléments porteurs suivants (admis pour une pente maximale de 20%)⁶ :

- Élément en maçonnerie.
- Élément en béton cellulaire autoclavé avec pente minimale de 1 %.
- Élément en tôles d'acier nervuré avec pente minimale de 3 %, fixées à l'ossature comme si elles recevaient un revêtement auto- protégé.
- Élément en bois ou panneaux dérivés du bois, ou panneaux bénéficiant d'un Avis Technique visant favorablement son emploi en élément porteur pour toiture avec revêtement d'étanchéité sous protection lourde, dont la pente minimale est de 3 %.

2.2.Les charges sur le toit :

La surcharge due au complexe de végétalisation est déterminée obligatoirement à l'avance pour les végétalisations intensives, mais ne l'est pas nécessairement dans le cas des végétalisations extensives puisque l'adaptation peut se faire en sens inverse. C'est-à-dire que l'on

⁴ **DTU 43.1** (référence NF P 84-204), Norme française Intitulée « Etanchéité des toitures terrasses avec éléments porteurs en maçonnerie »

⁵ **CNERIB**, «Travaux d'étanchéité des toitures : terrasses et toitures inclinées (support en maçonnerie)», Document Technique Règlementaire, D.T.R. E4-1, CNERIB, Alger, 2005.

⁶ **Adivet, CSFE, SNPPA, UNPE**, «Règles Professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées », 2^e éd., Paris, novembre 2007. p. 14.

peut définir la surcharge du complexe de végétalisation à installer en fonction de la charge admissible par l'élément porteur (cas d'installation d'une végétation sur toiture existante).

D'après Lassalle (2006), les toitures- terrasses accessibles disposant d'une surcharge admissible de l'ordre de 350 Kg/m², peuvent recevoir une végétalisation semi- intensive ou une forme plus lourde de végétalisation extensive, à condition que les zones végétalisées ne soient plus autorisées à la circulation. Le tableau (III-1) montre les plages de surcharges et les surcharges moyennes indicatives (Kg/m²) pour les différentes formes de végétalisation.

Tableau III- 1. Surcharges des différentes formes de végétalisation des toits
(Source. François Lassalle, 2006)

Forme de végétalisation	Plage de surcharge (kg/m ²)	Surcharge moyenne indicative (kg/m ²)
Végétalisation intensives	De 600 à 2 000	1000
Végétalisation semi- intensives	De 150 à 400	300
Végétalisation extensives	De 40 à 300	100

Selon les règles françaises pour la végétalisation des toits de 2007, les **charges** à prendre en compte pour n'importe quel élément porteur sont⁷ : les **charges permanentes** et les **charges d'exploitations**.

Les **charges permanentes** correspondent à la somme du :

- Poids du complexe isolation- étanchéité (pare- vapeur, isolant, revêtement d'étanchéité).
- Du poids du complexe de végétalisation à capacité maximale en eau (la couche drainante, la couche filtrante, le substrat et les végétaux).
- Une charge de sécurité est fixée forfaitairement à 15 daN/m² (déca- Newton) ; en plus d'une charge complémentaire forfaitaire de 85 daN/m² (soit 100 daN/m² au total) sera ajoutée pour le dimensionnement des seuls éléments porteurs à base de bois (bois massif et panneaux dérivés).

Les charges d'exploitation : regroupent les charges d'exploitation en plus des charges climatiques. On retient la valeur la plus élevée des deux charges (charge d'entretien ou la charge climatique).

- Sachant que la charge d'entretien est estimée à 100 daN/m² au sens de la norme NF P 06001⁸.
- La surcharge due au complexe de végétalisation comprend la somme du poids propre de la végétation et du complexe de culture (couche de drainage et le substrat) calculé à capacité maximale en eau.

⁷ Adivet, CSFE, SNPPA, UNPE, «Règles Professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées », édition n°2, Paris, novembre 2007. p.07.

⁸ Ibid. p. 07.

2.3. La pente du toit :

La pente est un facteur déterminant dans la conception des systèmes de végétalisation des toits, que ce soit du point de vue de la structure (élément porteur en bois, béton...), de la sécurité contre l'érosion ou du point de vue de la croissance des plantes⁹.

D'abord, une adaptation du système de végétalisation à la pente est indispensable de telle manière que ; les toitures-terrasses jardins ne sont tolérées que pour une pente $\leq 5\%$, alors que la végétalisation extensive tolère de fortes pentes.

- Pente entre 0 à 5% : adaptable pour tout type de végétalisation (intensif ou extensif), la société « Toit vert » recommande que le toit ne soit pas complètement plat, mais qu'il ait une pente minimale afin de simplifier l'écoulement de l'eau. Sachant que pour les pentes très faibles ou nulles (0 à 5%) le risque de stagnation de l'eau est évident. Dans ce cas, la mise en œuvre d'un système de drainage performant est exigée.
- Pente intermédiaire à moyenne : ces pentes peuvent aller jusqu'à 60%. Pour les végétalisations extensives, les pentes de 5 à 20% rendent le drainage naturel (Il s'effectue à travers le substrat sous l'effet de la gravité)¹⁰. Cependant, à partir de 5% de pente, l'écoulement rapide de l'eau doit être compensé par une augmentation de la capacité de rétention du substrat pour que la végétation soit suffisamment pourvue en eau. A partir d'une pente de 20%, une étude approfondie est obligatoire puisque le risque d'érosion du substrat sous l'effet des pluies est nettement accru. Il convient donc de mettre en place des systèmes de retenue du substrat, en bois ou en autre matériau (Fig. III-3).
- Forte pente : La pente maximale tolérée par la société « Toit vert » est de l'ordre de 30° (pente de 60 %), puisque au-delà de celle-ci, l'eau contenue dans la structure rétentrice migrerait dans les parties basses du complexe et provoquerait l'assèchement de la partie haute de la toiture végétalisée¹¹. La figure (III-3) montre le système de retenue très développé pour une végétalisation sur une forte pente proposé par la société Ecovegetal.

⁹ C'est-à-dire, penser à drainer l'excès d'eau rapidement afin d'éviter les risques de stagnation néfastes pour certaines plantes

¹⁰ **Vegetalid**, « Foires aux questions », (page consultée le 22-04-2008), [En ligne] <http://www.vegetalid.com>

¹¹ **Toit vert**, « Toitures inclinées », (page consultée le 22-04-2008), [En ligne] <http://www.toitvert.fr>.



Figure III-3. Système de retenue GEORASTER d'Ecovegetal pour pente moyenne à forte (jusqu'à 60%)
(Source. Ecosedum, www.ecovegetal.fr)

D'après L'OFEFP, si le toit a plus de 45°, il faut renoncer à sa végétalisation vue les coûts, les risques et les dommages que ça engendre¹². Néanmoins, certaines sociétés vont jusqu'à des pentes supérieures à 60% pour des projets exceptionnels (rares) en utilisant des systèmes de retenue développés, cette végétalisation se fait uniquement en tapis ou en bacs pré-cultivés (Voir annexe III).

3. Les contraintes climatiques :

3.1. Effets des paramètres climatiques :

Le véritable climat sur les terrasses et balcons est déterminé par la somme de plusieurs facteurs : la latitude, l'exposition (au soleil et au vent), la température, ainsi que les caractéristiques architecturales de la terrasse¹³. Ces paramètres influent directement sur la conception des toitures à végétalisation extensive surtout pour les régions sèches.

Le cas du Midi méditerranéen est représentatif puisqu'il est caractérisé, selon Lassalle¹⁴, par des périodes sèches d'une durée supérieure à huit, voire douze semaines. Ce climat doit être traité avec précaution en prévoyant la réserve d'eau, ainsi que la capacité de résistance des plantes à la sécheresse qui devront éviter le flétrissement définitif des plantes.

L'influence des paramètres climatiques peut être réduite par les caractéristiques particulières du substrat et plus largement celles du complexe de culture, spécialement du point de vue de retenue en eau, du choix des végétaux eux-mêmes et dans certains cas du mode de mise en œuvre des végétaux. Malgré toutes ces précautions, certaines sociétés recommandent un

¹² OFEFP (L'office Fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage), « Cahier de l'environnement : Toits végétalisés », n°216, Berne, 1995, p.27.

¹³ A. Furlani Padoja, « Comment fleurir terrasse et balcons ». Editions De Vecchi S.A, Paris, 1996. p.06, 14.

¹⁴ François Lassalle, « Végétalisation extensive des terrasses et toitures : 34 réalisations exemplaires », Editions Le Moniteur, Paris, 2006. p.69.

arrosage périodique alors que d'autres préfèrent les systèmes à retenue ou de réserve d'eau pour les régions vraiment sèches ou arides.

3.1.1. L'exposition aux radiations solaires :

L'effet de l'orientation de la terrasse végétalisée par rapport aux autres bâtiments : murs, édicules ou accessoires divers présents sur la toiture, définit des zones d'ombre plus ou moins fortes, ainsi qu'une circulation d'air plus ou moins importante.

La durée et la période d'ensoleillement suivant les saisons, le tracé des ombres sur la surface à planter, la luminosité... constituent des paramètres importants qui conditionnent le choix des espèces (espèces d'ombre ou celles préférant le plein soleil). Sachant que les plantes d'ombre par exemple préfèrent les expositions Est et Ouest, et qu'elles grilleraient dans un endroit inondé de soleil même si, elles ne détestent pas un peu de lumière le matin ou le soir¹⁵.

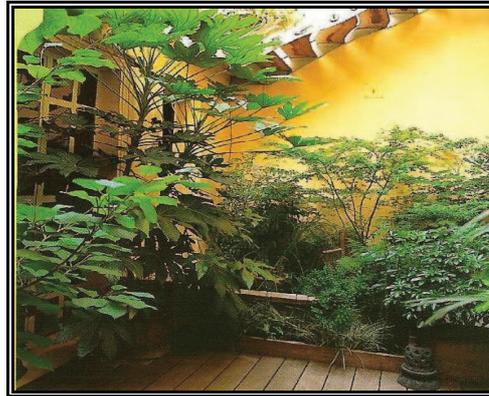


Figure III- 4. Plate bande installée à l'ombre sur une terrasse- patio en ville
(Plantée d'*Aralia (Fastia japonica)*
(Source. P.A. Risser, 2006)

Le premier critère de sélection des plantes étant la résistance à la sécheresse, cette caractéristique permet de faire le choix entre les plantes de lumière et les plantes d'ombre. Les situations de végétalisation des toitures ou terrasses ombrées peuvent être très fréquentes dans un milieu urbain (Fig. III- 4). Il existe une gamme très restreinte de plantes résistant à une ombre forte et à une sécheresse relative, parmi elles, les *bryophytes*¹⁶, mais aussi des *fougères* de situations sèches et certaines plantes *vivaces*. Par ailleurs, l'évaporation réduite sur les zones d'ombre doit conduire à limiter les épaisseurs de substrat et à assurer un drainage efficace pour

¹⁵ Emilie Courtat, « Aménager balcons et terrasses » Edition : Hachette livre, Paris, 2007. p.6.

¹⁶ Les bryophytes : Végétal tel que les mousses et les hépatiques (Dic. Hachette 2005)

éviter de créer des conditions favorables aux adventices de milieu humide. L'approche préalable du facteur de la luminosité est donc, une donnée importante de la conception de ces toitures¹⁷.

Au cas par cas, selon l'ensoleillement ou les tracés d'ombre de la terrasse, les sociétés spécialisées peuvent définir les espèces végétales pouvant survivre sur cette dernière. En général, une exposition minimale au soleil est recommandée. La société «Toit vert» préconise pour un bon fonctionnement de la toiture végétalisée, des expositions au soleil d'au moins trois heures par jour en été¹⁸. D'autres sociétés, recommandent un minimum de quatre heures d'ensoleillement quotidien¹⁹.

3.1.2. L'exposition aux vents dominants :

Les façades des immeubles alignées le long des avenues créent des couloirs où le vent s'engouffre et forme des turbulences surtout lorsque les bâtiments sont hauts et les rues étroites et que l'orientation principale est face aux vents dominants. L'acrotère périphérique, est susceptible de générer des effets de turbulence en périphérie, et plus encore dans les angles de la terrasse. Localement, la pression du vent qui peut atteindre 300 kg/m² dans les cas extrêmes, est capable de déplacer un lit de graviers de 5cm d'épaisseur. Cependant, on peut s'opposer à la force de dépression due au vent par l'alourdissement du complexe de végétalisation dans les angles et périphéries ou par des zones dites «stériles»²⁰.

D'autre par, l'effet du vent peut parfois être fatal pour la végétation. En été, il assèche les plantations et augmente leur évapotranspiration et en hiver il augmente sensiblement l'effet du froid. Selon Furlani (1996), un vent soufflant à 10Km/h fait baisser de 1°C la température...à 20Km/h elle baisse de 2°C. Donc, les vents doivent être bloqués pour que certaines espèces puissent se développer sur les terrasses. Pour cela, on peut installer des brises- vents végétaux adéquats.

3.1.3. Les températures :

En hiver, la température sur une terrasse dépend du matériau constituant sa structure et de son exposition (totalement fermée sur les côtés, orientée plein sud...).

¹⁷ **François Lassalle**, « *Végétalisation extensive des terrasses et toitures, 34 réalisations exemplaires* », Editions Le Moniteur, Paris, 2006. p.79.

¹⁸ **Toit vert**, « *Toitures inclinées* », (page consultée le 22-04-2008), [En ligne] <http://www.toitvert.fr>.

¹⁹ **Article**, « *Toiture végétalisée* », (page consultée le 11-01-2008), [En ligne], <http://www.init-environnement.com>.

²⁰ **François Lassalle**, *Op. cit.* p.76.

Les terrasses jouissent de climat moins rigoureux au cours des mois froids que les espaces à découverts (jardins ou parcs) parce qu'ils sont abrités des rigueurs hivernales, et que la ville engendre une masse calorifique qui diminue les amplitudes thermiques. Donc, il y gèle moins fort, ce qui permet d'envisager des plantations plus exotiques qu'en pleine terre²¹. Par contre en été, ces espaces entre ciel et terre, subissent fortement les vents et hautes températures estivales, phénomène accentué par les surfaces des murs qui réfléchissent les radiations solaires et la chaleur emmagasinée. Il faut donc, prendre en considération les températures les plus défavorables pour toutes les saisons et opter pour des plantes résistantes à la sécheresse.

3.2. Les caractéristiques des différentes expositions des terrasses :

3.2.1. Exposition au sud :

Un balcon ou terrasse orientés plein sud possèdent un microclimat doux de type presque méditerranéen, ne manquant jamais de soleil. En hiver, l'espace est protégé des vents froids et les plantes peuvent bénéficier la nuit de la chaleur emmagasinée par les murs²². Cependant, les amplitudes thermiques brusques entre le jour et la nuit sont pire pour la végétation qu'un froid continu et un réchauffement progressif (chute brutale des températures la nuit et élévation rapide de celle-ci, dès l'apparition du soleil sur la terrasse orientée plein sud)²³.

D'après Furlani (1996), l'exposition au sud en été est délicate pour les plantes, parce que les rayons solaires sont fort en juillet et août, surtout quand ils sont accompagnés de vent chaud qui balaye les étages supérieurs, dessèche les plantes et brûle leurs tissus (entraînant une forte évapotranspiration et un besoin accru en eau). On recommande souvent des plantes robustes que ce soit pour les végétalisations extensives, semi- intensives ou intensives, mais aussi pour la plantation dans des pots ou des jardinières. Pour cette dernière, Bonduel (2005) conseille la plantation dans des pots d'espèces résistantes à la sécheresse (*grenadiers d'ornement, tulipes, pourpiers, sauge de Jérusalem...*)²⁴.

²¹ A.Furlani Pedoja, « Comment fleurir terrasse et balcons », Editions De Vecchi S.A, Paris, 1996. p.06, 14.

²² Ibid. p.6.

²³ Pierre- Alexandre Risser, « Terrasses et balcons en ville », Editions : Solar, Paris, 2006. p.19.

²⁴ Philippe Bonduel, « Jardins de poche », Editions : Solar, Paris, 2005. p.19

Guyot²⁵, recommande en général pour une exposition Sud, les plantes grimpantes offrant une protection solaire d'été : *Aristolochie siphon*, *Bignone à grandes fleurs*, *Bougainvillée*, *Glycine de chine*, *Jasmin de virginie*, *Vigne vierge à cinq feuilles*, *Volubilis...* .

3.2.2. Exposition à l'est :

Furlani (1996) la considère comme la meilleure exposition puisque les plantes sur balcons ou terrasses tirent un grand bénéfice du soleil des premières heures de la journée. Alors que Bonduel (2005), la considère comme difficile puisque les plantes sont soumises aux vents de l'Est et du Nord-Est, ainsi qu'aux premiers rayons du soleil juste après le moment le plus froid de la nuit, provoquant un choc thermique brutal aux plantes. Il faut donc opter pour les plantes rustiques, armées contre les coups durs (*annuelles*, *sureau*, *tulipes...*).

3.2.3. Exposition à l'ouest :

Furlani (1996), Bonduel (2005) et Risser (2006) s'accordent à dire que l'exposition Ouest et Sud-Ouest sont meilleures que celle du sud. Cette exposition bénéficie d'une luminosité plus que suffisante, ensoleillée mais pas trop brûlante et chaude sans excès. Elle est souvent située face aux pluies et abritée des vents les plus froids, ce qui permet la prolifération d'une large gamme d'espèces qui tolèrent cette exposition.

3.2.4. Exposition au nord :

La terrasse ou balcon exposés au nord bénéficient d'une lumière moyenne élevée. En été, ces espaces bénéficient des rayons latéraux du soleil levant, puis du soleil couchant. Les plantes les plus adaptées à cette exposition en général sont celles de sous bois (*Camélias*, *Hortensias* de tous types, *Bégonias*, *Jacinthes...*).

Cette exposition est plutôt fraîche en été et très froide en hiver mais reste très venteuse sur les terrasses ou balcons ouverts de tout côté, les plantes doivent donc faire face aux plus basses températures avec des vents violents. Cependant, les températures y remontent lentement ce qui évite des alternances brutales du gel et dégel, plus néfastes que le froid lui-même. Donc, le choix des plantes pour l'exposition au Nord est réduit à des espèces robustes qui se cassent rarement.

²⁵ M.A. Guyot, « *L'arbre urbain : un composant de confort pour l'architecture et l'espace public* », (page consultée le 13-01-2008), [En ligne], www.arbreurbain.com.

4. Les contraintes d'entretien :

L'entretien de l'étanchéité ou de la végétation des toitures est obligatoire, sa fréquence par contre diffère selon le type de végétalisation (Tableau III-2).

Tableau III- 2. Entretien et arrosage des systèmes de végétalisation
(Source. François Lassalle, 2006)

Forme de végétalisation	Arrosage	Fréquence et durée des prestations d'entretien
Végétalisation intensives	indispensable	importante
Végétalisation semi- intensives	indispensable	modérée
Végétalisation extensives	Non nécessaire (sauf en région sèche)	faible

L'entretien des toiture- terrasses jardins : les besoins d'entretien sont élevés à très élevée, suivant le choix des plantes. L'élimination de la végétation adventice dans les plantations doit être réalisée de façon soignée et régulière. Des opérations de taille et d'éclaircissage, voire d'arrachage des plantes devenues gênantes avec le temps, sont nécessaires²⁶. Par ailleurs, il faut prévoir sur ces toits le montage du matériel, évacuation de gros volumes de déchets, la fertilisation du substrat ..., qui rendent ce système très coûteux.

L'entretien des toitures ou terrasses à végétation extensive est réduit mais reste indispensable au minimum à une fois par an. Il peut être couplé avec la visite de contrôle de l'ouvrage d'étanchéité, afin de s'assurer du bon fonctionnement du système de drainage et du bon état de la végétation.

L'entretien est limité pour la végétalisation extensive et donc son coût aussi, ce qui justifie leur emploi pour les terrasses inaccessibles, grâce au :

- Choix des espèces végétales qui se multiplient naturellement sans intervention.
- La résistance des végétaux aux aléas climatiques (sécheresse) diminue la quantité d'eau nécessaire pour l'arrosage et donc, la présence d'un système d'arrosage n'est pas requise (sauf pour les régions à été chaud et sec, telle que la méditerranée).
- La fertilisation devient non indispensable, le substrat est volontairement pauvre afin de générer une croissance modérée des plantes. D'autre part, l'épaisseur du complexe de culture est réduite ce qui ne favorise pas le développement d'une végétation adventice²⁷ et élimine par conséquent ou réduit fortement : l'arrosage, le désherbage, la tonte et la fertilisation...

²⁶ Liesecke (1990, p.26) In, François Lassalle, «Végétalisation extensive des terrasses et toitures, 34 réalisations exemplaires », Editions Le Moniteur, Paris, 2006. p.26.

²⁷ Végétation non prévue au départ, mauvaises herbes.

Les Règles Professionnelles pour la Conception et la Réalisation des Terrasses et Toitures Végétalisées déterminent trois périodes d'entretiens pour les toitures à végétation extensive et semi- intensives depuis l'installation jusqu'à l'entretien courant. On distingue : la ***période de parachèvement***²⁸, la ***période de confortement*** et l'***entretien courant***.

La période de confortement est comprise entre la réception de l'ouvrage jusqu'au démarrage de l'entretien courant qui ne commencera que lorsque le taux de couverture sera supérieur ou égal à 80%²⁹. D'après Lassale (2006), cet *entretien technique initial* pour les végétalisations extensives, doit comprendre au moins une saison végétative complète où un certain entretien devient obligatoire. A savoir : l'arrosage pendant quelques semaines (semis ou plantation), le fauchage (graminées), des semis complémentaires (si le taux de couverture ne progresse pas rapidement), des plantations de remplacement et une fertilisation (si nécessaire)³⁰. La durée de confortement est fonction de la mise en œuvre de la végétation (Voir annexe III).

L'entretien courant, démarre après une couverture végétale $\geq 80\%$, son but est de maintenir et/ou d'augmenter le taux de couverture végétale et de maîtriser le développement des espèces adventices. La fréquence minimale d'entretien pour la végétalisation extensive est de deux passages/an, quelque soit le mode d'installation de la végétation³¹.

Entretien des terrasses à végétation semi- intensive : comporte les mêmes contraintes d'entretien lors des périodes de parachèvement et de confortement que les végétalisations extensives sauf que l'arrosage est indispensable de même que la maintenance des systèmes d'irrigation, la tonte des gazons, évacuations des déchets, taille des plantes semi- ligneuses et ligneuses.

Lors de la période d'entretien courant, les préconisations d'entretien restent les mêmes, avec en général une fréquence de quatre interventions par an. La fréquence peut être accrue lors de la période de parachèvement ou de confortement (quatre à six fois par an suivant les systèmes)³².

5. Les contraintes d'arrosage :

Les besoins en eaux sont variables selon la localisation géographique, la configuration du toit et le système de végétalisation de toiture installé (Tableau III-2). Si la fréquence d'arrosage

²⁸ La période de parachèvement comprend les travaux depuis l'installation jusqu'à la réception de l'ouvrage.

²⁹ Adivet, CSFE, SNPPA, UNPE, «Règles Professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées », édition n°2, Paris, novembre 2007. p.09.

³⁰ Cette phase d'entretien initial est déterminée par Lassalle (2006) à 60% de couverture du sol. Elle a pour but de s'assurer de l'installation du système racinaire et aérien de la végétation.

³¹ Adivet, CSFE, SNPPA, UNPE, *op. cit.*, p.09.

³² Ecovegetal, « Entretien des systèmes de végétalisation extensive et semi- intensive », fichier PDF (consultée le 23-04-2008) [en ligne], www.ecovegetal.fr. p.2-3.

pour la végétalisation intensive reste la même que pour un jardin au sol, elle est fonction de l'espèce végétale pour la végétalisation semi- intensive et moindre à rare pour la végétalisation extensive. Pour cette dernière, on distingue trois phases selon le système *Ecovegetal*³³.

- L'arrosage à la mise en oeuvre : doit être abondant de sorte à saturer en eau le substrat. A répéter en période estivale ou, sèche au minimum les deux premières semaines. En région méditerranéenne, l'arrosage automatique par aspersion doit obligatoirement être posé avant la mise en place des végétaux.
- L'arrosage au démarrage de la végétation : arrosage quotidien trois fois par jour à raison de 7mm d'eau pour chaque opération d'arrosage, ceci afin de maintenir une humidité permanente sur les végétaux qui viennent d'être plantés. Ces trois arrosages doivent se faire aux heures les plus fraîches. Généralement la durée est de trois à quatre semaines. Dans le sud de la France, il sera maintenu tout l'été de juin à septembre l'année de la mise en oeuvre et la suivante afin d'accélérer l'enracinement des végétaux dans le substrat.
- L'arrosage courant : en méditerranée, en période de canicule et de sécheresse un arrosage de début juin à la fin septembre est nécessaire. Une fois par semaine à raison de 14 à 20 mm d'eau selon les températures. Il sera fait en deux fois, 7 à 10 mm à l'aube et 7 à 8 mm le soir. En été l'arrosage ne sera mis en fonctionnement qu'après le premier épisode de forte chaleur afin que ce dernier puisse agir en tant que désherbant naturel sur les éventuels adventices qui pourraient s'installer sur la toiture.

Le procédé «*Vertige*» adopte l'arrosage au «goutte à goutte» intégré dans la couche du substrat (Fig.III-5), limitant considérablement l'arrosage (de 5 min tous les deux jours à 3 x 5 min par jour en cas de très fortes chaleurs et en fonction des régions)³⁴. Un système de sonde hydrométrique se déclanchant immédiatement en cas de sécheresse est actuellement à l'étude par la même société.

³³ **Ecovegetal**, « *Entretien des systèmes de végétalisation extensive et semi- intensive* », fichier PDF (consultée le 23-04-2008) [en ligne], www.ecovegetal.fr, p.2-3.

³⁴ **Vertige**, « *L'ABC de la végétalisation selon Vertige* », Fiche technique, Fichier PDF, (consultée le 23-04-2008), [En ligne] www.vert-tige.eu, p.02.

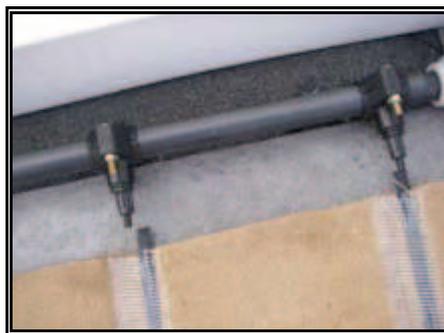


Figure III-5. Système d'arrosage au « goutte à goutte » intégré dans le complexe de culture
(Source. www.vert-tige.eu)

II. Dispositifs spécifiques et avantages des toits végétaux :

1. Les documents graphiques des toits végétaux :

La toiture végétale doit être conforme aux normes ou règlements, en ce qui concerne les caractéristiques du complexe de culture ou de la végétation ; les plans d'aménagement, les dispositifs particuliers à prévoir sur les toits... Et le plus important, c'est l'adaptation du procédé de végétalisation aux diverses contraintes selon le projet.

Avant toute conception de toiture végétale, on doit prendre en considération les contraintes techniques générales (architecturales, surcharges sur le toit...) et les contraintes techniques particulières (exigences en matières de rétention en eau, accessibilité à la terrasse pour la mise en œuvre comme pour l'entretien, l'arrosage...), mais aussi les contraintes esthétiques et l'aspect général de la toiture après végétalisation.

Tous les matériaux doivent être sélectionnés dès le départ selon les critères cités plus haut. Par ailleurs, des plans, des coupes et des détails de construction de la toiture végétale doivent accompagner obligatoirement le projet. Ceci, afin de déterminer la disposition de la toiture végétale par rapport à la surface totale de la toiture ; la possibilité d'accessibilité usuelle de la toiture ou l'accessibilité occasionnelle (terrasse inaccessible) ; les aménagements particuliers (espace de repos ou autres) pour la toiture-terrasse jardin, ou les cheminements pour celles à accessibilité modérée (Voir annexe III- plan d'une toiture à végétation extensive).

D'autres part, les concepteurs des toits végétaux doivent fournir le maximum de détails sur les zones particulières, les emplacements des évacuations des eaux pluviales et leurs protections. Ainsi que toutes techniques utilisées pour la végétalisation du toit (dispositif de séparation, zones stériles, chemin de circulation et son revêtement ...).

Un plan de plantation doit être fourni lorsque le choix se porte sur une répartition non homogène des espèces végétales retenues, de même en cas d'utilisation de configurations différentes sur un même projet³⁵. Le plan de plantation doit être accompagné de coupes afin de donner une idée plus claire sur la plantation prévue (Fig.III-6).

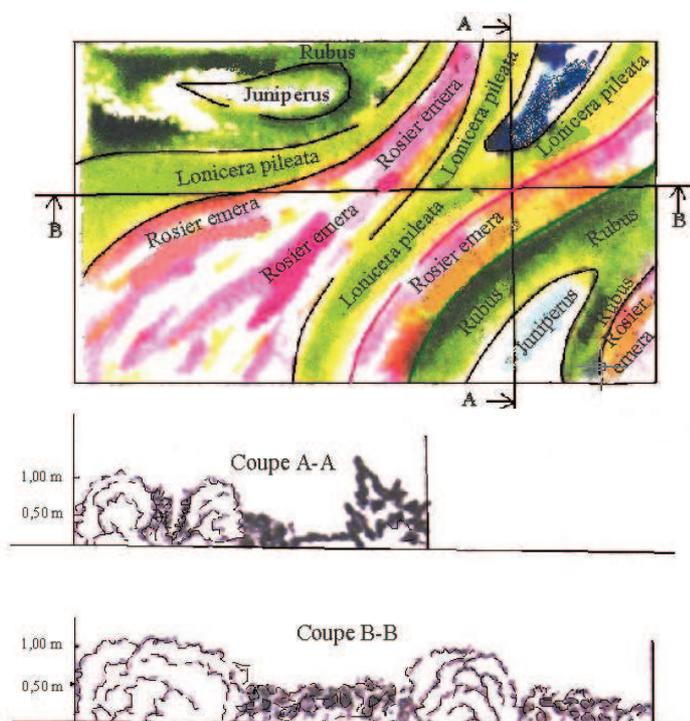


Figure III- 6. Exemple de plan de plantation d'une toiture végétalisée semi- intensive.
(Source. SOPRANATURE, Soprema, brochure, 2008. Réadaptée par auteur)

2. Aménagement des zones stériles :

Les zones subissant des contraintes particulières (absence de pluie, couloir de vent, réflexion solaire intense, zone ombragée, ...) sont à considérer comme des zones singulières et sont aménagées comme des zones stériles par des protection minérales. Elles n'entrent pas en considération dans l'appréciation du taux de couverture global.

En général, se sont les périphéries des ouvrages construits et des ouvrages émergents (lanterneaux, cheminées...) qui reçoivent ce traitement périphérique par une bande non végétalisée d'une largeur minimale de 0.40m de préférence (Fig.III-7). Cette bande stérile est pourvue de graviers ou dalles pour permettre l'accessibilité aux zones les plus sensibles du système d'étanchéité, elle offre la possibilité de dégagement des eaux pluviales en direction des

³⁵ François Lassalle, «Végétalisation extensive des terrasses et toitures, 34 réalisations exemplaires », Editions Le Moniteur, Paris, 2006. p. 112.

évacuations fréquemment placées dans les angles et à la périphérie³⁶ (Voir annexe III- plan de toiture végétalisée). Le but de ce dispositif est de faciliter l'entretien des évacuations pluviales et des relevés d'étanchéité.

Le revêtement d'étanchéité doit être anti- racines dans l'emprise de la zone stérile, et la protection de celui-ci peut être faite soit avec une couche de gravillons dont la granulométrie est $> 15 \text{ mm}$ ³⁷ ; soit en dalles préfabriquées en béton posées sur la couche drainante ou sur plots ; soit en dalles préfabriquées en bois posées sur plots. La zone stérile et la zone végétalisée sont délimitées par un dispositif de séparation³⁸.

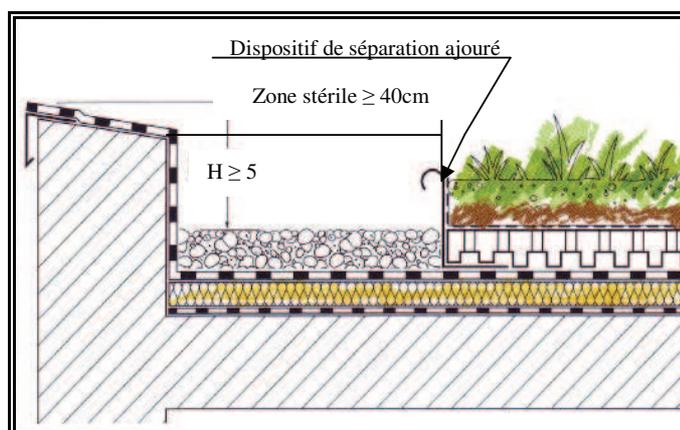


Figure III- 7. Aménagement de la zone stérile recouverte de gravillons
(Source. Verdura, Eternit, Brochure 2008. Réadaptée par auteur)

3. Les dispositifs de séparation :

Le dispositif de séparation est une barrière qui marque la séparation entre la zone stérile et la zone végétalisée. Cette dernière est en général, une bande ou une équerre ajourée maintenue en place sur l'étanchéité à l'aide de pattes en membrane d'étanchéité collée ou soudée. Sa fonction est de retenir la couche de culture (drainage, substrat) et de permettre le passage de l'eau vers les dispositifs d'évacuation (Fig.III-7).

Cette séparation peut être constituée de bandes métalliques d'épaisseur adaptée à la poussée qu'elles vont recevoir (alliage d'aluminium ou en acier inoxydable) (Fig.III-8), ou des bordures en béton ou en brique.

³⁶ François Lassalle, «Végétalisation extensive des terrasses et toitures, 34 réalisations exemplaires », Editions Le Moniteur, Paris, 2006. p.18, 90.

³⁷ Les granulométries inférieures favorisant l'installation de la végétation parasite

³⁸ Adivet, CSFE, SNPPA, UNPE, «Règles Professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées », édition n°2, Paris, novembre 2007. p.20.

Le dispositif de séparation doit être d'une hauteur supérieure à la couche de culture et recouvert d'un filtrage. Il est généralement ajouré, avec une surface totale d'ouvertures représentant 25 % de la surface du dispositif³⁹.

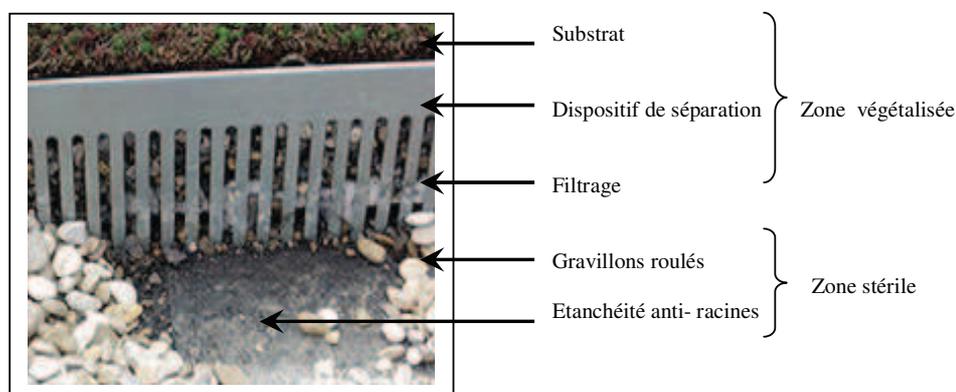


Figure III- 8. Dispositif de séparation par bande métallique
(Source. www.vegetalid.com. Réadaptée par auteur)

4. Les chemins de circulation :

Pour accéder aux équipements techniques, des chemins de circulation doivent être aménagés ; leur protection étant posée sur la couche de drainage, sur la couche filtrante, sur la couche de culture ou éventuellement sur le revêtement d'étanchéité.

La zone stérile ne constitue pas un chemin de circulation, mais si les concepteurs lui confèrent cette fonction, alors ils doivent prévoir l'installation d'un garde-corps en rive et autour des ouvrages présentant des risques de chute. La largeur de ces zones de passage est alors portée à environ 0,80 m⁴⁰ (Voir annexe III- plan des cheminements de circulation).

5. L'évacuation des eaux pluviales :

Les évacuations doivent être assurées selon la réglementation des bâtiments qui précise le nombre et le diamètre des canalisations de sortie en fonction des surfaces de la toiture.

Elles sont équipées d'un garde- grève visitable et sont soit bordées par une zone stérile sur 40 cm minimum (Fig. III-9) (voir annexe III- Coupe sur évacuation d'eau pluviale); soit protégées par une forme de regard tel que pour le dispositif des procédés de terrasses- jardins⁴¹.

³⁹ Adivet, CSFE, SNPPA, UNPE, «Règles Professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées », édition n°2, Paris, novembre 2007. p.24.

⁴⁰ Ibid. p.27.

⁴¹ Ibid. p.25.

Un contrôle annuel et un nettoyage de ces évacuations pluviales sont obligatoires, ceci afin de protéger la toiture des risques de mise en charge surtout pour les pentes nulles. La réglementation française contrairement à celle allemande, préconise la prise en compte d'une surcharge forfaitaire de 15 kg/m² visant à assurer une marge supplémentaire au cas où l'évacuation de l'eau ne serait pas optimale⁴².



Figure III- 9. Zone stérile autour d'une entrée d'évacuation des eaux pluviales (Source. SOPRANATURE, Soprema, brochure ,2008)

6. Les documents réglementaires régissant la conception des toits végétaux :

6.1. En Allemagne :

La réglementation des terrasses jardins existe depuis longtemps dans les pays européens, elle est souvent intégrée avec la réglementation de l'étanchéité des toitures- terrasses.

La réglementation des toitures et terrasses végétalisées (végétalisation extensive) est apparue pour la première fois en Allemagne. C'est la **FLL**⁴³ qui a édité la première version complète en 1982 sous le nom « *Les Directives pour les Végétalisations de Toitures* ». Cette réglementation est régulièrement remise en question et rééditée par le même groupe. Les Directives allemandes traitent les éléments suivants : les différentes formes de végétalisation et leurs domaines d'applications ; les prescriptions vis-à-vis du bâtiment ; les caractéristiques des matériaux ; la conception des systèmes de végétalisation et les conditions de leur mise en œuvre ; ainsi que les prescriptions en matière d'entretien⁴⁴.

⁴² **François Lassalle**, «*Végétalisation extensive des terrasses et toitures, 34 réalisations exemplaires* », Editions Le Moniteur, Paris, 2006. p.89.

⁴³ Groupe de Recherche sur le Développement et la Réalisation en Paysage. Traduit de l'allemand, **FLL** : «*Fordshungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau*】 (**François Lassalle**, 2006).

⁴⁴ **François Lassalle**, *op. cit.* p.55.

L'Allemagne a rapidement compris que c'est une réglementation fiable sur les techniques de végétalisation qui permettra le développement et la généralisation de ce procédé. Les autres pays d'Europe ont suivis l'exemple en passant au développement de la végétalisation extensive dès 1986, en traduisant le règlement allemand ou bien en essayant de l'adapter à leur mode constructif (Autriche, Hollande, Suisse, Suède, Espagne).

6.2.En France :

La France est restée en retard dans ce domaine, puisque ces documents normatifs du bâtiment (DTU : documents techniques unifiés) ne traite pas des toitures-terrasses à végétalisation extensive à l'inverse de la terrasse-jardin qui est considérée comme une utilisation particulière des toitures-terrasses plates. D'ailleurs, il n'y a que le procédé de la terrasse-jardin (végétalisation intensive pour 30cm de terre végétale minimum) à pente nulle ou pente inférieure ou égale à 5%, qui est traitée dans la norme **DTU 43.1** relevant des «Travaux d'étanchéité des toitures-terrasses avec éléments porteurs en maçonnerie ».

Le premier document normatif concernant la végétalisation des toits est apparu en 1997. Intitulé « *Les Règles Professionnelles pour l'Aménagement des Toitures-Terrasses Jardins* », il traite la végétalisation intensive et sur dalle en béton seulement. Pour rattraper son retard, la France publia un deuxième document technique en 2002, intitulé « *Règles Professionnelles pour la Conception et la Réalisation des Toitures et Terrasses Végétalisées* » exclusivement pour la végétalisation extensive (inspiré des Directives de végétalisation allemandes de la FLL). Ce dernier détaille l'ensemble des obligations en matière de support porteur, charges admissibles, étanchéité et isolation, complexe de végétalisation, ouvrage particuliers, réalisation et entretien⁴⁵. Il fut réédité et amélioré en 2007 en intégrant la végétalisation extensive et semi-intensive pour des pentes inférieures ou égales à 20 %.

D'après Lassalle (2006), les produits ou procédés nouveaux qui n'ont pas encore fait l'objet de normes DTU (Document Technique Unifié), peuvent être validés par un avis technique, document délivré par la commission des avis techniques du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) et entrer dans le cadre de l'assurabilité.

⁴⁵ **François Lassalle**, « *Végétalisation extensive des terrasses et toitures, 34 réalisations exemplaires* », Editions Le Moniteur, Paris, 2006. p.53-54.

6.3. En Algérie :

Les toitures végétalisées telles que présentées dans les précédents chapitres, ne font pas objet d'un règlement, d'une norme ou d'un document technique réglementaire en Algérie. Que ce soit pour spécifier les types de végétalisation, les procédés de mise en œuvre ou les caractéristiques des matériaux utilisés. Seulement deux documents techniques citent le système de végétalisation intensive, sans mentionner cette appellation récente. On les distingue par «toiture- terrasse jardin», ou «dalle- jardin» sans donner non plus de détail sur la conception, la réalisation ou les matériaux utilisés pour ces toitures.

Le document technique réglementaire (**DTR. E4-1**)⁴⁶ édité en 2005 par le CNERIB⁴⁷, traite de l'étanchéité des toitures- terrasses jardins⁴⁸. Les informations y figurant restent générales et sans le moindre détail permettant la réalisation d'une toiture- terrasse jardin dans les normes. Par ailleurs, jusqu'en 2005 aucune mention n'a fait référence à la végétalisation extensive ou semi-intensive.

Quant au **DTR. (B.C.2.2)**⁴⁹, il mentionne une seule fois les «Dalles- jardins» en spécifiant la valeur de la charge d'exploitation de celle-ci (évaluée à 1 kN/m²). Aucun autre détail sur la procédure de calcul des charges permanentes à prendre en considération avant la conception de ces toits jardins n'est mentionné.

De ce fait, même en 2010, l'Algérie reste très en retard dans ce domaine. Elle n'a pas encore de règlement spécifique à ces aménagements, que ce soit pour la végétalisation intensive ou extensive. Et même les règlements qui ont traité d'une manière anodine ces jardins sur le toit, sont très brefs sur la description des caractéristiques des matériaux et pas assez clairs sur la conception ou la réalisation de ces terrasses- jardins, mais aussi sur les espèces végétales à choisir, les épaisseurs admises, ou leurs poids à capacité maximale en eau.

7. Avantages des toits végétaux :

Aujourd'hui, on arrive à admettre que l'intégration des processus naturels dans la conception urbaine est souvent plus attrayante, plus efficace, plus rentable et plus durable que

⁴⁶ CNERIB, «Travaux d'étanchéité des toitures terrasses et toitures inclinées : support en maçonnerie», Document Technique Réglementaire d'Exécution (DTR. E4-1), CNERIB, Alger, 2005.

⁴⁷ CNERIB : Centre Nationale d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment.

⁴⁸ Les éléments suivants sont mentionnés brièvement ; la nature de l'élément porteur et sa pente ; la nature de la protection en dur du support (étanchéité) ; la nature de la couche du drainage et quelques caractéristiques la spécifiant; la protection des joints de dilatation ; et les dispositifs d'évacuations des eaux pluviales.

⁴⁹ Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique C.G.S., «Charges permanentes et charges d'exploitation », DTR. B.C. 2.2, C.G.S., Alger, 1988. p.27.

des infrastructures construites⁵⁰. De ce fait, la mise en place des terrasses et toitures végétalisées est aussi susceptible d'apporter un certain nombre d'avantages d'utilité publique ou privée. Celles-ci répondent largement aux principes du développement durable et s'inscrivent par ailleurs dans la démarche HQE (Voir Annexe III).

7.1. Avantages écologiques et environnementaux :

- ✚ Amélioration de la biodiversité : Comme tout espace vert au sol, les toits végétaux améliorent la biodiversité et sont considérés comme des réservoirs biologiques sur les toits en pleins centres urbains. Ces installations écologiques constituent d'une part, un excellent habitat de haltes momentanées. Et d'autre part, elles sont propices au développement de biodiversité végétale intéressante, en faisant appel en partie à des espèces non cultivées et même à des plantes adventices que parfois les constructeurs les souhaitent nombreuses et aussi diverses que possible⁵¹.
- ✚ Contribution à la purification de l'air et à la création de microclimats : Les toits végétaux sont une solution écologique contre l'effet d'îlot de chaleur urbain. Les recherches de Köhler *et al.* (2002), de Wong *et al.* (2003) et de Banting *et al.* (2005) ont démontré qu'une importante surface végétale sur les toits pourrait diminuer les surfaces qui irradient l'énergie solaire dans le milieu urbain. Des simulations ont prouvé la réduction de l'effet de serre, de l'effet d'îlot de chaleur urbain, ainsi que l'amélioration du microclimat urbain grâce à l'évapotranspiration procurée par les toitures végétalisées (Fig. III-10). A Toronto par exemple, une étude a démontré que l'aménagement de 6 % de toitures végétalisées, permettrait de diminuer la température urbaine de 1 à 2 °C et de limiter les émissions de GES et d'autres polluants⁵².

⁵⁰ M. Hough (1995), In Article, «*Le besoin d'une nature urbaine : un rapport de recherche*», (page consultée le 13-01-2008), [En ligne], <http://www.evergreen.ca>

⁵¹ Frehfahl, In François Lassalle, «*Végétalisation extensive des terrasses et toitures, 34 réalisations exemplaires*», Editions Le Moniteur, Paris, 2006. p.44.

⁵² Agence régionale de l'environnement et des nouvelles énergies (ARENE), «*Toitures végétalisées extensives*», Fichier PDF, (consulté en Janv. 2010), [En ligne], www.arenidf.org. p.02

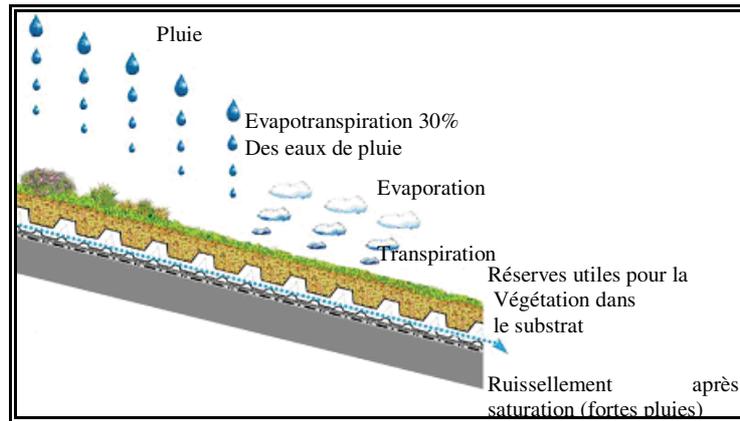


Figure III- 10. Amélioration du microclimat par la toiture végétalisée
(Source. ARENE, www.arenidf.org)

En effet, les toits végétaux permettent l'amélioration de la qualité de l'air, en agissant comme filtre. Puisque d'une part, la végétation produit une grande quantité d'oxygène grâce à la photosynthèse. Et d'autre part, selon les travaux de Nowak and Crane (1998) et de Banting *et al.*, (2005), la surface des feuilles, l'évapotranspiration et la rosée engendrées, participent à la séquestration des polluants atmosphériques et des poussières. Ceci réduit l'effet du smog et rafraîchit l'atmosphère. Sachant par exemple, qu'un mètre carré de toit vert (gazon) capture environ 0,2 kg de particules en suspension dans l'air par jour⁵³.

✚ La gestion et la régulation des eaux pluviales : Les toitures représentent jusqu'à 20% des surfaces de nos villes, elles accueillent les eaux de pluies, qui sont directement acheminées vers les réseaux d'évacuations. Ceci surcharge les égouts ou les stations d'épuration d'eau, en causant parfois des inondations et des dégradations environnementales. Ces problèmes peuvent être évités par les toitures végétalisées grâce au substrat et à la strate végétale qui retiennent une grande partie de l'eau de pluie. D'après Lassalle (2006), même les végétalisations extensives des toitures sont efficaces et ont un effet sur la gestion des eaux pluviales, en agissant selon deux effets :

Effet de rétention de l'eau : À l'image d'une éponge, ces surfaces perméables retiennent un certain temps, une partie de l'eau pour éviter l'engorgement des réseaux d'évacuations et les inondations (Fig.III-11). L'eau retenue dans le substrat, le drainage et les plantes est recyclée et restituée par la suite à l'atmosphère grâce au phénomène de l'évapotranspiration. D'après le

⁵³ D.Laroche, A.M.Mitchell, S.Péloquin, «Les toits verts aujourd'hui ; c'est construire le Montréal de demain », Mémoire présenté à L'office de consultation publique de Montréal dans le cadre du nouveau plan d'urbanisme 2004, 30 juin 2004. p. 3.

CSTB, les toitures à végétation extensives peuvent retenir en moyenne 50 % de l'eau de pluie en volume par an⁵⁴. Cette rétention de l'eau diffère aussi selon l'épaisseur du substrat⁵⁵, les caractéristiques du drainage et de l'espèce végétale. Les *Sedums*, par exemple retiennent en moyenne annuelle entre 40% et 60% en volume, même dans le cas d'épaisseurs de substrat très faibles (Inférieures à 6cm)⁵⁶ (Voir annexe III).

La rétention de l'eau dans le complexe de végétalisation des toits a une répercussion intéressante sur l'économie d'énergie pour la climatisation. Une expérimentation effectuée à Rio de Janeiro (Brésil) en 2004, a révélé que sur un total de précipitation de 556mm (durant neuf mois), la rétention des eaux pluviales par une toiture à végétation extensive a atteint 60.3%. Ce qui permet de réduire le besoin de climatisation de 228 kW/h par m² de toiture végétalisée grâce à l'évapotranspiration de l'eau retenue (335mm). Cependant, cette performance est fonction du système de végétalisation et de la teneur en eau du substrat. Elle diminue de 85% le matin lorsque le substrat est sec, à seulement 35% l'après midi pour un substrat saturé⁵⁷.

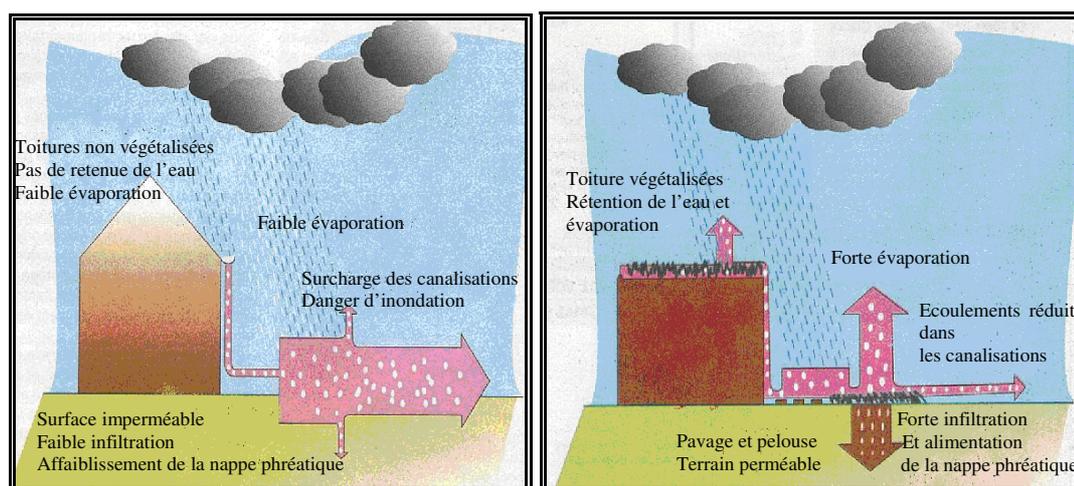


Figure III- 11. Comparaison de la gestion de l'eau par un toit non végétalisé et un toit végétalisée
(Source. CSTB, www.resosol.org)

Effet retard à l'évacuation : après saturation du substrat, une partie de l'eau absorbée est évacuée dans les canalisations avec un retard favorisant un bon écoulement de l'eau et

⁵⁴ Agence régionale de l'environnement et des nouvelles énergies (ARENE), «Toitures végétalisées extensives», Fichier PDF, (consulté en Janv. 2010), [En ligne], www.arenidf.org, p.03.

⁵⁵ Le procédé Sopranature, utilise un substrat (SOPRAFLOOR) dont la rétention en eau (ou la capacité maximale en eau) peut atteindre 60% en volume, soit 60litres/m² sur 10cm seulement d'épaisseur (Brochure Sopranature, 2008, p.16)

⁵⁶ François Lassalle, « Végétalisation extensive des terrasses et toitures, 34 réalisations exemplaires », Editions Le Moniteur, Paris, 2006. p.38.

⁵⁷ Michel Laar & Friedrich Wilhelm Grimme, «Thermal Comfort and Reduced Flood Risk Through Green Roofs in the Tropics », PLEA -23^{ème} conférence, Genève, 6-8 Sep. 2006.

l'alimentation des nappes phréatiques en cas de sol perméable. Sachant que, pour l'ensemble des séquences de pluies d'orages décennales, **le coefficient d'imperméabilisation moyen**⁵⁸ de la terrasse est de l'ordre de 98 % pour une terrasse nue, 80 à 95 % pour une terrasse gravillonnée et 45 à 80 % pour une terrasse végétalisée selon les systèmes et les zones climatiques. Par ailleurs, une partie de l'eau résiduelle issue d'une toiture végétalisée peut être réutilisée pour usage d'eau non potable (arrosage, chasses d'eau...).

7.2. Avantages urbanistiques et sociaux :

✚ Insertion paysagère du bâtiment dans son environnement : Josef Hoffmann fait partie des précurseurs des toitures végétalisées. Il prévoyait l'aménagement de grands espaces plantés sur les terrasses des immeubles d'habitation à plusieurs étages, comme solution pour alléger l'aspect brutal des grands ensembles locatifs des villes en les rendant plus nuancés, plus attrayants⁵⁹ (Fig.III-12).

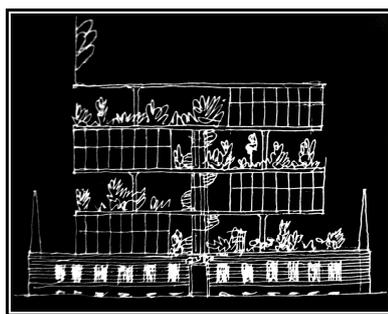


Figure III- 12. Propositions d'immeubles d'habitations avec terrasses plantées par Josef Hoffmann.
(Source. Roland Rainer, 1972)

Les toitures végétalisées permettent aux bâtiments en hauteur de bénéficier d'une plus belle percée visuelle sur des bâtiments moins élevés. En général, la végétalisation de cette cinquième façade par un choix vaste d'espèces, permet d'adapter les couleurs et les formes de ces dernières aux caractéristiques du bâtiment et du site (Fig. III-13). Au lieu de voir les systèmes de ventilation, de climatisation et les différents matériaux composant les toitures qui sont parfois tristes à regarder, il serait beaucoup plus intéressant d'y observer une toiture verte qui offre une excellente solution d'agrémenter ces espaces, d'intégrer le bâtiment dans son environnement et de créer un cadre de vie aux répercussions positives sur l'équilibre psychologique des habitants.

⁵⁸ **Le coefficient d'imperméabilisation moyen** correspond à la proportion d'eau de pluie renvoyée au réseau après environ 3 heures.

⁵⁹ **Roland Rainer**, « *Les extérieurs vivants* », «s. éd.», Suisse, 1972. p.75, 83.

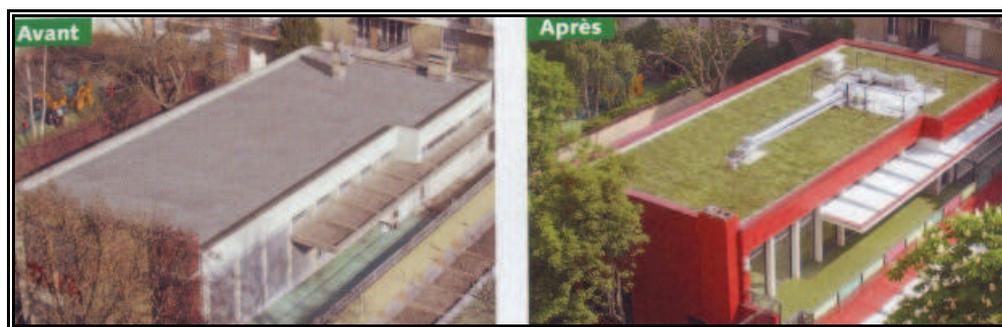


Figure III- 13. Végétalisation extensive de la terrasse inaccessible d'une crèche (à La Réunion)
(Source. Soprema, brochure Sopranature, 2008)

✚ Offrir des surfaces végétales supplémentaires : Les toits végétaux offrent l'unique possibilité, à part les cours, d'aménager de nouveaux espaces verts à l'intérieur des villes densément bâties⁶⁰. Ils sont déjà considérés en Allemagne, en Suisse et aux Pays- Bas, comme un élément structurant des projets d'urbanisme et comme un nouveau type d'espaces verts participant à la satisfaction de besoins psychologiques et sociaux des citoyens en cas d'une végétalisation intensive. D'autre part, les toitures inaccessibles à végétation extensive, atténuent l'aspect artificiel des constructions, offrent au regard d'avantage de nature, ce qui influe sur la perception et l'appropriation de l'espace tout en procurant un sentiment de délasserement et de dépaysement dans un monde complètement minéralisé.

La végétalisation des toits peut aussi avoir des répercussions sur la santé physique des citoyens. Mis à part, la purification de l'air, une étude effectuée en 1986 par les professeurs Ulrich et Simmons a permis de démontrer que les plantes permettent d'atténuer le stress, de diminuer l'hypertension, de contribuer au relâchement musculaire et de doper les émotions et sentiments positifs⁶¹.

Par ailleurs, les travaux de R.Kaplan et S.Kaplan en 1989 et de S.Kaplan en 1992, ont démontré que les aires naturalisées ont une incidence sur l'état mental, l'humeur et le sentiment de sécurité des gens, ce qui contribue à la sociabilité⁶². L'expérience canadienne, a démontré qu'on peut profiter de ces espaces perdus pour une nouvelle activité écologique à savoir ;

⁶⁰ **Sukopp In François Lassalle**, « Végétalisation extensive des terrasses et toitures, 34 réalisations exemplaires », Editions Le Moniteur, Paris, 2006. p.36.

⁶¹ **François Leroux**, « Intégration végétale des bâtiments, contributions environnementales sur une maison individuelle », Mémoire de formation continue- Architecture HQE, Ecole d'Architecture de Lyon, Session 2005.p.08

⁶² **Article**, « Le besoin d'une nature urbaine : un rapport de recherche », (page consultée le 13-01-2008), [En ligne], <http://www.evergreen.ca>

l'agriculture urbaine, qui est bénéfique aussi bien pour le bien-être psychologique des habitants, pour les relations sociales, que pour l'économie des villes.

7.3. Le confort dans le bâtiment et l'économie d'énergie :

✚ Confort acoustique des bâtiments : L'un des avantages de l'installation d'une toiture végétalisée est l'augmentation du confort et de l'isolation acoustique par le substrat, les plantes et l'air, qui isolent le bâtiment du son par absorption, réflexion et déflexion. Le substrat de culture bloque les basses fréquences et les plantes, les hautes fréquences. Selon les essais menés à ce jour, un substrat de 12 cm à lui seul peut atténuer les bruits de 40dB⁶³. L'isolation aux bruits aériens sera d'autant améliorée que la toiture verte est épaisse (loi des masses), alors que l'isolation aux bruits d'impacts (pluie, grêle) sera améliorée même pour de faibles épaisseurs, de même la réflexion des sons sera également limitée⁶⁴.

✚ Le confort thermique des bâtiments : La toiture végétalisée participe à l'amélioration du confort thermique intérieur et donc permet d'importantes économies d'énergie surtout pour la climatisation, puisque les températures dans les villes, peuvent être régulées grâce au tapis végétal, qui va à l'encontre de l'effet de serre et de l'îlot de chaleur urbain.

En effet, l'amélioration du microclimat urbain par la baisse des températures de l'air, l'ombrage et l'évapotranspiration au dessus des toits, permettent de réduire sensiblement les températures surfaciques des toits. De telle manière qu'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°C⁶⁵.

La toiture végétale est considérée comme une solution écologique qui réduit les gains de chaleur par le toit et améliore le confort thermique intérieur grâce aux fonctions biologiques de ses composantes. De ce fait, la consommation énergétique pour la climatisation qui est réduite.

- Selon des statistiques, une baisse des températures de l'air intérieur de 3 à 7 °C amène à des économies de l'ordre de 10 % en climatisation⁶⁶. Alors que d'autres recherches estiment

⁶³ **Steven Peck & Monica Kuhn**, «Lignes directrices de conception des toits verts», Fichier PDF, (consulté en Janv. 2010), [En ligne], www.cebq.org-Lignesdirectricesdeconceptiondetoitsverts. P. 07.

⁶⁴ **M. Eyckens et M.P. Kerstenne**, «Toitures vertes: classification, composition et caractéristiques (1)», In Roof Belgium (Edition 99/5. p.26), (page consultée le 06/06/2008), [En ligne], <http://www.dakweb.nl/rbf/99inhoud.htm>

⁶⁵ **Alain Crégut**, «La toiture végétalisée: une technique d'aménagement durable », Revue Technique du solaire thermique, (page consultée le 11-01-2008) [En ligne], www.resosol.org

⁶⁶ **D.Laroche, A.M.Mitchell, S.Péloquin**, «Les toits verts aujourd'hui ; c'est construire le Montréal de demain », Mémoire présenté à L'office de consultation publique de Montréal dans le cadre du nouveau plan d'urbanisme 2004, 30 juin 2004. p.08.

qu'une réduction de seulement 0,5°C allègera la consommation énergétique de la climatisation d'environ 8 %⁶⁷. Une étude faite par le cabinet de consultants Wetson pour la ville de Chicago a démontré que l'apport d'une végétalisation génère une économie de 20% à 30% sur l'exploitation de climatisation du niveau sous la toiture⁶⁸.

La figure (III-14), montre la demande énergétique due aux échanges thermiques à travers un toit expérimental installé dans le Campus d'Ottawa au Canada et le toit de référence lui correspondant. On voit clairement que la demande énergétique pour le toit végétal est moins importante (de presque la moitié) en période estivale que celle du toit de référence.

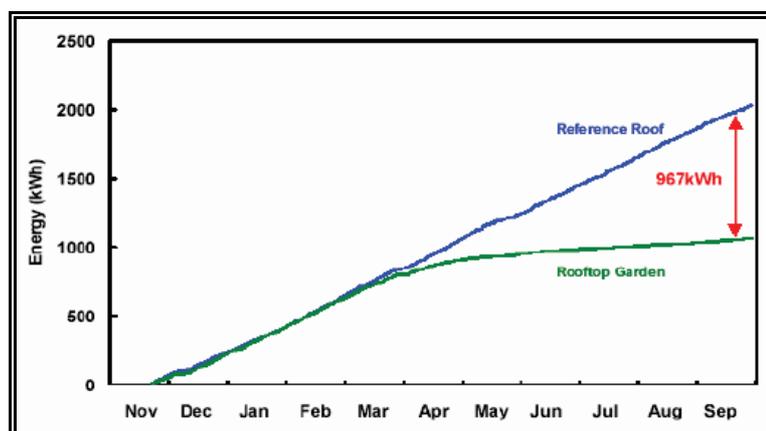


Figure III- 14. Demande énergétique due aux échanges thermiques à travers deux toits (Source. B.Lavoie, V.Simard et M.Tradif, www.aqpere.qc.ca)

En hiver, l'isolation supplémentaire fournie par le substrat contribue à réduire les besoins énergétiques pour le chauffage. L'ampleur des économies d'énergie dépend de la taille de l'immeuble; de son emplacement; de la profondeur du substrat de croissance; du type de plantes et d'autres variables. Cependant c'est en été que les économies d'énergie sont importantes.

7.4. Avantages économiques :

✚ Economie sur le coût d'exploitation des bâtiments : Mis à part, l'économie d'énergie pour le chauffage et la climatisation, les toits végétaux peuvent doubler la durée de vie des toits traditionnels, selon l'expérience européenne. Celle-ci est estimée à une moyenne de 60 ans par

⁶⁷ François Leroux, «Intégration végétale des bâtiments, contributions environnementales sur une maison individuelle», Mémoire de formation continue- Architecture HQE, Ecole d'Architecture de Lyon, Session 2005.p.12.

⁶⁸ Suzane Elson (30.12.2000), In Sopranature- Soprema, « Toiture végétalisées », Brochure n° 08/006, Studio Mark C.Ashcroft, Strasbourg, 2008, p.09.

Denis Gingras⁶⁹. La fonction de protection des étanchéités a été vérifiée en 1983 par Darius et Drepper, pour des toitures à colonisation spontanée. Où les toits après plusieurs années de colonisation ne présentaient aucun signe de détérioration due à la végétation spontanée⁷⁰.

La végétalisation des toits constitue donc une couche supplémentaire protectrice de la membrane d'étanchéité par la réduction de l'amplitude thermique journalière et annuelle qui évite les chocs thermiques (pluie froide sur les toitures chaudes) et réduit ainsi les sollicitations mécaniques de la toiture (dilatation, rétraction). D'autre part, le substrat permet de bloquer les rayons ultraviolets (UV) qui sont responsables d'environ 5% du vieillissement des membranes⁷¹, en plus de la protection contre le poinçonnement, les gaz et les agents atmosphériques.

La protection et la prolongation de la durée de vie du toit procurée par les toits végétaux permettent de réduire les travaux de réfection des couvertures et d'économiser sur le coût d'exploitation des immeubles à long terme.

✚ Economie d'intérêt public : Les expériences déjà réalisées dans divers pays européens montrent que les toits végétaux contribuent aussi à la réduction des dépenses dans d'autres domaines. Tels que : les dépenses de santé ; de nettoyage des poussières dans la rue, les dépenses d'entretien et de réparation dues aux inondations, aux dysfonctionnements des réseaux d'eaux pluviales, des égouts ou des stations d'épuration... En plus de la réduction du coût de revient à long terme, même si le coût de réalisation reste plus important pour les toits végétaux⁷².

Selon Crégut⁷³, lorsque les toitures végétalisées sont judicieusement conçues, elles redonnent aux villes notamment industrielles, une indéniable valeur esthétique et valorisent l'habitat en offrant une bonne solution pour que le bâtiment s'intègre dans son environnement. Ce qui ajoute une plus-value pour la vente ou la location du bâtiment et permet, d'après Steven Peck and Monica Kuhn de bonifier la valeur de copropriété.

⁶⁹ **D.Laroche, A.M.Mitchell, S.Péloquin**, «*Les toits verts aujourd'hui ; c'est construire le Montréal de demain* », Mémoire présenté à L'office de consultation publique de Montréal dans le cadre du nouveau plan d'urbanisme 2004, 30 juin 2004. p.09-10.

⁷⁰ **François Lassalle**, «*Végétalisation extensive des terrasses et toitures : 34 réalisations exemplaires* », Edition Le Moniteur, Paris, 2006. p.34-35.

⁷¹ **Alain Crégut**, «*La toiture végétalisée: une technique d'aménagement durable* », Technique du solaire thermique, (page consultée le 11-01-2008) [En ligne], www.resosol.org

⁷² Sachant qu'un toit conventionnel revient entre 40 et 90 € par m², pour une durée de vie comprise entre 15-20 ans et 30-50 ans, avec des travaux de rénovation plus ou moins importants à échéance. En comparaison, une toiture végétalisée extensive coûte entre 110 et 230 € par m², alors que le toit intensif a un coût de revient compris entre 220 et 440 € par m². (**F.Lerroux**, 2005- p.10)

⁷³ **Alain Crégut, op. cit.** [En ligne], www.resosol.org

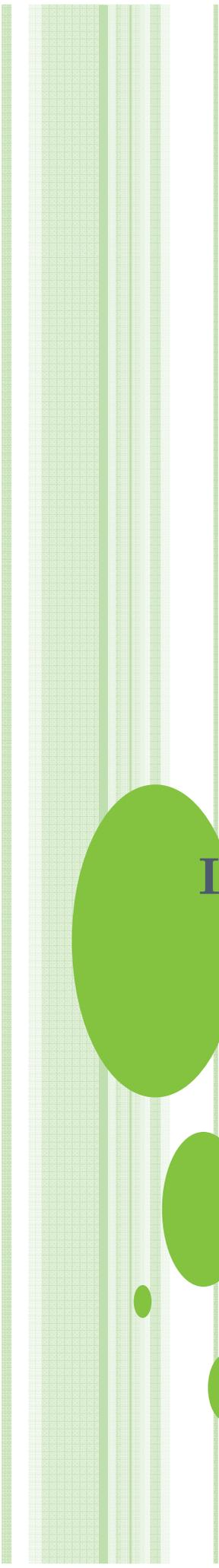
Conclusion :

Le végétal devient de plus en plus précieux en ville à cause de l'évolution de nos sociétés vers plus de technologies. Cet élément vivant intégré à l'enveloppe du bâtiment est très prisée par les pays développés puisqu'il présente autant d'avantages qu'un aménagement sur le sol. Cependant, la végétalisation des toits est soumise à plusieurs contraintes, et elle est régit par des normes et des réglementations strictes, qui assurent la sécurité et la pérennité des toits.

Les contraintes qui conditionnent la conception des toits végétaux concernent : les paramètres climatiques, les caractéristiques du bâtiment, le type d'entretien et la fréquence d'arrosage admis par le propriétaire. L'analyse de ces contraintes permet d'adapter au mieux le choix du système de végétalisation (extensif, intensif...), le choix des espèces végétales et leur mise en œuvre pour que l'installation soit durable.

La toiture végétalisée présente l'avantage d'être un système constructif écologique, efficace et durable. En plus des avantages environnementaux, écologiques, sociaux, urbanistiques qu'elle procure en rajoutant des espaces verts dans les centres urbains pour le bien-être de chacun. Ces surfaces végétales supplémentaires sur les toits sont un excellent moyen pour créer des microclimats et diminuer l'effet d'îlot de chaleur urbain. Ce qui se répercute sur le confort thermique intérieur et permet d'effectuer des économies sur la consommation énergétique.

Dans ce sens, le prochain chapitre constitue un état de l'art sur l'efficacité thermique de la toiture végétalisée. Son but est d'approfondir les informations concernant la régulation thermique procurée par ces toits en été.



Chapitre IV



**Les toits végétaux : Une alternative
au rafraîchissement passif
des bâtiments**

Introduction :

Le confort thermique intérieur et le rafraîchissement passif des bâtiments dus à l'installation d'une toiture végétalisée ont été largement traités à travers le monde pour différents climats et selon différentes méthodes.

Afin de vérifier l'efficacité thermique de cette installation écologique, certains chercheurs ont étudié son impact direct par l'analyse *des températures de l'air intérieur*. Alors que la plupart d'entre eux, ont analysé *les températures surfaciques intérieures et extérieures* de la toiture et *les amplitudes thermique diurnes* des surfaces des toits, les *gains et pertes* de chaleur ainsi que le *flux de chaleur* à travers le toit pouvant affecter le confort thermique intérieur mais aussi les besoins pour la climatisation.

Les paramètres indirects se rapportant au rafraîchissement passif intérieur ont été sujet à d'autres investigations tels que; *le rafraîchissement de l'air extérieur* qui a un impact non seulement sur l'effet d'îlot de chaleur urbain mais aussi sur les amplitudes thermiques de la surface externe de la toiture. D'autre part, *la température et l'humidité relative de l'air dans la couche de végétation* ainsi *l'évapotranspiration* procurées par la toiture végétalisée n'ont pas été épargnées des recherches, puisqu'elles agissent sur le rafraîchissement intérieur.

Cette *literature review* a pour but, l'analyse des différents résultats de recherches concernant le rafraîchissement passif des bâtiments par les toitures végétalisées. La synthèse de ce chapitre permet de classer les paramètres propres à ces toitures ainsi que les conditions externes les plus influents sur leur efficacité thermique et sur le confort thermique intérieur. En plus de déterminer une méthodologie pour la présente recherche.

I. Impact des toits végétaux sur le rafraîchissement intérieur :

Lorsque nos intérieurs sont frais en été, ils nous procurent une sensation de confort, définie comme un « sentiment de bien-être et de satisfaction »¹. En effet, dans le bâtiment, les gens sont sensibles à plusieurs types de confort, dont on distingue *le confort thermique*. Ce dernier représente l'équilibre thermique qui s'établit entre le corps et l'environnement proche, tout en incluant les dimensions culturelles et psychologiques.

¹ Microsoft ® Encarta ® 2007. © 1993-2006 Microsoft Corporation. [CD- ROM].

L'équilibre thermique s'effectue entre l'énergie que nous irradiions et l'air de la pièce qui l'absorbe. Ces échanges thermiques se font par *rayonnement, conduction, convection* ou *évaporation*.

La sensation de confort thermique reste assez subjective et difficile à mesurer. Les critères de confort les plus couramment utilisés dans le design architectural sont basés sur les travaux de Fanger. Ce dernier a développé une théorie selon laquelle le confort thermique dépend de six paramètres :

- La température de l'air intérieur (**T_a**)² et son humidité³.
- La température des parois (**T_p**).
- Le déplacement de l'air⁴.
- Le métabolisme interne des occupants⁵.
- La qualité des vêtements portés⁶.

Par ailleurs, la ventilation contribue aussi à la qualité de l'air ambiant et la dissipation de la chaleur. Une ventilation naturelle passive basée sur les déplacements naturels de l'air est à favoriser dans un bâtiment.

Le mécanisme d'autorégulation du corps humain laisse donc apparaître une zone où la variation de confort thermique est faible : c'est *la plage de confort thermique*.

De façon simplifiée, on définit une température de confort ressentie, dite encore *température opérative* ou *température résultante sèche*⁷ comme suit :

² **Givoni** (1991) suggère une zone de confort entre 18°C et 25°C en hiver et de 20°C à 27°C en été pour les zones à climat tempéré dans des conditions d'air calme. Avec l'augmentation de 2°C pour la limite supérieure pour les régions chaudes (**Abdou.S.** 2004, p.58)

³ C'est le rapport exprimé en pourcentage entre la quantité d'eau contenue dans l'air à la température **T_a** et la quantité maximale d'eau pouvant être contenue à la même température lorsque l'air est saturé. Il est admis des variations de l'humidité relative entre 19 à 65 % (**Benhalilou**, 2008, p.40)

⁴ Influence les échanges de chaleur par convection. En pratique, dans un bâtiment, les vitesses de l'air ne devraient pas dépasser les 0,2 m/s (**IBGE**, 2007. p.2). L'individu commence à ressentir le mouvement de l'air à cette vitesse.

⁵ Il s'agit de la production de chaleur interne au corps humain permettant de maintenir celui-ci autour de 36,7 °C. Lorsqu'une personne est en mouvement, un métabolisme de travail correspondant à son activité particulière s'ajoute au métabolisme de base du corps au repos. Une unité appelée "**met**" a été créée pour caractériser le métabolisme

⁶ Représente une résistance thermique aux échanges de chaleur entre la surface de la peau et l'environnement.

⁷ **Alain Liébard et André De Herde**, «*Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique* », Editions Le Moniteur, Paris. p. 80- 82.

$$\mathbf{T_{rs} = (T_a + T_p) / 2}$$

Equation IV- 1

T_{rs} : Température résultante sèche.

T_a : Température ambiante ou température sèche, mesurée par un thermomètre ordinaire.

T_p : Température des parois. Celle-ci est égale à la moyenne des températures des parois environnantes pondérées par leur surface

D'autre part, les plantes aident à contrôler la température de l'air et l'humidité relative à l'extérieur des bâtiments. Cette régulation hygrothermique affecte le confort thermique à l'extérieur et à l'intérieur des bâtiments mais reste fonction du climat de la région. La végétation a un pouvoir de rafraîchissement dû aux effets combinés de :

- La réduction du rayonnement de grandes longueurs d'onde réfléchi par la couverture végétale, diminuant les températures surfaciques des parois qui les absorbent.
- La chaleur latente : Lorsque l'humidité produite par transpiration est accrochée à la surface des feuilles et que l'air est chaud et non saturé, il y aura d'une part ; un échange de chaleur entre l'eau et l'air. D'autre part ; l'évaporation de cette eau nécessite l'absorption d'une quantité d'énergie de l'air ambiant. C'est cet effet évaporatif qui produit un rafraîchissement de l'air en diminuant sa température et augmentant l'humidité. Donc la végétation produit une *chaleur latente* et rafraîchit l'air extérieur et par là l'air intérieur des bâtiments.
- Dans le cas de petites zones de végétation, l'effet de refroidissement des parois est obtenu principalement par l'effet de l'ombre.

1. Impact sur les températures de l'air intérieur :

La température de l'air intérieur doit être maintenue stable et uniforme sous des conditions climatiques externes variables. Ce qui ne peut être atteint que par un choix judicieux des matériaux de construction de grande capacité calorifique, par un dimensionnement adéquat des ouvertures et leur orientation par rapport au soleil et au vent⁸.

La hausse des températures de l'air intérieur est fonction des gains de chaleur par l'enveloppe du bâtiment, les occupants, ou autres sources de chaleur (appareils, éclairage...).

⁸ **Abdou Saliha**, «*La thermique dans le bâtiment*», cours de post graduation architecture bioclimatique, Université de Constantine, 2007-2008.

L'installation d'un toit végétal permet d'atteindre un confort thermique intérieur meilleur en utilisant une moindre énergie pour le chauffage et spécialement pour la climatisation⁹. Le rafraîchissement des bâtiments procuré par les toitures végétalisées a été constaté par plusieurs chercheurs : Santamouris et al. (2007), Takakura, et al. (2000), Niachou et al. (2001), Kumar et Kaushik (2005)... Il se trouve que ces toits n'agissent pas sur les humidités relatives à l'intérieur des bâtiments, mais plutôt sur les transferts de chaleur à travers la paroi.

La baisse des températures de l'air intérieur sous un toit végétal est due à sa capacité à diminuer le transfert de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur et ce, grâce à l'ombrage, l'évapotranspiration et l'inertie importante du substrat. Cette baisse est évaluée en moyenne entre 3°C à 4°C¹⁰. Cependant, on ne peut généraliser ces résultats puisqu'ils peuvent varier selon le climat de la région étudiée, les caractéristiques du bâtiment, le complexe de culture, l'espèce végétale, la couverture foliaire et d'autres paramètres.

Afin de déterminer l'impact de la toiture végétalisée sur le confort thermique intérieur, **Niachou et al**¹¹ ont effectué une expérimentation sous le climat chaud et sec (*Loutraki, Grèce*). Celle-ci consiste à mesurer les températures de l'air dans deux bâtiments, l'un avec un toit végétal (un hôtel) et l'autre sans toit végétal (bâtiment adjacent) considéré comme toit de référence. Les mesures ont été effectuées chaque demi heure, avec et sans conditionnement de l'air. Leur recherche a révélé, qu'il y a une baisse significative des températures de l'air à l'intérieur d'un bâtiment recouvert de végétation, procurant une amélioration du confort thermique intérieur de 2°C. La figure (IV-1) montre que les températures de l'air à l'intérieur du bâtiment avec un toit végétal sont moins importantes durant la journée que celles du bâtiment de référence qui se caractérise par des variations de température de l'air plus importantes, ce qui augmente ses amplitudes thermiques.

⁹ **Onmura et al.** (2001) In **Johnnel Kiera Lanham**, «*Thermal Performance of Green Roofs in Cold Climates*», thèse de master en science, Queen's University Kingston, Ontario, Canada, Septembre 2007. p. 02.

¹⁰ **François Leroux**, «*Intégration végétale des bâtiments, contributions environnementales sur une maison individuelle*», Mémoire de formation continue- Architecture HQE, Ecole d'Architecture de Lyon, Session 2005.p.12.

¹¹ **Niachou, A, K.Papakonstantinou, M.Samtamouris et G.Mihalakakou**, «*Analysis of the Green Roof Thermal Properties and Investigating of its Energy Performance*», Energy and Building, vol. 33, 2001, pp.719-729.

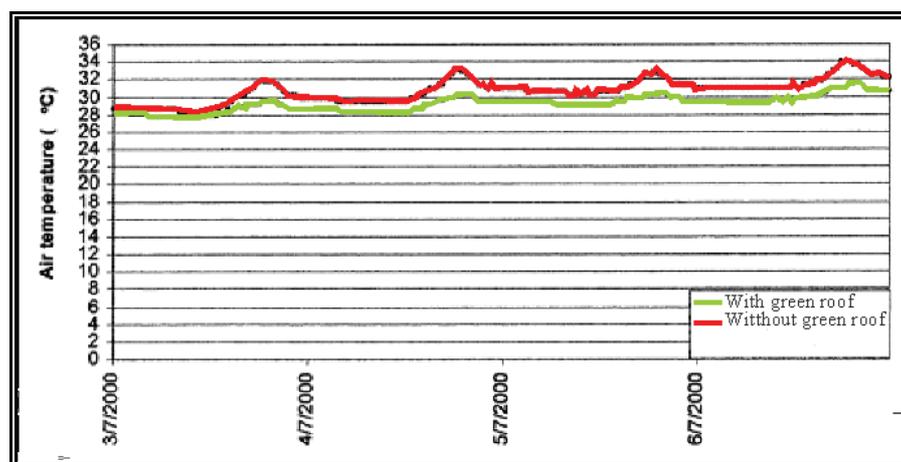


Figure IV- 1. Températures de l'air intérieur des bâtiments avec et sans toit végétal. (Source. Niachou, A et al, 2001. Réadaptée par auteur)

Le bâtiment avec le toit de référence possède les plus importantes valeurs des températures de l'air intérieur (Tableau IV-1). La différence entre les deux toits est de l'ordre de 2, 3 et 1°C respectivement pour les températures diurnes moyennes, les températures maximales et les températures minimales de l'air.

Tableau IV- 1. Résultats des températures de l'air dans le bâtiments avec et sans toit végétal durant la période sans conditionnement de l'air (Source. Niachou et al.)

Building	With green roof	Without green roof
Average daily air tempéarture (°C)	29	31
Average maximum air temperature (°C)	30	33
Avrage minimum air temperature (°C)	29	30
Average daily temperature width (°C)	2	3
Number of air temperature exceeding 30°C	28 (15) ^a	132 (69) ^a
Number of air temperature exceeding 32 °C	0 (0) ^a	30 (16) ^a
Total number of measurements	192	192

^a The values in parenthesis are in percent.

Les résultats des températures de l'air intérieur obtenus pour le climat chaud et sec semblent moins importants que ceux du climat chaud et humide qui atteignent une réduction moyenne de 7.2°C¹². En effet, **Kumar et Kaushik** ont comparé d'une part les températures de l'air intérieur sous une toiture végétale existante et sous un toit de référence. Et d'autre part, ils ont utilisé des formules mathématiques pour évaluer le potentiel de rafraîchissement du toit végétal en l'Inde (Yamuna Nagar, Haryana).

¹² **Rakesh Kumar et S.C.Kaushik**, «Performance Evaluation of Green Roof and Shading for Thermal Protection of Building », Building and Environment, Vol. 40, 2005, pp. 1505-1511.

Ces chercheurs ont constaté que la réduction des températures de l'air intérieur et des amplitudes thermiques de celles-ci sous le toit végétal subit l'influence de deux paramètres :

- L'alternance du jour et de la nuit : la réduction maximale des températures de l'air intérieur est survenue durant la période la plus chaude de la journée (12 :00 à 15 :00), et la minimale est relevée au levé du soleil.
- L'ombre portée sur le toit végétal : sachant que les toitures végétales doivent bénéficier en général d'un ensoleillement minimal de trois à quatre heures par jour. Il arrive cependant que ces dernières subissent l'ombrage des éléments architecturaux du site (murs, bâtiment adjacent...). Dans ce cas là, la performance de la toiture végétale n'est pas compromise, au contraire, elle présente de meilleurs résultats quand à la réduction de la température de l'air intérieur.

En effet, les résultats d'une simulation effectuée par **Kumar et Kaushik** pour un volume de (6m x5m x 4m) ont révélé que, lorsque les températures de l'air intérieur sont de 28.47°C et 25.7°C respectivement pour le toit de référence et le toit végétal. Celle du toit végétal ombré est de seulement 23.6°C (soit une amélioration de 2.1°C par rapport au même toit végétal exposé au soleil et de 4.87°C par rapport au toit de référence).

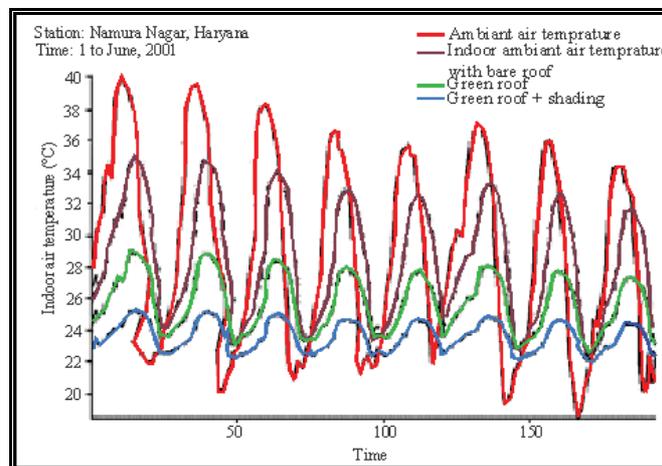


Figure IV- 2. Variations des températures de l'air intérieur (résultats de la simulation)
(Source. Kumar & Kaushik, 2005, Réadaptée par auteur)

La figure (IV-2) montre que les températures de l'air intérieur d'un bâtiment sans toit végétal sont soumises à des amplitudes thermiques diurnes importantes. Celles-ci sont de l'ordre de 10.2°C, alors qu'elles diminuent à seulement 5.1°C et 2.1°C respectivement pour une toiture

végétale ensoleillée et une toiture végétale ombrée. Ceci se répercute directement sur le potentiel de rafraîchissement de la toiture végétale, estimé à 3.02kWh par jour¹³.

2. Impact sur les températures surfaciques de la toiture :

De nombreux toits sont exposés aux radiations solaires du lever au coucher du soleil. Une importante partie des rayons frappant ces surfaces est absorbée, une autre est réfléchiée en fonction de l'albédo du matériau, de sa couleur et de sa rugosité. Les hausses des températures surfaciques externes des toits causent des surchauffes dans les espaces intérieurs par conduction et rayonnement du toit vers l'intérieur. Elles représentent les plus importants gains de chaleur à l'intérieur du bâtiment qui diminuent la sensation de bien-être. En effet, cette sensation diminue lorsque une différence de plus de 2°C existe entre les températures des parois et l'air ambiant¹⁴.

L'introduction de la végétation peut avoir un effet rafraîchissant en diminuant les températures surfaciques des éléments qu'elle recouvre. Watson et Camous¹⁵ ont spécifié deux températures qui distinguent les éléments minéraux des éléments végétaux. Leur «*Températures surfaciques*» et «*La zone microclimatique*» entre 0.30m à 1.20m au dessus de ces surfaces, présentant des différences de températures appréciables de l'ordre de 6°C et plus, qui diffèrent selon le matériau. Par exemple, la différence des températures surfaciques entre l'herbe et l'asphalte peut facilement dépasser 15°C, et les toits sont encore plus chauds. Il existe même des écarts de température entre l'air et la surface du feuillage variant entre -2°C et +2°C¹⁶.

La réduction des températures surfaciques externes sous un toit végétal par rapport à un toit non végétalisé a été constatée par plusieurs chercheurs ; Del Bario (1998), Onmura et al. (2001), Wong et al. (2003), Laar et Grimme (2005), Liu et Minor (2005), Liu et Baskaran (2005, 2006), Alexandri et Jones, (2006)... La différence entre les températures surfaciques externes des deux toits peut être très importante, elle est estimée entre 11 et 12°C pour le climat chaud et humide du Brésil par Laar et Grimme (2005), 14.4°C à Athènes avec une réduction maximale de 26.2°C (Alexandri et Jones, 2006). Selon Onmura et al. (2001) et Liu et Minor (2005), la réduction moyenne des températures surfaciques du toit végétal par rapport au toit de référence atteint 30°C à 40°C.

¹³ Rakesh Kumar et S.C.Kaushik, «*Performance Evaluation of Green Roof and Shading for Thermal Protection of Building* », Building and Environment, Vol. 40, 2005, pp. 1505-1511.

¹⁴ Article, «*Le bien-être thermique*», (Page consultée le 02.02.2008), [En ligne] www.perso.wanadoo.fr.

¹⁵ Donald Watson et Roger Camous, «*L'habitat bioclimatique*», Edition L'Etincelle, Canada, 1986. p.33.

¹⁶ Marjorie Musy, «*Le rôle climatique de la végétation urbaine* », CERMA, Revue Culture Et Recherche, N° 113, (automne 2007), p 17. Fichier PDF, [En ligne] <http://www.cerma.archi.fr>. p.17.

Les facteurs permettant la baisse des températures surfaciques sont : la résistance thermique et la capacité thermique de la toiture végétalisée, l'absorption des radiations solaires par la végétation, le transfert de chaleur par convection à la surface de la toiture végétalisée et le transfert de chaleur latente due à la vapeur d'eau dans la couche de végétation¹⁷.

Contrairement à ce qu'on peut penser, les toits végétaux ne permettent pas une réduction continue des températures surfaciques du toit, puisque celle-ci dépend de leurs caractéristiques techniques et des paramètres suivants :

- La température de l'air extérieur : lorsque les températures de l'air extérieur sont élevées la différence entre les températures surfaciques externes du toit végétal et le toit de référence est plus importante. Les recherches menées à l'Université de Géorgie, ont révélé que lorsque la température de l'air extérieur est de 25°C, la température surfacique externe du toit végétal est plus basse de 10°C approximativement que le toit adjacent non végétalisé. A 35°C, cette différence atteint 25°C.
- La nébulosité (ciel clair ou ciel nuageux): Sachant que les nuages diffusent le rayonnement solaire et réduisent les radiations directes et l'éclairement de 5 ou 30% par rapport à un ciel clair. Ce dernier peut descendre à moins de 5% pour des nuages de pluie, comme il peut préserver une grande intensité d'éclairement avec des nuages blancs¹⁸. Ce paramètre influe sur la quantité d'énergie absorbée par les surfaces minérales et végétales et donc sur leurs températures. Dans ce sens, **Onmura et al**¹⁹ ont effectué une expérimentation sur la toiture d'un bâtiment de trois étages construit en béton à Osaka (Japon). Une partie de la toiture est recouverte de pelouse (4m x 9m) (Cas A) le reste de la surface constitue le toit de référence (Cas B). La figure (IV-3) montre que les températures surfaciques du toit végétal et du toit de référence baissent sous un ciel couvert (Fig.IV-3.b), et que la différence maximale entre elles est réduite de 30°C sous un ciel clair (Fig.IV-3.a) à seulement 10°C pour un ciel couvert.

¹⁷ **S.Onmura, M.Matsumoto et S.Hokoi**, « *Study on Evaporative Cooling Effect of Roof Lawn Gardens* », Energy and Environment, vol. 33, 2001. pp. 653-666.

¹⁸ **Huetz De Lemps, A.** « *La végétation de la terre* », Editions Masson et Cie, Paris, 1970. p. 13,14.

¹⁹ **S.Onmura, et al**, *Op.cit.*

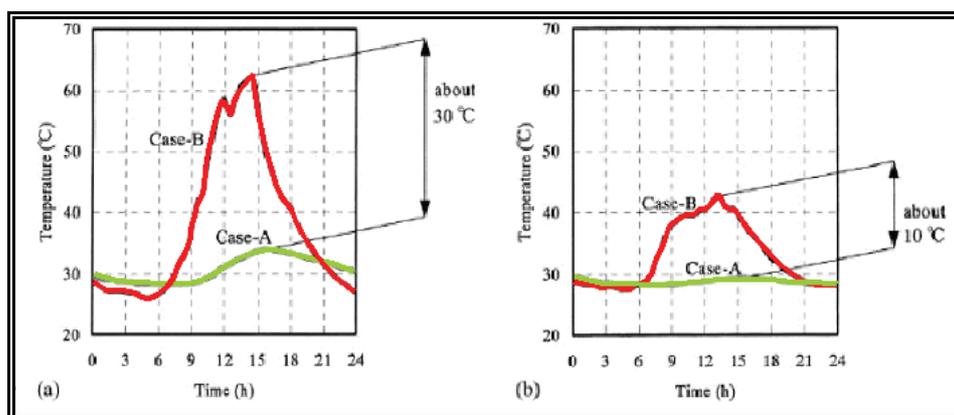


Figure IV- 3. Comparaison entre la température surfacique du support du toit pour le (cas A) et (Cas B). Graphe (a) journée à ciel clair. Graphe (b) journée à ciel couvert.
(Source. S.Onmura et al, 2001. Réadaptée par auteur)

- Différence entre le jour et la nuit : durant la journée, les toits végétaux réduisent les températures surfaciques externes des toits. D'après **Liu et Minor**²⁰, ces dernières atteignent leurs valeurs maximales tard dans l'après midi (18h30), avec un déphasage par rapport aux toits de références, dont les températures surfaciques sont maximales à 14h. D'autre part, **Wong et al.**²¹ affirment que les toits atteignent une baisse maximale des températures surfaciques externes en début d'après midi (12h30), lorsque les radiations solaires sont intenses. Néanmoins, celle-ci reste fonction de la couverture foliaire.
- Durant la nuit, plusieurs chercheurs ont constaté un phénomène inverse (Onmura et al. 2001, Laar et Grimme 2005, Wong et al, 2003, 2006) (Fig. IV-3-a). En général, l'enveloppe du bâtiment émet un rayonnement vers la voûte céleste, qui possède une température inférieure de 20°C par rapport à la température de l'air ambiant en absence de nuages²². Ce rayonnement permet la baisse des températures des surfaces minérales, alors que la végétation agit autrement (arbre, herbe ou autres). Le feuillage constitue un ciel pour le sol au pied de l'arbre, sa température est supérieure que celle de la voûte céleste et donc, la chute des températures des surfaces sous un arbre est limitée la nuit²³.

²⁰ **Liu, k. et J. Minor.** «Performance evaluation of an extensive green roof », NRC-CNRC, NRCC-48204, 2005, Fichier PDF, [En ligne] <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/irepubs>

²¹ **Wong Nyuk Hien et al.** «Exploring the Thermal Benefits of Plants in Industrial Areas with Respect to the Tropical Climate», PELA 2006, 23^{ème} conférence, Genève, 6-8 Sep. 2006

²² **ARENE** (Agence Régionale de l'Energie), «Confort d'été en Provence-Alpes-Côte d'Azur : traitement des espaces extérieurs », Fichier PDF, [En ligne] www.aren.fr.

²³ **Alain Liébard et André De Herde**, «Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique », Editions Le Moniteur, Paris. p.181.

Le rayonnement thermique nocturne est donc, réduit par la résistance du complexe de culture et par le potentiel d'isolation de la végétation. D'ailleurs, ce dernier, peut dans certaines conditions anéantir l'effet de refroidissement passif dû à sa protection solaire et de ce fait être *contreproductif*, puisque les émissions de rayonnement de grandes longueurs d'onde sont réduites²⁴. Cependant, pour une nuit à ciel couvert, cette différence n'est plus perceptible puisque le rayonnement diminue aussi pour les surfaces minérales (Fig. IV-3-b).

Laar et Grimme²⁵ ont abouti aux mêmes conclusions concernant les températures surfaciques intérieures. Ils ont effectué une expérimentation à Rio De Janeiro, en utilisant un prototype de toits (box) partagé en quatre parties de 4m² chacun (1m x 4m) avec une pente de 2%. Ces derniers sont construits en bois et peints en blanc. La figure (IV-4) affiche durant la journée une baisse des températures surfaciques intérieures du toit lorsque celui-ci est végétalisé. Alors que la nuit, celles-ci atteignent 31°C contre 29°C pour le toit de référence.

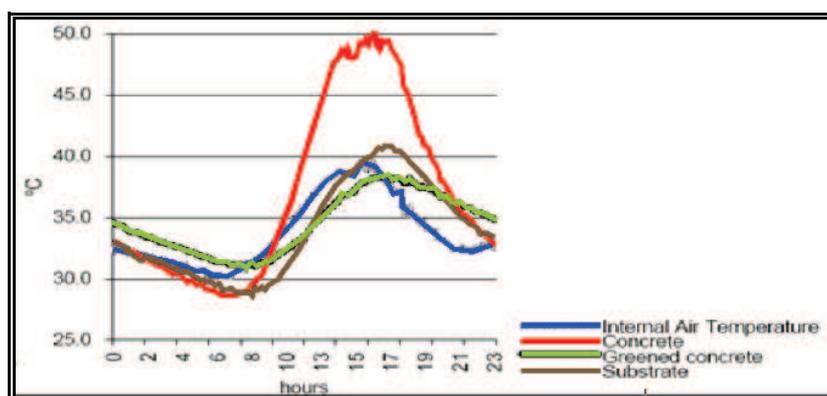


Figure IV- 4. Profil des températures de l'air et températures surfaciques des toits avec dalle en béton (toit de référence et toit végétalisé)
(Source. Laar et .Grimme, 2005. Réadaptée par auteur)

3. Impact sur l'amplitude des températures surfaciques:

Le rôle principal des parois est de protéger le bâtiment des effets des conditions climatiques en absorbant, filtrant ou repoussant la chaleur. La paroi ne doit pas se limiter au rôle de médiateur entre l'environnement externe et l'ambiance interne mais doit assurer en plus le confort et le bien-être de l'utilisateur en s'adaptant aux apports et pertes de calories²⁶.

²⁴ Givoni In TAREB, «Intégration architecturale» In «The Low Energy Architecture Training Course», London Metropolitan University, 2004. p.26. Fichier PDF, [En ligne], www.iee-library.eu

²⁵ Michael Laar et Friedrich Wilhelm Grimme, «Thermal Comfort And Reduced Flood Risk Through Green Roofs In The Tropics », PLEA- 23^{ème} conférence, Genève, 6-8 Sep. 2006.

²⁶ Abdou Saliha, «La thermique dans le bâtiment», cours de post graduation, option Architecture bioclimatique, 2007-2008.

La surface externe du toit est souvent soumise aux fluctuations de températures les plus larges en fonction de son type et de sa couleur²⁷. Les températures surfaciques de cette dernière suivent les fluctuations saisonnières et quotidiennes des températures de l'air ambiant, ce qui engendre un réchauffement puis un refroidissement, continus et périodiques des composantes de la toiture. En effet, la surface du toit de référence exposée au soleil absorbe les radiations durant le jour et ses températures augmentent, la chaleur absorbée par cette dernière est dégagée la nuit ce qui réduit sa température surfacique (Fig. IV-5), créant d'importantes amplitudes thermiques diurnes (différence entre les températures maximales et minimales diurnes). D'après plusieurs chercheurs, les amplitudes thermiques diurnes des surfaces externes des toits peuvent être réduites en réduisant leur températures et ce, en installant des toit végétaux (Bass et Baskaran, 2003, Wong et al. 2003, Liu, 2004, Liu et Baskaran, 2005, Liu et Minor 2005).

Une expérimentation a été effectuée par le NRC (National Research Canada) dans le campus d'Ottawa au Canada. La moitié du toit d'un bâtiment a été végétalisée en plantant des graines de fleurs sauvages, des sedums de différentes espèces et des plantes annuelles sur 150mm de substrat. Les résultats obtenus montrent que, les surfaces externes du toit de référence sont sensibles aux variations saisonnières des températures de l'air (Fig. IV-5), leurs températures augmentent et baissent avec des valeurs extrêmes ce qui augmente les amplitudes thermiques jusqu'à 46°C et plus en été (Fig. IV-6). Alors que, la végétation et le substrat de culture du toit végétal, procure des variations des températures surfaciques moins importantes en été (Fig. IV-5) réduisant de ce fait les amplitudes thermiques à une moyenne de 6.5°C (Fig. IV-6).

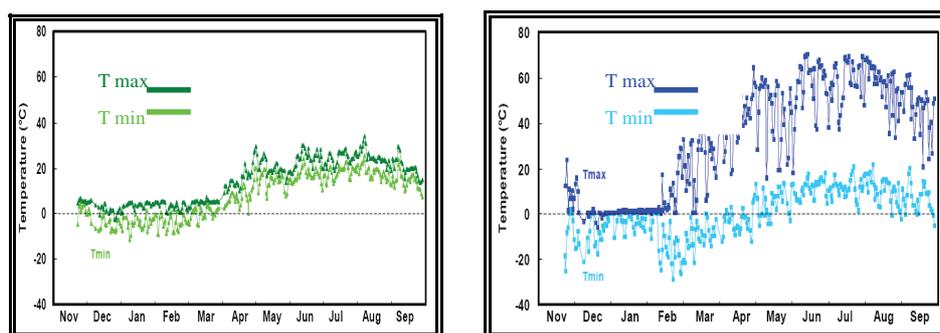


Figure IV- 5. Profil des températures surfaciques extérieures maximales et minimales des surfaces externes des toits du campus. A gauche le toit végétal, à droite le toit de référence (Source. Bass & Baskaran, 2003, Réadaptée par auteur)

²⁷ B.Givoni, «L'homme, l'architecture et le climat », Edition Le Moniteur, Paris, 1978. p .163.

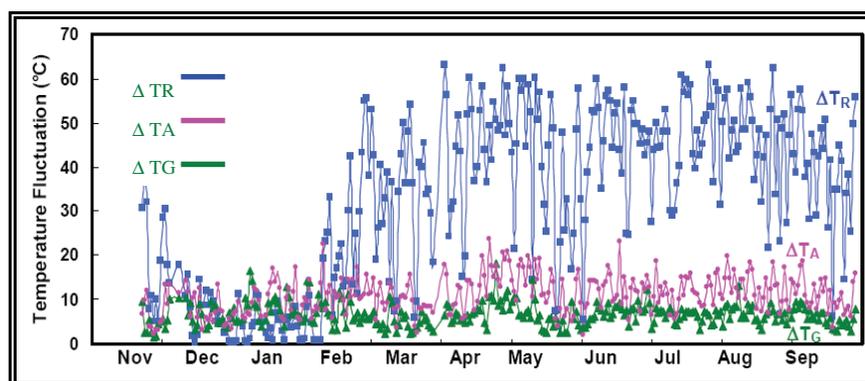


Figure IV- 6. Les amplitudes thermiques diurnes moyennes ; des températures de l'air (T_A), des températures surfaciques externes du toit de référence (T_R) et du toit végétal (T_G).
(Source. Bass & Baskaran, 2003)

4. Impact sur le flux de chaleur :

Chaque partie de l'enveloppe du bâtiment est soumise aux transferts thermiques. La connaissance et la maîtrise de ces transferts permettent la gestion de la facture énergétique d'un bâtiment ainsi que de son impact écologique.

Les variations des conditions climatiques extérieures agissent sur les températures surfaciques externes des toits et créent une différence de température entre la surface intérieure la surface extérieure. Un flux de chaleur est donc créé, il est entrant dans les bâtiments pendant les mois d'été, où la température de l'air extérieur est plus chaude que la température de l'air dans le bâtiment. Et il est sortant du bâtiment pendant les mois d'hiver.

Le toit reçoit en été une grande quantité de radiations solaire et donc, les gains de chaleur sont importantes. Elles sont de l'ordre de 23.4 MJ/m² par jour dans une région aride, contre 6.18 MJ/m², 13.95 MJ/m², 6.61 MJ/m² et 5.69 MJ/m², respectivement pour les parois verticales Sud, Ouest, Est et Nord²⁸. De ce fait, la réduction des températures intérieures peut être atteinte en réduisant les radiations solaires reçues par les toits.

Plusieurs chercheurs ont prouvés que les toits végétaux constituent une solution passive à ce problème, puisqu'ils permettent de réduire les flux de chaleur entrant dans le bâtiment en été et de ce fait, réduisent les gains de chaleur par le toit. (Takakoura, et al. 2000, Onmura et al.2001, Wong et al. 2003, Lazazin et al, 2005, Liu et Baskaran, 2005, Liu et Minor 2005, Santamouris et al. 2007 ...).

²⁸ Emad H.Amer, «Passive options for solar cooling of buildings in arid areas», Energy, vol .31, 2006, pp.1332-1344

La réduction du flux de chaleur entrant dans le bâtiment en été varie d'une recherche à une autre, elle est comprise entre 50 et 90%. Le flux de chaleur est fonction à la fois : des conditions climatiques extérieures selon Theodosiou (2003), et des composantes de la toiture végétale (isolation, substrat et couverture foliaire) d'après, Kanellopoulou (2008) et Kumar et Kaushik (2005) et Theodosiou (2003).

Le flux peut même être sortant grâce à l'effet de l'évapotranspiration selon Takakoura et al. (2000), Bass & Baskaran (2003) et Onmura et al, 2001. Ce qui réduit les besoins de climatisation jusqu'à 15-49% pour un toit non isolé et de 6-33% pour un toit isolé²⁹.

La figure (IV-7), montre le flux de chaleur à travers le toit végétal installé par le NRC (National Research Canada) et le toit de référence lui correspondant pour une journée d'été typique. Les mesures du flux de chaleur ont été effectuées dans trois stations sur chaque toit, Il est entrant lorsque le profil est positif et sortant lorsqu'il est négatif.

Il s'avère que, le flux de chaleur à travers le toit végétal est fortement diminué alors que les gains à travers le toit de référence atteignent 30W/m² le jour. La nuit, c'est plutôt ce dernier, qui permet un important flux de chaleur sortant de l'ordre de 8 W/m², alors que le toit végétal bloque le flux sortant, à cause du substrat de culture et de la végétation qui agissent comme une masse thermique.

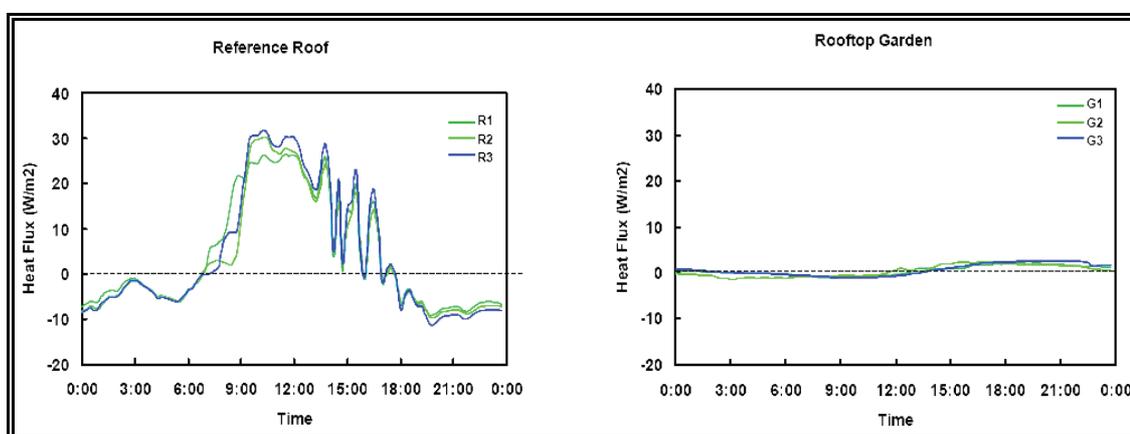


Figure IV- 7. Flux de chaleur à travers les toit végétal (à droite) et le toit de référence (à gauche) suivant les différente stations.
(Source. Bass & Baskaran, 2003)

²⁹ Santamouris, M. et al., «Investigating and Analysing the Energy and Environmental Performance of an Experimental Green Roof System Installed in a Nursery school building in Athens, Greece», Energy, vol. 32, 2007, pp. 1781–1788.

Onmura et al³⁰ ont démontré que la réduction du flux de chaleur entrant est d'environ 50% pour un toit végétal (Cas A) par rapport au toit de référence (Cas B), indépendamment d'un ciel clair ou nuageux (Fig. IV-8). En effet, pour un jour à ciel clair (Fig. IV-8-a) le flux de chaleur entrant à travers le toit végétal est de 2.17 MJ/m² contre 4.74 MJ/m² pour le toit de référence, soit une baisse du flux de chaleur total de 45.8%. Alors que durant une journée à ciel couvert (Fig. IV-8-b), le flux de chaleur est de 1.08 MJ/m² et 3.12 MJ/m² pour le toit végétal et le toit de référence respectivement, soit une baisse de 53.9% du flux chaleur total.

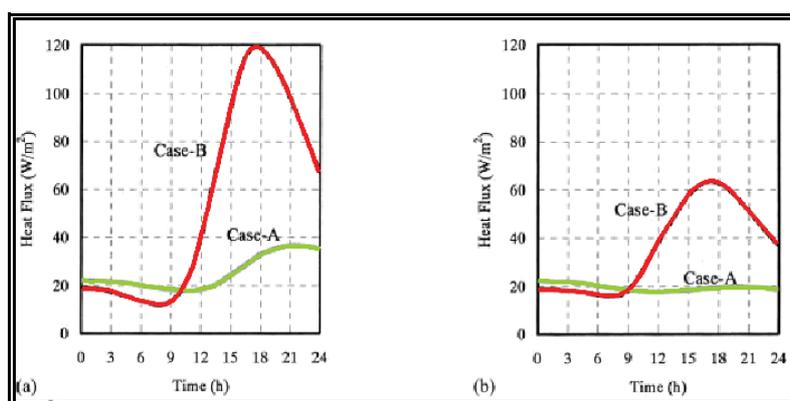


Figure IV- 8. Flux de chaleur total à travers le toit du (Cas A) et (Cas B) : graphe (a) journée à ciel clair; graphe (b) journée à ciel couvert.
(Source. Onmura et al, 2001. Réadaptée par auteur)

II. Les paramètres influents sur l'efficacité thermique de la toiture végétale :

1. Les paramètres climatiques :

L'efficacité thermique de la toiture végétalisée est influencée par les caractéristiques de l'environnement immédiat dont les paramètres climatiques. Ceux-ci, agissent sur le développement et le comportement biologique et physiologique des plantes³¹ mais aussi sur le comportement thermique du substrat. Et de ce fait, les végétaux et le substrat, ont à leur tour un impact sur les paramètres climatiques au dessus du toit grâce à leurs comportements (évapotranspiration, ombrage, albédo du substrat) en créant des microclimats sur les toits et en améliorant le confort thermique intérieur. Néanmoins, il est important de signaler que certains paramètres climatiques ont un impact sur l'efficacité thermique des toitures végétalisées.

³⁰ S.Onmura, et al, «Study on Evaporative Cooling Effect of Roof Lawn Gardens», Energy and Environment, vol. 33, 2001. pp. 653-666.

³¹ Les conditions climatiques (Ensoleillement, température, humidité relative, et vent) se combinent pour créer un milieu ambiant, qui affecte l'abondance et la santé des plantes et auquel elles s'efforcent, à certains moment, de s'adapter surtout sur les terrasses et balcons. Sachant que chaque espèce possède des *valeurs limites de tolérance* au delà desquelles elle ne peut se développer, l'optimum se situe entre la valeur supérieure et inférieure de ces limites.

1.1.Type de climat :

Le climat est un ensemble de phénomènes météorologiques terrestres caractérisant une région et moyenné sur plusieurs décennies, Il représente donc le « temps moyen » en un lieu donné³².

La transpiration physiologique de la plante est fonction des changements des paramètres climatiques et surtout proportionnelle à la température de l'air ambiant et inversement proportionnelle au degré hygrométrique³³, ce dernier atteint parfois la saturation avec plus de végétation. Le climat d'un lieu est principalement défini par ces deux composantes et de ce fait, la régulation hygrothermique a un impact beaucoup plus significatif pour un climat chaud et sec qu'un climat froid ou humide.

En ce qui concerne l'impact du type de climat sur l'efficacité thermique de la toiture végétalisée, les avis sont partagés entre son effet insignifiant d'après les résultats de recherche de **Kanellopoulou** en 2008, et son effet considérable par **Eleftheria et Jones** (2006, 2008).

D'une part, Kanellopoulou³⁴ considère que les températures surfaciques externes du toit sont réduites sous différents climats (chaud et sec et chaud et humide) grâce à la fonction biologique similaires de la végétation. Et d'autre part, Eleftheria et Jones ont conclu que ces derniers sont plus efficaces non seulement pour les climats chauds par rapport à ceux froids³⁵. Mais aussi pour les climats chauds et secs ou chauds et arides par rapport aux climats chauds et humides³⁶.

La figure (IV-9) montre la réduction des températures surfaciques des toits végétaux pour neuf climats différents. Il s'avère que le climat chaud et aride de Riyad a enregistré la plus importante réduction des températures surfaciques extérieurs durant une journée typique d'été. La réduction moyenne est de (12.8°C) et la maximale est de (26°C).

³² Microsoft ® Encarta ® 2008. © 1993-2007 Microsoft Corporation.

³³ Louis Soulier, « Espace vert et urbanisme », 2^e Edition, «s.l.», «s.d.», p.42.

³⁴ Kleanthi Kanellopoulou, «Cooling Performance of Green Roofs », PLEA 2008, 25^{ème} Conférence, Dublin, 22-24 Oct.2008.

³⁵ Aleftheria Alexandri et Phil Jones, «Temperature Decreases in an Urban Canyon Due to Green Walls and Green Roofs in Diverse Climates», Building and Environment, vol.43, 2008. pp. 480–493

³⁶ Elftheria Alexandri et Phil Jones, « Ponds, Green Roofs, Pergolas and High Albedo Materials; Which Cooling Technique for Urban Spaces? », PLEA- 23^{ème} conférence, Genève, 6-8 Sep. 2006.

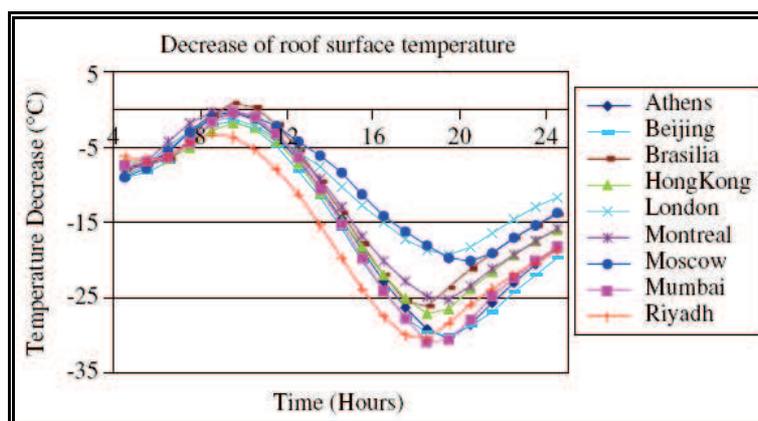


Figure IV- 9. La réduction des températures superficielles extérieures du toit végétal, pour les 9 climats.

(Source. Eleftheria. et Jones, 2006)

Les pays à climat froid tels que Londres, Moscou ou Montréal, possèdent les plus faibles réductions des températures. Moscou a enregistré la plus faible réduction des températures superficielles diurnes moyennes (9.1°C) et Londres la plus basse réduction des températures superficielles maximales (19.3°C). Alors, qu'Athènes avec son climat méditerranéen (chaud et sec) possède des réductions de températures superficielles maximales significatives.

1.2. L'humidité relative :

Comme pour les humains et les animaux, qui contrôlent la température de leur corps avec leur transpiration, les végétaux font de même. Celle-ci est conditionnée par les paramètres climatiques dont, le degré hygrométrique. Un taux d'humidité trop faible accroît la transpiration et donc le refroidissement, tandis qu'un taux d'humidité trop important limite la transpiration et le refroidissement.

L'humidité de l'air a un effet considérable sur les plantes, puisque certaines ne peuvent se développer que sous des humidités élevées, tandis que d'autres la tolèrent et arrivent à capter la vapeur d'eau par les feuilles. D'autres, plus résistantes telles que les crassulacées régulent leur transpiration et la réduisent lorsque l'air est chaud et sec en fermant leurs stomates. Le fonctionnement de ces derniers est relié aux conditions climatiques (chaleur, humidité, luminosité et vent), leur ouverture répond à l'humidité ambiante³⁷.

³⁷ Mansfield (1990), In William G. Hopkins, « La physiologie végétale », 2^e éd., Edition De Boeck, Bruxelles, 2003. p 455.

D'après **Theodosiou**³⁸, le plus important paramètre qui a un impact direct sur la protection des locaux intérieurs des surchauffes estivales est relié à l'évaporation. Ce phénomène est affecté à son tour par les facteurs climatiques, dont l'humidité relative de l'air extérieur joue un rôle important. En effet, le flux de chaleur est inversement proportionnel à l'humidité relative de l'air extérieur (même si ce paramètre n'agit pas seul dans la réalité). Cependant, lorsque l'évapotranspiration est minimale (humidité élevée), le rôle le plus important des toitures végétalisées à ce moment est la protection des couches inférieures de la toiture grâce à l'ombrage et une importante inertie thermique. Alors qu'un environnement sec rehausse l'évapotranspiration et favorise le rafraîchissement.

1.3. La vitesse du vent :

Le vent correspond à de l'air en mouvement dans l'atmosphère³⁹. Il agit indirectement sur l'efficacité thermique de la toiture végétalisée puisqu'il modifie la température et l'humidité en agissant sur la végétation. En effet, le vent a un effet bénéfique sur le renouvellement de l'air au contact des stomates et facilite l'assimilation chlorophyllienne⁴⁰. Sachant que sa vitesse est ralentie au niveau du sol ainsi que dans la végétation, mais lorsque sa vitesse augmente, il peut avoir un pouvoir desséchant dangereux (vent chaud et sec), comme il peut avoir un pouvoir de refroidissement considérable.

Lorsque la vitesse du vent est plus de 2m/s⁴¹, les stomates doivent se fermer ce qui réduit la photosynthèse alors que la déshydratation de la plante se poursuit par la transpiration cuticulaire⁴². Donc, un vent sec assèche l'air, accélère l'évaporation du sol et exerce une sorte de succion au niveau des stomates en augmentant la transpiration. La chambre stomatique libère alors beaucoup de vapeur d'eau ajoutée à celle de l'assèchement du sol, ce qui augmente l'évapotranspiration et ralentit le développement des végétaux par manque d'eau.

En étudiant l'impact de la vitesse du vent sur le flux de chaleur à travers le toit végétal, **Theodosiou** (2003) a conclu que la vitesse du vent peut multiplier le flux de chaleur sortant du bâtiment, puisqu'il a un effet considérable sur la continuité de l'évapotranspiration. En effet,

³⁸ **Theodore G. Theodosiou**, «*Summer Period Analysis of The Performance of Planted Roof as a Passive Cooling Technique*», Energy and building, vol. 35, 2003, pp. 909-919.

³⁹ **Microsoft ® Encarta** © 2008. © 1993-2007 Microsoft Corporation.

⁴⁰ Le vent permet à cette l'interface feuille- atmosphère, de ne pas atteindre la saturation en oxygène qui causerait l'inhibition de la photosynthèse et d'autre part de renouveler constamment l'apport en CO₂.

⁴¹ **2m/s** équivalent à la Force **2** selon l'échelle de Beaufort, et à 6- 11 Km/heure (**Faurie et al**, 2006)

⁴² **A.Huetz De Lemps**, «*La végétation de la terre*», Editions Masson et Cie, Paris, 1970. p 19.

l'évapotranspiration est fonction du renouvellement d'air au contact des feuilles, celui-ci permet d'arracher les molécules d'eau à la surface de la feuille et diminuer la saturation en vapeur d'eau de l'interface : feuille- atmosphère, qui sinon bloquerait l'évaporation⁴³. Cependant, Theodosiou (2003) affirme que l'effet du vent reste secondaire par rapport à celui de l'humidité relative.

Ce qui rejoint les résultats de **Yu et Wong**⁴⁴, qui ont effectué une expérimentation sous le climat tropical pour déterminer l'impact des différents paramètres climatiques sur la variation des températures de l'air dans la couche de végétation sur un toit. Leur expérimentation a confirmé pour différents indices de couverture foliaire (LAI= 1, 3 et 5) qu'il n'y a pas une corrélation significative entre la variation de la vitesse du vent et la variation des températures de l'air dans la couche de végétation.

1.4. Les radiations solaires :

Le rayonnement solaire, flux de particules d'énergie appelées photons, reçu par une surface donnée est fonction de la latitude du lieu, de la position du soleil et des conditions climatiques. Lorsqu'il frappe une surface minérale, il augmente sa température en fonction de la nature du matériau, de sa rugosité et de sa couleur, alors que les surfaces végétales agissent autrement⁴⁵.

La diminution des températures dans la couche végétale est due d'une part, à l'évaporation de l'eau au niveau des feuilles, induite surtout par l'échauffement local au niveau des feuilles et par l'absorption préférentielle du rayonnement infrarouge par les gouttelettes d'eau transpirées.

D'autre part, la végétation est un outil efficace pour le contrôle du rayonnement incident et donc de la protection solaire (ombrage). Ceci représente son rôle majeur, puisqu'elle arrive à filtrer ces radiations ou les bloquer, et diminuer de ce fait les températures de l'air dans la couche

⁴³ **Claude Faurie et al.**, «*Ecologie ; approche scientifique et pratique*», 5^e éd. Editions TEC & DOC, Paris, 2006. p. 83.

⁴⁴ **Chen Yu et Wong Nyuk Hien**, «*Green Experiment Conducted in the Tropical Climate*», PLEA 2006, 23^{ème} conférence, Genève, 6-8 Septembre, 2006.

⁴⁵ Les radiations utilisables par les végétaux ne représentent que 20% du flux radiatif total parvenu à la surface de la terre. 20% de l'énergie reçue par la végétation est réfléchiée, 10% sont transmises sous forme de photons, 69% est perdue sous forme de chaleur par les phénomènes de respiration et transpiration. La végétation convertit donc l'énergie calorifique en énergie latente grâce à l'évapotranspiration. Seulement 1% est utilisable pour la *production nette* de biomasse des végétaux et les pertes métaboliques (respiration, excréments des feuilles et racines). Donc, les végétaux ont besoins de 36 fois plus d'énergie des radiations solaires pour transpirer et faire monter la sève aux feuilles que, pour le processus de photosynthèse. Autrement dit, ils ont besoin de **470 Joules** puisées de l'énergie lumineuse, pour assimiler 12g de carbone, contre **17 kJ** pour évaporer les **7 500g** d'eau transpirée durant ce processus (**Faurie et al.**, 2006- p.05).

de végétation⁴⁶. Les radiations solaires interceptées par la végétation affectent, le bilan radiatif et le confort thermique à l'extérieur et à l'intérieur du bâtiment, puisque l'énergie solaire qui atteint un sol ombré est diminuée, ce qui permet de réduire sa température surfacique et par là, réduit, les radiations de grande longueur d'onde émises par ce dernier. Shahidan et Jones (2008) associent justement, le filtrage des radiations solaire à la transmissibilité (le pourcentage de la lumière transmise) en dessous d'un arbre et au LAI (Leaf Area Index) représentant la densité du feuillage. Ils affirment que, plus la surface foliaire est grande, plus la transmission est basse et le pourcentage de filtrage des radiations est grand. Cependant, les radiations solaires ne sont pas totalement réduites même avec de forte valeur du LAI.:

- Lorsque le LAI > 5 : le filtrage des radiations est plus de 90% (végétation dense).
- Lorsque le LAI < 5 : le filtrage des radiations est entre 70 -90% (végétation moins dense).

De même, les températures de l'air dans la couche de végétation augmentent la journée avec l'élévation des radiations solaires selon le pourcentage de couverture foliaire. La figure (IV-10) représentant les résultats d'une expérimentation effectuée sous un climat tropical par **Yu et Wong**⁴⁷, montre que la température de l'air dans la couche de végétation présente un déphasage entre les valeurs maximales des radiations solaires et les températures maximales de l'air dans la couche de végétation durant l'après midi (de 13 :00h jusqu'au coucher du soleil). Le pic des radiations solaires (850W/m²) ne correspond pas au pic des températures de l'air dans la couche de végétation⁴⁸. Ce dernier survient pour les différents coefficients de couverture foliaire (LAI) lorsque les radiations solaires s'abaissent de 850W/m² à 750W/m².

Cette augmentation des températures de l'air dans la couche de végétation ne doit pas agir sur les températures de l'air intérieur puisque, **Kumar et Kaushik**⁴⁹ ont trouvé que sous un climat chaud et humide, celles-ci atteignent une réduction maximale l'après midi, durant la période la plus chaude de la journée soit de (12 :00h à 15 :00h).

⁴⁶ **Robinette** (1968), In **Mohd Fairuz Shahidan et Philip Jones**, «*Plant Canopy Design in Modifying Urban Thermal Environment: Theory and Guidelines*», PLEA 2008, 25^{ème} conférence, Dublin, 22-24 Oct. 2008. pp. 179.

⁴⁷ **Chen Yu & Wong Nyuk Hien**, «*Green Experiment Conducted in the Tropical Climate*», PLEA 2006, 23^{ème} conférence, Genève, 6-8 Septembre, 2006.

⁴⁸ Sachant que l'intensité lumineuse régule la photosynthèse, cette dernière augmente avec l'intensité lumineuse jusqu'à un seuil optimal au-delà duquel la photosynthèse diminue en raison d'un mécanisme de photo- inhibition. Ce mécanisme de protection permet d'évacuer l'excès de d'énergie lumineuse sous forme de chaleur pour limiter le stress oxydatif destructeur (**Faurie et al.**, 2006- p.07).

⁴⁹ **Rakesh Kumar et S.C.Kaushik**, «*Performance Evaluation of Green Roof and Shading for Thermal Protection of Building* », Building and Environment, Vol. 40, 2005, pp. 1505-1511.

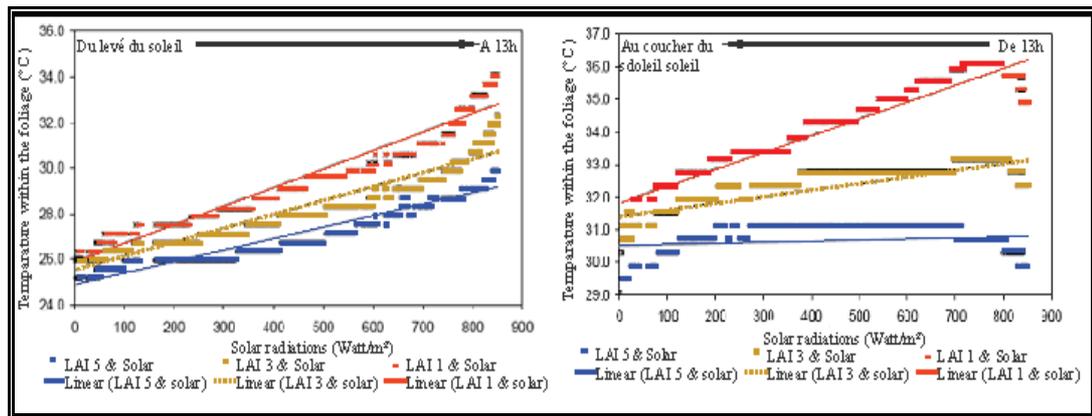


Figure IV- 10. Analyse de la corrélation existant entre la température de l'air dans la couche de végétation et les radiations solaires (le matin et l'après midi) pour différents indices de couverture foliaire.

(Source. Yu et Wong, 2006. Réadaptée par auteur)

2. Impact des composantes de la toiture végétale et leurs caractéristiques sur le rafraîchissement intérieur :

2.1 L'isolation de la toiture:

Les déperditions thermiques par le toit sont plus importantes que celles des murs qui bénéficient de plus d'irradiations du type longues ondes (infrarouges) que les toits plats, dues principalement à la réflexion des radiations solaires et rayonnement des murs des bâtiments voisins⁵⁰. L'ADEME⁵¹ les évalue à 30%, alors que Hamouda et Malek⁵² les ont évalué à 34% pour une maison individuelle à Batna (Algérie). L'isolation de l'enveloppe des bâtiments devient donc importante. Elle se fait avec des matériaux dont la résistance thermique (R) est élevée et le coefficient de conductivité thermique (λ) faible, ce qui empêche l'écoulement de la chaleur.

D'après les diverses recherches étudiées (Niachou et al. 2001, Theodosiou 2003, Liu et Baskaran 2003), les résultats montrent que l'effet d'isolation thermique compromet le

⁵⁰ D.G. Stephenson, «Températures extrêmes à la surface extérieure des bâtiments», Publication n° CBD-47-F, Publié à l'origine en Août 1966. (page consultée le 30-04-2008), [En ligne] www.darkweb.nl.

⁵¹ ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), « Réussir un projet d'urbanisme durable », Editions Le Moniteur, Paris, 2006. p.65.

⁵² C.Hamouda et A.Malek, «Analyse théorique et expérimentale de la consommation d'énergie d'une habitation individuelle dans la ville de Batna », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 9, n°3, (2006). pp. 211-228.

rafraîchissement intérieur obtenu par la toiture végétalisée, puisque cette dernière peut réduire d'elle-même les besoins en isolation traditionnelle selon la zone climatique⁵³.

En effet, **Theodosiou**⁵⁴ affirme que le substrat agit comme une masse thermique qui rafraîchit l'intérieur des bâtiments surtout dans le cas de toiture non isolée par rapport à celle isolée. L'inertie thermique du substrat contribue à maintenir cet effet pendant quelques jours et accroît ainsi l'effet de rafraîchissement comparé à un toit végétal avec une importante isolation.

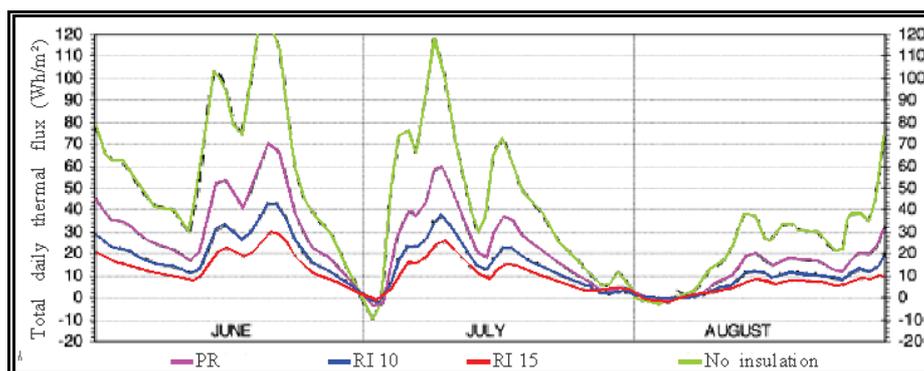


Figure IV- 11. Flux de chaleur total diurne à travers le toit végétal pour différentes épaisseur d'isolation (Polystyrène)
(Source. Theodosiou, 2003. Réadapté par auteur)

C'est ce qui apparaît dans la figure (IV-11), qui montre l'impact de la variation de l'épaisseur d'une isolation en polystyrène expansé de (0 à 0,15m) sous le climat chaud et sec (Grèce). Le scénario (PR) représente le cas réel dont isolation en polystyrène est de 0.05m d'épaisseur, alors que RI10 représente une isolation de 0.10m et RI15 une isolation de 0.15m. Le flux est considéré sortant lorsque son profil est positif. Il s'avère que l'épaisseur de l'isolation ne joue aucun rôle sur l'habilité des composantes d'un toit végétal à rafraîchir l'air à l'intérieur du bâtiment. Ce sont plutôt les fonctions biologiques de la végétation et son ombrage qui contribuent à baisser les températures sur le toit durant les journées relativement fraîches. Et donc, l'absence d'une isolation peut augmenter le flux de chaleur de l'intérieur relativement chaud vers l'extérieur rafraîchie par la couche de végétation.

⁵³ Plus l'épaisseur de la végétation et du substrat est importante, plus la toiture est bien isolée. On estime qu'une épaisseur de 20 à 40 cm de végétation poussant sur 20 cm de substrat permet d'obtenir un pouvoir isolant proche de celui d'une épaisseur de 15 cm de laine de verre (**François Leroux**, 2005.p.13)

⁵⁴ **Theodore G. Theodosiou**, «Summer Period Analysis of The Performance of Planted Roof as a Passive Cooling Technique», Energy and building, vol. 35, 2003, pp. 909-919.

Niachou et al⁵⁵, insistent sur l'importance de la ventilation nocturne pour dissiper la chaleur même avec un toit végétal, mais affirment que les coefficients de transmissions thermiques diminuent en végétalisant les toits.

En effet, cet effet isolant de la toiture végétale est dû à ces trois composantes essentielles; *les plantes mortes ou vivantes*, ombrent la surface du complexe de culture et altèrent le flux de chaleur. *La couche médiane (substrat)*, idéalement d'une porosité importante et de couleur claire, permet un meilleur flux de l'air et une capacité de réflexion des radiations solaires. *La couche inférieure (drainage)*, avec des pores larges facilitant le drainage et l'évacuation de l'excès d'eau du substrat. Ce qui produit en plus une isolation additionnelle due au faible coefficient de conductivité thermique de l'air de cette couche. Ensembles ces trois couches, sont capables de produire un effet rafraîchissant par une importante isolation du toit et par l'évaporation de l'eau⁵⁶. Cependant, **Theodosiou** (2003) recommande de rajouter aux toits végétaux une isolation thermique (même une fine couche d'isolant) pour les climats contrastés afin de diminuer les pertes de chaleur en hiver.

2.2 Les caractéristiques du substrat :

Le complexe de culture (substrat) doit accomplir trois rôles, **une isolation** contre le transfert de chaleur en été et en hiver, **la protection** des composantes du toit des radiations solaires et des températures basses et la **réduction** des fluctuations des températures des composantes de l'étanchéité, ce qui permet d'augmenter la durée de vie du toit⁵⁷.

L'énergie solaire reçue par le sol est conditionnée par la latitude, la saison, l'exposition de ce dernier et son couvert végétal. L'énergie solaire, constitue la principale source d'énergie calorifique qui élève la température du sol le jour et évapore l'eau retenue. Par contre, la nuit, le sol se refroidit par rayonnement, il s'ensuit alors une oscillation diurne des températures surfaciques externes du sol, qui est fonction du type de sol et de la végétation qui la recouvre.

⁵⁵ **Niachou, A, K.Papakonstantinou, M.Samtamouris et G.Mihalakakou**, «*Analysis of the Green Roof Thermal Properties and Investigating of its Energy Performance*», Energy and building, vol. 33, 2001, pp.719-729.

⁵⁶ **Liu and Baskaran**, (2003), In **Johnnel Kiera Lanham**, «*Thermal Performance of Green Roofs in Cold Climates*», mémoire de Master, Université Kingston, Ontario, Canada, 2007. p. 40.

⁵⁷ **Tsiotsiopolou et al.** (2003) In **Johnnel Kiera Lanham**, «*Thermal Performance of Green Roofs in Cold Climates*», Mémoire de master en science, Queen's University Kingston, Ontario, Canada, Septembre 2007. p. 29.

Les facteurs qui agissent sur la température surfacique du sol sont : la couleur⁵⁸, la teneur en eau⁵⁹ et la couverture végétale⁶⁰. Pour les toitures végétalisées, les chercheurs ajoutent aussi à ces facteurs agissant sur son efficacité thermique, l'épaisseur du substrat.

2.2.1 L'épaisseur du substrat :

L'épaisseur du substrat est habituellement déterminée par la taille, le type de végétation plantée sur le toit et les charges admises, elle varie de 0.05m à plus de 1m. D'après les recherches de **Theodosiou** (2003) et de **Kanellopoulou** (2008), l'importance de ce paramètre est fonction de deux éléments :

- Le type de climat : puisque la variation de l'épaisseur présente un impact beaucoup plus significatif sur la performance thermique de la toiture végétalisée sous un climat chaud et sec par rapport à un climat chaud et humide.
- Les conditions climatiques : c'est-à-dire que les substrats épais sont meilleurs lorsque les conditions climatiques sont extrêmes, et que le besoin de rafraîchissement est intense, alors l'effet de rafraîchissement des substrats fins décroît. Par contre, cet effet s'inverse en été pour des journées plus clémentes, où les substrats fins permettent une baisse rapide des températures surfaciques externes puisqu'ils emmagasinent peu de chaleur et donc refroidissent plus vite la nuit grâce à leur faible inertie par rapport aux substrats épais.

La figure (IV-12)⁶¹ révèle qu'une épaisseur de 0.3m procure une faible variation du flux de chaleur et un déphasage important, dus essentiellement à la forte inertie et isolation du substrat lorsque son épaisseur est importante. Le flux de chaleur entrant dans le bâtiment n'atteint sa valeur maximale de 1.5W/m² qu'à 3heures du matin alors que le substrat de 0.1m atteint un flux de chaleur maximal (6 W/m²) dès 21heures⁶². Ce dernier présente toutefois, une

⁵⁸ Les sols foncés absorbent plus de radiations, à cause de leur albédo (rapport du rayonnement réfléchi au rayonnement global) et de ce fait s'échauffent plus vite que les sols clairs (**Vincent Affolter et Lucas Prêtre**, «*L'écosystème forestier*», (page consultée 13-01-2008), [En ligne] <http://www.lpretre.com/travaux/forêt/>)

⁵⁹ Sachant que la capacité calorifique de l'eau est quatre à cinq fois plus élevée que celle de l'air ou des matières solides, puisqu'il faut plus de calories pour élever du même nombre de degrés la température d'un sol saturé d'eau, que celle d'un sol sec. Donc son rôle est considérable. Les sols sableux ou calcaires sont «*chauds*» alors que les sols mal drainés sont «*froids*».

⁶⁰ Constitue un véritable écran. La forêt est plus efficace que la pelouse, d'autre part ; un sol de forêt en été est souvent moins chaud de 8 à 10°C qu'un sol nu (**P.Duchaufour, Winfried.E et H.Blum**, 2001.p 99)

⁶¹ Le flux est considéré positif lorsqu'il est entrant dans le bâtiment, effet de surchauffe.

⁶² **Kleanthi Kanellopoulou**, «*Cooling Performance of Green Roofs*», PLEA 2008, 25^{ème} Conférence, Dublin, 22-24 Oct.2008.

meilleure extraction de la chaleur de l'intérieur vers l'extérieur lorsque les journées sont relativement fraîches.

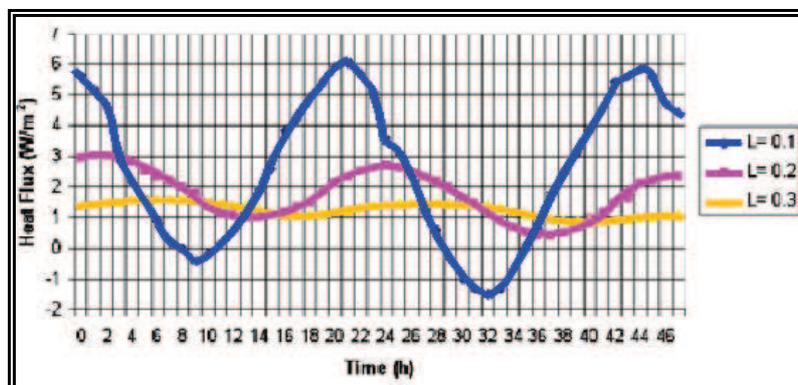


Figure IV- 12. Flux de chaleur selon différentes épaisseurs de substrat. (Climat chaud et sec ; Athènes) (Source. Kanellopoulou, 2008)

2.2.2 La teneur en eau du substrat :

Les variations de température dans les couches profondes et superficielles du sol sont régies par la conductivité thermique du sol. Sachant que, les températures augmentent en été et baissent en hiver plus lentement pour les horizons profonds que les horizons de surface. Il y a deux actions antagonistes qui régulent la diffusion de la chaleur dans le sol; *la conductivité thermique* qui augmente avec la teneur en eau, *la capacité calorifique* qui freine l'élévation de température des sols humides. La conductivité thermique maximale s'arrête lorsque la teneur en eau arrive au seuil de 15 à 20%⁶³. Alors qu'au dessus de ce seuil, c'est la capacité thermique de l'eau qui joue le rôle principal. D'autre part, lorsque, les horizons de surface s'assèchent en période sèche, une discontinuité s'établit entre les particules qui conduisent mal la chaleur, et subissent de fortes oscillations de température, alors que les horizons profonds plus humides, restent froids.

Comparé à un toit conventionnel, l'effet le plus important du toit végétal est dû à l'évaporation aussi longtemps que le système est humide, mais aussi lorsqu'il est sec⁶⁴. Cependant, plus le sol est humide plus la chaleur ainsi que le flux de chaleur entrants dans le bâtiment diminuent⁶⁵. C'est ce qui apparaît dans la figure (IV-13) représentant le flux de chaleur

⁶³ Philippe Duchaufour et Winfried E. H. Blum, « Introduction à la science du sol : sol, végétation, environnement », 6^e éd., Edition Dunod, Paris, 2001. p 100.

⁶⁴ Lazzarin, Castellotti et Busato, (2005) In Tobias Emilsson, « Extensive Vegetated Roofs in Sweden Establishment, Development and Environmental Quality », Thèse de doctorat, Swedish University of Agricultural Sciences, 2005. p.12.

⁶⁵ Kleantli Kanellopoulou, « Cooling Performance of Green Roofs », PLEA 2008, 25^{ème} Conférence, Dublin, 22-24 Oct. 2008.

à travers le toit végétalisé pour un climat chaud et sec (Grèce). Il est considéré entrant dans le bâtiment lorsqu'il est positif et vis versa.

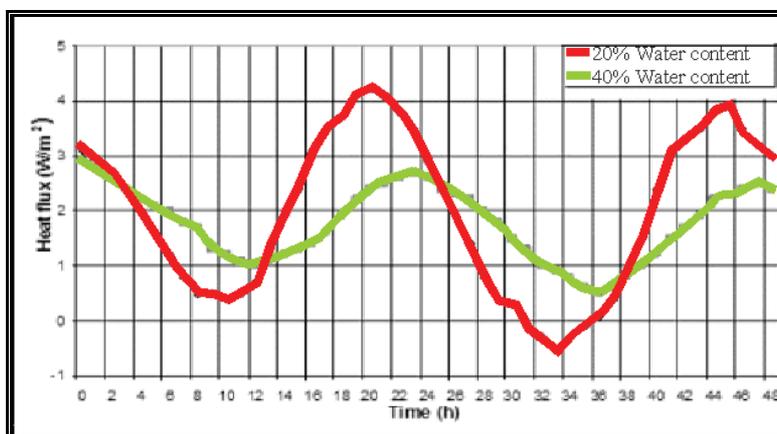


Figure IV- 13. Le flux de chaleur à travers le toit végétalisé selon la teneur en eau du substrat. (Source. Kanellopoulou, 2008, Réadaptée par auteur)

La courbe du sol humide (teneur en eau de 40%) présente une oscillation moindre du flux de chaleur alors qu'au niveau d'un sol sec (teneur en eau de 20%) la variation de ce dernier est plus importante. Un substrat avec une teneur en eau de 20% présente tout de même un effet rafraîchissant entre la 31^{ème} et 36^{ème} heures. Ceci est dû à la faible diffusivité thermique⁶⁶ du substrat sec, qui subit des surchauffes essentiellement à la surface externe et donc refroidit rapidement par rapport à un substrat humide.

2.2.3 Albédo du substrat et sa couleur :

La fraction de rayonnement solaire réfléchi par un corps est appelée «albédo». Ce dernier diffère d'un matériau à un autre. Pour la végétation, l'albédo n'est pas uniforme pour toutes les espèces végétales, sa valeur varie selon les auteurs mais reste en général fonction de l'espèce. Certains l'évaluent entre 10 -20 % pour une formation forestière et jusqu'à 25% pour une prairie verte⁶⁷, alors que De Lempis⁶⁸, estime que l'albédo est relativement faible pour une forêt dense (5%) et plus important pour une prairie claire qui renvoie la lumière (30%).

⁶⁶ **La diffusivité thermique** (m²/heure) ; représente la vitesse à laquelle la chaleur se propage par conduction dans un corps. Lorsque celle-ci est faible la chaleur met plus de temps à traverser l'épaisseur du matériau, ce qui fait que cette dernière fait intervenir la conductivité thermique et la capacité thermique d'un matériau.

⁶⁷ **Vincent Affolter et Lucas Prêtre**, «L'écosystème forestier », (page consultée 13-01-2008), [En ligne] <http://www.lpretre.com/travaux/forêt/>.

⁶⁸ **A.Huetz De Lempis**, « La végétation de la terre », Editions Masson et Cie, Paris, 1970. p 14.

L'albédo est aussi fonction de *la nature du feuillage*⁶⁹ (couleur, texture, l'épiderme...), de *l'orientation de la feuille* (horizontale, verticale), du *climat* et du temps qu'il fait (puisque la composition du spectre solaire incident influe sur l'albédo), ainsi que de *la hauteur du soleil* (l'albédo est élevé lorsque le soleil est bas et quand les feuilles de couronnes des arbres sont disposées horizontalement⁷⁰). Par ailleurs, l'installation finale d'une toiture végétalisée peut prendre du temps selon le mode de mise en œuvre de la végétation, et donc avant que la couverture foliaire ne soit complète (100%), l'albédo du substrat joue un rôle primordial dans l'efficacité thermique de la toiture.

Sailor et al⁷¹ estiment que chaque représentation des toits végétaux doit tenir compte de l'humidité du substrat, de ces propriétés thermiques mais aussi de l'humidité de la surface du substrat et son albédo correspondant. Ces chercheurs ont trouvé que l'albédo mesuré sur une toiture végétalisée varie de 0.05 à 0.40 pour les substrats humides et secs, respectivement. Ils pensent que les propriétés thermiques des substrats doivent être déterminées avant toute conception des toits végétaux. Pour eux, l'albédo affecte l'équilibre énergétique des toits verts qui lui-même dépend de l'humidité du substrat. En effet, lorsqu'il y a une humidité rajoutée au sol par les précipitations ou l'arrosage, la surface du sol est d'abord très humide et donc elle a un albédo bas qui lui correspond permettant au sol d'absorber une grande quantité de radiations solaires. Par contre, lorsque la surface externe du substrat se dessèche, l'albédo augmente et la quantité de radiations solaires absorbées diminuera.

Par ailleurs, l'humidité du substrat n'agit pas seule sur son albédo, puisque **Liu et Minor**⁷² affirment que la couleur des particules du substrat constitue aussi un facteur important qui affectent la variation des températures surfaciques du substrat et du toit.

2.3 Les caractéristiques de la végétation :

La température intérieure d'un bâtiment recouvert d'une toiture végétalisée est fortement réduite par l'ombre des plantes et par leur évapotranspiration.

⁶⁹ Les feuilles ont un albédo de 0.1 dans le visible et 0.6 dans le proche infrarouge (**Article**, « *Le système terre-atmosphère et l'effet d'albédo* », (page consultée le 20-01-2008), [En ligne] <http://www.meteofrance.com>)

⁷⁰ **Vincent Affolter et Lucas Prêtre**, « *L'écosystème forestier* », (page consultée 13-01-2008), [En ligne] <http://www.lpretre.com/travaux/forêt/>.

⁷¹ **D.J.Sailor, D.Hutchinson et L.Bokovoy**, « *Thermal Property Measurements for Ecoroof Soils Common in Western U.S.* », Energy and Building, vol. 40, 2008, pp.1246-1251.

⁷² **Liu, K. et Minor, J.**, « *Performance evaluation of an extensive green roof* », NRC-CNRC, NRCC-48204, 2005, Fichier PDF [En ligne] <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/irepubs>.

Pour que ce processus s'effectue le mieux possible en été, les végétaux doivent être en période active de croissance⁷³.

Le rôle de la végétation sur la performance de rafraîchissement d'une toiture végétalisée est étudié soit par la couverture foliaire de certaines espèces végétales (herbes, arbustes, gazon) avec des qualificatifs (dense, épars...), soit par l'indice de couverture foliaire (*Leaf Area Index, LAI*), ou par le pourcentage de couverture foliaire (*Coverage ratio*).

Certains chercheurs se sont intéressés à l'épaisseur de la couche végétale ou la hauteur de la végétation, alors que d'autres ont été même intéressés par l'impact de l'épaisseur du feuillage sur la performance thermique de la végétation sur les toits.

2.3.1 Le pourcentage de couverture foliaire :

Le pourcentage de couverture foliaire (LAI) est l'un des plus importants paramètres affectant le microclimat au dessus du toit végétal mais aussi les températures de l'air à l'intérieur des bâtiments. Il est défini comme étant le pourcentage de la surface des feuilles sur la surface de base occupée par la plante⁷⁴. Il est mesuré soit par des appareils, soit défini par formules mathématiques. La figure (IV-14) montre l'indice LAI du Soja.

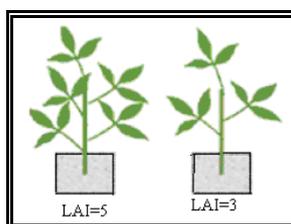


Figure IV- 14. Le calcul moyen de l'indice de couverture foliaire du Soja.
(Source. Kumar & Kaushik, 2005)

La couverture foliaire agit sur la quantité d'évapotranspiration de la végétation et sur l'ombrage procuré. Les chercheurs (Del Bario, 1998, Takakura et al, 2000, Theodosiou, 2003, Kumar et Kaushik, 2005, Yu & Wong, 2006, Chih-Fang Fang, 2008) s'accordent sur le fait qu'une importante couverture foliaire permet de mieux intercepter les radiations solaires ; rafraîchir l'air dans la couche de végétation ; stabiliser les amplitudes thermiques dans celle-ci ;

⁷³ **François Leroux**, «*Intégration végétale des bâtiments, contributions environnementales sur une maison individuelle*», Mémoire de formation continue- Architecture HQE, Ecole d'Architecture de Lyon, Session 2005.p.12.

⁷⁴ **Rakesh Kumar et S.C.Kaushik**, «*Performance Evaluation of Green Roof and Shading for Thermal Protection of Building* », Building and Environment, Vol. 40, 2005, pp. 1505-1511.

diminuer les températures surfaciques du substrat et donc faciliter le flux de chaleur sortant du bâtiment.

Sachant que, les couvertures foliaires LAI < 5 filtrent entre 70 et 90% des radiations solaires, certains chercheurs (Theodosiou, 2003, Yu & Wong, 2006 et Takakura et al, 2000) affirment qu'un indice LAI= 3 pour une toiture végétalisée, peut avoir un effet de rafraîchissement considérable à l'intérieur des bâtiments durant les journées chaudes.

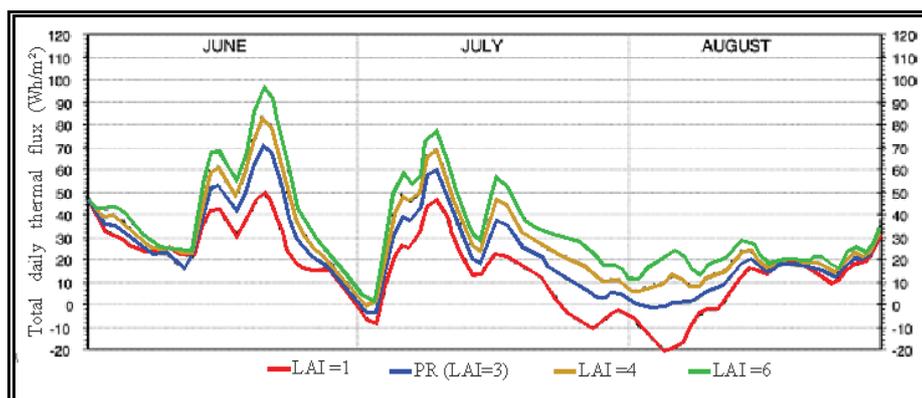


Figure IV- 15. Flux de chaleur total diurne à travers le toit végétalisé pour différents indice de couverture foliaire (LAI) en Grèce.
(Source. Theodosiou, 2003. Réadapté par auteur)

Par ailleurs, on a pu révélé que le rafraîchissement intérieur n'est plus perceptible ou s'inverse, pour un indice de couverture foliaire élevé:

- Durant la nuit : puisque la température baisse plus rapidement dans un feuillage épars (LAI=1) que dans un feuillage dense (LAI=3 & 5)⁷⁵.
- Lorsque le ciel est couvert : le flux de chaleur sortant diminue pour une végétation dense⁷⁶.
- Pour des journées relativement fraîches ou humides: puisqu'une importante couverture foliaire a un effet perceptible surtout durant les journées les plus chaudes, et lorsque l'air est sec. Ce qui apparaît dans la Figure (IV-15) en fin juillet début août (sachant que le flux est considéré sortant lorsqu'il est positif). Cependant, ce rafraîchissement devient presque identique pour différentes couvertures foliaires lorsque les températures de l'air extérieur

⁷⁵ Chen Yu & Wong Nyuk Hien, «Green Experiment Conducted in the Tropical Climate», PLEA 2006, 23^{ème} conférence, Genève, 6-8 Septembre. 2006.

⁷⁶ T.Takakura, S.Kitade & E.Goto, «Cooling Effect of Greenery Cover Over a Building», Energy and building, vol. 31, 2000, pp. 1-6.

baissent (début juin, fin août), ou que les humidités relatives sont élevées (fin juin début juillet)⁷⁷.

2.3.2 L'épaisseur de la couverture foliaire et épaisseur des feuilles:

Mis à part la densité foliaire représentée par l'indice de couverture foliaire (LAI), les chercheurs ont mis en avant deux autres caractéristiques de la végétation pouvant affecter l'efficacité thermique de la toiture végétalisée, à savoir l'épaisseur de la couverture foliaire et l'épaisseur des feuilles.

D'après Kumar et Kaushik (2005) et Theodosiou (2003), le flux de chaleur entrant dans le bâtiment augmente pour des épaisseurs de couverture foliaire faible. Theodosiou (2003) affirme qu'une couverture foliaire, à faible hauteur ou épaisseur, a un effet sur la séparation induite entre l'air atmosphérique chaud et l'air en dessous de la végétation rafraîchit. Plus l'épaisseur de la couverture foliaire est faible, plus la relation entre les deux atmosphères est forte. Par conséquent, la température de l'air relativement basse en dessous de la végétation est diffusée à l'atmosphère extérieure chaude au lieu de maintenir la zone en dessous de la végétation à des températures basses. Durant les jours à températures continuellement élevées en début d'été, une épaisseur de couverture foliaire élevée contribue à l'extraction de la chaleur de l'intérieur vers l'extérieur. Par contre, une couverture foliaire à faible épaisseur conduit au réchauffement de l'air en dessous de la végétation et à un flux entrant. Donc, le toit végétal n'arrive pas à procurer un rafraîchissement naturel.

Par ailleurs, l'épaisseur des feuilles peut avoir un impact important sur l'interception des radiations solaires, l'ombrage et l'évapotranspiration. Ce qui a été confirmé par **Chih- Fang Fang** en 2008, qui a établi une équation et une carte facilement utilisable par les concepteurs des toits végétaux pour choisir les plantes adéquates selon l'efficacité thermique que l'on veut obtenir. Celle-ci met en relation la couverture foliaire (*Covrage Ratio- CR*)⁷⁸, l'épaisseur des

⁷⁷ **Theodore G. Theodosiou**, «Summer Period Analysis of The Performance of Planted Roof as a Passive Cooling Technique», *Energy and building*, vol. 35, 2003, pp. 909-919.

⁷⁸ **Calcul du pourcentage de couverture foliaire (CR)** : on utilise 8 fils en nylon blanc, puis on divise une région en 25 carrés de 8cm x 8cm. La plante testée est ensuite déposée dans la grille et elle est tenue par des fils. Le taux de couverture (%) est calculé par le nombre de grille couverte par la plante sur le nombre total (25).

feuilles (*Total leaf thickness*, **TLT**)⁷⁹ et l'efficacité thermique de la végétation ou le pourcentage de réduction de la température par les plantes (*Thermal reduction ratio*, **TRR**)⁸⁰:

$$\text{TRR} = (T_0 - T_P / T_0 - T_A) \times 100\%$$

Equation IV- 2

T₀ : Température pour couverture de 0% (sol nu)

T_P : Température pour un pourcentage de couverture foliaire (CR%)⁸¹

T_A : Température atmosphérique.

Il s'avère que, le pourcentage de couverture foliaire (CR) et l'épaisseur totale du feuillage (TLT) sont complémentaires. Puisqu'un pourcentage de couverture foliaire (CR) faible, impose le choix de plantes avec une épaisseur totale du feuillage (TLT) élevée pour que l'efficacité thermique (TRR) soit élevée. Pour cela, des couvertures foliaires inférieures à 80%, exigent des épaisseurs élevées pour le feuillage. Alors qu'au-delà de 80% de couverture foliaire, l'épaisseur du feuillage perd de son importance. Par exemple, la végétation peut réduire l'énergie thermique des radiations solaires de 70-90% seulement si l'épaisseur totale du feuillage est supérieure à 2.25mm (TLT ≥ 2.25mm) pour de faibles couvertures foliaires (entre 30 -50%).

Conclusion :

Une bonne protection thermique peut diminuer les charges pour la climatisation dont souffrent les constructions en période estivale. L'ensemble «complexe de culture et strate végétale» au dessus du toit ont un effet très important sur la régulation thermique à l'extérieur et à l'intérieur des bâtiments. Ceci est du à l'évapotranspiration, au contrôle des radiations solaires par l'ombrage ainsi qu'à la résistance thermique du complexe de culture. La baisse des températures de l'air dans la couche de végétation diminue les fluctuations des températures surfaciques externes du toit mais aussi le flux de chaleur entrant dans le bâtiment en été et de ce fait, réduit les températures de l'air intérieur. Celle-ci est réduite en moyenne de 2 à 4°C et parfois plus.

⁷⁹ **Calcul de l'épaisseur totale du feuillage (TLT)** est calculée par le choix de 10 feuilles au hasard. Leur épaisseur est mesurée et la moyenne est déterminée. Ensuite le nombre moyen des couches de la végétation est estimé puis il est multiplié par l'épaisseur moyenne d'une feuille pour trouver l'épaisseur totale du feuillage.

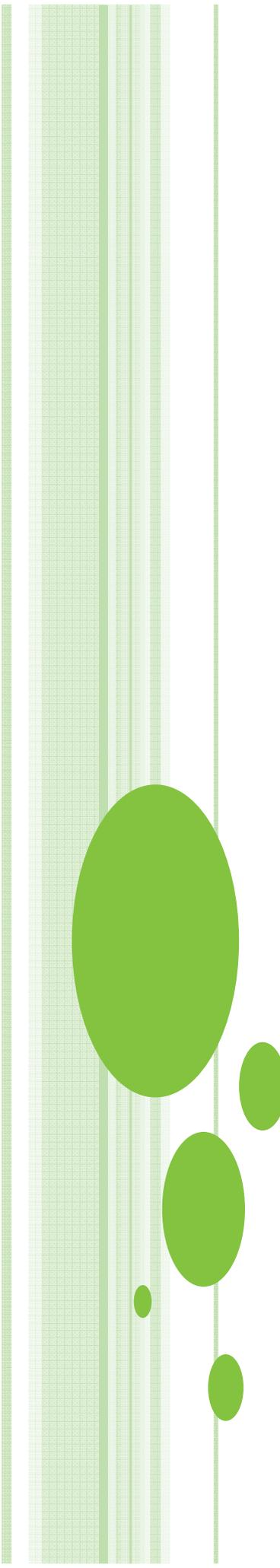
⁸⁰ **Chih- Fang Fang**, « *Evaluating the Thermal Reduction Effect of Plant Layers on Rooftops* », Energy and Building, vol. 40, 2008, pp. 1048-1052.

⁸¹ Dans cette recherche, l'auteur n'a pas utilisé l'indice de couverture foliaire (LAI) puisqu'il est difficile à déterminer pour un concepteur paysager que ce soit à cause des formules de calcul du LAI compliquées utilisant beaucoup de variables, ou de l'impossibilité d'utiliser l'appareil de mesure du LAI qui est extrêmement cher.

L'efficacité thermique de la toiture végétalisée ne peut être uniforme pour tous les projets, elle est fonction de plusieurs paramètres physiques d'environnement ou des composantes mêmes de ce toit écologique. Ces derniers se résument en : l'*ombrage* projeté sur la toiture végétalisée ; le *type de climat* et les *paramètres climatiques* (températures de l'air, humidité relative, vent, les radiations solaires et leur intensités). L'efficacité thermique de la toiture végétalisée reste cependant fonction de la *couverture du ciel* (nuageux ou clair) et de *l'alternance du jour et de la nuit*.

Par ailleurs, les caractéristiques des composantes de la toiture végétalisée agissent aussi sur sa performance thermique. Le rafraîchissement est meilleur pour une toiture *sans isolation* et avec un *substrat épais*. Ce dernier protège le toit des amplitudes thermiques importantes grâce à son inertie. Cependant, son efficacité reste fonction de sa teneur en eau, son albédo, des températures de l'air extérieur et de l'alternance de la nuit et du jour.

La végétation représente l'élément le plus influent sur le rafraîchissement intérieur, grâce à ces fonctions biologiques (transpiration, ombrage...). *La couverture foliaire* doit être importante afin de protéger complètement le substrat des radiations solaires, diminuer les surchauffes des surfaces et réduire le flux de chaleur entrant dans les bâtiments (un LAI ≥ 3 est souvent recommandé). Cet élément n'agit pas seul puisque *la hauteur de la végétation*, *l'épaisseur de la couverture* foliaire ainsi que *l'épaisseur des feuilles*, sont des caractéristiques importantes et complémentaires. Cependant, il est important de rappeler qu'un pourcentage de couverture foliaire important est plus contraignant la nuit puisqu'il bloque aussi le flux de chaleur sortant du bâtiment.



Chapitre V

Présentation du cas d'étude

Introduction :

Le chapitre précédent a constitué une base de données, qui a facilité le choix de la méthodologie d'approche de la présente recherche. Rappelons que l'objectif de celle-ci consiste à évaluer la capacité de rafraîchissement d'une toiture à végétation extensive sous un climat chaud et sec, en vérifiant les hypothèses émises à savoir :

- La toiture végétalisée plantée d'espèces végétales de type CAM (crassulacées), qui réduisent leur transpiration en période chaude comme adaptation au stress thermique, peut contribuer au rafraîchissement intérieur passif.
- C'est l'ensemble couche de substrat et strate végétale qui constitue une couche protectrice de la surface du toit en la protégeant des radiations solaires intenses, ce qui réduit les fluctuations des températures surfaciques du toit, et procure le rafraîchissement intérieur.
- La densité de la couverture foliaire a un impact sur les températures surfaciques externes du toit.

La nouveauté de ce type de végétalisation des bâtiments et l'inexistence des toits végétaux à Constantine, ont été les principales raisons de la réalisation de la toiture végétale de ce cas d'étude. Le présent chapitre explique la méthodologie de travail adoptée, les contraintes régissant le choix du procédé, le choix des matériaux de construction, ainsi que la réalisation de la toiture végétale. Par ailleurs, une analyse des caractéristiques du climat de la ville de Constantine a été faite.

1. Choix du procédé de végétalisation étudié :

L'urgence de la diminution des émissions des gaz polluants dus à la consommation énergétique pour la climatisation des bâtiments existants ou ceux en cours de réalisation, a été l'une des causes qui a exhorté le choix du procédé de végétalisation extensif dans la présente recherche. Puisque celui-ci, est applicable autant pour les futures constructions que pour le patrimoine bâti existant, dont l'architecture n'a pas tenu compte des paramètres du climat et ce, sans modification ou renforcement de la structure des bâtiments. Alors que la végétalisation intensive n'est applicable que pour des toits plats et en phase conception.

Par ailleurs, la végétalisation extensive présente par rapport à la végétalisation intensive ou semi- intensive les avantages suivants; poids et épaisseur du complexe de culture faibles, entretien et arrosage moindres, faibles contraintes de réalisations, faibles exigences des espèces végétales et leur résistance aux stress hydrique et thermique sur les toits, en plus des faibles coûts

de réalisation. Elles peuvent aussi être facilement intégrées dans les centres urbains vu leur adaptabilité à différents types de toitures existantes (accessibles, inaccessibles, plates ou en pente).

Cependant, sachant que les terrasses accessibles en Algérie constituent des espaces de vie complémentaires. Leur végétalisation extensive pourrait diminuer de la surface exploitable pour les diverses activités attribuées aux terrasses, puisque les surfaces végétalisées ne devraient plus être piétinées (il faut donc faire le choix d'exploiter autrement une partie de la terrasse), alors que le procédé semi- intensif tolère juste un piétinement modéré et il est plus lourd. Il était donc judicieux d'étudier une solution médiane à moindre coût, qui prend en compte plusieurs types de terrasses, notamment celles inaccessibles (assez répandues dans l'habitat collectif, les bâtiments administratifs...). D'où le choix du procédé de la végétalisation extensif.

Le choix du procédé extensif vise, non seulement la vérification de la capacité de rafraîchissement passif d'un procédé de végétalisation léger, à faible épaisseur du substrat, mais aussi l'éventualité de vulgariser un jour cette stratégie de rafraîchissement si elle s'avère efficace. D'autant plus que des sociétés étrangères installées en Algérie, notamment à Constantine (SOPREMA- Algérie) disposent des matériaux d'étanchéité développés (anti-racines) ce qui peut inciter à la végétalisation des toits.

Par ailleurs, à travers cette recherche, un intérêt particulier a été porté au climat chaud et sec, puisque l'efficacité des toitures végétalisées est meilleure sous ce climat par rapport au climat humide. Pour cela, vu le besoin intense de système de rafraîchissement sous ces climats, on a voulu vérifier l'efficacité de ce genre de toit sous le climat semi aride de Constantine. Pour ce faire, une analyse climatique et bioclimatique précise de la ville de Constantine a été effectuée afin d'identifier les caractéristiques du climat de la ville et les recommandations de base pour une conception bioclimatique.

2. Etude climatique et bioclimatique de la ville de Constantine :

2.1 Analyse climatique :

Chef-lieu de wilaya, Constantine occupe une position géographique centrale dans la région Nord Est de l'Algérie (Fig. V-1). Elle se situe entre la latitude 36°17' Nord et la longitude 6°37' Est. Le centre ville s'étale sur un terrain caractérisé par une topographie très accidentée (le Rocher) sur une altitude de 687m et il est marqué par la juxtaposition de deux plateaux : El Mansourah et Ain el Bey.



Figure V- 1. Situation de la ville de Constantine
(Source. ENCARTA 2008)

Le climat à Constantine est très contrasté et spécifique du fait que la ville est située dans une zone comprise entre le Sahara à climat continental au sud, et la Méditerranée avec son climat tempéré au nord.

Afin de déterminer le climat d'une région, l'analyse de différents paramètres sur une longue période est requise, dont principalement la température de l'air, les précipitations, la durée d'insolation, la direction et la vitesse du vent ainsi que l'humidité relative. Pour l'étude climatique de la ville de Constantine, les données météo sur une période de 25 ans (1980-2005) ont été analysées¹ (Voir Annexe V analyse climatique), afin de spécifier les caractéristiques principales du climat de la ville.

Le résumé de cette analyse révèle que la ville de Constantine est caractérisée par une température moyenne annuelle de 15.9°C, une humidité relative moyenne de 67%, et une moyenne annuelle des précipitations de 527.7mm. Le vent moyen varie de 2.06m/s (Septembre) à 2.94m/s en décembre². Par ailleurs, la durée d'insolation annuelle à Constantine est de l'ordre de 2802.9h, cette dernière est plus élevée en été qu'en hiver. La ville de Constantine est caractérisée

¹ Les données météorologiques analysées ont pour source : **L'Office Météorologique d'Alger**. «Tableaux récapitulatifs des données météorologiques de la ville de Constantine de 1980-2005».

² Ces vitesses correspondent à la force 2 selon l'Echelle de Beaufort et entre 6 à 11km/h (frémissement des feuilles) In, **Faurie et al.** 2006. p 71.

par un climat semi aride d'après le calcul du quotient pluviométrique d'Emberger établi pour la région méditerranéenne et le calcul de l'indice d'aridité De Martone (Voir annexe V).

L'amplitude moyenne annuelle des températures de l'air est de **12.2°C**. Cette dernière est maximale au mois de juillet avec **15.9°C** et minimale au mois de janvier avec **9.3°C**. L'amplitude thermique moyenne saisonnière est de **19.2°C**³ (Voir Annexe V). Ceci crée deux saisons principales⁴ :

- Un été chaud et moins humide que l'hiver avec un écart de température diurne important.
- Un hiver froid, avec un écart de température diurne moins important.

La saison froide : assez prolongée s'étale du mois d'octobre au mois de Mai. Elle est caractérisée par des températures moyennes basses variant de 7°C à 17.6°C et coïncidant avec des précipitations élevées (la moyenne mensuelle maximale de 88.3mm) et des taux d'humidité relative importants (la moyenne mensuelle maximale est de 79%) (Hiver froid et humide).

La saison chaude : de juin à septembre, enregistre des températures mensuelles moyennes variant de 22.2°C (juin) à 26.2°C (août). Alors que juillet enregistre la maxima des températures maximales (34°C) et constitue le mois le plus chaud. En été, les précipitations ainsi que l'humidité relative moyenne sont minimales (avec respectivement 6.4mm en juillet et entre 48-63% en juillet et septembre). La minima des moyennes minimales des taux d'humidité relative est de 25% en juillet (Eté chaud et sec).

L'indice d'aridité De Martone mensuel ainsi que le diagramme Ombrothermique de la ville de Constantine réalisé d'après les travaux du botaniste M.Gaussen (Annexe V), font ressortir la saison sèche et aride, qui s'étale de juin à septembre. En définissant cette période, les botanistes déterminent les mois où l'activité végétative des plantes est paralysée, sauf si le sol est bien pourvu de réserves aquifères⁵. Pour la présente recherche elle permet aussi de définir la période de mesure en saison estivale.

³ L'amplitude entre la maxima des températures moyennes mensuelles de **26.2°C** au mois d'Août et la minima des températures moyennes mensuelles de **7°C** au mois de Janvier.

⁴ **Ministère de l'habitat**, « *Recommandations Architecturales* », éditions ENAG, Alger 1993. p 9.

⁵ **A.Huetz de lemps**, « *La végétation de la terre* ». Masson et Cie Editeurs. Paris, 1970. p21.

2.2 Analyse bioclimatique de la ville de Constantine:

L'analyse bioclimatique s'est effectuée par l'application des tables de Mahoney et du diagramme psychrométrique de Szokolay, en se basant sur les données climatiques de la ville de Constantine afin de générer des conseils de base en amont d'un projet architectural.

Les tables de Mahoney sont basées sur l'enregistrement des données climatiques, et leur conversion en indicateurs puis en recommandations (Voir annexe V). L'application de cette méthode à la ville de Constantine impose :

- Une conception compacte du tissu urbain dans le but de : protéger le bâtiment des radiations solaires intenses durant l'été, procurer l'ombre et diminuer les déperditions thermiques en hiver.
- Orientation des bâtiments Nord- Sud (l'axe long ; Est- Ouest), vu qu'il faut se protéger des rayons solaires gênants de l'Ouest, surtout en été.
- La taille des ouvertures doit être moyenne à petites (15-25%), leur position sur le mur orienté vers le nord et le sud doit être à hauteur du corps, mais aussi il faut prévoir des ouvertures intérieures pour faciliter le mouvement d'air en été et faire sortir l'air chaud de l'intérieur.
- Mouvement d'air diurne n'est pas requis cependant une ventilation nocturne est souhaitable.
- Les murs extérieurs et intérieurs ainsi que les planchers et toits doivent être à forte inertie, avec un déphasage de 8 heures (grande capacité thermique).
- Il faut prévoir des espaces extérieurs pour y dormir les soirs d'été.

L'application du **Diagramme Psychrométrique de Szokolay** pour la ville de Constantine (Voir Annexe V) a montré qu' :

- En hiver : le chauffage actif est indispensable pour les mois de décembre, janvier, février et pour une grande partie des mois de mars, avril et novembre, dont le confort peut aussi être atteint partiellement grâce au chauffage solaire passif.
- Le confort est atteint en partie à la fin de l'hiver au mois de mai et la fin de l'été au mois de septembre et octobre, pour quelques jours seulement, où le temps est beaucoup plus clément même si le besoin de chauffage passif est nécessaire.

- En été, l'effet de masse est nécessaire à partir du mois de mai, en favorisant le rafraîchissement évaporatif direct et la création de mouvement d'air grâce à la ventilation naturelle. Les mois les plus chauds (juillet et août) auront besoin de ventilation nocturne.

L'étude bioclimatique a montré que des solutions passives peuvent améliorer le confort hygrothermique intérieur. Que ce soit par la conception des plans de masse compactes ; le choix des éléments architecturaux ; l'orientation des bâtiments pour favoriser une bonne protection en été et une bonne exposition en hiver ; ou simplement par ventilation naturelle et rafraîchissement évaporatif direct en saison estivale durant les mois les plus chauds (juin, juillet août) en utilisant les plans d'eau ou la végétation. Cette dernière constitue la base de la présente recherche.

3. Choix de la méthode d'investigation :

Le chapitre IV a révélé qu'il y a plusieurs méthodes d'évaluation du rafraîchissement passif et du confort thermique intérieur obtenu après installation d'une toiture végétalisée. Celles-ci peuvent être basées sur : des toitures schématiques déterminées par des nœuds pour faciliter l'usage des formules mathématiques, des mesures In- situ en comparant des toitures végétalisées avec d'autres de références existantes ou dans des box expérimentaux ; ou alors l'utilisation des logiciels de simulation.

Pour la présente recherche, il est important de signaler les différentes étapes et difficultés rencontrées pour aboutir à la méthode d'investigation finale adoptée (puisque le choix final ne s'est fixé qu'en février 2010):

- En premier, après plusieurs prospections infructueuses auprès des bureaux d'études d'architecture, des pépinières et auprès de la société «SOPREMA- Algérie» de Constantine, l'investigation fût retardée à cause de l'absence totale de toitures végétales réalisées en Algérie sous un climat chaud et sec⁶.
- Ensuite, le choix du cas d'étude s'est porté sur une toiture terrasse inaccessible de 440.32m² recouverte spontanément de *Sedum Album* et ressemblant aux toitures terrasses à végétation

⁶ La société SOPREMA –Algérie a réalisé l'étanchéité des bacs végétaux recouvrant une petite partie de la dalle du sous sol, dans l'école privé «Dar En-nadjah» située à Sidi Mabrouk. Ceux-ci sont recouverts de 15cm de terre végétale et plantés de diverses espèces ornementales. Ce cas d'étude n'a pas pu être retenu, puisque l'effet de la toiture végétale serait moindre par rapport à l'effet d'inertie thermique du sol.

extensive⁷. Cette terrasse à végétation spontanée recouvre le bloc de résidence pour étudiantes dans le Centre National de Formation du Personnel pour Handicapés (CNFPH), situé à Constantine sur le plateau du Mansoura (photo II-1). Le bâtiment est entouré du côté sud par un petit bois planté d'Eucalyptus.

Le vent a permis le dépôt naturel et spontané, sur la couche de gravillons roulés de la terrasse, des particules de poussières et des feuilles d'arbres qui se sont décomposées et transformées au fil du temps en humus, produisant de ce fait, une couche de substrat d'environ 3 à 4 cm de profondeur. Cette couche a permis au *Sedum album*⁸ et d'autres plantes saisonnières de se propager et de recouvrir 302.25m² (68.71%) de la surface totale de la terrasse.

La ressemblance de cette toiture à végétation spontanée avec les toitures à végétation extensive a permis sa sélection comme cas d'étude. Elle fût donc étudiée de février 2009 (mois de la découverte de la toiture) à juin 2009, en analysant en un premier temps l'évolution de la couverture foliaire et les espaces intérieurs qu'elle recouvre tout en préparant la phase des mesures pour l'été 2009. A la fin du mois de juin 2009, ce cas d'étude a dû être abandonner pour diverses raisons dont, la difficulté de collaborer avec l'administration et l'impossibilité de se procurer les plans du bâtiment ou d'exploiter les lieux librement. En plus du dessèchement total de la végétation (*Sedum album*) durant le mois de juin. Celui-ci est dû, d'une part, à l'absence d'arrosage sur la terrasse et d'autre part, aux petites feuilles que la végétation possède. Il se trouve que malgré que ces dernières soient succulentes, elles n'ont pas pu résister aux fortes chaleurs. Cependant, la végétation n'a pas disparue pour autant puisqu'elle s'est régénérée en 2010 grâce aux graines produites. Il s'avère donc, que même certaines plantes succulentes ou crassulacées ne peuvent résister aux longues semaines de canicules sous notre climat sans arrosage. D'ailleurs Lassalle (2006) recommande pour ces climats un arrosage d'appoint avec une fréquence faible (Voir chapitre II).

⁷ Il s'avère que les premières toitures végétales étudiées en Allemagne furent à végétation spontanée et donc, elles sont à la base de l'évolution des toitures à végétation extensives. (Voir Chapitre II). Pour cela cette toiture a été prise comme cas d'étude.

⁸ Le *Sedum album* prend racine dans une très fine couche de substrat, et même directement dans les interstices des gravillons (constat sur les lieux).

- A partir de février 2010, le choix de la méthode de recherche expérimentale s'est imposé. Pour cela, les recherches d'Onmura et al, 2001, Bass et Baskaran, 2003... (chapitre IV) basées sur la comparaison entre un toit de référence et un toit végétal installé sur le même bâtiment, ont constitué une source d'inspiration pour la présente recherche. Une toiture à végétation extensive a donc été réalisée en grandeur réelle sur une partie de la terrasse accessible d'une habitation individuelle à Constantine. Son installation fût achevée en fin Mars 2010, avec pour but la vérification du rafraîchissement obtenu sous la toiture végétale en comparaison à un espace non doté de toit végétal dans le même bâtiment.

4. Choix du site d'investigation :

L'investigation s'est déroulée dans le lotissement *Les Eucalyptus*, situé dans la partie Sud de la commune de Constantine, sur le versant Nord- Ouest du plateau de Ain El Bey. Le lotissement est constitué d'habitations individuelles mitoyennes qui possèdent pour la plupart deux façades. Le lotissement, en cours de construction, est situé sur un terrain en pente. Il est délimité par le lotissement Belhadj Mostefa au Sud, par un terrain vague au Nord et à l'Ouest, et par la Route Nationale (RN 79) à l'Est. Le site d'investigations (Photo V-1) est situé sur la périphérie Nord du lotissement. Il possède deux façades : l'une donnant sur un terrain vague et l'autre sur une intersection de ruelles (Fig. V-2).



Photo V- 1. Vue aérienne du site d'investigation
(Source. www.googleearth.com, 2009)

Le choix s'est porté sur ce site pour diverses raisons :

- La proximité du lotissement concerné de la Station météo de la ville de Constantine (sis à Ain El Bey), ce qui permet d'utiliser les données météo réelles sans l'influence du centre urbain dense et de l'îlot de chaleur urbain probable.

- L'absence de couvert végétal dans les environs du lotissement durant la période estivale pouvant influencer les mesures. Sachant que le jardin de l'habitation ne doit pas avoir une grande influence sur les mesures vu qu'il se trouve à une hauteur de 12.24m plus bas (niveau du sous sol).
- L'accord du propriétaire à disposer pour le compte de la présente recherche d'une partie de la terrasse accessible pour l'installation du toit végétal.
- La terrasse n'est pas dominée par les habitations mitoyennes et bénéficie donc pleinement des radiations solaires en saison estivale.

5. Présentation du site d'investigation :

Pour ce cas d'étude, une toiture végétalisée a dû être réalisée sur la terrasse accessible d'une habitation individuelle (R+2). Celle-ci possède deux jardins, l'un à l'avant de 2m de large et un autre à l'arrière de 6 m de large (Fig. V-2).

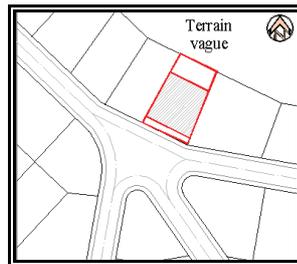


Figure V- 2. Localisation du site d'investigation (Ech : 1/2000)
 (Source. Plan de réalisation d'une habitation individuelle R+2 Sis au Lotissement Eucalyptus)



Photo V- 2 . A gauche : façade principale (Sud- Ouest). A droite : façade postérieure (Nord- Est)
 (Source. Auteur)

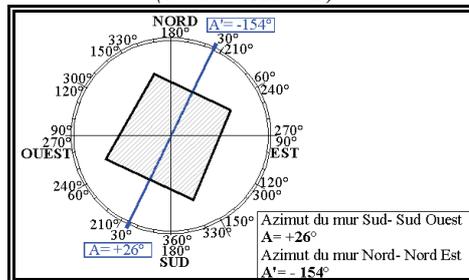


Figure V- 3. Orientation de l'habitation testée (Source. Auteur)

Ayant une forme trapézoïdale, l'habitation a deux façades. Une façade principale (Photo V-2) (donnant sur la rue) orientée Sud- Sud Ouest avec un Azimut de (+26° Sud) et une façade postérieure orientée Nord- Nord Est avec un Azimut de (-154° Sud) (Fig. V-3). Les murs latéraux de l'habitation sont aveugles, puisque mitoyens. Au 2^{ème} étage (étage testé), le mur aveugle Sud- Est est complètement exposé aux radiations solaires (habitation mitoyenne basse).

L'habitation fût achevée en 2007, elle est conçue avec le système traditionnel poteaux-poutres avec un remplissage en briques creuses en doubles murettes et une lame d'air (épaisseur totale avec les enduits= 33cm). Toutes les dalles sont en corps creux. La construction n'a pas tenu compte des spécificités du climat, cependant elle présente d'après le vécu des occupants des températures agréables dans le sous-sol, le RDC et 1^{er} étage en été (sauf en cas de canicules). Alors que le 2^{ème} étage (sous la terrasse) présente des surchauffes durant toute la saison estivale.

Le 2^{ème} étage (étage testé sous la terrasse) est composé de trois pièces (Fig. V-4), un grand séjour ouvert avec la cuisine, et des sanitaires. Les pièces testées présentent des caractéristiques communes et d'autres particulières, résumées dans le tableau (V-1). L'effet de l'échauffement par les murs peut être négligé pour la chambre 02 puisqu'elle est orientée au Nord- Nord Est et de ce fait, elle ne reçoit pas les radiations solaires intenses en été, en plus de la protection procuré par la loggia (Coupe A-A, Fig. V-4). Alors que la chambre 01, possède un balcon d'angle, protégé par un mur au Sud- Sud Est et par le débord de la terrasse (Fig. V-4), ce qui constitue une protection du mur des radiations solaires en été. Sachant que celles-ci sont perpendiculaires en été, et que les gains de chaleur à travers le toit sont plus importants que ceux des murs, même ceux orientés au Sud⁹.

Dans ce sens, d'après la *literature review* effectuée dans le chapitre IV, aucune recherche ne précise l'orientation des espaces testés puisque l'effet des radiations sur les toits est plus important en été, de ce fait, on peut négliger les gains de chaleur par les murs. Par ailleurs, les espaces testés ne sont pas aménagés, ni occupés durant la période de mesure.

⁹ **Emad H.Amer**, «Passive options for solar cooling of buildings in arid areas», Energy, vol .31, 2006, pp.1332-1344

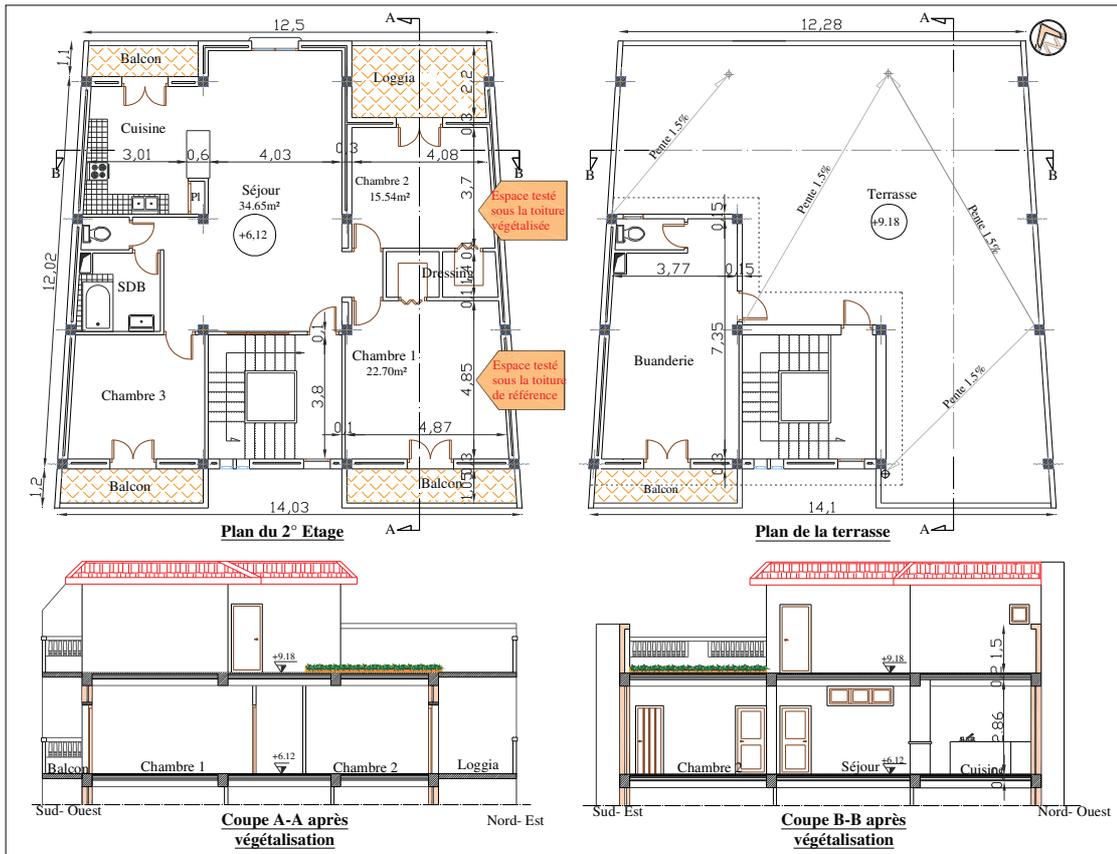


Figure V- 4. Plans et coupes du 2ème étage et de la terrasse (Ech : 1/ 200) (Source. Auteur)

Tableau V- 1. Récapitulatif des caractéristiques des espaces testés (Source. Auteur)

Caractéristiques	Chambre 2	Chambre 1
Surface	15.54 m ²	22.70 m ²
Orientation des murs extérieurs	Nord- Nord Est Sud- Sud Est	Sud- Sud Ouest Sud- Sud Est
Matériaux et couleur des murs extérieurs (épaisseur totale 33cm)	Double murette en briques creuses. Le mur est revêtu à l'extérieur d'un enduit rugueux en ciment, de couleur jaune ocre.	
Matériaux et couleur des murs intérieurs	Cloisons de 10cm d'épaisseur avec enduit en plâtre. Murs non peints (couleur blanche du plâtre)	
Surface des ouvertures	Porte fenêtre (2.88m ²)	Porte fenêtre (2.88m ²)
Protections solaires	- Volets en bois (peints en vert foncé). - Saillie de (2.2m) de la dalle de la terrasse (loggia).	-Volets en bois (peints en vert foncé). -Saillie de la dalle de la terrasse (balcon d'angle)

6. Les caractéristiques de la toiture terrasse et les contraintes régissant sa végétalisation :

Le choix du procédé de végétalisation, le choix des matériaux (épaisseur et composante du complexe de culture, le choix des espèces végétales, et leur mode de leur mise en œuvre...) sont en général fonction d'une étude approfondie sur les diverses caractéristiques et contraintes de la terrasse. On distingue les contraintes architecturales, climatiques, esthétiques, les masques d'ombre, ainsi que les contraintes d'entretien et d'arrosage... pour cette recherche, certaines contraintes ont été prises en compte, telles que :

- L'étude de la disposition des éléments architecturaux et leur orientation. Celle-ci a permis de déterminer l'emplacement exact de la toiture végétale, mais aussi les zones d'ombre dans l'emplacement même de la toiture végétale. Il se trouve que la terrasse ne subie pas l'ombrage des constructions mitoyennes, mais celui des éléments architecturaux de la terrasse même. A savoir : un muret opaque de 15cm d'épaisseur et 1.5m de haut du coté Sud- Est et du coté Nord- Ouest, les murs de la buanderie et de la cage d'escalier au Sud- Ouest, et les balustrades de 1.1m de haut construites en dur (mi- opaques mi- ouvertes) du coté Nord- Est et Sud- Ouest (Fig. V-4).
- La dalle en corps creux peut supporter une charge de 350 kg/m². Celle-ci pourrait recevoir une végétalisation semi- intensive ou une végétalisation extensive plus lourde dont les charges varient de 40 à 300 kg/m², à condition que les zones végétalisées ne soient plus autorisées à la circulation¹⁰. Sachant que le poids du toit végétal est fonction du type de végétalisation (extensif, intensif) et de l'épaisseur et du poids du complexe de culture à saturation. Pour ce cas d'étude, le poids exact des matériaux constituant la toiture végétale ne pouvait être déterminé. Pour cela, le choix s'est limité à la végétalisation extensive monocouche (Voir titres 8 et 9 du présent chapitre).

¹⁰ **François Lassalle**, « *Végétalisation extensive des terrasses et toitures : 34 réalisations exemplaires* », Editions Le Moniteur, Paris, 2006. p.30.

- La pente du toit est de 1.5%, considérée comme pente nulle selon les normes algériennes¹¹. Elle permet cependant l'évacuation rapide des eaux pluviales vers 03 évacuations sur la terrasse (Fig. V-4).
- Les murs extérieurs sont tous peints en jaune ocre et de ce fait ont un albédo d'environ 0.30 à 0.35¹². Par ailleurs, Constantine possède une importante durée d'insolation en été, qui atteint un max de 346.4 heures¹³ au mois de Juillet. Durant ce mois, les murs orientés Sud- Ouest et Sud- Est reçoivent un rayonnement global total d'une intensité de 3649Wh/m² par jour, contre 3334Wh/m² par jour pour les murs Nord- Est, Nord- Ouest. La surface horizontale reçoit par contre, la plus importante quantité de radiations solaires en été, à raison de 7480Wh/m² de rayonnement global en une journée du mois de Juillet¹⁴. Dans ce cas d'étude, le plancher de la terrasse est recouvert d'un carrelage de type Granito d'un fond clair avec des grains foncés, dont l'albédo est d'environ 0.15 à 0.20 pour les parties claires.
- La terrasse est exposée au vent dominant froid (du Nord) et au vent chaud (du sud) en été. Les vents pourraient avoir un effet néfaste sur les plantes, comme ils peuvent stimuler l'évapotranspiration et donc le rafraîchissement en été.
- Les contraintes d'arrosage et d'entretien conditionnent aussi le choix du type de végétalisation et les espèces choisies. Pour ce cas d'étude, un arrosage d'appoint est disponible dans la buanderie. Par ailleurs, le manque d'eau dans la région de Constantine en saison estivale, a limité le choix aux espèces à faibles besoins en eau (Voir chapitre III). Néanmoins, l'arrosage devrait être régulier les premiers mois de l'installation puisque les plantes seront en période végétative, en plus dans le but de favoriser le développement rapide des plantes (toiture installée 4 mois avant la période des mesures).
- Les exigences esthétiques ont été un peu négligées vu la rapidité avec laquelle cette toiture végétale a dû être construite. D'autre part, le choix du mode de mise en œuvre de la végétation

¹¹ CNERIB, «Travaux d'étanchéité des toitures terrasses et toitures inclinées : support en maçonnerie», Document Technique Règlementaire d'Exécution (DTR. E4-1), CNERIB, Alger, 2005. (Tableau en annexes A, B.)

¹² Alain Liébard, André De Herde, «Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique », Editions du Moniteur, Paris, p.300.

¹³ Office météorologique National d'Alger, «Durée d'insolation », tableau récapitulatif 1980-2005.

¹⁴ Capderou.M, « Atlas solaire de l'Algérie, Aspect énergétique », Tome 2, OPU Alger, 1985. p 61, 63, 56.

qui s'est imposé ne permettait pas l'obtention d'un aspect immédiat et une couverture foliaire importante. Néanmoins, les espèces choisies sont essentiellement des plantes à feuillage succulent et persistant avec une floraison diversifiée.

7. Choix de l'emplacement de la toiture végétale :

La toiture végétale pouvait être installée au dessus de trois espaces : le séjour, la chambre 01 et la chambre 02 (Voir Fig. V-4). Cependant, vu l'impossibilité de végétaliser toute la surface du séjour (34.65m²), d'autant plus que l'espace est ouvert avec la cuisine et que plusieurs paramètres pourraient influencer les mesures, le choix devait donc être fait entre les chambres 01 et 02. Pour ce faire, une analyse précise de la durée d'insolation du plancher de la terrasse recouvrant chaque chambre était nécessaire.

Sachant que le rayonnement solaire est le facteur climatique qui a le plus d'influence sur le microclimat d'une toiture, particulièrement en été puisqu'il cause des élévations de températures importantes¹⁵. L'exploitation des diagrammes stéréographiques des masques d'ombre (Fig. V-5)¹⁶ montre que les toits des deux espaces testés reçoivent les radiations solaires durant au moins trois heures par jour (même en décembre), ce qui est dans les normes de la végétalisation des toits. Le toit végétal aurait donc pu être installé sur l'un des deux espaces. Or, les diagrammes stéréographiques montrent que la durée d'insolation de la chambre 02 est plus importante durant la saison estivale :

- Le plancher recouvrant la chambre 02 est ensoleillé durant environs neuf heures par jour de mai à juillet (de 8 :00h à 17 :00h) et environs huit heures par jour en août.
- Le plancher recouvrant la chambre 01 a une durée d'insolation moindre, à cause de l'ombre projetée par les éléments architecturaux. Ce dernier reçoit donc le soleil environ cinq heures et demi de mai à juillet (de 8 :00h à 14 : 30mn) et environ six heures et demi par jour en août. Néanmoins, les radiations solaires durant cette période restent intenses.

¹⁵ D.C.Tibbetts et M.C.Baker, «*Revêtements des toits en agrégats minéraux* », Publication n° CBD-65-F, Publié à l'origine en Sept. 1967, In www.darkweb.nl

¹⁶ Les masques d'ombre représentés dans les diagrammes stéréographiques de la figure (V-5), représentent les points centraux du plancher recouvrant les différents espaces testés.

De ce fait, le choix de l'espace à végétaliser s'est porté sur le toit recouvrant la chambre 02 (Fig. V-6), puisqu'il subi le maximum de radiations solaires en été et de ce fait, surchauffe plus les espaces intérieurs.

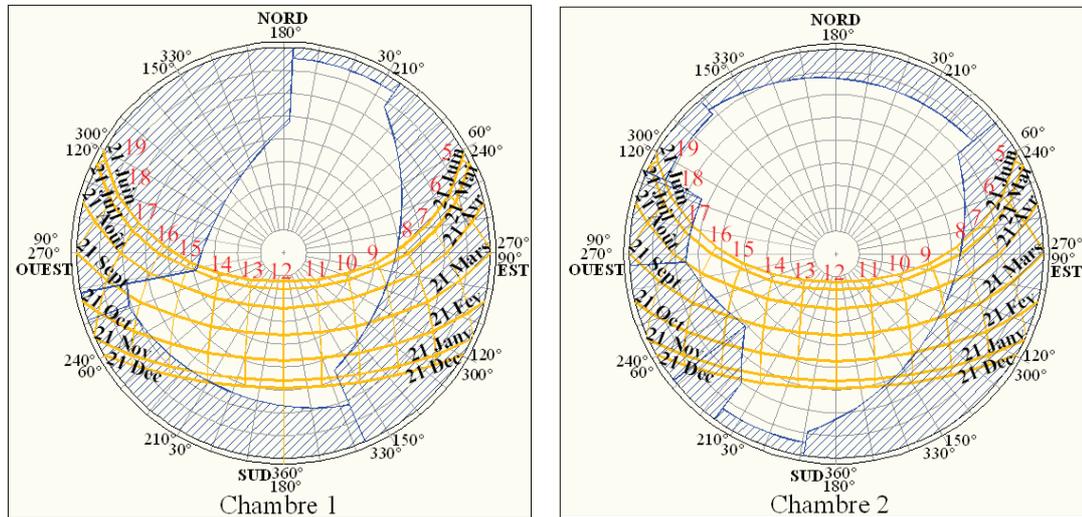


Figure V- 5. Projection stéréographique des masques d'ombres sur la dalle recouvrant la chambre 01 et la chambre 02. (Source. Auteur)

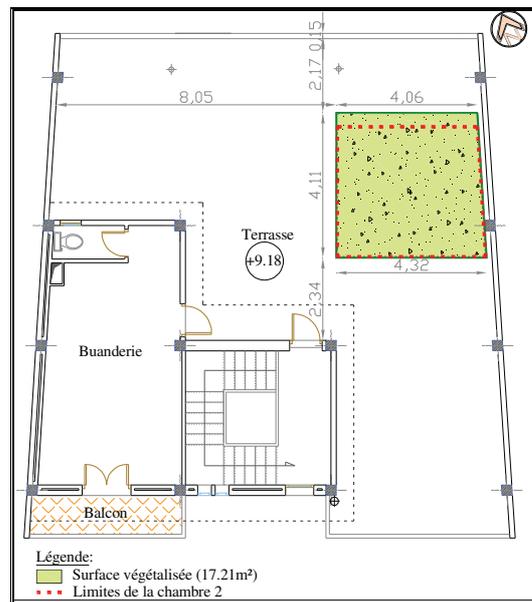


Figure V- 6. Implantation de la toiture végétale sur la terrasse (ECH : 1/200) (Source. Auteur)

8. Choix des matériaux et de la procédure de construction de la toiture végétale :

Le caractère expérimental de la toiture végétalisée réalisée a influencé le choix de la procédure et les matériaux de construction. D'une part, vu qu'au sein du laboratoire, on ne

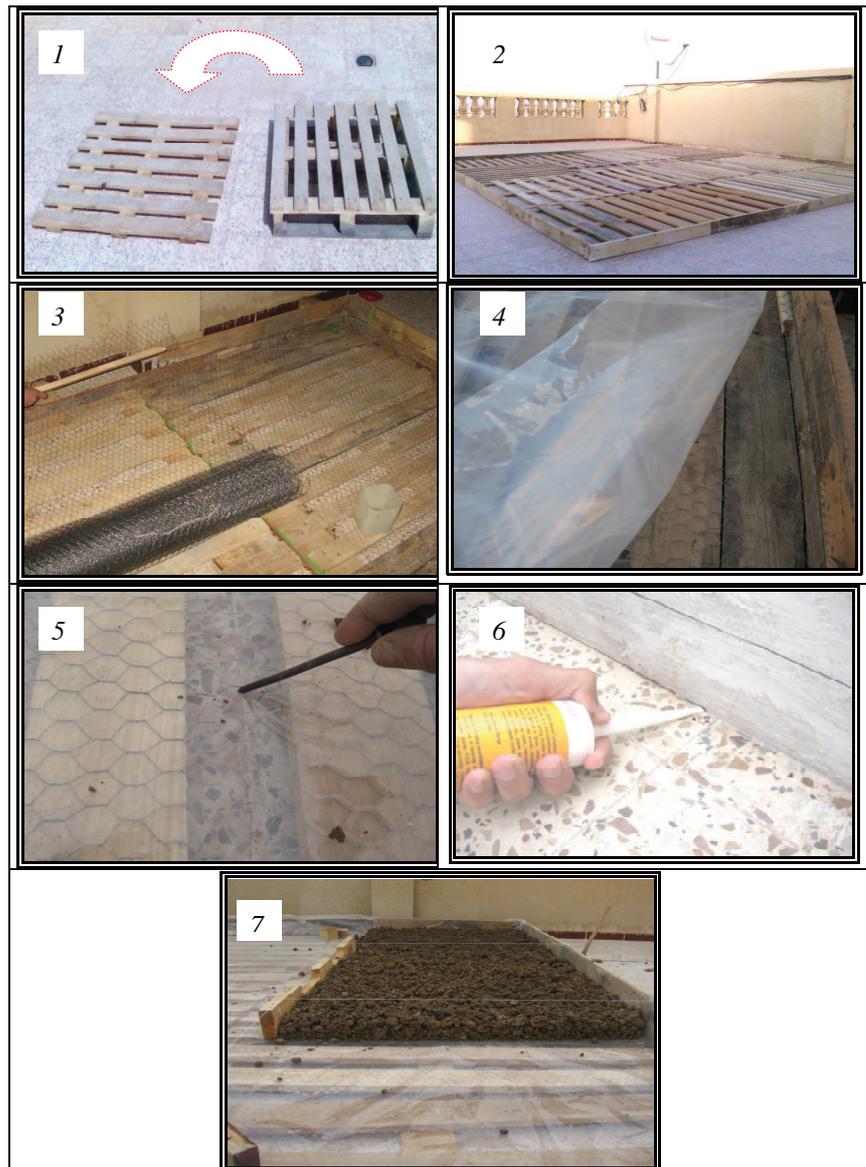
disposait pas de moyens pour réaliser la toiture végétalisée dans les normes (étanchéité anti-racine, filtrage, composition et caractéristiques techniques du substrat et du drainage). D'autre part, vu son installation rapide pour le profit de la présente recherche et le temps restreint accordé pour la phase réalisation afin de permettre aux végétaux de pousser avant la saison estivale (l'installation fût terminée vers le 20 mars 2010).

La construction de la présente toiture végétale expérimentale trouva son inspiration de la recherche d'Alexandri et Jones¹⁷. Comme pour cette dernière, un socle en bois surélevé de quelques centimètres du plancher a été construit sur la surface totale de la chambre 02 (17.21m²). Vu les moyens dont on disposait pour cette expérimentation, le choix du matériau de construction s'est fixé sur le recyclage de palettes en bois utilisées habituellement comme supports pour les marchandises (Photos V-3-1). Celles-ci ont été démontées en parties pour récupérer leurs parties supérieures (plateaux), qui furent ensuite juxtaposées afin de constituer un socle pour la toiture végétale (Photo V-3-1). De ce fait, la partie supérieure du socle est surélevée de 3cm par rapport au plancher. Les planches de bois restantes ont servies pour entourer le socle d'une bordure de 18 cm de haut (Photo V-3-2) qui maintien la couche de culture, et dont la face externe fût peinte en blanc.

La partie supérieure constituant le socle est composée de plusieurs planches distantes les unes des autres de 6 à 7cm (Photo V-3-1). De ce fait, la mise en place d'un film en plastique seul ne pouvait maintenir le poids de la couche de culture à saturation au niveau des fentes existantes entre les planches de bois (Photo V-3-1). En plus, par manque de matériau (planches de bois), et vu que des interstices devaient être laissées afin de permettre l'évacuation de l'eau et l'introduction de la sonde qui mesure les températures surfaciques, la mise en place d'un grillage solide s'est imposée puisqu'il permet au substrat saturé de garder la position horizontale, même au niveau des fentes entre les planches de bois (Photo V-3-3). Un film en plastique transparent fût ensuite déposé sur le grillage (Photo V-3-4), et percé de trous à plusieurs endroits permettant l'évacuation des eaux excédentaires vers le plancher, puis vers l'évacuation (Photos V-3-5). Le substrat est ensuite déposé au dessus de ce film (Fig. V-3-7).

¹⁷ Eleftheria Alexandri et Phil Jones, «Developing a one- dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effects of green roofs one the built environment: Comparison with experimental results», Building and Environment, Vol. 4, 2007. pp. 2835-2849.

Tous les bords extérieurs du socle ont été obstrués avec un mastic en silicone, afin de rendre le plancher en dessous de la toiture végétale étanche à l'air et à l'eau, (sinon les valeurs des températures surfaciques du plancher peuvent être influencées par ces derniers) (Photos V-3-6). Cependant, des vides ont été laissés au niveau bas de la pente, facilitant l'évacuation de l'eau. En résumé, la couche d'étanchéité est supprimée puisque la dalle est déjà recouverte d'une étanchéité et d'un revêtement la protégeant (carrelage de type Granito) (Fig. V-7).



Photos V- 3. Les matériaux utilisés et les étapes de construction de la toiture végétale
(Source. Auteur)

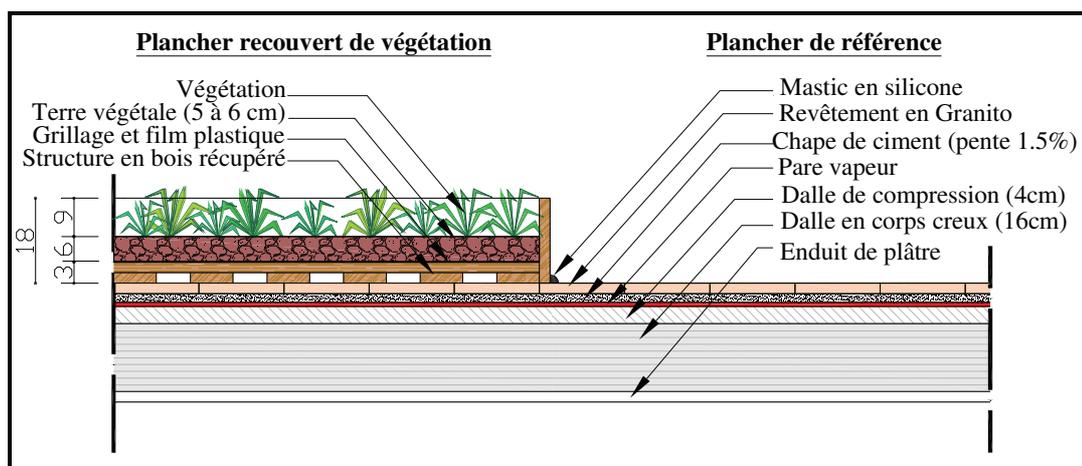


Figure V- 7. Coupe schématique sur le plancher de référence et la toiture végétale
(Source. Auteur)

9. Le choix des composantes de la couche de culture :

Sachant que la couche de culture peut être choisie selon différentes configurations monocouche (substrat seul), bicouche (drainage et substrat) ou multicouche (drainage, filtre et substrat) (voir chapitre II). Le choix pour la présente toiture s'est porté sur la configuration monocouche pour les raisons suivantes :

La composition du drainage étant en général en agrégats minéraux poreux (pouzzolane, pierre ponce...) ou en matériaux synthétiques (Voir chapitre II) (ne pouvant être procurés pour ce cas d'étude). Ces derniers peuvent être remplacés par des agrégats minéraux non poreux (gravillons roulés). Or, la prise en compte de la granulométrie et de l'épaisseur de cette couche selon les normes est difficile à atteindre. Sachant qu'entre autre, l'épaisseur de la couche de drainage est conditionnée par plusieurs éléments tels que : la pente du toit, les charges admissibles, les espèces végétales et la couche filtrante :

- **La couche filtrante** : l'épaisseur de la couche de drainage est coordonnée avec la présence ou l'absence de la couche filtrante. Cette dernière n'est obligatoire que lorsque l'épaisseur de la couche de culture représente plus de la moitié de celle de la couche de drainage¹⁸. C'est-à-dire, lorsque la couche filtrante est supprimée (comme pour ce cas d'étude), le substrat doit avoir

¹⁸ François Lassalle, «Végétalisation extensive des terrasses et toitures : 34 réalisations exemplaires », Editions Le Moniteur, Paris, 2006. p.102.

une épaisseur inférieure ou égale à la moitié de la couche de drainage¹⁹. (Donc, la prise en compte de cette condition dans ce cas d'étude, exige que la couche de drainage doit être plus importante que le substrat pour pouvoir éliminer la couche filtrante).

- **La pente** : la couche de drainage doit avoir une épaisseur de 4 à 6 cm en pente nulle²⁰. (Donc ; avec cette condition dans ce cas d'étude, où la pente de 1.5% est considérée comme nulle, le substrat doit être ≤ 2 ou ≤ 3 cm d'après les conditions reliées à la couche filtrante. Or, ces épaisseurs de substrat peuvent être considérées trop faibles pour la survie des plantes et pour l'obtention d'un effet rafraîchissant à l'intérieur du bâtiment sous un climat semi- aride).
- **Le choix des végétaux** : les plantes succulentes peuvent se développer sur les plus faibles épaisseurs (4 à 8cm), avec ou sans drainage, les plantes vivaces plus exigeantes sont installées sur des épaisseurs plus fortes (10 à 15cm) et demandent une couche de drainage et une couche filtrante²¹. (Dans ce cas d'étude et vu le climat semi- aride de Constantine, les plantes doivent obligatoirement être succulentes, et donc 4 à 8 cm de substrat sans drainage suffisent).
- **La surcharge admissible** : un substrat de 12cm ou 15cm d'épaisseur en végétalisation extensive, exige l'utilisation d'un drainage léger en argile expansée concassée, pouzzolane... (Ce qui ne pouvait être réalisé pour ce cas d'étude, vu l'absence de tous ces matériaux. D'autre part, si les gravillons roulés présents sur le marché sont utilisés, ils auront un poids important vu l'épaisseur qui doit leur être conférée par rapport à l'épaisseur du substrat).

Tous les paramètres cités plus haut, ont guidé le choix vers une solution médiane, de façon à éliminer la couche filtrante et la couche de drainage, puisque leur absence ne sera pas néfaste pour les plantes succulentes, et donc la configuration monocouche a été choisie.

Par ailleurs, la composition même du substrat avec des pourcentages précis pour les matières minérales et les matières organiques (voir annexe II), n'est pas de notre ressort et exige

¹⁹ Par exemple : Substrat 4 cm sur drainage 8 cm- on ne met pas de couche filtrante, substrat 4 cm sur drainage 5 cm- on met une couche filtrante. (**Soprema, CCP. P.29**), ou par exemple, on ne met pas de couche filtrante lorsqu'on a 6 à 8cm de couche de drainage en granulat meuble, pour 2 à 3 cm de substrat élaboré (**F.Lassalle, 2006-p. 105**)

²⁰ **François Lassalle**, «Végétalisation extensive des terrasses et toitures : 34 réalisations exemplaires », Editions Le Moniteur, Paris, 2006. p.114.

²¹ **Ibid.** p.114.

des connaissances en horticulture. Et vu l'urgence de l'installation de la toiture, la terre végétale a été prélevée des environs de l'habitation et étalée sur le socle en bois sur une épaisseur de 6 cm (Photo. V-3-7). Sachant que la plage d'épaisseur pour les végétalisations extensives est entre 5cm et 20cm avec une moyenne de 10cm (chapitre II). L'épaisseur de 6 cm est aussi conditionnée d'une part, par le fait que son poids à sec et à saturation ne pouvait être précisé. Et que d'autre part, le complexe de culture est constitué de terre végétale, et donc son poids sera beaucoup plus important à saturation²². Pour cela, l'épaisseur de la couche de culture a été réduite à seulement 6cm, et elle fût vérifiée en plusieurs points. Par ailleurs, la terre végétale utilisée est de couleur foncée (marron foncé), ce qui peut avoir un effet sur les radiations solaires absorbées et réfléchies mais aussi sur le rayonnement infrarouge lorsque le substrat est sec.

10. Le choix des espèces végétales :

La végétalisation extensive des toits sous les climats chauds demande des plantes xérophiles qui résistent à la déshydratation telles que les succulentes du genre crassulacées ou des vivaces succulentes. Ces plantes ont un mécanisme de photosynthèse de type CAM (Chapitre II).

Pour cette recherche, le choix des espèces végétales s'est d'abord porté sur la végétalisation totale de la toiture avec des plantes succulentes de la famille des crassulacées, du genre *Sedum* qui poussent bien dans le jardin de la propriété (*Sedum palmeri*, *Sedum tortulosum*). Celles-ci présentent une grande résistance au gel, au froid et aux températures élevées et dont le besoin en eau est faible. Le manque du nombre de boutures et l'indisponibilité immédiate de ces deux espèces sur le marché ont imposé la diversification des espèces végétales du genre crassulacées, telles que *Sedum album*, *Echeveria sanchez*, *Aoenium cyrico*, *Aloinopsis schooneesii*, *Aloinopsis-peersii*. Ces plantes ont les mêmes caractéristiques que les Sedums ; elles captent le maximum d'eau en leur disposition, la stockent dans leurs feuilles charnues et diminuent les pertes par transpiration (Voir Annexe II- les caractéristiques des plantes utilisées).

²² Vu que le substrat présente un poids plus léger, d'une part grâce à ses composants minéraux (pouzzolane, pierre ponce...) et d'autre part, vu le volume d'air le caractérisant grâce à sa granulométrie.

Par ailleurs, à cause du manque de ce genre de plantes grasses dans les pépinières de Constantine, le choix s'est orienté vers les plantes succulentes vivaces²³ (qui résistent aussi bien à la sécheresse, mais qui préfèrent une situation arrosée en été pour bien se développer). Deux plantes succulentes de la famille des Aizoacées ont donc été choisies. L'une du genre *Delosperma* (*Pourpier de Cooper*) et l'autre du genre *Mesembryanthemum* (*Aptenia cordifolia*, appelé aussi *ficoïde à feuilles en cœur*) (Voir Annexe II). L'*Aptenia cordifolia* a été entièrement prélevée du jardin de la propriété étudiée (Fig. V-8). Le tableau (V-2) résume les principaux avantages et inconvénients que présentent les espèces végétales choisies.

Tableau V- 2. Avantages et inconvénients caractérisant les espèces végétales choisies.
(Source. Auteur)

Avantages.	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Toutes les espèces sont résistantes à la sécheresse et au gel. - Les crassulacées se développent et se multiplient seules. - Les vivaces se développent en se ramifiant d'un seul pied (rampante ou tapissante). - Feuillage succulent et persistant dont le développement est varié (tapissant : rampant ou érigé pour les succulentes vivaces, en coussinet pour les <i>Sedums</i>, créant une importante zone d'ombre à développement adulte). - La floraison est variée (rose pour le <i>Pourpier de cooper</i>, jaune pour les <i>Sedums</i> et l'<i>Aloinopsis</i>, rouge à rose pour l'<i>Aptenia cordifolia</i>). - Faibles développement des racines et besoins en eau. 	<ul style="list-style-type: none"> - Feuillage envahissant de l'<i>Aptenia cordifolia</i> à développement avancé (qu'il faut couper de temps en temps). - Enlèvement des fleurs fanées du <i>Pourpier de Cooper</i>. (Pas obligatoire). - Les fleurs des vivaces très nombreuses restent cependant fermées en absence de soleil (ce qui n'est pas le cas de cette toiture puisque les zones d'ombre sont périodiques). - Le développement des <i>Sedums</i> peut prendre du temps avant d'avoir une couverture foliaire satisfaisante.

10.1. Le mode de mise en œuvre de la végétation :

Le mode de mise en œuvre de la végétation s'est imposé automatiquement, vu l'indisponibilité en Algérie des plantes succulentes en plaques pré-cultivées, en tapis pré-végétalisés, ou micro mottes en grandes quantités. Pour cela, le choix s'est porté sur la végétalisation par le bouturage et par la plantation de micro- mottes ou de plants. Ce qui a eu un impact sur la couverture foliaire (qui n'était pas importante durant la période de mesure).

²³ Sachant que, le choix du gazon, qui pouvait couvrir rapidement la surface testée a été écarté vu, d'une part, l'incompatibilité de cette espèce avec la végétalisation extensive et d'autre part, vu son besoin d'une importante épaisseur de substrat (10 à 15cm), en plus de l'arrosage régulier en période estivale et l'entretien (tonte).

Le bouturage concerne les crassulacées (Fig. V-8), et consiste à mettre en terre des fragments de tige sans racines de chaque espèce. Ces plantes développent rapidement des racines lorsque le sol n'est pas sec, cependant leur développement aérien prend du temps. La densité du bouturage est de 56 boutures/m² dans le but d'avoir une couverture foliaire importante en période de mesure. Cette densité obéit aux recommandations de Lassalle²⁴ variant de 10 à 60 fragments/m² (Voir Chapitre II). Le bouturage de *Aptenia cordifolia* a été fait avec 50 boutures/m² puisque cette plante vivace est envahissante à développement.

La plantation de micro- mottes ou plants (jeunes plantes avec racines) concerne uniquement le *Pourpier de Cooper*, avec une densité de 25 unités/m² selon les recommandations des Règles françaises de la végétalisation des toits²⁵.

Le plan de plantation (Fig. V-8) n'obéit pas à une démarche esthétique, mais purement technique dans le but de vérifier séparément le développement des différentes espèces à long terme et leurs capacités de protection des surfaces grâce à leur ombrage varié.

A l'installation, la végétation est basse avec des hauteurs variant de 3cm à 6cm (pour les *Sedums*, *Aoenium*, *Echeveria* et *Aptenia cordifolia*) et jusqu'à 10cm pour le *Pourpier de cooper*. La couverture foliaire totale après installation (fin mars) est de 17.84% soit seulement 3.07m² de la surface totale de la toiture végétalisée (Photo V-4). La surface totale que chaque espèce recouvre durant le mois d'avril est représentée dans le plan de plantation (Fig. V- 8).

D'après Lassalle (2006), le taux de couverture foliaire n'atteint 60% qu'un an après la plantation de micro- mottes et 40% pour la même période pour le semis et le bouturage de fragments de tiges. Ce qui constitue une autre contrainte qui a caractérisé cette expérimentation, puisque la couverture totale en juillet est de seulement 23.65% (Photo V-5) qui s'est améliorée en novembre 2010 (photo V-6).

²⁴ **François Lassalle**, «Végétalisation extensive des terrasses et toitures : 34 réalisations exemplaires», Editions Le Moniteur, Paris, 2006. p. 121.

²⁵ **Adivet, CSFE, SNPPA, UNPE**, «Règles Professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées », 2^e éd., Paris, novembre 2007, p.18.

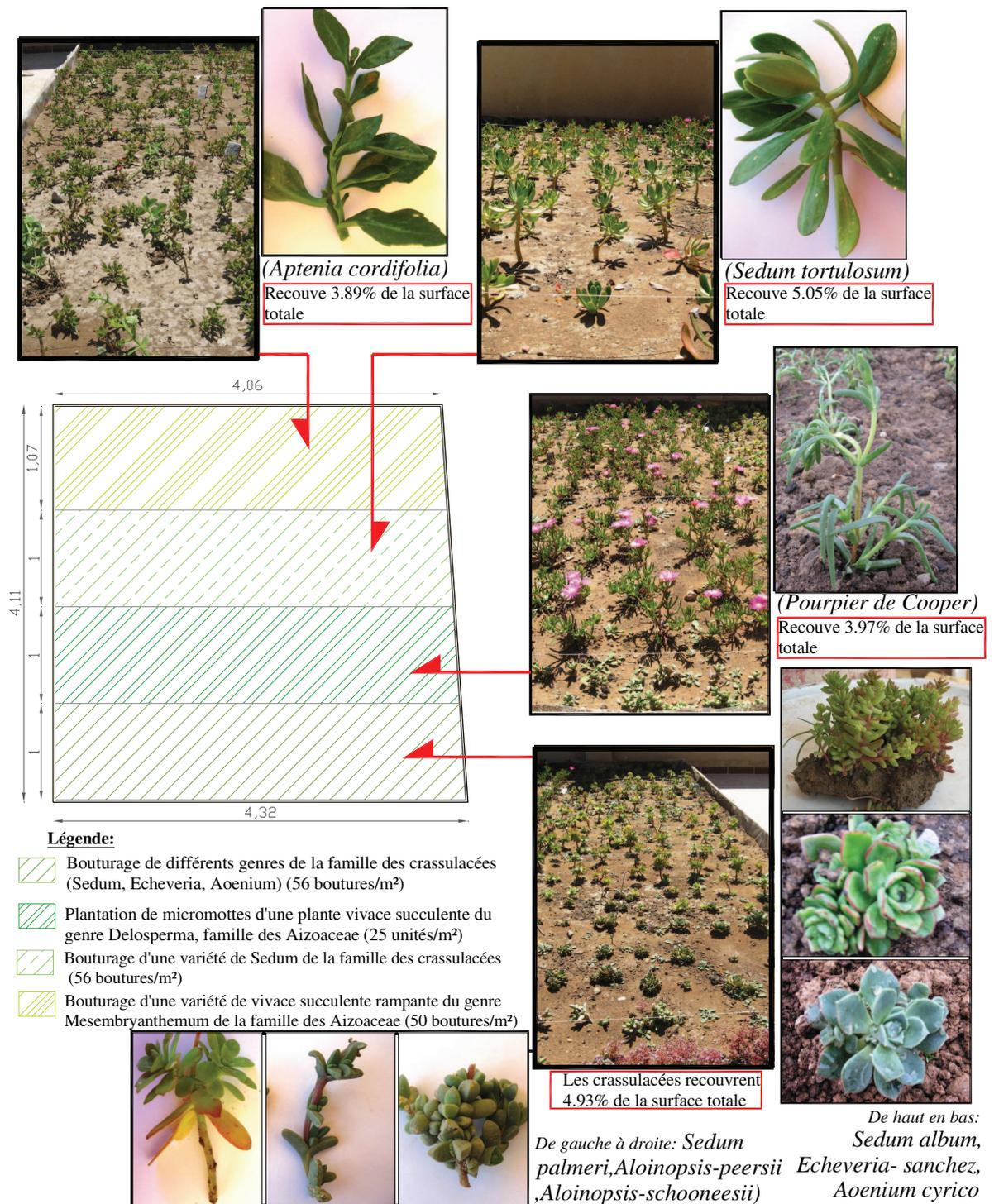


Figure V- 8. Plan de plantation et espèces végétales choisies (photos prises en mars et avril 2010)
(Source. Auteur)



*Photo V- 4. Aspect de la toiture végétale après installation (fin mars 2010)
(Source. Auteur)*



*Photo V- 5. Aspect de la toiture végétale en juillet 2010.
(Source. Auteur)*



*Photo V- 6. Aspect de la toiture végétale en novembre 2010.
(Source. Auteur)*

11. Le choix des stations de mesure :

Afin de vérifier l'effet de la toiture végétalisée sur le rafraîchissement intérieur, une comparaison sera faite entre un espace à toit végétalisé (chambre 02) et un autre avec un toit non végétalisé, dit «toit de référence» (chambre 01) (Fig. V-10). Pour ce faire, les mesures de certains paramètres sont prises à l'intérieur et au centre des deux pièces testées selon une stratification verticale (à 1.2m du plancher et à 30cm du plafond) (Fig. V- 9). Il s'agit de mesurer simultanément la paramètres affectant le confort thermique intérieur, à savoir : la température de l'air intérieur, l'humidité relative, la vitesse du vent et les températures surfaciques des parois pour ce cas d'étude, uniquement la température surfacique des plafonds est prise en considération).

Par ailleurs des mesures sont prises à l'extérieur au centre du toit recourant la chambre 01 (dans la station **S1**) et au centre du toit de la chambre 02 (dans la station **V1**), selon une stratification verticale (Fig. V-9). Et ce, afin de vérifier l'impact de la toiture végétalisée sur le microclimat extérieur et sur les températures surfaciques extérieures de la dalle.

D'autre part, la température surfacique extérieure de la dalle sous le toit végétal, la température surfacique externe du substrat, ainsi que la température de l'air et le taux d'humidité au contact du feuillage sont relevées au niveau de certaines espèces selon leur densité. Il s'agit des espèces végétales suivantes : l'*Aptenia cordifolia* (Station **V2**), le *Sedum palmeri* (Station **V3**), le *Sedum tortulosum* (Station **V4**) et l'*Aoenium cyroco* (Station **V5**) (Fig. V-10). Les masques d'ombres au niveau de toutes les stations de mesure ont été étudiés et sont représentés dans l'annexe (V).

Le choix des points de mesure (8, 9, 5', 6') au dessus des deux toits est dû, à la probable différence de la température et de l'humidité relative de l'air, mais aussi des températures surfaciques entre un élément minéral et un élément végétal, comprise, tel que l'affirment Watson et Camous²⁶, dans une zone de 30cm à 1.20m au dessus de ces surfaces. Pour ce cas d'étude, le choix s'est donc fixé sur 30cm et 1m au dessus du toit de référence et du toit végétal. Les points (6''- 6) ont pour but la vérification de l'effet de la végétation sur l'ombrage du substrat.

²⁶ Donald Watson, Roger Camous. «L'habitat bioclimatique», Edition L'Etincelle, Canada, 1986. p.33.

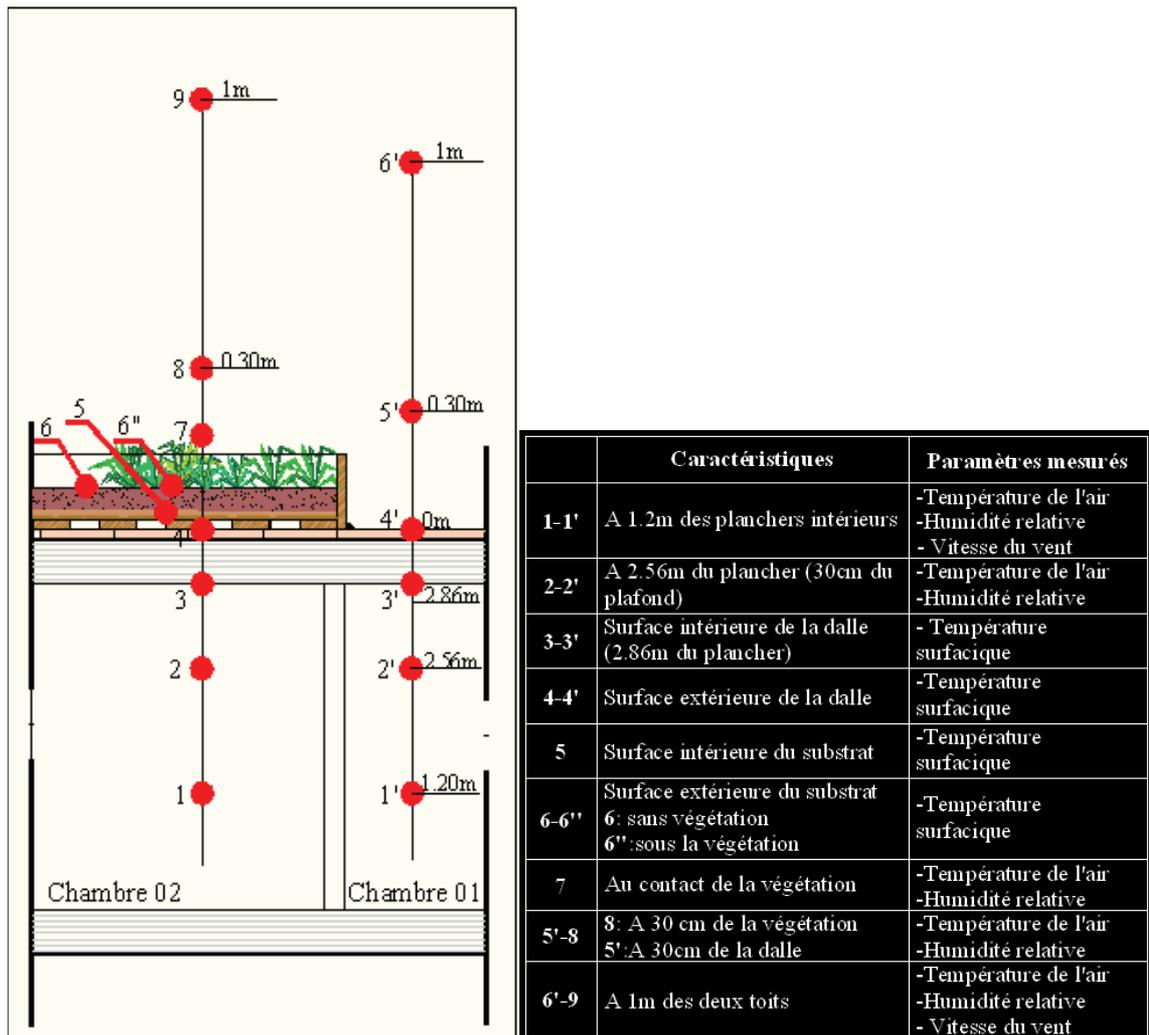


Figure V- 9.Représentation des points de mesures stratifiés dans les espaces testés et leurs caractéristiques (Source. Auteur)

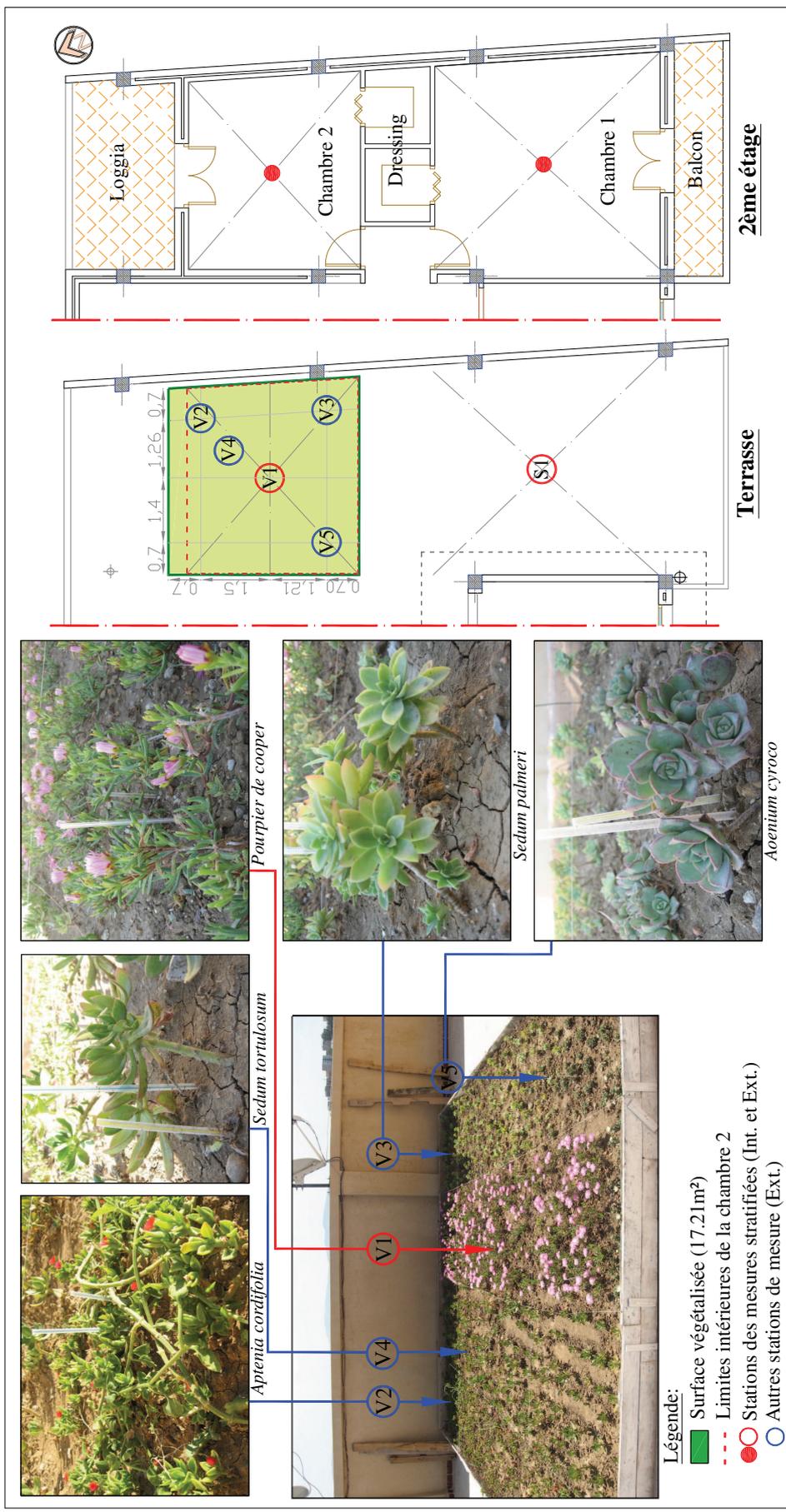


Figure V- 10. Emplacement des stations de mesure sur la terrasse et à l'intérieur des chambres (Source. Auteur)

12. Choix de la période de mesure :

Afin d'évaluer la capacité de rafraîchissement passif intérieur de la toiture à végétation extensive réalisée, la période de mesure a été choisie d'après l'analyse climatique de la ville de Constantine, qui a révélé que les mois les plus secs (période aride) s'étalent du mois de juin au mois de septembre. Pour cela, des mesures tests ont été effectuées au début de la saison estivale pour une journée type du mois de juin (30 juin) à l'intérieur des deux chambres. Ensuite des mesures s'étalant sur six jours ont été effectuées à l'intérieur et l'extérieur des deux chambres durant le mois le mois le plus chaud à Constantine (soit du 22 au 27 juillet).

Pour la journée type du mois de juin, les mesures effectuées sont bi- horaires et concernent les températures de l'air intérieur à 1.2m du plancher dans la chambre 01 (sans toit végétal) et la chambre 02 (avec un toit végétal).

En ce qui concerne la période de mesure de juillet (du 22 au 27 juillet), les paramètres mesurés du 22 au 25 juillet concernent tous les paramètres stratifiés résumés dans la figure (V- 9), dans la chambre 01 (S1) et la chambre 02 (V1). Toutes les mesures sont bi- horaires sauf celles relevées à 1.2m du plancher à l'intérieur des deux chambres, qui sont horaires. Par ailleurs des mesures ont été relevées du 22 au 25 juillet au niveau des stations V2, V3, V4, V5 dans les points de mesure : 4, 5, 6, 7 et 8 afin de déterminer l'importance de la densité foliaire des toits végétaux. D'autre part, les mesures effectuées du 26 et 27 juillet, sont limitées aux températures et aux taux d'humidité de l'air intérieur enregistrées chaque heure par l'appareil de mesure (Station météo SMV) à 1.2m du plancher (points de mesure 1- 1') dans les chambres 01 et 02.

13. L'instrumentation utilisée :

Afin de mesurer la température et l'humidité relative de l'air, la vitesse du vent et les températures surfaciques, les instruments de mesures suivants ont été utilisés (Tableau V- 3):

- **Le multimètre** : sert à mesurer les températures surfaciques à l'aide d'une sonde.
- **Le thermo- hygromètre** : appareil digital du model TSE-1360, sert à mesurer la température et l'humidité relative de l'air.
- **L'hygromètre HD 8501H** : doté d'une sonde qui mesure la température et l'humidité relative de l'air.
- **La centrale Météo sans fil TERMOTECH-OTIO** : constituée d'un baromètre, un indicateur d'orage, un hygromètre et un thermomètre intérieur et extérieur.

- **L'appareil LM 800** : a quatre fonctions : anémomètre, hygromètre, thermomètre et luxmètre.
- **Station météo SMV sans fil (Wireless weather station with PC software model WMR928NX)** : sert à mesurer la température de l'air, l'humidité relative, la pression atmosphérique, la vitesse et direction du vent et le niveau des précipitations. La station est dotée d'un enregistreur et elle a une portée de 100m sans interférences. L'appareil principal (WMR928NX) est utilisé pour récolter les données en plus du Baro-thermo-hygromètre (BTHR918N) et trois sondes thermo- hygromètres.

Tableau V- 1. Présentation de l'appareillage de mesure utilisé pour cette investigation.
(Source. Auteur)

 <p>Le thermo- hygromètre Précisions: $\pm 3\%$ et $\pm 0.8^{\circ}\text{C}$</p>	 <p>Hygromètre HD 8501H marges : -50°C à $+150^{\circ}\text{C}$ 5% à 98%</p>	 <p>Centrale météo Précisions: $\pm 2^{\circ}\text{C}$ et $\pm 5\%$</p>
 <p>Appareil LM 800 Précisions : $\pm 3\%$ ($\leq 20\text{m/s}$) et $\pm 4\%$ ($\geq 20\text{m/s}$)</p>	 <p>Station météo SMV Précisions : $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ et $\pm 1\%$ Marges : -50°C et $+70^{\circ}\text{C}$ 2% à 98%</p>	 <p>Le multimètre</p>

14. Présentation des scénarios :

Des scénarios ont été adoptés dans le but de déceler l'influence de la ventilation et de l'arrosage sur la performance thermique de la toiture végétalisée :

Le 22 juillet :

- Substrat saturé par de fortes averses (orage) le 21 juillet à (18 :00h). Il fût sec à la surface et craquelle dès l'absorption des premiers rayons du soleil le 22 juillet à (8 :00h), puis s'assèche en profondeur vers (10 :00h).
- Ouverture des portes- fenêtres à (21 :00h) (ventilation à exposition simple) et fermeture après les mesures de (22 :00h).

Le 23 juillet :

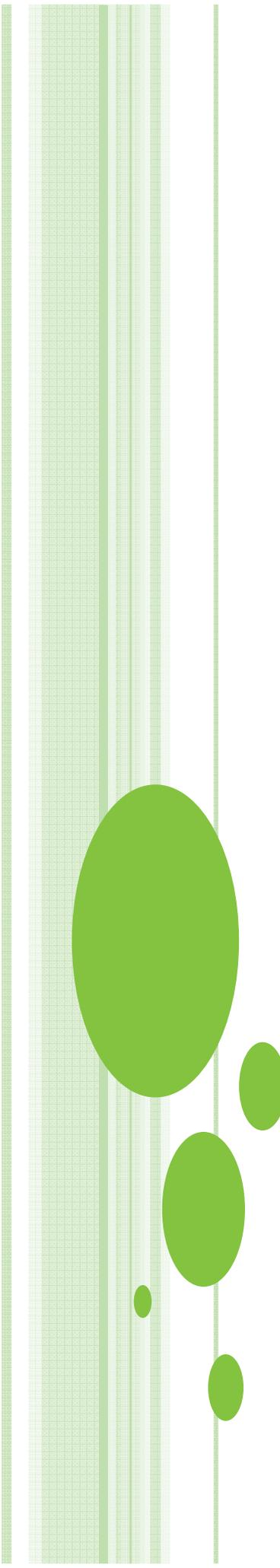
- Arrosage à (05 :00h) du matin. Le sol s'assèche vers (10 :00h) en profondeur.
- Ouverture des portes- fenêtres à (21 :00h) (ventilation à exposition simple) et fermeture après les mesures de (22 :00h).

Le 24 juillet :

- Substrat sec depuis presque vingt quatre heures (24h).
- Ouverture des portes- fenêtres à (20 : 45mn) pour les mesures de (21 :00h et de 22 :00h).
- Ouverture des portes des chambres pour une ventilation transversale à (22 : 10mn) et mesure des températures de l'air intérieur à (22 : 30mn). Après cela, les portes et les portes- fenêtres des deux chambres sont refermées pour les mesures de minuit.

Le 25-26-27 juillet :

- Substrat sec depuis le 23 juillet.
- Portes- fenêtres fermées toute la nuit.



Chapitre VI

Interprétation des résultats

Introduction :

Afin de vérifier l'efficacité de rafraîchissement passif de la toiture à végétation extensive sous le climat semi aride de Constantine, des mesures ont été effectuées sur la terrasse où le toit végétal a été installé. Ces dernières concernent les mesures stratifiées des températures de l'air, des températures surfaciques, de l'humidité relative et de la vitesse du vent. Et ce, à différentes hauteurs du toit, à l'intérieur et à l'extérieur de la chambre 01 sans toit végétal (S1) et la chambre 02 recouverte d'un toit végétal dans (V1), comme expliqué dans le chapitre précédent.

Par ailleurs, les mesures de température et d'humidité relative ont été effectuées à l'extérieur au niveau de différentes stations correspondant à des espèces végétales variées (V2- V3- V4- V5) (Voir chapitre V). Le but est d'étudier l'impact des plantes crassulacées sur l'ombrage du substrat et l'humidification de l'air au contact et au dessus de la végétation.

Les données récoltées sur canevas puis traitées sous forme de graphes, ont constitué une base de données pour l'analyse de l'effet du toit végétal sur le rafraîchissement de l'air extérieur et sur les températures surfaciques du toit et leur impact sur le rafraîchissement intérieur. Mais aussi, une analyse sur quelques paramètres influents sur ce dernier a pu être effectuée.

I. Evaluation de la performance thermique du toit végétal à l'extérieur du bâtiment :**1. Etude de la température, l'humidité relative et de la vitesse du vent à l'extérieur :**

Plusieurs recherches ont démontré que la végétation a un effet de rafraîchissement considérable au dessus du toit. Puisqu'elle réduit le rayonnement solaire et transforme l'énergie solaire en énergie latente qui humidifie l'air extérieur et diminue les températures. Pour vérifier cela sur la toiture végétale testée, une journée caniculaire type a été choisie (le 23 juillet) pour représenter le microclimat au dessus des deux toits. La figure (VI-1), met en relation la température de l'air, l'humidité relative et la vitesse du vent, qu'on a mesuré à 1 m au dessus du toit végétal (V1) pour une végétation dense (*Pourpier de cooper*) et à 1m du toit de référence (S1) (points 9 et 6' Fig. V-9). Rappelons que le substrat fût arrosé à (5 :00h) du matin, les résultats montrent que la toiture végétalisée a amélioré le microclimat du toit.

En effet, pour une journée caniculaire dont les données météo affichent une température de l'air et une humidité relative, moyennes de 31,9°C et de 38,9% et une température maximale

de 40.5°C¹. Le microclimat à 1m au dessus du toit de référence est plutôt hostile : l'air semble plus sec avec une hausse de la température diurne moyenne à 35,8°C et une baisse de l'humidité relative diurne moyenne à 35,2%. Ceci est dû au manque de verdure aux alentours de l'habitation et à la chaleur sensible produite par les surfaces minérales sur la terrasse.

L'installation du toit végétal sur la terrasse a contribué à une baisse moyenne de la température de l'air à 1m du toit par rapport au toit de référence de 2,1°C (température diurne moyenne de 33,7°C), et une hausse de l'humidité relative de 4,3% en moyenne (soit une humidité diurne moyenne de 39,5%). La réduction de la température de l'air grâce au toit végétal atteint une valeur maximale de 5,4°C à (22:00h), coïncidant avec une augmentation maximale du taux d'humidité de l'ordre de 17%. Ceci est dû à une forte évapotranspiration de la végétation après qu'elle ait emmagasinée l'eau de l'arrosage (voir scénarios dans le Chapitre V), sachant que l'évaporation au niveau du substrat doit être nulle puisque celui-ci s'est complètement desséché le matin. Les résultats obtenus rejoignent ceux trouvés par Alexandri et Jones² en Grèce où, la réduction diurne de la température de l'air à 1m du toit végétal était de 2.7°C en moyenne et de 7.3°C maximum.

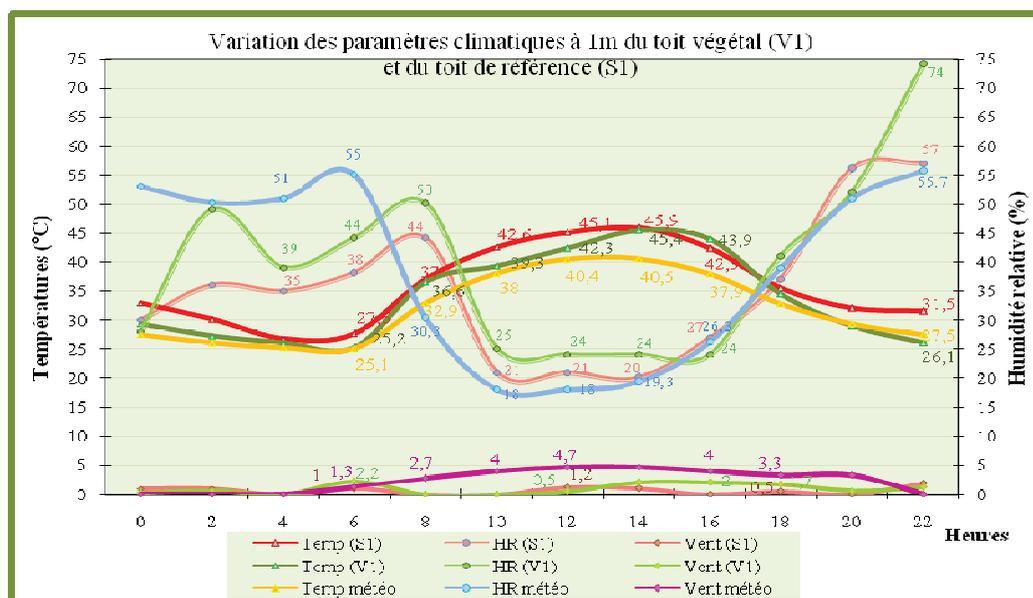


Figure VI- 1. Température de l'air, humidité relative et vitesse du vent, mesurées à 1m des deux toits (Source. Auteur)

¹ Les données météo des journées de mesures ont pour source les archives téléchargées du site Internet www.météo.infospace.ru, (page consultée le 01-07-2010 et 29-07-2010).

² Alexandri, Eleftheria et Phil Jones. «Ponds, Green Roofs, Pergolas and High Albedo Materials; Which Cooling Technique for Urban Spaces? », PLEA 2006, 23^{ème} conférence, Genève, 6-8 Sep. 2006.

L'impact de l'arrosage sur le microclimat du toit végétal a été plus perçu au dessus du toit végétal entre (6 :00h) et (8 :00h) par l'humidification de l'air grâce à l'évapotranspiration (écart de 6% avec le toit de référence) et par la baisse des températures de l'air (écart 2.4°C avec le toit de référence à 6 :00h). Cette humidification supplémentaire du substrat et par conséquent de l'air ambiant peut être très bénéfique pour le confort thermique intérieur. Puisque d'après Lazzarin et al.³ un sol humide annule non seulement le flux de chaleur entrant mais aussi un flux de chaleur sortant peut être procuré. Ce qui prouve que le toit végétal rafraîchit passivement l'air grâce à l'évapotranspiration.

Cependant, on pense que l'humidification supplémentaire et prolongée de l'air (jusqu'à 8 :00h) au dessus du toit végétal est due surtout à l'évaporation de l'eau contenue dans le substrat que, de la transpiration des végétaux (puisque ces derniers régulent leur transpiration par la fermeture de leur stomates du levé au coucher du soleil. Voir Chapitre II). De ce fait, l'humidification de l'air a été élevée à partir de (6 :00h) sous l'effet : des radiations solaires, de l'élévation des températures de l'air mais aussi par l'augmentation de la vitesse du vent (mesuré sur le toit végétal à 2.2m/s) qui ont stimulé l'évaporation au niveau des surfaces humides du substrat, et ont accéléré son assèchement.

D'autre part, malgré l'assèchement total du substrat vers (10 :00h), une humidification supplémentaire de 4% a été relevée au dessus du toit végétal par rapport au toit de référence durant les heures les plus chaudes (entre 12 :00h et 16 :00h) (Fig. VI-1), due essentiellement à la transpiration de la végétation et non au substrat. Celle-ci est certes réduite pour ces plantes comme adaptation à la sécheresse en fermant leurs stomates d'après les résultats, mais apparemment la végétation continue de rejeter l'eau vers l'extérieur grâce à des stratagèmes spécifiques à ce genre de végétaux⁴. En effet, selon Faurie et al⁵, 69% de radiations solaires reçues par la végétation sont perdues sous forme de chaleur par les phénomènes de respiration et transpiration, puisque la végétation convertie l'énergie calorifique en énergie latente grâce à l'évapotranspiration.

³ **Lazzarin, M. et al.** «*Experimental Measurements and Numerical Modelling of a Green Roof*», Energy and Buildings, vol. 37, 2005, pp.1260–1267.

⁴ Sachant que la plupart des plantes testées ont des surfaces de feuilles cireuses (brillantes) réfléchissant la lumière et réduisant l'absorption d'énergie (*Sedum spatulatum*, *Aptenia cordifolia*, *Pourpier de cooper*) alors que l'*Aoenium cyroco* possède des glandes sur les feuilles qui produisent des essences volatiles épidermiques permettant de refroidir l'air en s'évaporant (Voir Chapitre II et annexe II).

⁵ **Faurie, al.** «*Ecologie ; approche scientifique et pratique* », 5^e éd. Editions TEC & DOC, Paris, 2006.

Cette humidification supplémentaire par l'apport de la végétation pour un substrat sec, a été confirmée par Lazzarin et al. (2005), qui attestent aussi le rôle important de l'évapotranspiration pour le confort thermique intérieur en été : « avec un sol relativement sec, le toit végétal (isolé) peut atténuer les gains thermiques dans les bâtiments d'environ 60% ». Ceci est dû à la haute réflexion et absorption de la végétation, alors que l'évapotranspiration est très limitée pour un substrat sec (elle n'est pas pour autant nulle).

Par ailleurs, avec une faible couverture foliaire, le taux d'humidité de 24% enregistré entre (12 :00h et 16 :00h) dans (V1) (*Pourpier de cooper*), n'est pas aussi bas que le taux d'humidité relevé aux mêmes heures à Constantine par Benhalilou⁶ (29.25%) près d'un mur recouvert à 100% de vigne vierge vraie, et dont l'épaisseur du feuillage est de 20 à 30cm. Ce qui confirme la convenance des plantes crassulacées aux dessus des toits sous le climat semi- aride, non seulement pour leur résistance à la sécheresse mais aussi pour leur capacité d'humidification de l'air surtout si la couverture foliaire est importante.

Une élévation de 1.6°C des températures de l'air à 1m du toit végétal par rapport au toit de référence a été relevée (entre 14 :00h et 16 :00h) (Fig. VI-1). De notre part, on assimile cela à l'ombrage de la surface du toit de référence survenue dès (14: 30mn), alors qu'Alexandri et Jones (2006) ont aussi trouvé qu'à 1m du toit, les températures du toit blanc sont plus basses que celles du toit végétal pour une durée de sept heures (entre 8 :00h et 15 :00h) avec un écart maximal de 1.3°C. D'après eux, c'est dans l'après midi que cela s'inverse, lorsque le toit blanc aura emmagasiné la chaleur durant la matinée, et que la température de sa surface aura augmenté que l'air à 1m du toit surchauffera.

Par ailleurs, pour une vitesse moyenne du vent de 2.3m/s le 23 juillet (d'après les données météo), le vent moyen mesuré à un mètre du toit (points 6' et 9) est de 0.6m/s et 0.9m/s respectivement au dessus du toit de référence et du toit végétal. Vu que la direction du vent est principalement du Nord et Nord- Est, de ce fait le toit végétal est plus exposé à ce dernier. Selon Faurie et al⁷, une faible vitesse du vent facilite la transpiration de la végétation en évacuant les gouttelettes d'eau de la surface de la feuille permettant la continuité de la transpiration. Cependant, d'après De Lempis⁸ à partir de 2m/s les stomates se ferment, ce qui réduit la

⁶ **Benhalilou, Karima.** «Impact de la végétation sur le confort hygrothermique estival du bâtiment », Mémoire de magistère, Université de Constantine, 2008. p.171.

⁷ **Faurie, al.** «*Ecologie ; approche scientifique et pratique* », 5^e éd. Editions TEC & DOC, Paris, 2006.

⁸ **A.Huetz De Lempis** : « *La végétation de la terre* », Editions : Masson et Cie, Paris, 1970. p 19.

photosynthèse alors que la déshydratation de la plante se poursuit par la transpiration cuticulaire, ce qui explique l'élévation du taux d'humidité durant les heures les plus chaudes pour ce cas d'étude.

2. Etude des paramètres influents sur les températures surfaciques externes de la dalle :

2.1 Etude de la variation des températures externes de la dalle (du 22 au 25 juillet) :

Selon Onmura et al.⁹, les conditions météorologiques affectent les températures surfaciques externes d'un toit non végétalisé, alors que le complexe de culture conditionne sensiblement celles d'un toit végétal. Ce qui apparaît dans la figure (VI-2), représentant l'évolution détaillée des températures surfaciques externes des toits de la chambre 01 (S1) et de la chambre 02 (V1) du 22 au 25 juillet. En effet, tel que les résultats de différentes recherches (Voir chapitre IV), l'installation du toit végétal a eu trois actions importantes sur la surface externe du toit: la baisse des températures diurnes, le déphasage des températures surfaciques maximales et la baisse des amplitudes thermiques.

La courbe de la chambre 02 (Fig. VI-2) montre que la surface externe de la dalle sous un toit végétal surchauffe moins par rapport au toit de référence, tel que l'affirment Niachou et al (2001), Kanellopoulou (2008) et d'autres chercheurs. Par ailleurs, certains chercheurs (Bass et Baskaran (2003), Wong et al. (2003), Liu (2004), Liu et Baskaran (2005), Liu et Minor (2005)) ont trouvé que la résistance du complexe de culture et l'ombrage procuré par la végétation permettent au toit végétal de réduire aussi les oscillations diurnes des températures surfaciques externes des toits. Ce qui apparaît dans la figure (VI-2), où les températures varient d'une valeur minimale de 22°C à une valeur maximale de 30°C. Alors que celles du toit de référence sont étroitement liées à la variation de la température de l'air ambiant de jour comme de nuit. Ces dernières surchauffent rapidement dès le levé du soleil et ne refroidissent qu'aux crépuscules, variant de 19°C à 41°C, ce qui rejoint les résultats de Kanellopoulou¹⁰ qui a trouvé une variation de 20°C à 31°C pour le toit végétal et de 18°C à 55°C pour le toit de référence.

⁹ **Onmura, et al.** « *Study on Evaporative Cooling Effect of Roof Lawn Gardens* », Energy and Environment, vol. 33, 2001. pp. 653-666.

¹⁰ **Kanellopoulou, K.** « *Cooling Performance of Green Roofs* », PLEA 2008, 25^{ème} Conférence, Dublin, 22- 24 Oct.2008.

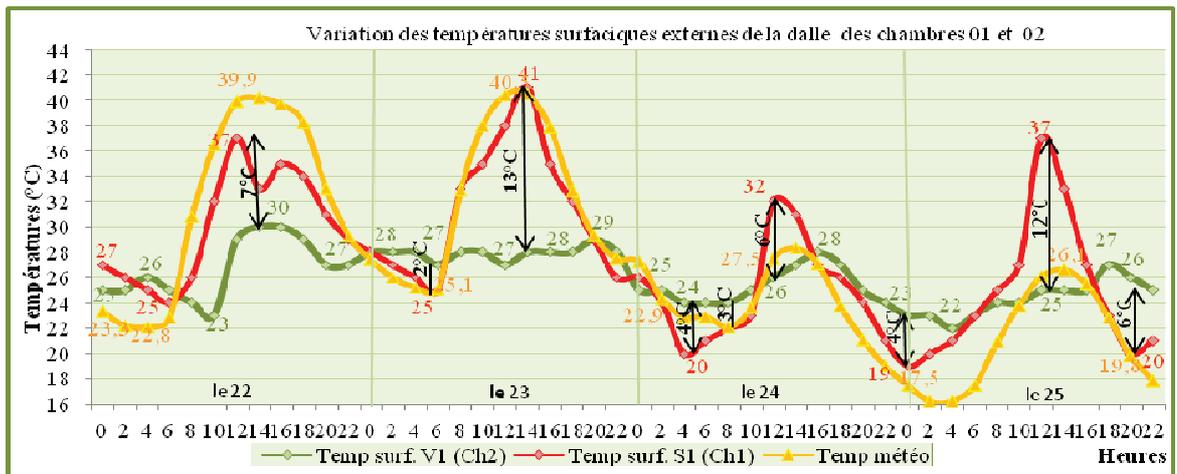


Figure VI- 2. Variation quotidienne des températures surfaciques externes du toit végétal (V1) et du toit de référence (V2) (du 22 au 25 juillet)
(Source. Auteur)

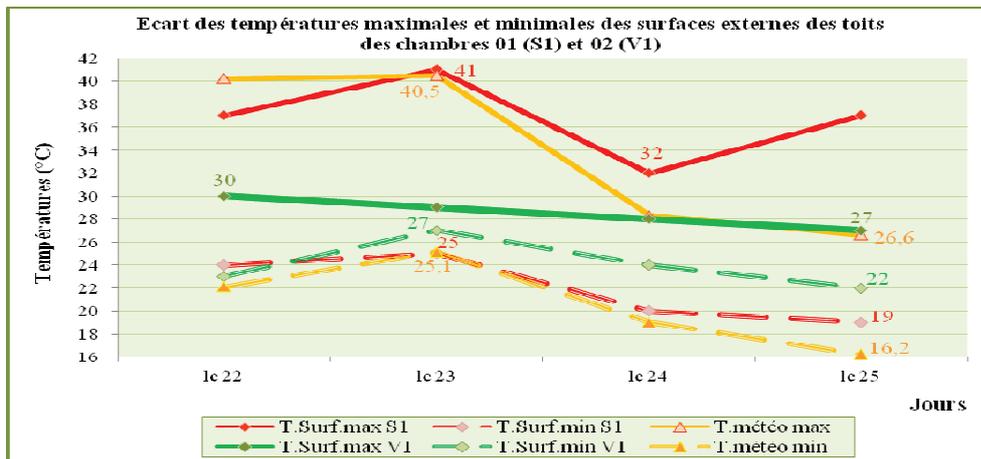


Figure VI- 3. Températures surfaciques maximales et minimales des toits de la chambre 01 (S1) et la chambre 02 (V1) du 22 au 25 juillet
(Source. Auteur)

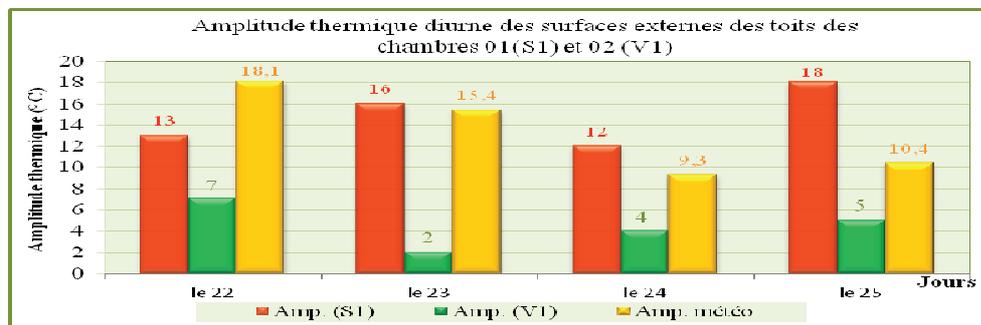


Figure VI- 4. Amplitudes thermiques des surfaces externes des toits des chambres 01(S1) et 02 (V1) (du 22 au 25 juillet)
(Source. Auteur)

La figure (VI-2) montre que malgré la couleur claire de la dalle et la durée d'insolation courte du point (S1), sa température enregistre un écart maximal avec le toit végétal (V1) de 13°C durant les heures les plus chaudes. Ce dernier est plus important que les résultats trouvés par d'Alexandri et Jones (2006) à Athènes (écart maximal de 8.8°C) affirmant de la meilleure performance des toits végétaux par rapport aux toits à surface blanche.

Par ailleurs, contrairement au toit de référence qui atteint sa valeur maximale dès (12 :00h) (Fig. VI-2), le toit végétal déphase l'augmentation des températures surfaciques qui atteignent leur valeur maximale entre (14 :00h) (cas du 22 juillet) et (20 :00h) (le 23 juillet), tel que prouvé par Liu et Minor¹¹.

La figure (VI-3) détaille l'évolution des températures maximales et minimales des points (S1) (chambre 01) et (V1) (chambre 02) durant la période de mesure du 22 au 25 juillet. Elle montre bien que lorsque le toit n'est pas végétalisé (S1), sa surface externe peut atteindre des températures maximales élevées (entre 32°C et 41°C respectivement pour une journée fraîche et une journée caniculaire). Alors qu'une surface recouverte d'un complexe de culture garde des températures maximales presque stables (entre 27°C et 30°C). D'où le rôle principal du toit végétal, prôné par les chercheurs, concernant la protection des surfaces externes des toits des élévations excessives de température sous l'effet des radiations solaires.

D'autre part, sachant que le rayonnement vers le ciel rafraîchit les surfaces, son effet débute au début des crépuscules et se termine après le levé du soleil¹². Cependant, durant cette période, la figure (VI-2) montre que la toiture végétalisée testée a perdu de son efficacité de refroidissement des surfaces, puisque la courbe des températures surfaciques sous un toit végétal (V1) s'inverse et dépasse celle du toit de référence (S1). L'écart moyen enregistré est de 2.1°C, pouvant atteindre une valeur maximale de 6°C pour une nuit à températures basses (25 juillet), alors que Wong et al.¹³ ont trouvé un écart maximal de 4.75°C. Les températures minimales des surfaces externes sous un toit végétal (V1) sont donc plus élevées que celles du toit de référence (S1), mais aussi plus importantes que celles de l'air ambiant (Fig. VI-3). Elles varient de 22°C à 27°C pour le toit végétal, et de 19°C à 25.1°C pour le toit de référence. D'après Laar et

¹¹ Liu, K. et J. Minor. «Performance evaluation of an extensive green roof», NRC-CNRC, NRCC-48204, 2005, Fichier PDF, [En ligne] <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/irepubs>.

¹² Abdou, S. «Investigation sur l'intégration climatique dans l'habitation traditionnelle en régions arides et semi-arides d'Algérie: Cas du Ksar de Ouargla et de la Médina de Constantine» Thèse de doctorat d'état Université de Constantine, 2004. p.118.

¹³ Wong et al. «Exploring the Thermal Benefits of Plants in Industrial Areas with Respect to the Tropical Climate», PELA 2006, 23^{ème} conférence, Genève, 6-8 Sep. 2006.

Grimme¹⁴ et Wong et al.¹⁵ le substrat bloque le rayonnement de grande longueur d'onde durant la nuit, ce qui rend les températures surfaciques du toit de référence plus basses.

Par ailleurs, la figure (VI-2) montre aussi que la baisse des températures surfaciques externes du toit de référence par rapport à celles du toit végétal peut se prolonger durant la matinée lorsque la température de l'air extérieur est basse. Cas du 24 juillet, pour un écart variant de 1°C (10 :00h) à 3°C (6 :00h). En général ceci peut être bénéfique en hiver.

Contrairement aux toits non couverts de végétation (Ch01), le toit végétal a pu maintenir de faibles oscillations durant toute la période de mesure (Fig. VI-2, 3 et 4). Et ce, sous d'importantes amplitudes thermiques de l'air extérieur qui ont atteint une valeur maximale de 18.1°C le 22 juillet (donnée météo). Les amplitudes thermiques diurnes (température maximale – température minimale) de la surface externe du toit de la chambre 02 (V1) sont donc, très faibles par rapport à celles de la chambre 01 durant toute la période de mesure. Elles varient de 2°C à 7°C (Fig. VI-4), avec une amplitude thermique diurne moyenne de 4.5°C (elle est moins importante que celle trouvée par Bass et Baskaran¹⁶ qui est de 6.5°C). Contrairement à celle-ci, la surface externe de la dalle de la chambre 01 a une amplitude thermique diurne moyenne de 14.8°C. Elle atteint une valeur maximale de 18°C et une valeur minimale 12°C. Par ailleurs, l'amplitude thermique de la surface externe de la dalle sous un toit végétal est très faible (2°C) lorsqu'on arrose le matin (23 juillet), et elle augmente lorsque le substrat est mouillé dès le soir (22 juillet) ou lorsqu'il est complètement sec (24-25 juillet).

2.2 Impact de la densité foliaire sur les températures externes de la dalle :

La baisse des températures des surfaces externes des dalles recouvertes d'un toit végétal est due principalement à la protection de ces dernières des radiations solaires directes. Bien que plusieurs chercheurs s'accordent à relever l'importance primordiale de l'épaisseur du substrat pour une meilleure réduction des températures surfaciques externes des toits, (tels que Theodosiou (2003) et Kanellopoulou (2008)). D'autres chercheurs affirment que la couverture foliaire à un rôle aussi important grâce à l'ombrage (tels que Wong et al. (2003), Del Barrio

¹⁴ Laar, M. et F.W. Grimme. «*Thermal Comfort and Reduced Flood Risk Through Green Roofs in the Tropics*», PLEA -23^{ème} conférence, Genève, 6-8 Sep. 2006.

¹⁵ Wong et al. «*Exploring the Thermal Benefits of Plants in Industrial Areas with Respect to the Tropical Climate*», PELA 2006, 23^{ème} conférence, Genève, 6-8 Sep. 2006.

¹⁶ Bass, B. et B. Baskaran. «*Evaluating Rooftop and Vertical Gardens as an Adaptation Strategy for Urban Areas*», NRCC-46737, Projet N° A020, NRC-CNRC, Canada, 2003. p. 111. Fichier PDF, [En ligne] <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/ircpubs>.

(1998)...). Ce qui est constaté dans les résultats de la présente étude, malgré la faible couverture foliaire la caractérisant.

En effet, la figure (VI-5) représente la comparaison des températures surfaciques externes de la dalle sous différentes espèces végétales, dont le développement a été varié. C'est-à-dire, certaines espèces se sont développées plus rapidement et se sont relativement étalées par rapport à d'autres. On distingue comme végétation éparse : le *Sedum palmeri* (V3), le *Sedum tortulosum* (V4) et l'*Aoenium cyroco* (V5). Et, comme végétation relativement dense : le *Pourpier de cooper* (V1) et l'*Aptenia cordifolia* (V2) (voir chapitre V).

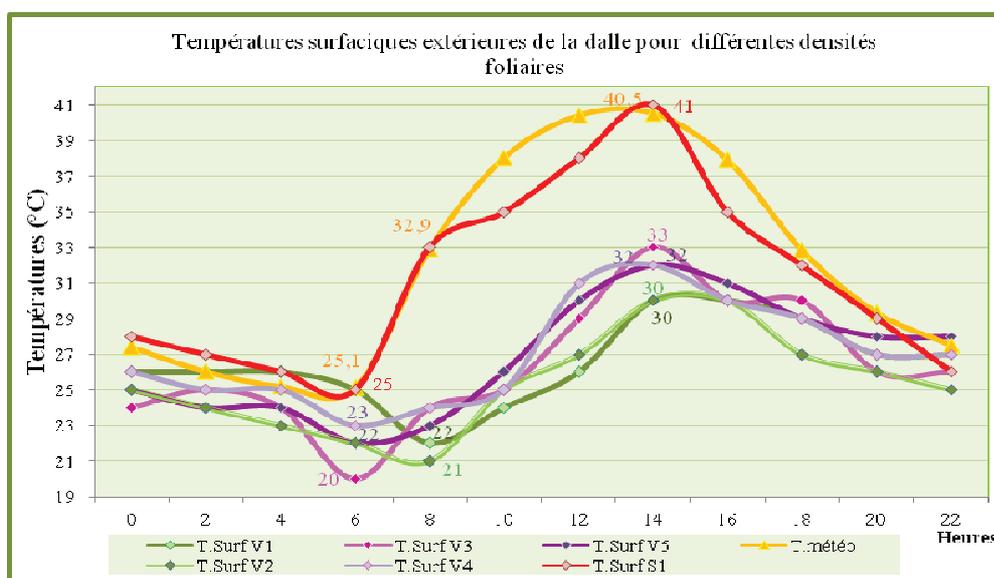


Figure VI- 5. Variation des températures surfaciques externes de la dalle sous diverses densités foliaires (le 23 juillet)
(Source. Auteur)

Les résultats pour une journée caniculaire type (23 juillet), affirment que les températures surfaciques externes de la dalle sont réduites par rapport à celle du toit de référence (chambre 01) et cela malgré le faible développement de certaines espèces. Ce qui prouve que c'est le substrat qui joue le principal rôle d'atténuation des radiations solaires grâce à sa masse thermique et son inertie. Alors que Wong et al.¹⁷ attestent que la protection thermique de la végétation dépend essentiellement de son effet d'ombrage que de sa capacité d'isolation. Ces derniers ont démontré que les plus hautes températures sont générées par les plantes éparse. La présente étude confirme cela (Fig. VI-5), puisque la baisse des températures surfaciques de la dalle est plus

¹⁷ Wong, et al. «Investigation of Thermal Benefits of Rooftop Garden in the Tropical Environment », Building and Environment, vol. 38, 2003, pp. 261- 270.

importante durant la journée sous une végétation relativement dense dans les points (V1) et (V2) (température maximale de 30°C) que sous une végétation éparse (température maximale de 32°C pour les stations V4 et V5 et 33°C pour V3).

Par contre durant la nuit, les températures surfaciques dans le point (V1) avec une végétation relativement dense sont plus importantes que celle sous une végétation éparse (Fig. VI-5). D'ailleurs c'est dans la station (V3) qu'on note la température minimale la plus basse (20°C). D'après Kanellopoulou¹⁸, le rôle d'une végétation dense est essentiel durant le jour, grâce à l'ombrage et la protection de la surface du toit, qui n'est plus important pendant la nuit. En plus une végétation dense peut bloquer le rayonnement de grande longueur d'onde et les pertes de chaleur de la surface du toit durant la nuit, pour cela ses températures sont plus élevées dans (V1).

3. Etude des températures internes et externes du substrat :

3.1 Etude des températures du substrat et leur impact sur la surface de la dalle:

La figure (VI-6) met en relation les températures surfaciques internes du substrat (point 5), les températures surfaciques externes du substrat (ombré et non ombré) (dans les stations 6'' et 6 respectivement) et les températures surfaciques externes des deux toits testés (S1- toit de référence, station 4') (V1- toit végétal, station 4).

Les mesures effectuées dans la station (V1- *Pourpier de cooper*) montrent la capacité de l'ensemble complexe de culture et strate végétale à réduire les températures graduellement de l'extérieur vers l'intérieur, essentiellement durant les heures les plus chaudes d'une journée caniculaire (23 juillet). Hormis la résistance thermique du substrat qui diminue le transfert de chaleur vers l'intérieur du bâtiment, il y a deux actions importantes qui agissent sur la baisse des températures à travers un toit végétal, à savoir : l'ombrage et l'arrosage. Et ce, afin d'aboutir à des températures surfaciques de la dalle moins importantes que celle du toit de référence.

En effet, d'après Wong et al.¹⁹, les plantes jouent un grand rôle quand à la baisse des gains de chaleur grâce à leur ombrage. La figure (VI-6) montre que la surface ombrée du substrat reçoit une moindre fraction de radiation solaire et surchauffe moins, grâce à l'absorption et le

¹⁸ Kanellopoulou, K. «Cooling Performance of Green Roofs», PLEA 2008, 25^{ème} Conférence, Dublin, 22- 24 Oct.2008.

¹⁹ Wong, et al. «Investigation of Thermal Benefits of Rooftop Garden in the Tropical Environment », Building and Environment, vol. 38, 2003, pp. 261- 270.

filtrage des radiations solaires par la végétation. La température maximale enregistrée pour la surface externe d'un substrat ombré est déphasée et atteint seulement 38°C, alors que pour un substrat non ombré elle atteint 43°C. L'ombrage a procuré une baisse des températures externes du substrat de 6°C à 7°C entre (10 :00h et 14 :00h) par rapport à un substrat exposé aux radiations solaires. Par contre, durant la nuit, l'effet de la végétation sur les températures externes du substrat s'annule, puisque les températures surfaciques du substrat sont presque identiques avec ou sans végétation. Il arrive même que ces dernières soient plus importantes sous la végétation de 1°C (à 6 :00h et à 18 :00h), puisque la végétation bloque le rayonnement de grande longueur d'onde.

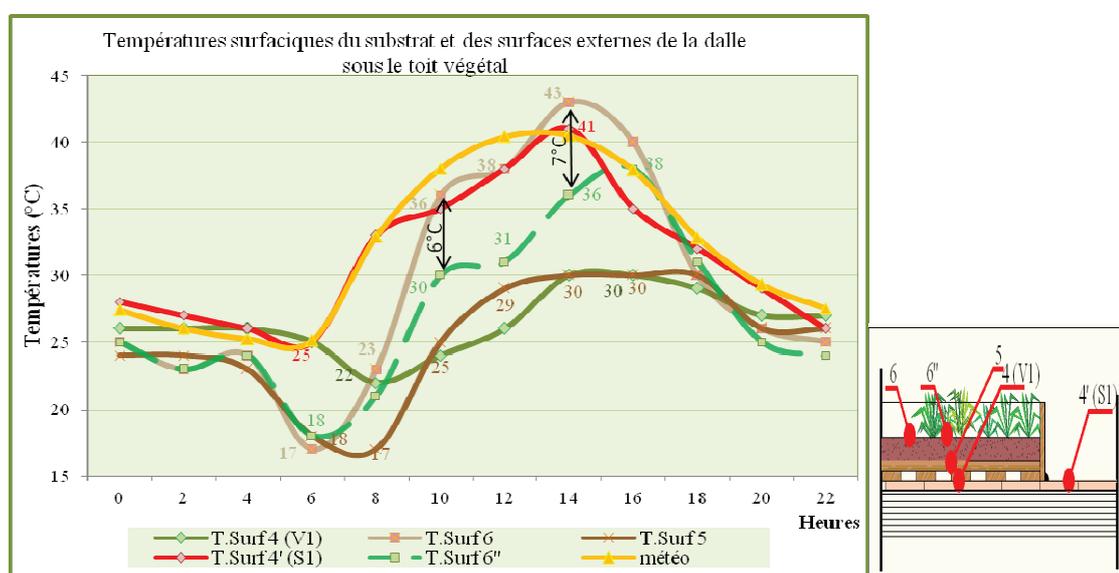


Figure VI- 6. Variation des températures surfaciques du substrat et des températures externes des toits testés (le 23 juillet)
(Source. Auteur)

Par ailleurs, l'arrosage est en général recommandé pour son rôle important quand à la baisse des températures du substrat. Pour ce cas d'étude, l'arrosage a permis une baisse considérable des températures de la surface externe du substrat (17°C à 6 :00h) qui ne dura pas autant que pour la surface interne de celui-ci ou la surface externe de la dalle. La figure (VI-6) montre que malgré l'arrosage de (5 :00h), la surface externe du substrat s'assèche et craquelle trois heures après, c'est-à-dire dès qu'elle reçoit les radiations solaires (8 :00h). Sailor et al.²⁰ attribuent la hausse des températures surfaciques externes du substrat à son albédo et sa teneur en

²⁰ Sailor et al. «Thermal Property Measurements for Ecoroof Soils Common in Western U.S. », Energy and Building, vol. 40, 2008, pp.1246-1251.

eau, ce qui affecte l'équilibre énergétique du toit végétal. En effet, tel que confirmé par ces chercheurs : après arrosage, l'albédo du substrat diminue et permet une plus grande absorption des radiations solaires. Ceci a desséché rapidement la surface externe du substrat et a augmenté sa température (une augmentation de l'ordre de 13°C entre 8 :00h et 10 :00h). Par la suite, sa couleur sombre, la hausse des températures de l'air et la hausse de l'intensité des radiations solaires ont favorisé l'assèchement du substrat en profondeur. Dans ce sens, Liu et Minor²¹ affirment que la couleur des particules du substrat a une grande importance sur les températures de ce dernier.

En ce qui concerne la température de la surface interne du substrat, celle-ci est restée stable et basse durant une journée caniculaire, avec une valeur maximale de 30°C (14 :00h), égale à la température maximale de la surface externe de la dalle. Alors que la température surfacique externe du toit de référence s'élève jusqu'à 41°C. L'arrosage le matin a permis de réduire les températures internes du substrat jusqu'à (8 :00h) (de l'ordre de 17°C), et de déphaser leur augmentation par rapport à la surface externe. Cependant la faible épaisseur du substrat et sa faible capacité de rétention de l'eau, ont conduit à l'assèchement de sa surface interne rapidement (vers 10 :00h) à cause de la forte chaleur de l'air ambiant qui a évaporé l'eau contenue dans le substrat. En effet, Theodosiou²², affirme que les épaisseurs faibles de substrat n'ont pas la capacité de maintenir des températures basses longtemps et donc, le substrat sera plus influencé par les conditions de l'air ambiant. Selon Teemusk et Mander²³, à 5cm de la surface externe d'un substrat de 10cm de profondeur, la température du substrat est plus influencée par les amplitudes thermiques de la surface externe qu'à une profondeur de 10cm, ceci est le cas de la présente étude dont le substrat est fin.

Les températures internes du substrat dépassent celles externes, du coucher du soleil jusqu'à (4 :00h). Ce qui contraint la surface de la dalle à garder des températures plus élevées que celles de la surface interne et externe du substrat, mais aussi par rapport à la dalle de référence (S1) (Fig. VI-6). Par ailleurs, le calcul des valeurs moyennes des températures surfaciques du toit végétal pour la période s'étalant du 22 au 25 juillet, démontre qu'elles sont

²¹ **Liu, K. et J. Minor.** «Performance evaluation of an extensive green roof », NRC-CNRC, NRCC-48204, 2005, Fichier PDF, [En ligne] <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/irepubs>.

²² **Theodore G. Theodosiou.** «Summer Period Analysis of The Performance of Planted Roof as a Passive Cooling Technique», Energy and building, vol. 35, 2003, pp. 909-919.

²³ **Teemusk, et Mander.** «Greenroof potential to reduce temperature fluctuations of a roof membrane: a case study from Estonia», Building and Environment, 2008.

toutes inférieures à la température surfacique moyenne du toit de référence tel que l'affirme Teemusk et Mander (2008) (Tableau VI-1).

Tableau VI- 1. Les températures surfaciques moyennes du substrat (du 22 au 25 juillet).
(Source. Auteur)

Surfaces	Température moyenne (°C)
Surf. extérieure du substrat non ombré (Point 6)	29,2
Surf. extérieure du substrat ombré (Point 6'')	27,2
Surf. intérieure du substrat (Point 5)	25,2
Surf. dalle en dessous du toit végétal (Point 4- V5)	26,5
Surf. extérieure toit de référence (Point 4' - S1)	31,3
Données météo	31,9

3.2 Analyse des amplitudes thermiques du substrat :

La figure (VI-7) représente les amplitudes thermiques (température maximale – température minimale) des différentes surfaces du substrat (dans V1) et du toit de référence (dans S1) lors d'une journée caniculaire (23 juillet). Les résultats confirment que la surface externe d'un substrat exposé aux radiations solaires (station 6) présente de forte amplitude thermique diurne (26°C) principalement à cause de sa couleur sombre et à l'absence d'ombrage. L'amplitude thermique de la surface externe d'un substrat ombré (Station 6'') est élevée (20°C) puisque les petites feuilles du *Pourpier de cooper* (V1) sont oblongues et espacées, ce qui procure un ombrage disloqué malgré la densité de la plante. Néanmoins, grâce à la résistance thermique du substrat (qui agit comme une masse thermique), la surface externe de la dalle (station 4) possède une amplitude thermique de seulement 8°C contre 16°C pour le toit de référence (station 4'). Et ce, malgré l'amplitude diurne importante à l'intérieur du substrat (13°C) (station 5). En testant un toit végétal à faible couverture foliaire (45%) en Estonie, Teemusk et Mander (2008), ont aussi trouvé des amplitudes thermiques de la surface externe du substrat plus élevées que celle du toit de référence. Selon eux, ceci démontre que la surface du substrat doit être mieux recouverte de végétation pour éviter les surchauffes.

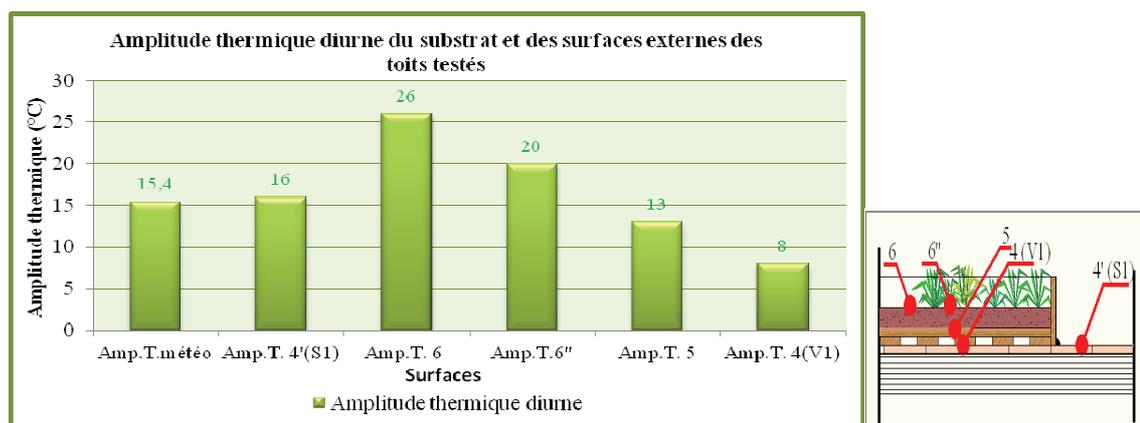


Figure VI- 7. Amplitudes thermiques des surfaces du substrat et des surfaces externes des toits testés (le 23 juillet)
(Source. Auteur)

4. Evaluation de l'efficacité des typologies végétales et leur densité :

4.1 Effet sur les températures surfaciques externes du substrat :

On a déjà vu la capacité de la végétation à réduire plus efficacement les températures surfaciques de la dalle pour une végétation dense qu'une végétation éparse, puisqu'elle procure un meilleur ombrage. Cette réduction proportionnelle à la densité foliaire est d'abord relevée au niveau de la surface externe du substrat tel que le démontre la figure (VI-8), qui représente les températures surfaciques externes du substrat sous différentes espèces et pour différentes densités lors d'une journée caniculaire (23 juillet). La végétation dense est représentée par le *Pourpier de cooper* (V1) et l'*Aptenia cordifolia* (V2). Alors que la végétation éparse est représentée par le *Sedum palmeri* (V3) (Voir chapitre V).

Grâce à ses caractéristiques, la végétation absorbe une importante quantité d'énergie pour ces besoins nutritifs (photosynthèse) tout en filtrant les radiations solaires en dessous des feuilles. Protégée par l'ombre projetée par la végétation, la surface du substrat surchauffe moins qu'un substrat exposé mais aussi, garde des températures plus basses que sur la surface claire du toit de référence (S1) (Fig. VI-8). Theodosiou²⁴ et Yu et Wong²⁵ affirment que l'habileté d'interception des radiations solaires incidentes par la végétation est proportionnelle à l'élévation

²⁴ **Theodore G. Theodosiou.** «Summer Period Analysis of The Performance of Planted Roof as a Passive Cooling Technique», Energy and building, vol. 35, 2003, pp. 909-919.

²⁵ **Yu, C. et Wong N.H.** « A green experiment conducted in the tropical climate », PLEA 2006 – 23^{ème} Conférence, Genève, 6-8 September, 2006.

du LAI (*Leaf Area Index*). Wong et al.²⁶, ont trouvé que l'effet d'ombrage est étroitement lié au LAI, puisque les plus hautes températures ont été relevées sous une végétation éparse, et les plus basses sous une végétation dense. Les profils des températures surfaciques du substrat de la figure (VI-8) confirment cela, puisque leurs moyennes diurnes sont de l'ordre de 25.4°C dans (V2-végétation dense), 27.2°C dans (V1- végétation dense) et 27.8°C dans (V3- végétation éparse). Par ailleurs, d'après les moyennes des températures surfaciques et l'évolution des courbes des trois espèces, il est clair que l'effet d'ombrage peut aussi être influencé par le type de port qu'à la végétation.

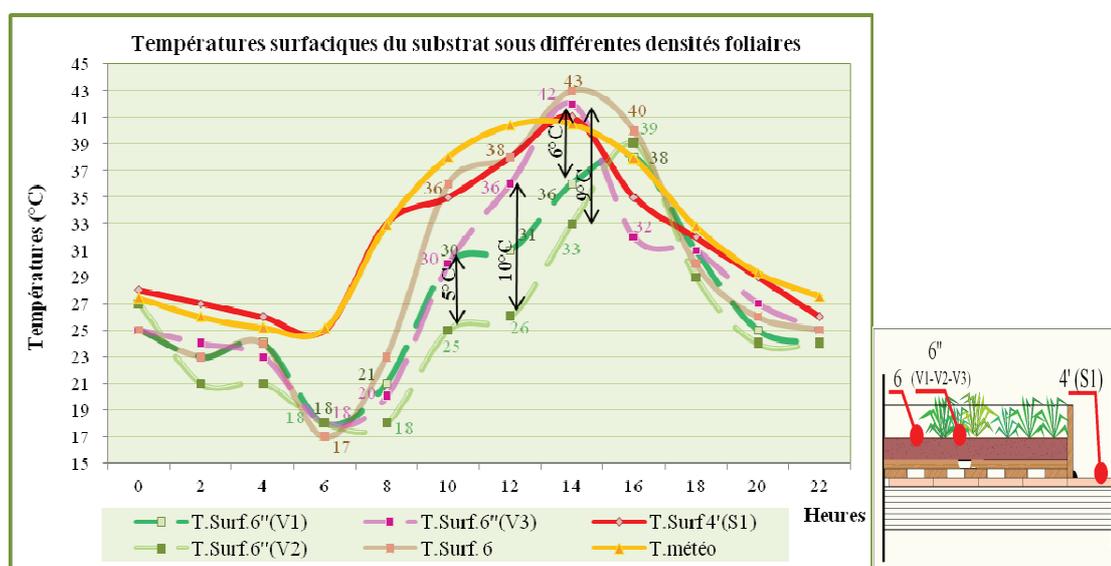


Figure VI- 8. Variation des températures surfaciques du substrat sous diverses densités foliaires
(Source. Auteur)

En effet, la courbe des températures surfaciques représentant le point (V2) montre qu'une végétation dense est rampante (*Aptenia cordifolia*) dont le port est au contact direct avec le substrat, protège mieux celui-ci des radiations solaires qu'une plante dense à port érigé (*Pourpier de cooper*) (V1). Par ailleurs, on note que les feuilles de *Aptenia cordifolia* sont plates et se chevauchent, en plus elles sont de surface plus importante que celle du *Pourpier de cooper*. Alors que les feuilles de ce dernier sont oblongues et espacées les unes des autres, ce qui procure un ombrage disloqué. Par contre Del Barrio²⁷, a plutôt mis en évidence l'angle des feuilles et la

²⁶ Wong, et al. «Investigation of Thermal Benefits of Rooftop Garden in the Tropical Environment », Building and Environment, vol. 38, 2003, pp. 261- 270.

²⁷ Del Barrio P.E. «Analysis of the Green Roofs Cooling Potential in Buildings», Energy and Buildings, vol. 27, 1998, pp. 179-193.

couverture foliaire (représentée par LAI : *Leaf Area Index*) qui déterminent selon elle, la capacité du feuillage à procurer l'ombrage.

Par ailleurs, l'importance de l'effet de l'ombrage de la végétation est ressentie lorsque les radiations solaires sont intense (entre 10 :00h et 14 :00h). Où l'écart entre une végétation dense et épars se creuse (de 5°C et 10°C entre V2 et V3, et d'un max de 6°C entre V1 et V3). Mais aussi, entre une végétation dense et le substrat nu (de 10°C à 12°C pour V2, et d'un max de 7°C pour V1). Ce qui prouve qu'une végétation rampante peut être plus efficace qu'une végétation érigée, mais aussi que l'ombrage projeté par le muret de la terrasse sur le point (V2) (ombré jusqu'à 10 :30mn- voir annexe V) a amélioré significativement la performance de l'ombrage de la végétation durant les premières heures chaudes. D'ailleurs, Kumar et Kaushik²⁸ affirment qu'un toit végétal ombré est meilleur qu'un toit végétal ensoleillé pour le rafraîchissement intérieur du bâtiment.

Les températures minimales de la surface du substrat sont par contre toutes identiques pour les différentes typologies végétales et les différentes densités (18°C), ce qui prouve que l'effet de la densité de la végétation est beaucoup plus significatif le jour grâce à l'ombrage qu'elle procure que la nuit.

4.2 Effet de la végétation sur le rafraîchissement de l'air et sur l'ombrage :

Afin de déceler l'effet le plus important que procure la végétation sur les températures : le rafraîchissement de l'air ou le refroidissement de la surface externe du substrat grâce à l'ombrage. Une comparaison a été faite entre les températures de l'air à 1 m du toit végétal (station 9 dans V1) avec les températures mesurées au contact de la végétation (station 7) et aux températures de la surface externe du substrat (station 6'') pour une végétation dense (V2) et une végétation épars (V3).

D'après Wong et al²⁹, le bilan énergétique dans la couche de végétation est influencé par deux effets importants de la végétation: l'ombrage et la transpiration qu'elle procure, ces derniers sont influencés par la densité de la végétation. Les courbes de la figure (VI-9) montrent, qu'indépendamment de la densité foliaire, la végétation réduit plus efficacement les températures

²⁸ Kumar, R. et S.C.Kaushik. «*Performance Evaluation of Green Roof and Shading for Thermal Protection of Building* », Building and Environment, Vol. 40, 2005, pp. 1505-1511.

²⁹ Wong, et al. «*Investigation of Thermal Benefits of Rooftop Garden in the Tropical Environment* », Building and Environment, vol. 38, 2003, pp. 261- 270.

surfaiques du substrat grâce à l'ombrage que, les températures de l'air au contact du feuillage ou à 1m du toit végétal.

L'analyse des températures de l'air au contact du feuillage (Fig. VI-9) montre que celles-ci ont une étroite corrélation avec la température de l'air ambiant. Elles augmentent toutes dès le matin (6 :00h) puis se distinguent, comme l'affirment Yu et Wong³⁰ par la densité de la végétation. Cependant, on remarque que les températures moyennes diurnes au contact du feuillage sont presque identiques pour une végétation dense (V2, avec 33.1°C) et une végétation éparse (V3 avec 33.4°C). D'autre part, la hausse des températures de l'air au contact des deux espèces est survenue à (14 :00h) en même temps que le pic des températures de l'air extérieur (données météo et des températures mesurées au dessus du toit de référence). Mais aussi tel que prouvé par Yu et Wong (2006), lorsque l'intensité des radiations solaires diminue de son pic (Voir chapitre IV), ce qui est confirmé dans la présente étude. En effet, les températures de l'air maximales au contact de la végétation sont survenues lorsque l'énergie solaire globale incidente sur une surface horizontale dans la ville de Constantine a baissé de son pic de 894 Wh/m² (entre 12:00h-13: 00h) à 729Wh/m² (entre 14:00h et 15:00h)³¹.

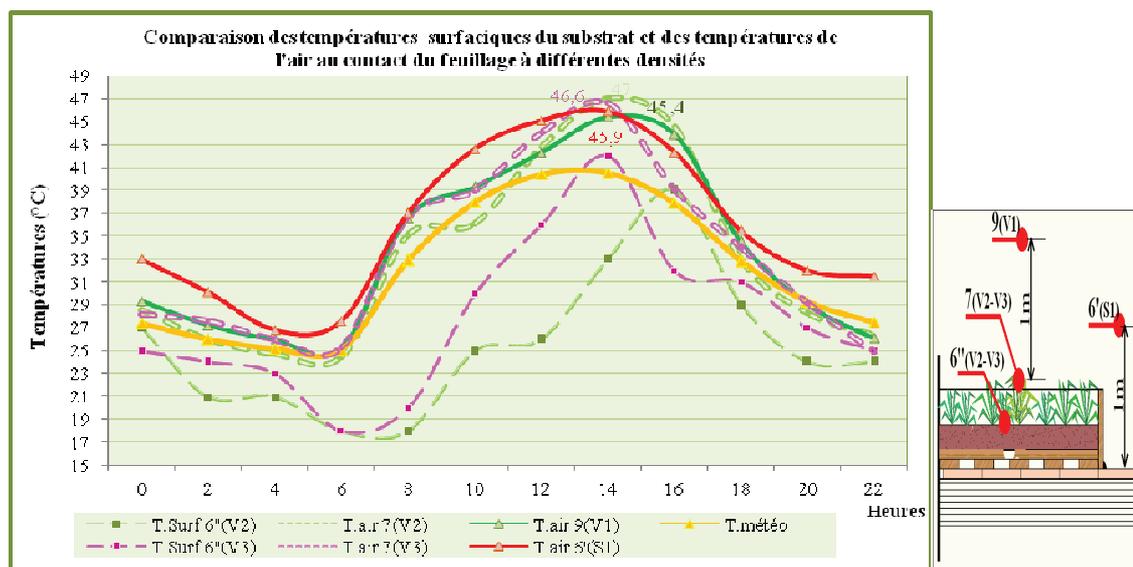


Figure VI- 8. Variation des températures à 1m du toit végétal, au contact du feuillage et à la surface externe du substrat pour diverse densité foliaire (Le 23 juillet)
(Source. Auteur)

³⁰ Yu, C. et Wong N.H. « A green experiment conducted in the tropical climate », PLEA 2006 – 23^{ème} Conférence, Genève, 6-8 September, 2006.

³¹ Capderou, M. « Atlas solaire de l'Algérie, Aspect énergétique », Tome 2, OPU Alger, 1985. p. 61.

Cette hausse des températures est expliquée par Faurie et al.³² par un mécanisme de *photo- inhibition*. C'est-à-dire, lorsque les radiations solaires deviennent intenses, la végétation bloque leur absorption d'après ce mécanisme pour se protéger du stress oxydatif et ce, en dégageant sous forme de chaleur l'excès d'énergie absorbée. Ce phénomène participe activement à l'augmentation des températures de l'air au contact de la végétation, mais aussi on ajoute à cela, la chaleur sensible que le substrat sombre émet lorsqu'il est surchauffé, sec et non ombré.

Par ailleurs, la figure (VI-9) montre que les températures de l'air sont en général plus élevées à 1m de la végétation qu'au contact du feuillage. L'écart moyen entre ces deux niveaux diminue pour une végétation éparse (0.3°C dans V3) et augmente pour une végétation dense (0.6°C dans V2) (bien qu'il fût relativement bas dans les deux cas). Cependant, la température de l'air maximale au contact du feuillage est plus élevée qu'à 1m du toit végétal mais aussi à 1m du toit de référence pour le point (V2) et (V3) à (14:00h) et ce, indépendamment de la densité foliaire. Sachant que Wong et al.³³ ont aussi trouvé ces résultats. Ils ont conclu que, lorsque le toit végétal et le toit de référence sont exposés à de fortes radiations solaires, ils ont des températures surfaciques très élevées qui influent sur l'air au contact des surfaces.

Par contre, les mesures effectuées au contact d'une autre végétation dense dans (*Pourpier de cooper*) ont révélé que la température maximale au contact du feuillage est plus basse que l'air à 1m au dessus du toit végétal de 1,2°C. Cet écart correspond à l'écart trouvé par Benhalilou³⁴ (d'une valeur de 1,25°C) pour un mur végétal couvert de vigne vierge vraie à 100%, alors qu'un écart de 0,1°C a été enregistré dans la même recherche entre la température du feuillage et l'air extérieur pour la vigne. Ceci nous amène à conclure que les plantes crassulacées avec leur mécanisme de photosynthèse qui ferme les stomates dès (6:00h) réduisant de ce fait la transpiration, ne sont pas défaillantes quand à la réduction des températures de l'air au contact du feuillage. Puisque, pour une densité et une épaisseur du couvert végétal moins importantes que celles de la vigne vierge vraie, le *Pourpier de cooper* (V1) a pu procurer ce même écart.

D'autre part, on a déjà vu qu'à 1m des deux toits, l'écart moyen de température de l'air entre le toit végétal et le toit de référence est de 2.1°C. On aurait pensé que l'écart augmenterait en s'approchant de la surface végétale (contact du feuillage). Cependant, l'écart entre la

³² Faurie, al. «*Ecologie ; approche scientifique et pratique* », 5^e éd. Editions TEC & DOC, Paris, 2006. p.07.

³³ Wong, et al. «*Investigation of Thermal Benefits of Rooftop Garden in the Tropical Environment* », Building and Environment, vol. 38, 2003, pp. 261- 270.

³⁴ Benhalilou, Karima. «*Impact de la végétation sur le confort hygrothermique estival du bâtiment* », Mémoire de magistère, Université de Constantine, 2008. p. 178, 193.

température à 1m d'une surface minérale et la température au contact du feuillage n'est pas plus important, il est par contre légèrement amélioré au contact d'une végétation dense avec 2,7°C pour (V2) et de 2,4°C pour une végétation éparse (V3). Par contre, grâce à l'ombrage, la végétation diminue les températures surfaciques du substrat plus efficacement que les températures de l'air au contact du feuillage. Puisque l'écart moyen obtenu entre la température de l'air à 1m au dessus d'une surface minérale (S1 : toit de référence) et la surface du substrat ombré est de l'ordre de 10.4°C et 8°C respectivement pour (V2) et (V3). Alors que cet écart est de 4.5°C avec la surface du toit de référence qui surchauffe plus.

De ce fait on peut dire que, la végétation testée a un effet beaucoup plus significatif sur la baisse des températures surfaciques du substrat grâce à l'ombrage et le filtrage des radiations solaires, que sur les températures de l'air au contact de la végétation, ou à 1m au dessus du toit végétal. D'ailleurs, Alexandri et Jones³⁵ prônent les avantages des pergolas par rapport aux toits végétaux pour les terrasses utilisées comme espaces additionnels aux bâtiments, puisqu'elles procurent de l'ombre et créent des conditions plus confortables sur les terrasses. Cependant, l'impact du toit végétal sur le confort thermique extérieur reste à vérifier sous notre climat avec une importante couverture foliaire de type crassulacée.

4.3 Effet des typologies végétales sur les humidités relatives au dessus du toit :

Après la vérification des températures de l'air au contact de la végétation (station 7), les humidités relatives sont vérifiées pour différentes espèces : *Pourpier de cooper* (V1-dense), *Aptenia cordifolia* (V2- dense), *Sedum palmeri* (V3-éparse), *Sedum tortulosum* (V4- éparse) et *Aoenium cyroco* (V5-éparse). Les taux d'humidités mesurés le 23 juillet au contact des différentes espèces ont été comparés à ceux mesurés à 1m au dessus du toit végétal (station 9 dans V1) et du toit de référence (station 6' dans S1).

Les courbes représentant les différentes espèces dans la figure (VI-10) suivent la variation de l'humidité de l'air (données météo), et elles sont inversement proportionnelles aux températures de l'air. Lors d'une journée caniculaire, les végétaux plantés sur le toit expérimental ont eu les mêmes profils indépendamment de leurs densités en réagissant comme toutes les plantes de type CAM (*Crassulaceen Acid Metabolism*) face au stress thermique et hydrique durant les heures les plus chaudes (entre 10 :00h et 16 :00h). Et ce, puisque le taux

³⁵ Alexandri, E. et P. Jones. «Ponds, Green Roofs, Pergolas and High Albedo Materials; Which Cooling Technique for Urban Spaces? », PLEA 2006, 23^{ème} conférence, Genève, 6-8 Sep. 2006.

d'humidité minimal au contact d'une végétation dense dans le point (V1) est identique (24%) à celui des autres plantes éparses.

La végétation dense au point (V2) a procuré une meilleure élévation du taux d'humidité avec un max de 27% entre (10 :00h et 12 :00h) qui ne baisse à 24% qu'à (14 :00h). Alors qu'une végétation éparses (*Sedum tortulosum*- V4) a procuré un moindre taux d'humidité pratiquement toute la journée avec un taux minimal de 20% et maximal de 48% malgré qu'elle ait des feuilles plus charnues que celle du *Pourpier de cooper* (V1) ou de l'*Aptenia cordifolia* (V2).

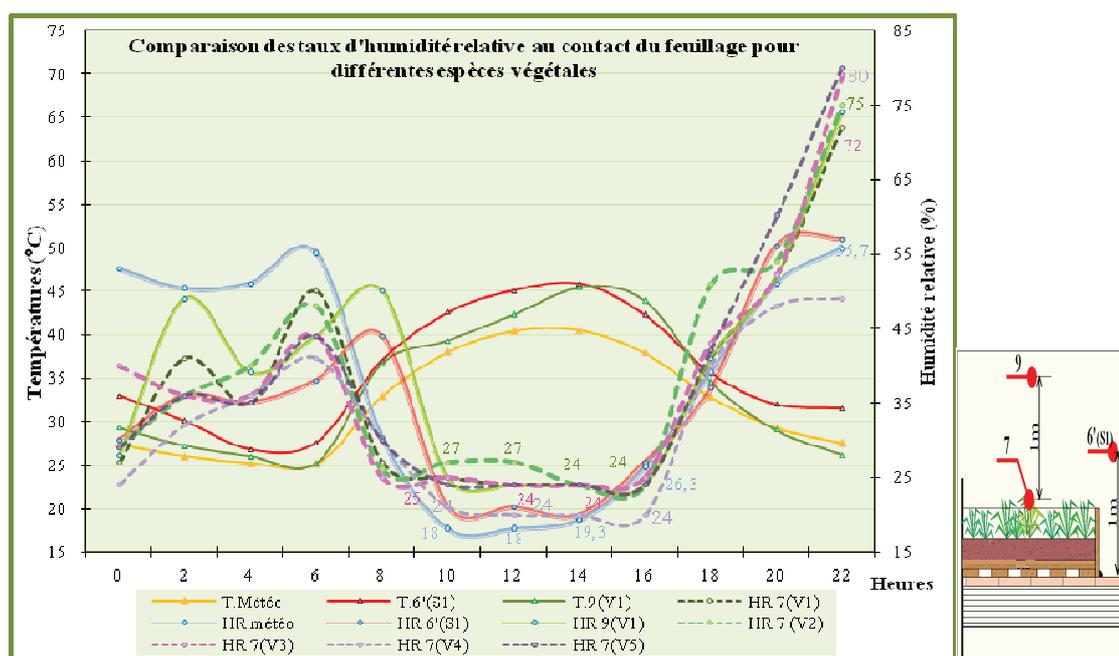


Figure VI- 9. Variation des taux d'humidité relative au contact du feuillage pour diverses espèces végétales
(Source. Auteur)

La figure (VI-10) montre qu'une hausse des humidités relatives au contact du feuillage a été perçue après arrosage (plus favorable pour la végétation dense (V1 –V2). Ensuite, les humidités relatives baissent dès (6 :00h) jusqu'au coucher du soleil (18 :00h) tel que l'affirment Belabi et Faucon³⁶ (Voir chapitre II). Ceci correspond à la fermeture des stomates dès le levée du soleil et atteste de la résistance de ces végétaux aux pertes excessives d'eau lorsque l'air est chaud et sec et ce, en réduisant leur transpiration et en préservant l'eau dans leurs feuilles charnues.

³⁶ Belabi Rafik et Philippe Faucon. «La contribution thermique des toitures végétalisées» colloques toitures végétalisées, 5.12.2007, fichier PDF, (consulté le 07-06-2008), [En ligne], www.cstb.fr.

De ce fait, le graphe (VI- 10) confirme que le taux d'humidité élevé relevé jusqu'à (8 :00h) à 1m du toit végétal est dû à l'évaporation de l'eau contenue dans le substrat et non de la transpiration de la végétation. Et que d'autre part, la végétation agit plus à l'élévation de la température qu'à la teneur en eau du substrat. Ce point est confirmé aussi pour les mesures de (22 :00h) où, toutes les plantes ont procurées une hausse des humidités relatives au contact du feuillage, indépendamment de l'assèchement du sol mais plutôt en fonction de l'augmentation du taux d'humidité de l'air et de la baisse des températures (données météo). Alors qu'à ce moment les mesures montrent que c'est au contact de la végétation que l'humidité est maximale et non à 1m du toit végétal pour certaines plantes.

Par ailleurs, à (22 :00h) la végétation éparsée dans (V3- *Sedum palmeri*) et dans (V5- *Aoenium cyroco*) ont procuré une meilleure humidification de l'air de l'ordre de 79% et 80% respectivement pour les deux espèces. Alors que la valeur maximale enregistrée au contact d'une végétation dense (V2) est de 75% (Fig. VI-10). Ceci prouve que ces espèces sont plus favorables à l'humidification de l'air durant la nuit, puisqu'elles transpirent plus. Et surtout, qu'elles présentent une meilleure résistance aux hautes températures en diminuant les pertes d'eau durant la journée, et ce, grâce à leurs feuilles charnues et leurs cuticules épaisses contrairement à celles de *Aptenia cordifolia* (V2) (dont les feuilles sont les plus fines).

II. Stratification des températures et des humidités relatives de l'air de l'extérieur vers l'intérieur :

1. Stratification des températures :

Pour l'étude de la stratification verticale des températures et des humidités relatives à l'extérieur et à l'intérieur du bâtiment, la moyenne des mesures du 22 au 25 juillet a été calculée, puis la journée a été partagée en trois parties: la nuit (de 20:00h à 4:00h), le matin (de 6:00h à 12:00h) et l'après midi (de 14:00h à 18:00h). Correspondant respectivement à l'absence, l'élévation et la baisse de l'intensité des radiations solaires. Les données traitées sont celles du point de mesure (V1) pour le *Pourpier de cooper*.

La figure (VI-11), représentant la stratification verticale des températures, montre que les températures extérieures des deux toits sont basses la nuit et s'élèvent progressivement du matin jusqu'au coucher du soleil (après midi), où, elles enregistrent les plus hautes valeurs. Par contre les températures intérieures sont plus basses durant l'après midi et le matin par rapport à la nuit où, l'accumulation de la chaleur non évacuée par ventilation préserve un intérieur relativement chaud. Cependant, toutes les températures sont considérablement réduites lorsqu'on installe un

toit végétal que ce soit à l'intérieur ou à l'extérieur, avec pour seule exception la hausse des températures surfaciques extérieures de la dalle sous un toit végétal durant la nuit.

En fait, on peut déduire globalement d'après la figure (VI-11) que le toit végétal testé a pu remplir les fonctions les plus importantes de ce genre de toit écologique, à savoir : la réduction des températures de l'air extérieur, la réduction des températures surfaciques externes du toit, le rafraîchissement passif du bâtiment.

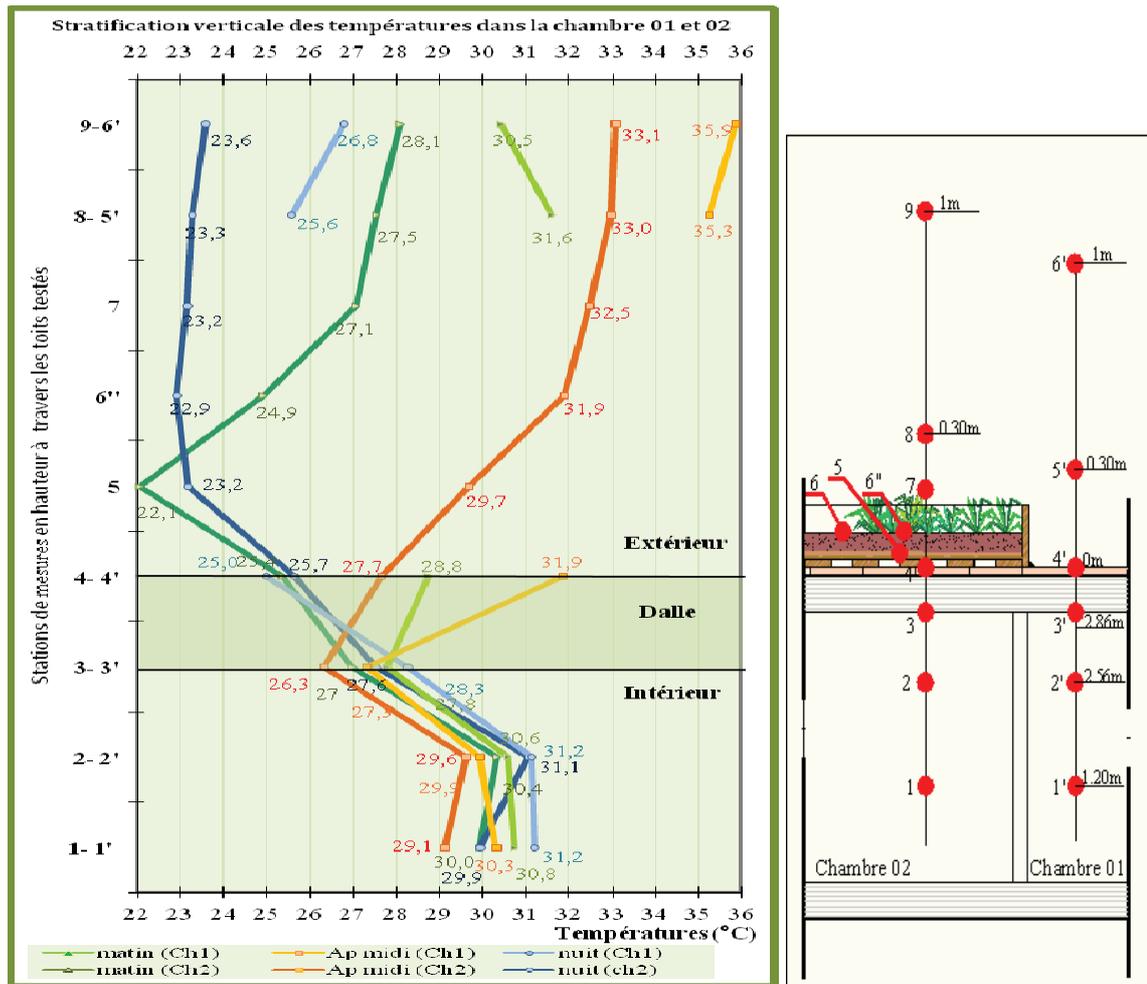


Figure VI- 10. Stratification des températures de l'air et des températures surfaciques moyennes à l'intérieur et à l'extérieur des deux chambres testées (du 22-25 juillet). (Source. Auteur)

La réduction des températures de l'air extérieur: a été perçue au dessus du toit végétal par rapport au toit de référence que ce soit à 1m du toit (points 6'-9) (avec un écart d'une valeur de 3,2°C, 2,4°C et 2,8°C respectivement, la nuit, le matin et l'après midi) ou à 30cm de celui-ci (stations 5'-8) (avec un écart 2,3°C, 4,1°C et 2,3°C respectivement la nuit, le matin et l'après

midi). Pratiquement toutes les températures mesurées à 30cm du toit sont moins importantes que celles à 1m pour les deux toits. Elles présentent un écart avec la température à 1m du toit moins important pour le toit végétal que pour le toit de référence.

Pour le toit végétal, la différence de température entre les deux niveaux (8) et (9) (entre 1m et 30 cm du toit) est de 0,3°C la nuit, elle diminue durant l'après midi avec la réduction de la transpiration (à 0,1°C). Cependant, elle est plus importante le matin (0,6°C) à cause de l'arrosage qui a augmenté le taux d'humidité et a baissé les températures à 30cm de la végétation.

Lorsqu'on se rapproche de la végétation, les températures au contact des feuilles (point 7) ne sont pas pour autant plus basses par rapport à 30cm ou 1m de celle-ci. La différence maximale qu'on a relevé avec les données d'un 1m de la végétation est de l'ordre de 1°C seulement. Celle-ci est observé le matin et elle est due à l'arrosage et la transpiration de la végétation (du moins lorsque les stomates sont ouvertes).

Cependant, la végétation est toute fois mieux efficace pour réduire les températures surfaciques du substrat grâce à l'ombrage (point 6''). Seulement cet effet est beaucoup plus perceptible le matin lorsque le substrat est humide, que lorsqu'il est sec l'après midi. En effet, durant le matin, il y a une différence de 2,2°C entre la température au contact du feuillage et la surface externe du substrat. Celle-ci baisse à 0,6°C dans l'après midi après accumulation de la chaleur par le substrat ombré. Par contre durant la nuit, la transpiration de la végétation diminue plus significativement les températures au contact des feuilles que sous le port de la végétation.

La réduction des températures surfaciques externes du toit : La figure (VI-11), montre l'effet procuré par l'addition d'une couche de substrat et de la strate végétale sur les températures surfaciques externes de la dalle, grâce à leurs multiples fonctions : isolation, ombrage, humidification de l'air... Ce qui rend ces installations bénéfiques pour la réduction du transfert de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur du bâtiment.

L'amortissement du transfert de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur a été amélioré par l'arrosage le matin qui a diminué considérablement les températures surfaciques internes du substrat, créant une différence entre la surface externe (station 6'') et interne (station 5) de 2,8°C. Cependant, la faible épaisseur du substrat, sa faible capacité de rétention de l'eau ajouté à l'ombrage disloqué que procure la végétation dans le point (V1) ont contribué à l'augmentation rapide de sa température surfacique externe durant l'après midi de 7°C et de la surface interne de 7,6°C. De ce fait, même lorsque le sol aura emmagasiné la chaleur durant la journée, l'écart entre les deux surfaces diminue dans l'après midi, mais reste important (2,6°C).

Durant la nuit, lorsque la température de l'air à 1m du toit végétal baisse considérablement (d'une valeur de 9,5°C par rapport à l'après midi), c'est plutôt la surface externe du substrat qui est la plus sensible à cette baisse que la surface interne. Et ce, puisqu'elle refroidie plus facilement par convection et rayonnement de grande longueur d'onde (baisse de 9°C), alors que l'intérieur du substrat reste relativement chaud par rapport à la surface externe froide (réduction de seulement 6,5°C). L'écart entre les deux surfaces la nuit est de 0,3°C, ce qui se répercute sur la température de la surface externe du toit qui est plus élevée que celle du toit de référence de 0,4°C durant la nuit. Pourtant, malgré cet inconvénient que présentent les toits végétaux, ceci n'est pas ressenti à l'intérieur puisque la température surfacique interne et la température de l'air sous un toit végétal sont plus basses.

La température surfacique externe du toit est plus élevée (station 4) que celle de la surface interne du substrat (station 5) durant le matin et le soir (avec respectivement 3,3°C et 2,5°C) favorisant le flux de chaleur sortant. Elle est par contre basse durant l'après midi de 2°C. Par ailleurs, les températures surfaciques externes du toit sont réduites considérablement par rapport à celles d'un toit non végétalisé (station 4') de 3,4°C durant la matinée et de 4,2°C l'après midi. Le graphe de la figure (VI-11) montre clairement l'importante oscillation diurne des températures subite par la surface externe du toit de référence, et la réduction considérable procurée par le toit végétal.

Le rafraîchissement passif du bâtiment : les températures surfaciques externes du toit de référence (station 4') sont plus élevées que celles internes (station 3') dès le matin, avec une différence de température de l'ordre 1°C le matin qui s'élève à 4,6°C l'après midi. Cet écart de températures entre les deux surfaces du toit induit un flux de chaleur entrant plus important l'après midi que le matin. Alors que pour le toit végétal, les températures surfaciques extérieures de la dalle (station 4) ne dépassent celles intérieures (station 3) que l'après midi (avec une différence de l'ordre de 1,4°C) et elles sont plus basses le reste du temps, enregistrant un écart entre les deux surfaces de 1,9°C le soir et 1,6°C le matin. Expliquant de ce fait, les faibles gains de chaleur à l'intérieur de la chambre 02 par rapport à la chambre 01 sans toit végétal.

La hausse de la température surfacique interne du toit par rapport à celle intérieure dans la chambre 02 durant la nuit est maintenue durant la matinée induisant un flux de chaleur sortant. Le flux de chaleur est aussi sortant durant la nuit pour le toit de référence, puisque la différence entre la surface externe et interne atteint 3,3°C. Cependant, ceci ne baisse pas pour autant la température de l'air intérieur, qui est maintenue plus élevée que sous un toit végétal.

Toutes les températures sont plus basses sous un toit végétal par rapport au toit de référence, mais les écarts entre les deux chambres sont comme même moindres par rapport aux données mesurées à l'extérieur. En ce qui concerne la stratification verticale de la température, c'est à 30cm du plafond (point 2) que la chambre 02 a enregistré les températures les plus hautes, avec un écart de l'ordre de 1,2°C avec les mesures prises à 1,2m du plancher durant la nuit (point 1). Cet écart diminue le matin et l'après midi à 0,4°C et 0,5°C respectivement.

D'autre part, même si le toit végétal a pu garder des températures plus basses dans la chambre 2 durant la nuit, avec une différence de l'ordre 1.3°C avec la chambre 1 dans les stations 1 et 1', il se trouve que les températures à 2.56m (stations 3-3') du plancher sont presque identiques dans les deux chambres. Ce qui prouve, que la ventilation a contribué à baisser la température de l'air à 1.2m du plancher dans la chambre 2, mais cela n'était pas suffisant pour extraire toute la chaleur vers l'extérieur (ventilation en moyenne d'une heure par jour à 22 :00h). Et donc comme l'air chaud est ascendant, il reste bloqué sous un toit végétal (à 30cm du plafond) durant la nuit, alors que la surface externe du toit de référence (point 4'), à température basse, favorise l'extraction de la chaleur. Le transfert de chaleur se fait essentiellement par convection (à l'intérieur), conduction (dans la dalle) et rayonnement (à l'extérieur), ce qui explique l'écart nul entre la température à 1.2m (station 1') du plancher et à 30cm du plafond (station 2') dans la chambre 01.

Par ailleurs, sachant que la sensation de bien-être est ressentie lorsque l'écart entre la température de l'air et la température surfacique des parois ne dépasse pas 2°C (voir Chapitre IV). Dans ce cas d'étude, l'écart entre la température à 1,2m du plancher (station 1) et la surface interne du toit dans la chambre 02 (station 3) est de 2,3°C, 3°C et 2,74°C respectivement pour la nuit, le matin et l'après midi. De même, il est de 4,9°C, 3,2°C et 3°C pour ces mêmes tranches de la journée dans la chambre 01. Ce qui confirme que le toit végétal peut réduire plus efficacement cet écart et procurer la sensation de bien-être.

En résumé, d'après la figure (VI-11), le toit végétal testé a rempli les objectifs de ce genre d'installation quand au rafraîchissement passif intérieur mais aussi extérieur. Les écarts moyens les plus importants enregistrés entre les températures du toit de référence et du toit végétal durant la période de mesure du 22 au 25 juillet (représentant la performance du toit végétal), ont été relevés:

- A un mètre (1m) au dessus des toits (les stations 6'- 9): avec un écart maximal de 3,2°C enregistré durant la nuit (dû à la transpiration de la végétation).

- A 30cm au dessus des toits (les stations 5'-8): avec un écart maximal de 4.1°C enregistré durant la matinée (dû à l'évaporation de l'eau du substrat et la transpiration de la végétation après l'arrosage).
- A la surface externe des toits (stations 4'-4): avec un écart maximal de 4.2°C enregistré durant l'après midi (grâce à l'isolation du substrat sec et l'ombrage de la végétation).
- A 1,2m du plancher intérieur (stations 1'-1) : avec un écart maximal de 1.3°C durant le soir, mais aussi un écart important durant l'après midi de l'ordre de 1.2°C (c'est à dire quand on en a le plus besoin).

2. Stratification des humidités relatives de l'air :

Pour l'étude de la stratification verticale des humidités relatives, la même méthode a été adoptée que pour la stratification des températures de l'air pour la période du 22 au 25 juillet. La figure (VI-12) montre que l'apport du toit végétal quand à l'humidification de l'air au dessus des toits est plus ressenti la nuit et la matinée que dans l'après midi.

Durant la nuit, lorsque l'évapotranspiration est élevée, l'écart entre les deux toits est de 6% et 5.3% respectivement à 1m (stations 6'-9) et à 30cm du toit (stations 5'-8). Il diminue à 3.6% et 3.2% pour ces mêmes hauteurs durant la matinée correspondant à la baisse du taux d'humidité et à la hausse de la température de l'air ambiant (données météo) impliquant la diminution de la transpiration de la végétation. Par contre durant l'après midi, les humidités relatives au dessus des deux toits sont presque identiques à 1m de hauteur avec un écart moyen de seulement 0.2%.

En général l'air est plus humide au contact des sources évaporatives (plan d'eau ou végétation), alors que pour ce cas d'étude, la stratification du taux d'humidité à l'extérieur montre que la distribution de la vapeur d'eau est presque uniforme en hauteur sur les deux toits en absence de radiations solaires directes (c'est-à-dire, durant la nuit pour les deux toits mais aussi dans l'après midi pour le toit de référence ombré). Le taux d'humidité au contact du feuillage (station 7) est plus élevé que celui à 1m du toit (station 9) de seulement 0.2% durant la nuit, alors que le reste du temps, il est inférieur par rapport à 1m du toit de 1.4% (matin) et 1.5% (l'après midi).

Par ailleurs, en présence de radiations solaires (matin et après midi), la figure (VI-12) montre que c'est à 30cm de haut (point 8) que la concentration de vapeur d'eau est la plus basse au dessus des deux toits. Pour le toit de référence, ceci est dû à l'émission de chaleur sensible par

les surfaces surchauffées du toit de référence qui assèche l'air et diminue le taux d'humidité relative (voir stratification de la température de l'air durant la matinée).

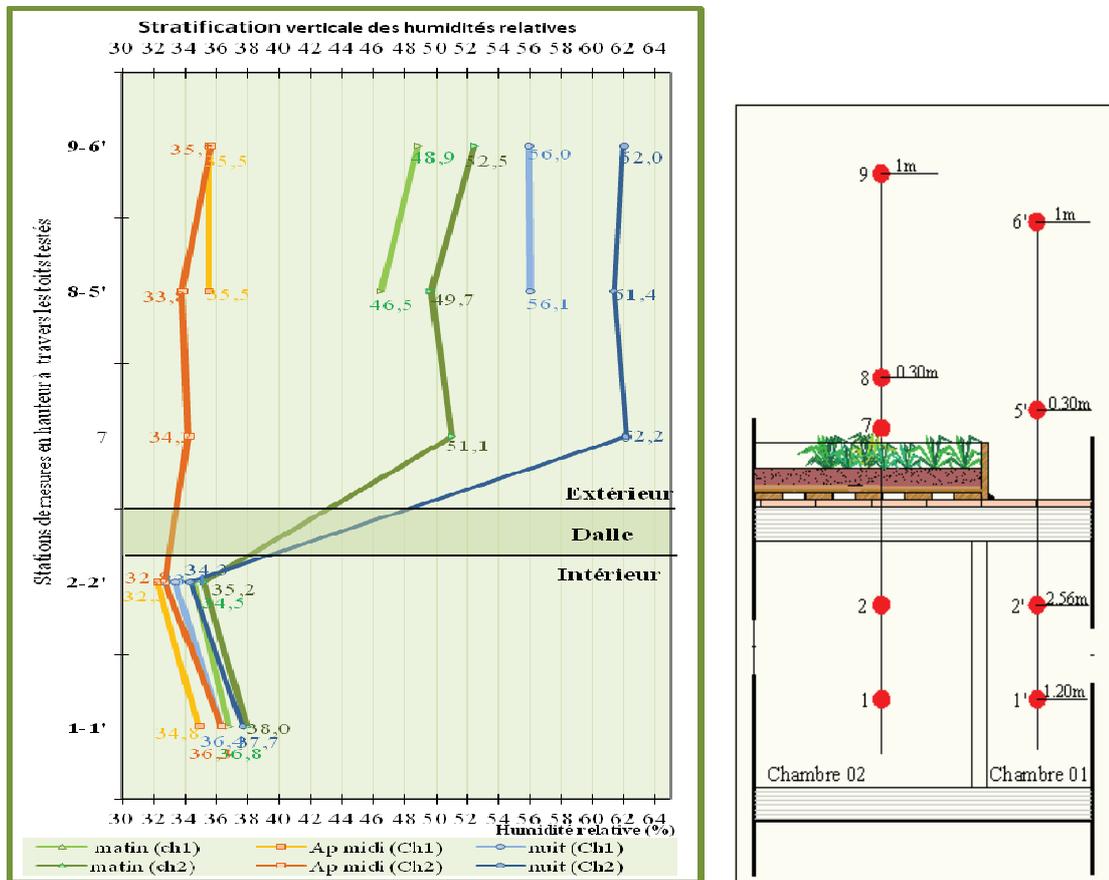


Figure VI- 11. Stratification des humidités relatives moyennes à l'intérieur et l'extérieur des deux chambres testées (du 22-25 juillet).
(Source. Auteur)

Par contre, lorsque le rayonnement solaire frappe une surface végétale, celle-ci procède à une absorption partielle et sélective, en absorbant 80% de radiations courtes et visibles et 20% des radiations infrarouges³⁷. Les radiations de grande longueur d'onde émises par la végétation sont faibles par rapport à une surface minérale³⁸. Et donc, c'est la surface sombre et sèche du substrat qui produit la plus grande quantité de ces radiations susceptibles de produire la chaleur sensible. Cependant on a vu dans la stratification de la température de l'air que celle-ci est plus basse au contact et à 30cm de la végétation qu'à 1m du toit dans le point (V1). De ce fait, une

³⁷ Brown et Gillespie (1995) In Mohd Fairuz Shahidan, Philip Jones. «Plant canopy Design in modifying urban thermal environment: theory and guidelines», PLEA 2008.

³⁸ Wong et al. «Investigation of Thermal Benefits of Rooftop Garden in the Tropical Environment», Building and Environment, vol. 38, 2003, pp. 261- 270.

grande partie du rayonnement infrarouge au niveau du toit végétal est transformée en chaleur latente. En effet d'après Del Bario³⁹, l'échange thermique au niveau de la couche végétale des toits est basé entre autre sur l'évapotranspiration des feuilles. Celle-ci inclut : l'évaporation de l'eau dans les feuilles (par les stomates), la diffusion de vapeur à la surface des feuilles, et le transport par convection de cette vapeur de la surface des feuilles à l'air.

Sachant que, la transpiration cutanée de la végétation succulente produit de l'humidité accrochée à la surface des feuilles ou des substances volatiles comme pour *l'Aoenium cyroco*. Par ailleurs, lorsqu'il y a de l'humidité produite par transpiration accrochée à la surface des feuilles et que l'air est chaud et non saturé, il y aura d'une part ; un échange de chaleur entre l'eau et l'air⁴⁰. D'autre part, l'évaporation de cette eau nécessite l'absorption d'une quantité d'énergie de l'air ambiant. Cette énergie est puisée du rayonnement infrarouge que produit le substrat, puisque Faurie et al⁴¹ explique que l'évaporation de l'eau au niveau des feuilles est induite par l'absorption préférentielle du rayonnement infrarouge par les gouttelettes d'eau transpirées. C'est cet effet évaporatif qui produit un rafraîchissement de l'air en diminuant sa température au niveau de la végétation jusqu'à une hauteur de 30cm (voir stratification de la température de l'air) et en augmentant l'humidité. Donc la végétation produit une *chaleur latente* grâce à cet effet évaporatif⁴². Cependant, l'air chaud et humide est connu d'être ascendant par conséquent, l'humidité est transportée vers le haut (ce qui explique sa baisse au niveau bas), alors que la baisse des températures est ressentie dans la couche végétale (du à la consommation du rayonnement infrarouge pour l'évaporation).

Par ailleurs, lorsque la couche végétale a une faible épaisseur, la connexion entre l'air rafraîchit et humide en dessous du port de la végétation avec l'air chaud et sec au dessus de celui-ci est important. Et donc, d'après Theodosiou⁴³, l'air rafraîchit est diffusé à l'extérieur.

A l'intérieur du bâtiment, la stratification verticale du taux d'humidité montre que tout au long de la journée celui-ci est plus élevé à 1.2m du plancher (station 1- 1') qu'à 30cm du plafond

³⁹ **Del Bario P.E.** «*Analysis of the Green Roofs Cooling Potential in Buildings*», Energy and Buildings, vol. 27, 1998, pp. 179-193.

⁴⁰ **Alain Liébard, André De Herde.** «*Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique* », Editions Le Moniteur, p.181.

⁴¹ **Faurie, al.** «*Ecologie ; approche scientifique et pratique* », 5^e éd. Editions TEC & DOC, Paris, 2006. p 8.

⁴² **Mohd Fairuz Shahidan, Philip Jones.** «*Plant canopy Design in modifying urban thermal environment: theory and guidelines*», PLEA 2008.

⁴³ **Theodore G. Theodosiou.** «*Summer Period Analysis of The Performance of Planted Roof as a Passive Cooling Technique*», Energy and building, vol. 35, 2003, pp. 909-919.

(station 2- 2') pour les deux chambres. Cet écart est maximal dans l'après midi dans la chambre 02 (écart de 3.5%), et durant la nuit dans la chambre 01 (écart de 3%).

Pour les mêmes conditions intérieures dans les deux chambres, le taux d'humidité dans la chambre recouverte du toit végétal est élevé en moyenne de 1.3%, avec un max de 1.5% survenue durant l'après midi, lorsque l'humidité relative extérieure est basse mais néanmoins améliorée au dessus de la végétation. Par ailleurs, malgré des humidités relatives plus élevées au dessus du toit végétal le matin et le soir, celles-ci n'affectent pas significativement l'écart d'humidité relative intérieure entre les deux chambres.

III. Analyse de la performance thermique du toit végétal à l'intérieur du bâtiment :

1. Analyse des températures de l'air intérieur pour des journées estivales types:

Sachant que les résultats obtenus au mois de juin, ont été probants, et donc ils ont été pris en considérations puisqu'ils sont assez représentatifs de la capacité de rafraîchissement de la toiture végétalisée en début de la saison estivale.

En effet, les résultats d'une journée type du mois de juin prouvent que la toiture végétale peut être considérée comme stratégie de rafraîchissement passif des bâtiments (et ce, sans ventilation). La figure (VI-13) montre que, la toiture végétale a diminué considérablement les températures de l'air mesurées à 1.2m du plancher de la chambre 02 par rapport à la chambre 01, tout au long de la journée. On note une baisse moyenne par rapport à la chambre 01 de 1.5°C, ce qui correspond à la réduction trouvée par Niachou et al⁴⁴ en Grèce (soit de 2°C).

L'écart maximal entre les deux chambres atteint 2.8°C à (16 :00h) et l'écart minimal est de 0.6°C enregistré à (8 :00h) du matin (Fig. VI-14). L'écart entre les deux chambres augmente progressivement après (8 :00h) jusqu'à (16 :00h) lorsque le rayonnement solaire est intense. Correspondant à l'accumulation de la chaleur dans la dalle recouvrant la chambre 01 et son transfert vers l'intérieur. Le soir cet écart diminue puisque la dalle non recouverte de toit végétal émet plus facilement un rayonnement de grandes longueurs d'ondes pour évacuer la chaleur emmagasinée le jour, ce qui baisse les températures de l'air intérieur contrairement au toit végétal dont les températures augmentent (Fig. VI-13).

⁴⁴ Niachou et al. « *Analysis of the Green Roof Thermal Properties and Investigating of its Energy Performance* », Energy and Building, vol. 33, 2001, pp.719-729.

Il y a une différence de l'ordre de 1.5, 2.4 et 1°C, respectivement entre les températures de l'air diurnes moyennes des deux chambres (01 et 02), entre leurs températures maximales et entre leurs températures minimales. Coïncidant avec les résultats de recherche de Niachou et al (2001) qui sont de l'ordre de 2, 3 et 1°C. La chambre recouverte d'un toit végétal possède une température diurne moyenne de l'air intérieur de 24.7°C, contre 26.2°C pour la chambre 01.

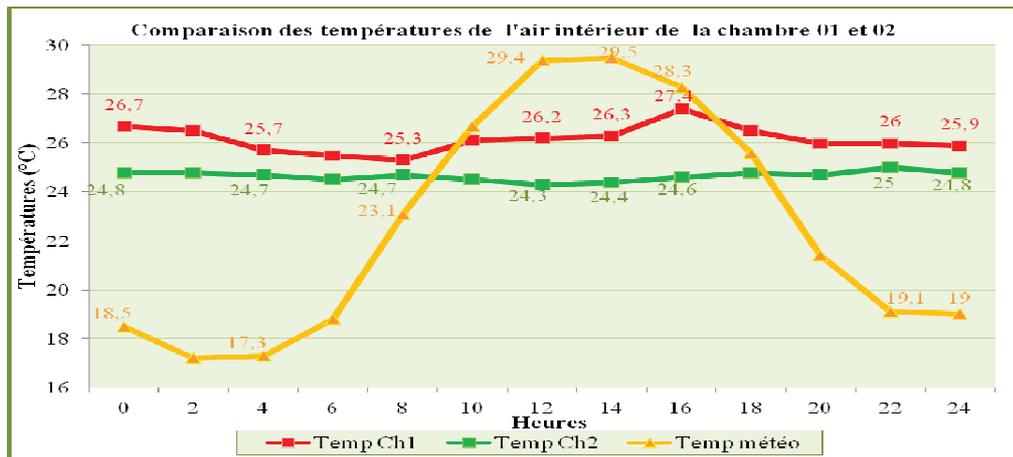


Figure VI- 12. Variation des températures de l'air intérieur des chambres 01 et 02 (juin) (Source. Auteur)

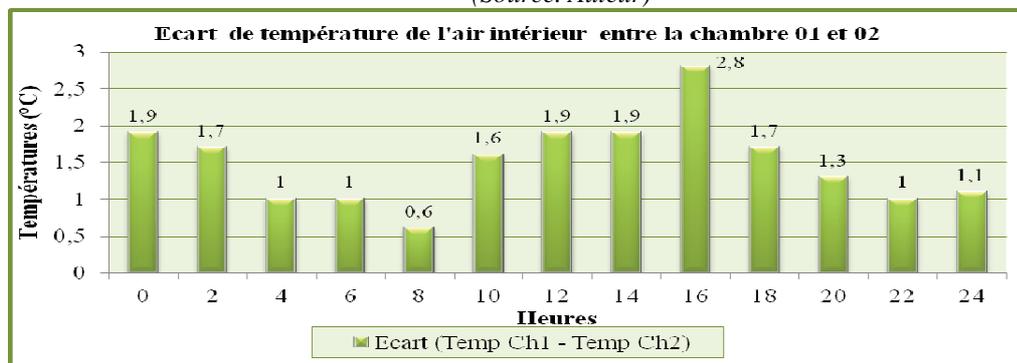


Figure VI- 13. Ecart des températures de l'air intérieur entre la chambre 01 et 02 (juin) (Source. Auteur)

Outre la baisse des températures de l'air intérieur de l'espace qu'elle recouvre, la toiture végétalisée a diminué de trois fois leur oscillation diurne, soit une amplitude thermique de seulement 0.7°C (différence entre la température diurne maximale et minimale). Les températures de l'air intérieur varient donc d'une valeur maximale de 25°C enregistrée à (22 :00h) et une valeur minimale de 24.3°C enregistrée à (12 :00h), lorsque les radiations solaires et les températures de l'air extérieur sont maximales (Fig.VI-13). En effet, Kumar et Kaushik⁴⁵

⁴⁵ Kumar, R. et S.C.Kaushik. «Performance Evaluation of Green Roof and Shading for Thermal Protection of

ont confirmé que la baisse maximale des températures de l'air intérieur survient durant la période la plus chaude de la journée (entre 12 :00h et 15 :00h). Ce phénomène est inversé pour la chambre 01 dont les températures de l'air suivent la variation des températures de l'air extérieur. Elles oscillent donc d'une valeur minimale de 25.3°C enregistrée à (8 :00h) et une valeur maximale de 27.4°C à (16 :00h) (Fig.VI-13), avec une amplitude thermique diurne de 2.1°C.

Kumar et Kaushik (2005) ont pu révéler la performance de rafraîchissement d'une toiture végétalisée ombrée par rapport au toit de référence et par rapport à une toiture végétalisée ensoleillée. Les résultats de l'investigation du mois de juin montrent que l'installation d'un toit végétal peut rafraîchir passivement l'intérieur des bâtiments, et ce en dépit de la durée d'insolation reçu par le toit de référence. En effet, vu que les plus importants gains de chaleur en été ont pour source le toit des bâtiments, la figure (VI-13) montre que les températures de l'air sous un toit végétal (chambre 02) qui reçoit le soleil pendant environs neuf heures et demi par jour sont moindres que celles de la chambre 01 recevant moins de radiations solaires par le toit (soit une durée d'insolation d'environs six heures par jour). Ce qui rend la végétalisation des toits une excellente stratégie de rafraîchissement.

Un autre élément important quand au comportement d'un toit végétal, consiste en son aptitude à déphaser l'augmentation des températures de l'air intérieur, correspondant à un déphasage du flux de chaleur entrant dans le bâtiment. En effet, la température de l'air augmente à partir de (8 :00h) dans la chambre 01 et seulement vers (12 :00h) dans la chambre 02. Alors que, les maximales sont atteintes à (16 :00h) et (22 :00h) respectivement pour les deux chambres. Soit huit heures après les températures extérieures maximales pour la chambre 02 et deux heures pour la chambre 01, et ce, malgré l'importante inertie de la dalle en corps creux. Le substrat constitue donc, une couche supplémentaire qui augmente l'inertie de la dalle et agit comme une masse thermique qui diffère le transfert de chaleur. En plus des fonctions biologiques de la strate végétale qui diminuent les radiations solaires frappant la surface du toit⁴⁶.

La performance de la toiture végétale est fonction du climat de la région, des conditions climatiques, et des caractéristiques de la toiture végétalisée. Les résultats obtenus au mois de juin sont représentatifs de cette performance, cependant ce cas d'étude est conditionné par plusieurs

Building », Building and Environment, Vol. 40, 2005, pp. 1505-1511.

⁴⁶ Bass, B. et B.Baskaran. «Evaluating Rooftop and Vertical Gardens as an Adaptation Strategy for Urban Areas», NRCC-46737, Projet N° A020, NRC-CNRC, Canada, 2003. p. 111. Fichier PDF, [En ligne] <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/ircpubs>.

contraintes dont une faible couverture foliaire (de 23.65%) et une faible épaisseur du substrat (6cm). Ces deux éléments ont été prouvés meilleurs pour des journées estivales clémentes par Theodosiou (2003) et de Kanellopoulou (2008), c'est ce qui apparaît dans les résultats du mois le plus chaud (juillet) (Fig. VI-15) où l'écart des températures entre la chambre 01 et 02 diminue durant les heures les plus chaudes de la journée jusqu'à 0.7°C à (12 :00h) (Fig. VI-16).

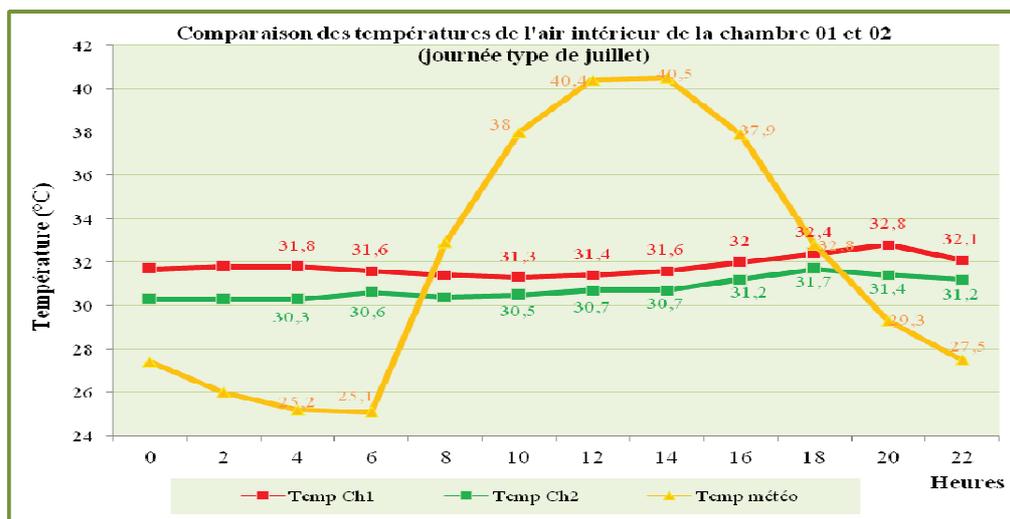


Figure VI- 15. Variation des températures de l'air intérieur des chambres 01 et 02 pour une journée type de juillet (Le 23 juil.) (Source. Auteur)

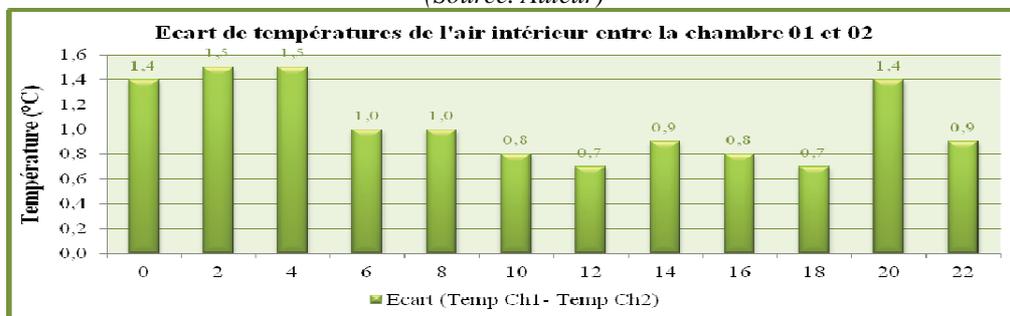


Figure VI- 16. Ecart des températures de l'air intérieur entre la chambre 01 et 02 (Le 23 juil.) (Source. Auteur)

En effet, pour une journée caniculaire type (le 23 juillet) dont les températures de l'air extérieur atteignant 40.5°C (Fig. VI-15), et malgré les caractéristiques du toit végétal, celui-ci a pu rafraîchir passivement la chambre 02. Cependant, sa performance a diminué après accumulation de la chaleur dans la chambre 02 et en absence de ventilation nocturne continue. De ce fait, le toit végétal procure un écart de température de l'air moindre entre la chambre 01 et 02 par rapport à une journée type du mois de juin. Cet écart diminue par contre, durant les heures les plus chaudes (entre 8 :00h et 18 :00h) et il augmente durant la nuit jusqu'à 1.5°C à (2 :00h)

(Fig. VI-16). Ces températures sont fonction de la variation des températures surfaciques externes et internes des toits testés et du transfert de chaleur qui s'y crée.

2. Analyse de la performance thermique du toit végétal durant le mois de juillet :

2.1 Impact du toit végétal sur les températures intérieures :

Les mesures effectuées en juillet, s'étale du 22 au 27. Elles sont caractérisées par deux journées caniculaires (le 22 et 23) et d'autres plutôt fraîches pour la saison (du 24 au 27 juillet). Des scénarios ont été adoptés afin de déceler l'influence de la ventilation et de l'arrosage sur la performance thermique de la toiture végétalisée (Voir chapitre V).

Pour vérifier l'efficacité thermique de la toiture végétalisée durant le mois le plus chaud, les moyennes des températures des deux chambres ont été analysées pour la période s'étalant du 22 au 25 juillet (où les températures surfaciques des toits ont été relevées). Le but est de confronter les moyennes obtenues, puisque la température de l'air intérieur est étroitement reliée à l'écart de température entre les surfaces extérieures et intérieures des parois et le flux de chaleur crée entre elles. Cette période est composée de deux journées caniculaires (22-23 juillet) et de deux journées relativement fraîches (24-25). La moyenne des données météo de la période de mesure affichent des températures de l'ordre de 27°C, 34.1°C et de 21.5°C, respectivement pour la moyenne diurne, la maximale et la minimale. Avec une amplitude diurne moyenne de 12.6°C.

Sous ces conditions climatiques, les profils des températures de l'air intérieur et les profils des températures surfaciques intérieures et extérieures des dalles recouvrant la chambre 01 et 02 (Fig. VI-17), montrent que la toiture végétalisée testée est efficace quand au rafraîchissement intérieur durant le mois le plus chaud. Bien que les températures de l'air intérieur enregistrent un écart moyen entre les deux chambres de seulement 1°C, il atteint une valeur maximale moyenne de 1.7°C à (22 :00h) et une valeur minimale moyenne de 0.7°C à (14 :00h) (Fig. VI-18).

Le rafraîchissement obtenu par le toit végétal est aussi représenté dans ce cas d'étude par la baisse des températures surfaciques intérieures et extérieures de la dalle sous un toit végétal. Mais aussi par la réduction de l'écart entre elles, induisant une réduction du flux de chaleur entrant (Fig. VI-19). D'après Bass et Baskaran (2003), le flux de chaleur à travers le toit végétal est fortement diminué alors que les gains à travers le toit de référence sont élevés le jour, ce qui rejoint les résultats de la présente étude.

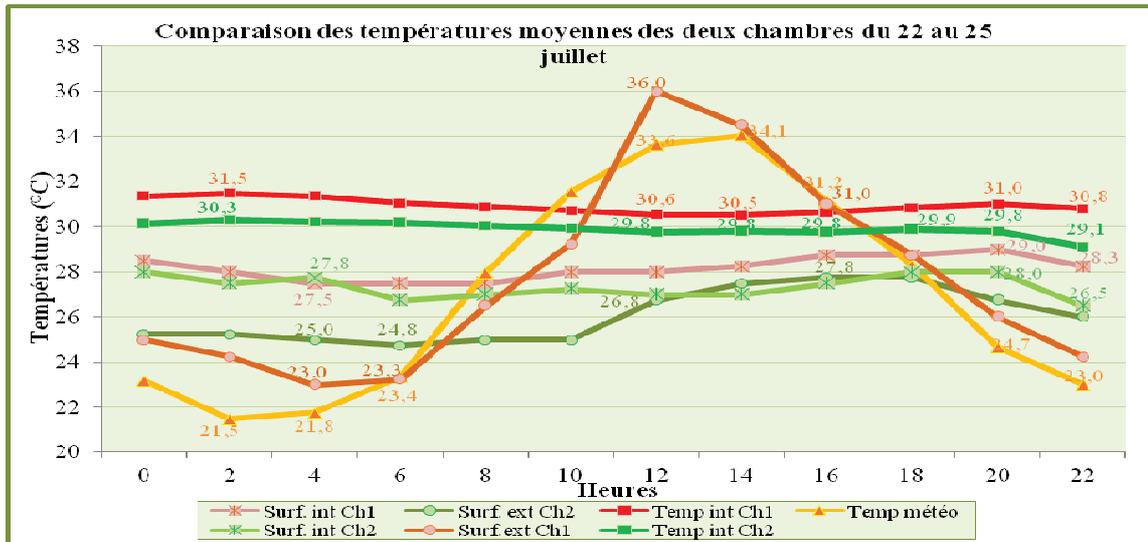


Figure VI- 14. Comparaison des températures moyennes de l'air intérieur et des surfaces internes et externes des toits des chambres 01 et 02 (du 22 au 25 juillet) (Source. Auteur)

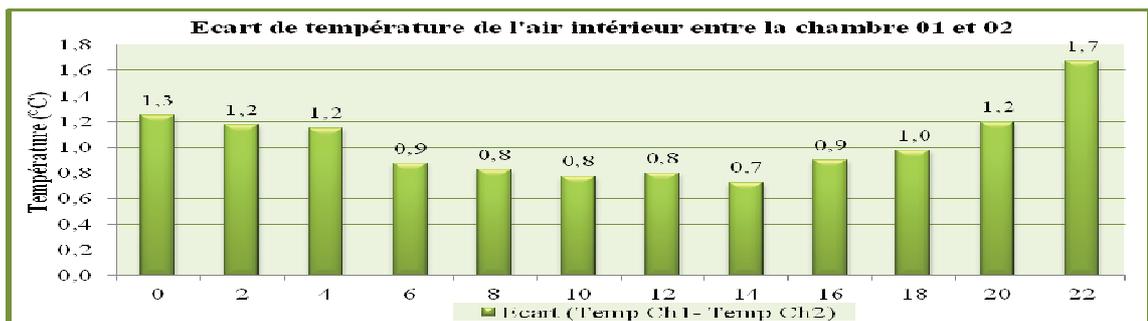


Figure VI- 15. Ecart des températures moyennes de l'air intérieur entre la chambre 01 et 02 (du 22 au 25 juillet) (Source. Auteur)

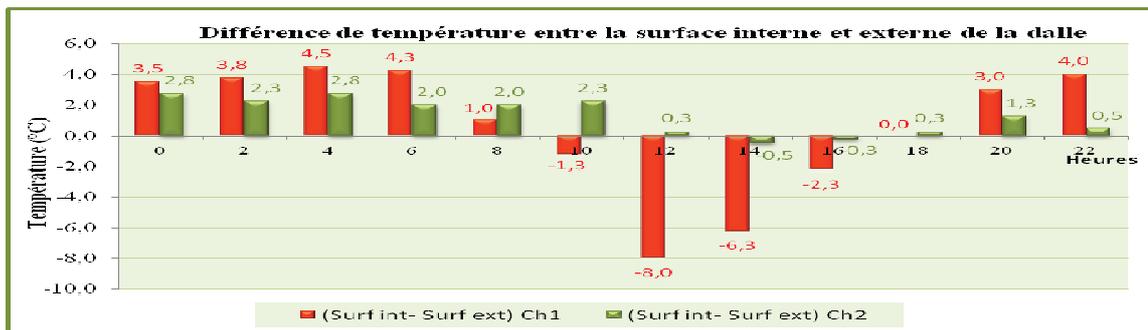


Figure VI- 16. Différence de température moyenne entre la surface externe et interne des deux toits testés ($T_{surf. int} - T_{surf. ext}$) (du 22 au 25 juillet). (Source. Auteur)

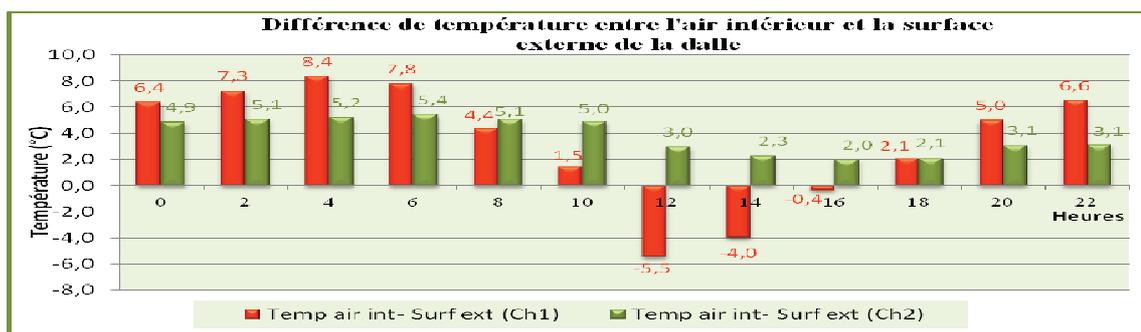


Figure VI- 20. Différence entre les températures moyennes de l'air intérieur et des températures des surfaces externes des toits (du 22 au 25 juillet).
(Source. Auteur)

Sachant que la différence de température établie entre la surface intérieure du toit et la surface extérieure exposée aux conditions climatiques ambiantes permet à la chaleur de passer de la surface à haute température vers à celle à basse température, principalement par la conduction⁴⁷. Le flux de chaleur entrant commence lorsque les températures surfaciques extérieures dépassent celles intérieures. De ce fait, ceci ne se produit dans la chambre 02 qu'entre (14 :00h et 16 :00h) avec des températures surfaciques externes dépassant celles intérieures d'une valeur maximale faible de l'ordre de 0.5°C (à 14 :00h) (Fig. VI-19), ce qui peut être considéré comme négligeable. Les températures surfaciques extérieures sont aussi inférieures aux températures de l'air intérieur tout au long de la journée, gardant un écart considérable de (20 :00h à 10 :00h) et moins important entre (12 :00h et 18 :00h), favorisant le flux de chaleur sortant (Fig. VI-20).

La toiture végétale protège donc les surfaces externes des hausses excessives durant les heures les plus chaudes de la journée. Ce qui réduit le flux de chaleur entrant et les gains de chaleur à l'intérieur, mais aussi déphase l'augmentation des températures de l'air intérieur par rapport à la chambre 01. Par ailleurs, d'après Liu et Minor (2005), les toits végétaux réduisent le flux de chaleur entrant et sortant. Ils ont confirmé que le flux est sortant le jour et les gains ne commence que l'après midi, ce qui est vérifié pour les résultats du mois de juillet. Bien que la hausse des températures de l'air dans la chambre 02 commence à (16 :00h) d'une valeur de 29.8°C, celles-ci augmentent légèrement mais restent stables jusqu'à (20 :00h). Elles atteignent une valeur maximale de 30.3°C à (2 :00h) en passant par une valeur minimale de 29.1°C à (22 :00h) (Fig.VI-17). La ventilation a permis une meilleure extraction de la chaleur de la

⁴⁷ Allen et Iano (2004) In Johnnel Kiera Lanham, «Thermal Performance of Green Roofs in Cold Climates». mémoire de Master, Université Kingston, Ontario, Canada, 2007. p. 19.

chambre 02 entre (20 :00h et 22 :00h) avec une baisse des températures de l'air de 0.2°C et 0.7°C pour la chambre 01 et 02 respectivement (Fig. VI-17).

D'autre part, Liu et Minor (2005) affirment que le flux de chaleur entrant sous un toit non végétalisé commence dès le levé du soleil (6 :00h) jusqu'au coucher (18 :00h). Ce qui correspond dans un sens au profil des températures de l'air du mois de juin (Fig. VI-13). Par contre pour le mois de juillet, les températures surfaciques extérieures moyennes du toit de la chambre 01 ne dépassent les températures surfaciques intérieures moyennes qu'entre (10 :00h) (dont l'écart entre les deux chambres est de 1.3°C) et (16 :00h) (écart de 2.3°C), et l'écart maximal est de 8°C (à 12 :00h) (Fig. VI-19). Et, elles ne dépassent les températures moyennes de l'air intérieur qu'entre (12 :00h) et (16 :00h) (Fig. VI-20). Le flux de chaleur entrant commence donc à (10 :00h), il s'accroît lorsque la différence de température entre : la surface externe et interne du toit, et la différence entre la surface externe et l'air intérieur est maximale, soit à (12 :00h). Cependant, les gains de chaleur n'apparaissent dans les valeurs des températures de l'air intérieur qu'à partir de (14 :00h).

Ce déphasage dans l'augmentation des températures surfaciques extérieures dans la chambre 01 par rapport à l'air intérieur est dû à : la hausse de la température de l'air intérieur qui transmet la chaleur à la surface intérieure par convection, à l'ensoleillement tardif de la station de mesure (S1) (à partir de 8 :00h) et à la haute réflectivité de la dalle et son inertie (dalle en corps creux). Ce qui retarde à la fois le transfert de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur et l'élévation des températures de l'air intérieur.

A partir de (18 :00h), même si les températures surfaciques extérieures sont plus basses que celles intérieures (Fig. VI-19), la dalle continue de restituer la chaleur emmagasinée durant la journée vers l'intérieur jusqu'à ce que les données météo affichent une température minimale de 21.5°C (à 2 :00h) et que l'écart entre les températures surfaciques extérieures et les températures de l'air intérieur augmentent à 7.3°C (Fig. VI-20). C'est donc à (2 :00h) que le flux de chaleur inverse (sortant) commence afin d'évacuer la chaleur de l'air intérieur, et il continue jusqu'à (12 :00h).

Givoni stipule qu'une construction massive bien isolée et protégée des radiations solaires, présente une variation de la température intérieure normalement de 10 à 20% de l'amplitude de

la température extérieure⁴⁸. Ceci est vérifié pour les deux chambres vu que Δt_i (Ch. 01) = 1°C et Δt_i (Ch. 02) = 1.2°C. Et que, 10% de Δt_e = 1.26°C.

Comme expliqué précédemment, la figure (VI-17) montre que la courbe des températures surfaciques externes moyennes du toit végétal pour la période du 22 au 25 juillet sont réduites entre (8:00h) et (18:00h), ce qui augmente l'écart entre les températures surfaciques des deux chambres (Fig. VI-21). Durant la nuit, l'effet de refroidissement des surfaces externes du toit par la toiture végétalisée s'annule, puisque le substrat bloque le rayonnement de grande longueur d'onde. De ce fait, les températures surfaciques du toit de référence sont plus basses.

Par ailleurs, les températures surfaciques intérieures sont fonction des températures de l'air intérieur, et des températures surfaciques externes. Le toit végétal est arrivé à les maintenir basses par rapport à celles de la chambre 01 (Fig. VI-17). Cependant, la figure (VI-21) montre que l'écart entre les deux chambres est moindre. On enregistre un écart moyen de 0.8°C et un écart maximal de 1.8°C à (22 :00h) (amélioré par la ventilation nocturne). La toiture végétalisée garde tout de même un écart considérable entre les températures surfaciques intérieures dans les deux chambres entre (14 :00h et 16 :00h) d'une valeur de 1.3°C. Cependant, durant la nuit les températures surfaciques intérieures sont plus élevées dans la chambre 02 de 0.3°C en moyenne. Laar et Grimme⁴⁹ ont trouvé une différence de 2°C entre les deux toits durant la nuit, ils expliquent cela par le blocage du rayonnement nocturne par le complexe de culture.

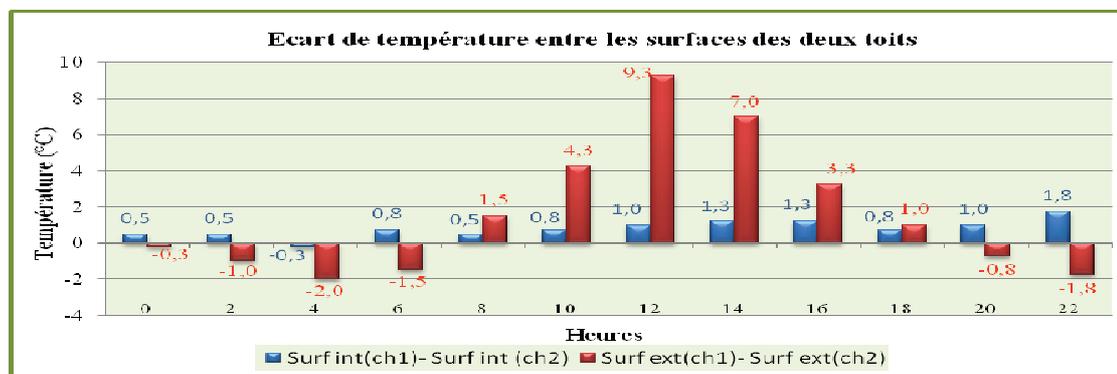


Figure VI- 21. Ecart des températures surfaciques moyennes des deux chambres (du 22 au 25 juillet) (Source. Auteur)

⁴⁸ **Abdou, S.** «Investigation sur l'intégration climatique dans l'habitation traditionnelle en régions arides et semi_arides d'Algérie: Cas du Ksar de Ouargla et de la Médina de Constantine » Thèse de doctorat d'état Université de Constantine, 2004. p. 146.

⁴⁹ **Laar, M. et F.W. Grimme.** «Thermal Comfort and Reduced Flood Risk Through Green Roofs in the Tropics», PLEA -23^{ème} conférence, Genève, 6-8 Sep. 2006.

Bien que la surface intérieure du toit de la chambre 02 possède des températures plus basses que celles de la chambre 01, leurs amplitudes thermiques diurnes sont identiques pour les deux chambres (1.5°C). Par ailleurs, la ventilation a eu un effet bénéfique sur les températures surfaciques intérieures grâce à l'échange thermique par convection entre l'air intérieur rafraîchit et la surface interne à température élevée. Les températures ont baissé donc de (20 :00h) à (22 :00h) de 1.5°C dans la chambre 02 et de 0.7°C dans la chambre 01 (Fig. VI-17).

2.2 Impact du toit végétal sur l'humidité relative de l'air intérieur:

L'humidité de l'air intérieur est fonction principalement de l'humidité de l'air extérieur, du taux de renouvellement d'air, et de la production de vapeur d'eau par le métabolisme humain ou les activités domestiques⁵⁰. Pour ce cas d'étude on élimine l'influence des activités domestiques ou du métabolisme humain puisque les pièces ne sont pas fréquentées, ce qui explique la stabilité des taux d'humidité relative durant toute la journée (Fig. VI-22).

Durant la période de mesure du 22 au 25 juillet, les humidités relatives enregistrées par les données météo ont une valeur saisonnière avec une moyenne diurne de 51.2%, une minimale de 30.3% (à 14 :00h) et une valeur maximale de 69.8% (6 :00h) (Fig. VI-22). L'écart important entre le taux maximal et minimal de l'humidité de l'air extérieur (39.4%) n'affecte pas celui des deux chambres qui est de seulement de 3%.

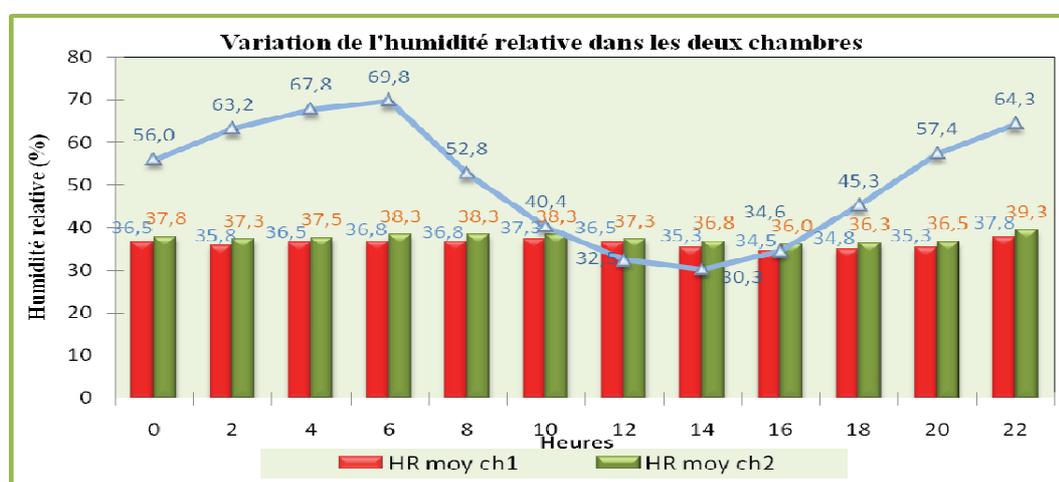


Figure VI- 17. Moyenne des taux d'humidités relatives dans les deux chambres (du 22-25 juillet)
(Source. Auteur)

⁵⁰ Millet JP, Nicholas C, (1991) In Abdou, S. «Investigation sur l'intégration climatique dans l'habitation traditionnelle en régions arides et semi-arides d'Algérie: Cas du Ksar de Ouargla et de la Médina de Constantine » Thèse de doctorat d'état Université de Constantine, 2004. p. 146.

Le taux d'humidité moyen est de 36.1% et 37.4% pour la chambre 01 et 02 respectivement. Le taux d'humidité dans la chambre 02 est plus élevé, enregistrant un écart moyen avec la chambre 01 de 1.3%, ce dernier est minimal à (12 :00h) (0.8%) et maximal durant plus de la moitié de la journée (1.5%). Notons qu'à notre connaissance, aucune recherche ne fait part d'une quelconque élévation du taux d'humidité intérieur après installation du toit végétal. Les valeurs d'humidités relevées dans les deux chambres peuvent être admissibles selon la norme (ASHRAE 55-1992 : $30 \leq HR \leq 70$).

La chambre 01 et 02 ont enregistré leurs valeurs maximales du taux d'humidité à (22 :00h), grâce au renouvellement d'air (sachant que lors de la ventilation aucun mouvement d'air n'a été détecté : vent calme).

2.3 Analyse de l'écart entre les températures de l'air intérieur et extérieur (ti - te) :

L'écart de température de l'air intérieur et extérieur pour ce cas d'étude est défini par la différence des températures moyennes, journalières ou horaires, des deux chambres et celles des données météo (ti - te) sur la période s'étalant du 22 au 27 juillet (Figure VI-23- a –b). Sachant que les journées du 22 et 23 juillet sont caniculaires, et celles du 24 au 27 juillet sont fraîches.

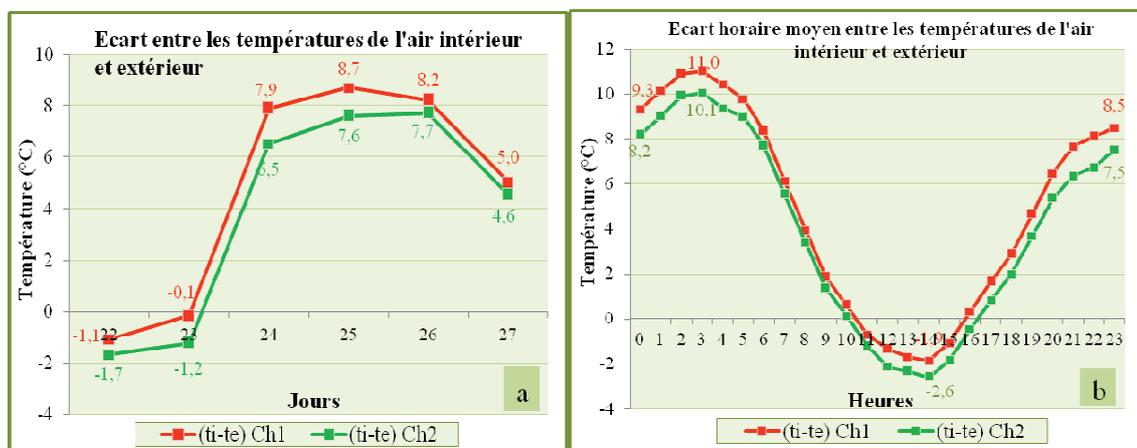


Figure VI- 18. Écart journalier (a) et écart horaire moyen (b) entre les températures de l'air extérieur et intérieur (ti - te) (Du 22 au 27 juillet)
 (Source. Auteur)

Alors que le confort thermique intérieur est de plus en plus apprécié lorsque la différence entre les températures de l'air intérieur et les températures de l'air extérieur s'éloigne du zéro en

valeur négative⁵¹. Dans ce cas d'étude, ce dernier est amélioré dans la chambre dotée d'un toit végétal (02), il est ressenti toutefois en même temps dans les deux chambres (écart négatif) :

- Durant les heures les plus chaudes (entre 10 :00h et 16 :00h) (Fig.VI-23- b).
- Lors des journées caniculaires (22- 23 juillet) (Fig.VI-23- a).

Par contre, un écart (ti- te) positif est enregistré en même temps dans les deux chambres pour des journées fraîches (du 24 au 27 juillet) (Fig.VI-23- a), et en absence de radiations solaires (la nuit) ou lorsque l'intensité des radiations solaires est basse (Fig.VI-23- b).

Donc, malgré la baisse des températures de l'air extérieur, les températures intérieures sont élevées dans les deux chambres à cause du confinement de l'air chaud à l'intérieur en absence de ventilation continue et prolongée qui renouvelle l'air (espaces clos et ventilation d'une heure par jour –Voir chapitre V). De ce fait, la chaleur accumulée durant les heures chaudes ou les journées caniculaires n'est dissipée vers l'extérieur que lentement par échange thermique à travers les parois, lorsque la température de l'air extérieur décroît. Ce qui explique que l'écart (ti- te) ne se rapproche du zéro dans les deux chambres que trois jours après la chute des températures de l'air extérieur (soit le 27 juillet). (La performance de rafraîchissement des toits végétaux doit être vérifiée avec les plages de confort de Humphrey et le diagramme de Szockolay).

Un écart considérable est relevé entre les courbes des deux chambres (Figure VI-23), qui atteste de la performance de la toiture végétalisée à réduire les températures de l'air intérieur. Celui-ci diminue lors d'une journée caniculaire (le 23 juillet) mais aussi lors d'une journée fraîche (27 juillet). Sachant que le flux de chaleur et la capacité de rafraîchissement du toit végétal sont fonction à la fois des conditions climatiques extérieurs selon Theodosiou (2003), et des composantes de la toiture végétale (isolation, substrat et couverture foliaire) d'après, Kanellopoulou, (2008), Kumar et Kaushik, (2005) et Theodosiou (2003). On a donc, voulu vérifier l'impact de certains paramètres sur l'efficacité thermique de la toiture végétalisée.

3. Etude des paramètres influents sur le rafraîchissement intérieur :

Takakoura et al.⁵² affirment que les surfaces recouvertes d'éléments caractérisés par l'évaporation induisent un flux de chaleur sortant, contrairement à celles minérales qui favorisent

⁵¹ Benadji A. (1999) In Abdou, S. «Investigation sur l'intégration climatique dans l'habitation traditionnelle en régions arides et semi-arides d'Algérie: Cas du Ksar de Ouargla et de la Médina de Constantine » Thèse de doctorat d'état Université de Constantine, 2004. p. 150.

le flux de chaleur entrant. En effet, à travers l'étude des températures intérieures moyennes des deux périodes de mesure (juin, juillet), les résultats trouvés affirment que la toiture végétalisée testée est un moyen de rafraîchissement passif intéressant sous le climat semi aride. Et ce, malgré la faible épaisseur du substrat (6cm) (réputée moins efficace lors des journées caniculaires), sa couleur sombre, et surtout la faible couverture foliaire (ombrage réduit du substrat), comparer avec la haute réflectivité (couleur claire) de la dalle recouvrant la chambre 01 et la durée d'insolation moindre qui la caractérisent. Dans ce sens, Alexandri et Jones⁵³ ont déjà prouvé que l'évapotranspiration des plantes est capable de réduire plus efficacement les températures de l'air que des surfaces qui absorbent une faible quantité de radiations solaires et ne transpirent pas.

Cependant, les profils des températures de l'air intérieur (Fig. VI-24) et le profil de l'écart entre les deux chambres sur la période s'étalant du 22 au 27 juillet (Fig. VI-25), indiquent qu'il y a une combinaison de plusieurs paramètres qui influent sur leur variation quotidienne et sur l'efficacité thermique de la toiture végétalisée. A travers la variation des conditions climatiques et le choix des scénarios, on a pu déceler l'influence des paramètres suivants :

- La variation des températures de l'air extérieur.
- La teneur en eau du substrat.
- La ventilation.

3.1.Impact des températures de l'air extérieur sur le rafraîchissement intérieur :

Les températures de l'air intérieur augmentent et baissent en fonction de la saison et des caractéristiques de l'enveloppe du bâtiment qui conditionnent les échanges thermiques entre l'extérieur et l'intérieur (épaisseur, couleur, type de matériau, inertie...). En général, les températures de l'air intérieur augmentent progressivement dès le début de la saison estivale, les gains de chaleur durant la journée sont plus importants que les pertes la nuit malgré la baisse des températures extérieures. Pour cela, les surchauffes intérieures sont gérées par les occupants grâce à différents comportements passifs (protection solaire, ventilation nocturne, humidification des sols...) ou actifs (climatisation). Pour un espace clos (non ventilé ou aéré), les transferts de chaleur se font par échange thermique à travers les parois.

⁵² Takakura e al. «Cooling Effect of Greenery Cover Over a Building», Energy and building, vol. 31, 2000, pp. 1-6.

⁵³ Alexandri, Eleftheria et Phil Jones. «Ponds, Green Roofs, Pergolas and High Albedo Materials; Which Cooling Technique for Urban Spaces? », PLEA 2006, 23^{ème} conférence, Genève, 6-8 Sep. 2006.

Pour analyser l'évolution des températures de l'air dans les deux chambres testées, la période de mesure fut partagée en trois périodes, composées chacune de deux jours: le 22 et 23 juillet (journées caniculaires et substrat arrosé), le 24 et 25 juillet (journées fraîches et substrat non arrosé pendant deux jours) et le 26 et 27 juillet (journées fraîches et substrat sec depuis trois à quatre jours).

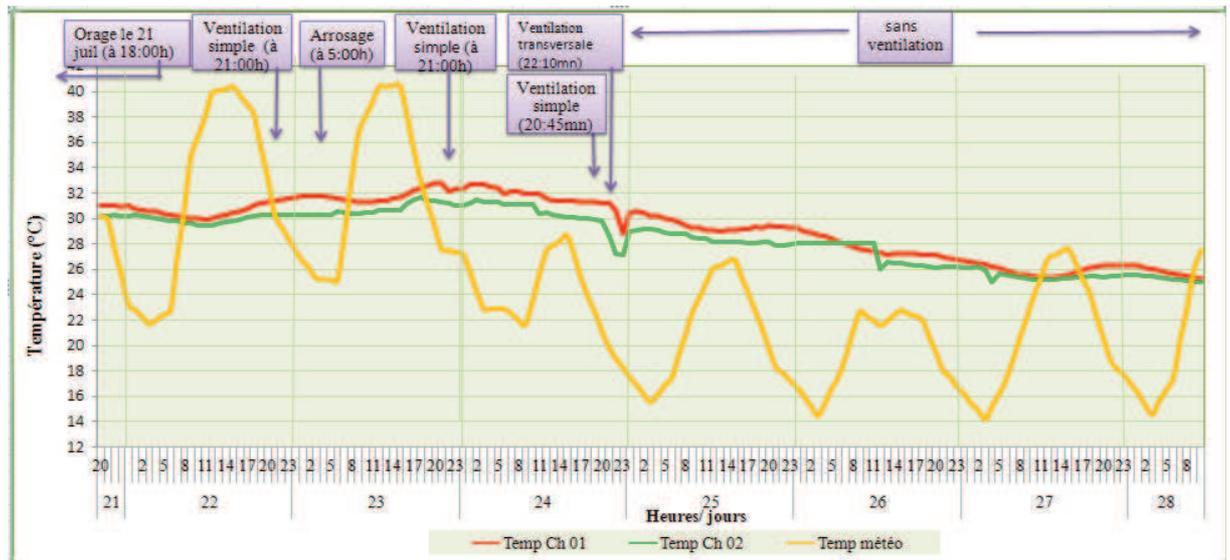


Figure VI- 19. Variation des températures de l'air intérieur du 22 -27 juillet dans les deux chambres. (Source. Auteur)

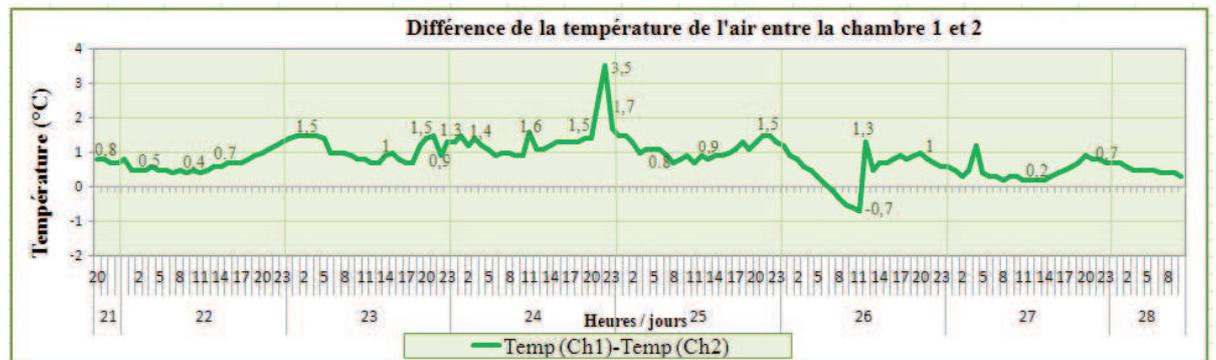


Figure VI- 20. Ecart de température de l'air entre les deux chambres (du 22 au 27 juillet) (Source. Auteur)

Pour ce cas d'étude, la figure (VI-24) montre que les profils des températures de l'air intérieur du 22 au 27 juillet dans les deux chambres sont influencés en grande partie par les températures de l'air extérieur qui agissent sur le flux de chaleur à travers le toit (dalle). Bien que les températures de l'air intérieur sont plus basses sous un toit végétal (chambre 02), l'accumulation de la chaleur durant la saison estivale fait qu'elles sont aussi élevées que celles de

la chambre 01 lorsque les températures de l'air extérieur sont élevées (22-23 juillet : la température moyenne des données météo est de 31.8°C). Le toit végétal a pu maintenir un écart moyen entre les températures de l'air intérieur des deux chambres de 0.8°C, celui-ci atteint un max de 1.5°C (la nuit) et une valeur minimale de 0.4°C (le jour) (Fig.VI-25).

Cette réduction est assez significative pour les journées caniculaires puisque des recherches ont prouvé qu'une réduction de seulement 0,5°C allège la consommation énergétique de la climatisation d'environ 8%⁵⁴, alors que la Société Nationale d'Electricité et de Gaz (SONELGAZ) estime qu'une baisse de 1°C mène à une économie d'énergie d'environ 7%⁵⁵.

Lorsque les températures de l'air extérieur chutent brusquement à partir du 24 juillet (pour une moyenne diurne de 22.4°C), l'évacuation de la chaleur à travers les parois prend du temps en absence de ventilation nocturne continue. Cependant, l'écart moyen entre les deux chambres augmente à 1.2°C le 24-25 juillet, il atteint une valeur maximale de 3.5°C (la nuit) et minimale de 0.8°C (le matin) (Fig.VI-25).

Pour les journées fraîches du 26-27 juillet, dont la température de l'air extérieur moyenne est plus basse (20.2°C), on aurait pensé que l'écart moyen entre les deux chambres augmenterait puisque le substrat fin est plus performant durant les journées clémentes d'après les résultats de plusieurs recherches. Cependant, celui-ci a diminué à 0.5°C (avec un écart maximal de 1.3°C le jour). Ce qui reste acceptable mais fait intervenir l'influence d'autres paramètres sur le rafraîchissement intérieur, dont on distingue la teneur en eau du substrat et le nombre de jours de son assèchement (substrat sec depuis quatre jours).

D'autre part, l'écart négatif (-0.7°C) enregistré le matin du 26 juillet (Fig.VI-25), est provoqué par la masse thermique du toit végétal qui bloque le flux de chaleur sortant, alors qu'il y a une meilleure extraction de la chaleur de la chambre 01 puisque la surface externe de son toit est étroitement influencée par les températures basses de l'extérieur. Mais aussi, par l'absence des radiations solaires (ciel couvert durant la matinée du 26 juillet) qui a participé à cette baisse. D'ailleurs, ce phénomène pourrait être plus bénéfique en saison hivernale. Puisque, Takakoura et al.⁵⁶ ont démontré qu'en fonction de la couverture foliaire le flux de chaleur sortant est

⁵⁴ **François Leroux**, «Intégration végétale des bâtiments, contributions environnementales sur une maison individuelle», Mémoire de formation continue- Architecture HQE, Ecole d'Architecture de Lyon, Session 2005, p.12.

⁵⁵ **SONELGAZ**. "Guide du confort". p. 16.

⁵⁶ **Takakura e al.** «Cooling Effect of Greenery Cover Over a Building», Energy and building, vol. 31, 2000, pp. 1-6.

relativement faible par temps couvert, alors que Onmura et al (2001) ont trouvé que sous un ciel couvert, le flux de chaleur total est diminué de moitié que ce soit sous un toit végétal ou non.

D'après les résultats de recherche de S.Abdou⁵⁷, lorsque les amplitudes des températures extérieures sont grandes, celles des températures intérieures restent réduites lorsque les parois ont une importante inertie. Ceci est confirmé pour les journées caniculaires du 22-23 juillet, où l'amplitude thermique moyenne des données météo atteint 17°C, celles des chambres 01 et 02 sont réduites respectivement à 1.1°C et 0.6°C, ce qui atteste que le toit (en corps creux) de ce cas d'étude possède une importante inertie. Celle-ci est améliorée par la toiture végétalisée, qui les réduit pratiquement de « moitié » par rapport à un toit non végétalisé, ce qui rejoint les résultats de Kumar et Kaushik⁵⁸ (amplitude de 10.5°C et 5.1°C respectivement sous le toit de référence et le toit végétal).

3.2.Impact de la teneur en eau du substrat et son épaisseur :

Theodosiou⁵⁹ affirme que l'importance de l'épaisseur du substrat pour les toits végétaux est basée sur son inertie thermique. Selon lui, une faible épaisseur n'a pas la capacité de maintenir des températures intérieures basses pour une longue période, ce qui rend ces dernières étroitement reliées aux conditions extérieures. Kanellopoulou⁶⁰ atteste aussi que les substrats fins sont meilleurs pour extraire la chaleur de l'intérieur vers l'extérieur pour les jours relativement frais à cause de leur faible inertie thermique.

Ceci est vérifié dans ce cas d'étude, où le substrat fin testé (6cm), faiblement recouvert par la végétation (23.65%), est arrivé à maintenir un écart diurne moyen considérable entre les températures de l'air intérieur des deux chambres (1.5°C au mois de juin et 1.2°C pour les journées fraîches du 24-25 juillet). Cet écart diminue durant les journées caniculaires (0.8°C en moyenne), mais aussi, les résultats montrent qu'il a diminué lors des journées à basse température le 26-27 juillet (Ecart diurne moyen de 0.5°C) malgré la capacité d'un substrat fin à extraire la chaleur de l'intérieur durant la nuit. Ceci peut être associé à la teneur en eau du

⁵⁷ **Abdou, S.** «*Investigation sur l'intégration climatique dans l'habitation traditionnelle en régions arides et semi-arides d'Algérie: Cas du Ksar de Ouargla et de la Médina de Constantine* » Thèse de doctorat d'état Université de Constantine, 2004.

⁵⁸ **Kumar, R. et S.C.Kaushik.** «*Performance Evaluation of Green Roof and Shading for Thermal Protection of Building* », Building and Environment, Vol. 40, 2005, pp. 1505-1511.

⁵⁹ **Theodore G. Theodosiou.** «*Summer Period Analysis of The Performance of Planted Roof as a Passive Cooling Technique*», Energy and building, vol. 35, 2003, pp. 909-919.

⁶⁰ **Kanellopoulou, K.** «*Cooling Performance of Green Roofs*», PLEA 2008, 25^{ème} Conférence, Dublin, 22- 24 Oct.2008.

substrat qui est nulle depuis quatre jours mais aussi à la capacité d'un toit non végétalisé à extraire la chaleur de l'intérieur lorsque les températures de l'air extérieur sont basses.

En effet, selon plusieurs chercheurs (Lazarin et al, 2005, Del Bario, 1998...), plus le sol est humide, plus il contribue à diminuer les gains thermiques à travers le toit, ce qui rafraîchit passivement les bâtiments. D'autre part, Wong et al.⁶¹ attestent que l'humidité du sol peut procurer une meilleure isolation du toit toute la journée. Par ailleurs, sachant que l'arrosage est souvent recommandé tôt le matin ou le soir pour que les plantes puissent mieux s'alimenter en eau. Les résultats de la présente recherche montrent qu'un substrat arrosé le matin (23 juillet) a permis un écart de température entre les deux chambres plus important de jour comme de nuit qu'un substrat humidifié le soir (pluie du 21 juillet). Et ce, malgré la hausse des températures de l'air extérieur et intérieur le 23 juillet par rapport au 22 juillet.

Sachant que, les variations quotidiennes et saisonnières de la teneur en eau du substrat (précipitation- drainage) influent sur sa conductivité thermique, sur la chaleur spécifique et sur son albédo⁶². Dans ce sens, Kanellopoulou (2008) affirme que les sols humides présentent des fluctuations diurnes moindres, cependant l'accumulation de la chaleur dans les sols humides durant la journée (à cause de leur capacité thermique) empêche ou retarde leur rafraîchissement immédiat la nuit, contrairement aux sols secs qui sont caractérisés par des températures diurnes élevées et basses durant la nuit.

De ce fait, l'écart de températures entre les deux chambres durant la nuit est compris entre 0.5°C à 0.8°C pour la nuit du 21-22 juillet lorsque le substrat été saturé par la pluie (Fig. VI-24) (Fig. VI- 25). Par contre, lorsque le substrat est sec la nuit, les températures de l'air intérieur sont maintenues stables dans la chambre 02, que ce soit pour des températures extérieures très élevées (nuits du 22 et 23 juillet) ou basses (nuits du 24 et 25 juillet) (Fig. VI-24) avec un écart maximal pouvant atteindre 1.5°C sans ventilation (Fig. VI-25). Cependant, après trois à quatre jours sans arrosage, et pour des données météo plus clémentes, cet écart diminue à un max de 1°C (nuit du 26 juillet) et un max de 0.9°C (nuit du 27 juillet) (Fig. VI-25). Ce qui prouve que le nombre de jours d'assèchement du substrat influe sur l'efficacité thermique du toit végétal. La diminution de l'écart de température de l'air entre les deux chambres pour le 26 et 27

⁶¹ **Wong et al.** «*Investigation of Thermal Benefits of Rooftop Garden in the Tropical Environment* », Building and Environment, vol. 38, 2003, pp. 261- 270

⁶² **Sailor et al.** «*Thermal Property Measurements for Ecoroof Soils Common in Western U.S.* », Energy and Building, vol. 40, 2008, pp.1246-1251.

juillet peut aussi être causée par la facilité d'extraction de la chaleur de la chambre 01 lorsque les conditions extérieures sont clémentes.

Par ailleurs, durant les heures les plus chaudes de la journée, les résultats montrent que le substrat s'assèche en profondeur vers (10 :00h) qu'il soit arrosé le matin ou le soir, vu sa faible épaisseur et sa faible capacité de rétention de l'eau face aux radiations solaires intenses. Ceci est dû en grande partie à la composition du complexe de culture dépourvu d'agrégats minéraux rétenteurs d'eau (voir chapitre II), et donc, sa température s'élève rapidement induisant un flux de chaleur entrant. L'écart entre les deux chambres le 22 juillet atteint un max de 0.7°C durant les heures chaudes (substrat humide dès le soir) et un max de 1°C le 23 juillet (pour un arrosage le matin) (Fig. VI-25). Par contre, l'écart entre les deux chambres a été plus important durant les heures les plus chaudes de la journée pour un substrat complètement sec (du 24 au 25 juillet) variant de 0.9°C à 1.6°C. Alors qu'il est moins élevé pour des journées fraîches lorsque le substrat est sec depuis trois à quatre jours (écart entre 0.2°C et 1.3°C).

3.3.Impact de la ventilation sur le rafraîchissement intérieur :

La ventilation a un effet très important sur la dissipation de la chaleur dans les bâtiments. Elle fait partie des recommandations ressorties par l'analyse bioclimatique (tables de Mahoney, et diagramme psychrométrique de Szokolay) de la ville de Constantine. Bien que la toiture végétalisée ait pu procurer un rafraîchissement passif pour des espaces non ventilés de jour comme de nuit, même pour des journées caniculaires, sa performance est améliorée par la ventilation naturelle, qu'elle soit simple (ouverture des fenêtres seulement) ou transversale (ouverture des portes et fenêtres).

Lorsque les températures de l'air extérieur sont élevées la nuit, ou avoisinent celles de l'intérieur (cas du 22 juillet à 22 :00h), la ventilation n'a pas eu un grand effet sur la baisse des températures intérieures (Fig. VI-24). Par contre, pour des températures de l'air extérieur basses la nuit (27.5°C à 22 :00h le 23 juillet), la ventilation a permis de rafraîchir passivement les deux chambres en réduisant d'une part leur température, et en réduisant d'autre part l'écart entre les deux espaces de 1.5°C (relevé à 21 :00h) avant l'ouverture des fenêtres à 0.9°C après ventilation (Fig. VI-25). Cet écart augmente à 1.3°C lorsque les fenêtres sont refermées à 23h. La ventilation améliore donc le confort thermique intérieur dans les deux espaces, mais c'est sous un toit végétal que cela reste plus bénéfique lorsqu'on referme les fenêtres.

Pour les journées plus fraîches (24 juillet), dont les températures extérieures baissent à 17.5°C) et après une ventilation d'une heure et quarante cinq minutes (voir scénarios chapitre V), la toiture végétalisée s'est avérée plus efficace puisqu'elle a dors et déjà des températures plus basses. Ces dernières diminuent de 2.6°C (de 20: 45mn à 22 :00h) contre seulement 0.5°C pour la chambre 01, ce qui augmente l'écart entre les deux chambre à 3.5°C. Par contre lorsqu'on crée une ventilation transversale, l'écart entre les deux chambres diminue par la suite à 1.7°C (à 22: 30mn), soit vingt minutes (20mn) après ouverture des portes des deux chambres (Fig. VI-25). Sachant que le mouvement d'air n'a pas été détecté par l'anémomètre (vent calme).

D'après La Roche⁶³, les toits végétaux combinés à la ventilation nocturne peuvent assurer des conditions plus confortables dans les bâtiments. Et Niachou et al.⁶⁴, affirment que la consommation énergétique est moindre lorsque le bâtiment est muni d'un toit végétal et s'abaissent plus avec la ventilation nocturne en été.

Par ailleurs, on peut déduire que lorsque le bâtiment ne permet pas une ventilation transversale, la toiture végétalisée à elle seule constitue un moyen de rafraîchissement intérieur très efficace puisqu'une ventilation simple améliore sa performance.

4. Evaluation du confort thermique intérieur dans les deux chambres :

4.1 Comparaison des températures par rapport aux plages de confort :

La plage de confort de la figure (VI-26) est définit par la formule de Humphrey ($T_n = 11,9 + 0,534T_o$) pour le mois de juin. La température moyenne de ce mois étant de 22.7°C, la température neutre calculée est de 23.2°C, et la limite supérieure et inférieure de confort sont de 25.2°C et 21.2°C respectivement (Voir annexe V- calcul des limites de confort).

Au début de la saison estivale (30 juin), les températures de l'air intérieur d'une chambre sans toit végétal (chambre 01) sont sensiblement liées à la température de l'air extérieur. Elles gardent des valeurs plus élevées par rapport à la limite supérieure de confort (limite de Humphrey) et ce n'est qu'à (8 :00h) que sa température intérieure est égale à la limite supérieure de confort.

⁶³ **La Roche, Pablo.** « *Low Cost Green Roofs for Cooling: Experimental Series in a Hot and Dry Climate* », PLEA-26^{ème} conférence, Quebec, Canada, 22-24 Juin 2009

⁶⁴ **Niachou et al.** « *Analysis of the Green Roof Thermal Properties and Investigating of its Energy Performance* », Energy and Building, vol. 33, 2001, pp.719-729

D'après Onmura et al.⁶⁵, l'installation d'un toit végétal permet d'atteindre un confort thermique intérieur meilleur, ce qui est confirmé dans cette étude pour le mois de juin (Fig. VI-26). En effet, n'étant inférieures que de 1.5°C en moyenne par rapport à la chambre 01, les températures de la chambre 02 sont inscrites entre les limites de confort et avoisinent la limite supérieure. Elles s'en éloignent à partir de (8 :00h) et s'en approchent après (18 :00h). Ce qui prouve que la toiture végétalisée améliore plus efficacement le confort thermique intérieur le jour que la nuit tel que confirmé par plusieurs chercheurs (Liu et Minor (2001), Laar et Grimme (2006), Kumar et Kaushik (2005).....). L'écart maximal entre la température de l'air de la chambre 01 et la limite supérieure est de 0.9°C enregistré à (12 :00h), ce que attestent Kumar et Kaushik⁶⁶. Alors que l'écart minimal est de 0.2°C à (22 :00h) en absence de ventilation.

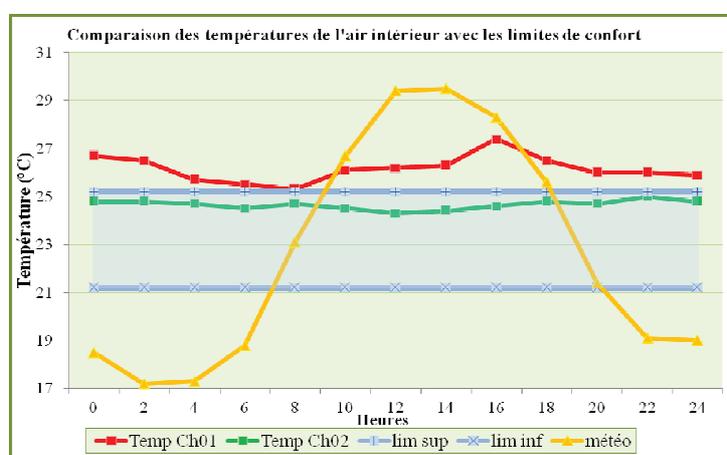


Figure VI- 21. Comparaison des températures de l'air intérieur des deux chambres avec les limites de confort (Humphrey) (journée type de juin)
(Source. Auteur)

Lorsque la structure du bâtiment aura accumulée la chaleur durant les journées estivales, le confort thermique intérieur est compromis. Puisque la courbe représentant la moyenne des températures de l'air dans la chambre 02 durant la période de mesure du 22 au 27 juillet, est en dehors des limites de confort (Fig. VI-27). Elle présente tout de même un écart moyen avec la limite supérieure de confort (1.7°C) moins important que la chambre 01 (2.6°C). Sachant que la température moyenne de ce mois étant de 26.1°C, la température neutre calculée est de 25°C, et la limite supérieure et inférieure de confort sont de 27°C et 23°C respectivement.

⁶⁵ Onmura et al. « Study on Evaporative Cooling Effect of Roof Lawn Gardens», Energy and Environment, vol. 33, 2001. pp. 653-666.

⁶⁶ Kumar, R. et S.C.Kaushik. «Performance Evaluation of Green Roof and Shading for Thermal Protection of Building », Building and Environment, Vol. 40, 2005, pp. 1505-1511.

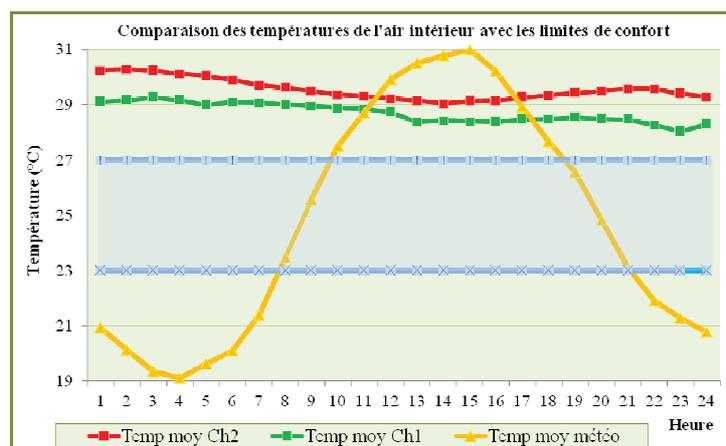


Figure VI- 22. Comparaison des températures de l'air intérieur moyennes des deux chambres avec les limites de confort (Humphrey) (moyenne du 22 au 27 juillet) (Source. Auteur)

Comme pour le mois de juin, la courbe des températures de la chambre 02 se rapproche de la limite supérieure durant les heures chaudes (12 :00h- 16 :00h) et s'en éloigne la nuit. En effet, le rôle principal de la toiture végétalisée est beaucoup plus de protéger les surfaces externes des surchauffes le jour en les protégeant des radiations solaires grâce à l'ombrage de la végétation et la masse thermique du substrat, ce qui rafraîchit l'intérieur.

L'écart minimal (1°C) avec la limite supérieure est survenu à (22 :00h), alors qu'il atteint une valeur maximale (2.3°C) seulement après quatre heures (à 2 :00h). Ce qui prouve que la chaleur ne peut être évacuée de l'intérieur efficacement en absence d'une ventilation nocturne continue.

On peut donc conclure vu l'écart entre les températures de la chambre 02 avec la limite supérieure, que même avec une faible couverture foliaire et une faible épaisseur du substrat, la toiture végétalisée testée aurait pu améliorer plus efficacement le confort thermique intérieur si la ventilation aurait été continue durant la nuit pour extraire l'air chaud, puisque les gains de chaleur durant la journée sont faibles.

Notons que la comparaison des moyennes des températures de l'air dans les deux chambres par période (du 22-23 juillet, du 24-25 juillet et du 26-27 juillet) avec les plages de confort, a montré que durant les journées clémentes du mois de juillet (26-27 juillet) les deux chambres sont comprises entre les plages de confort en se rapprochant de la limite supérieure, cependant la toiture végétalisée reste plus performante (Fig. VI-28).

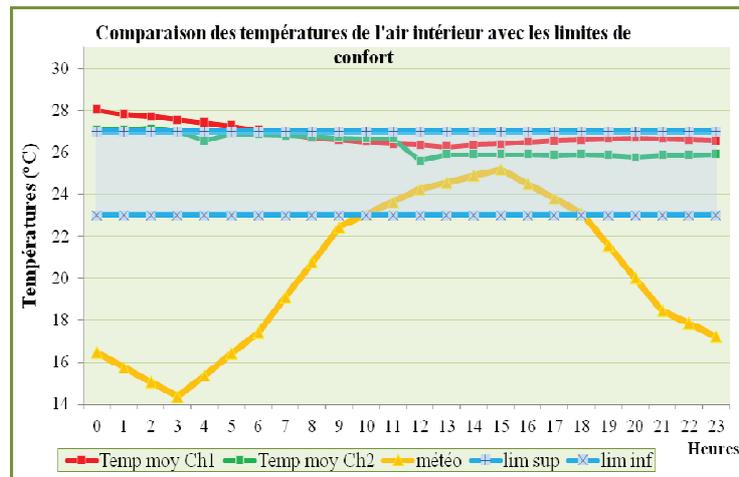


Figure VI- 23. Comparaison des températures de l'air intérieur moyennes des deux chambres avec les limites de confort (Humphrey) pour des journées fraîches (moyenne du 26 au 27 juillet) (Source. Auteur)

4.2 Représentation des résultats sur le diagramme de St Szockolay :

La représentation des températures et des humidités relative horaires des deux chambres sur le diagramme de Szockolay a été faite par le calcul des moyenne des périodes : du 22 et 23 juillet, du 24 et 25 juillet et du 26 et 27 juillet. Pour cela la zone de confort du mois de juillet est reportée sur le diagramme psychrométrique. Sachant que la moyenne mensuelle de la température de l'air du mois juillet est de 26.1°C, la température neutre est de 25.7°C selon la formule d'Auliciems ($T_n = 17,6 + 0,31T_o$) (voir annexe V).

Les figures (VI-29, 30, 31) confirment que l'humidité et la température de l'air intérieur changent en fonction des données climatiques mais aussi de la ventilation:

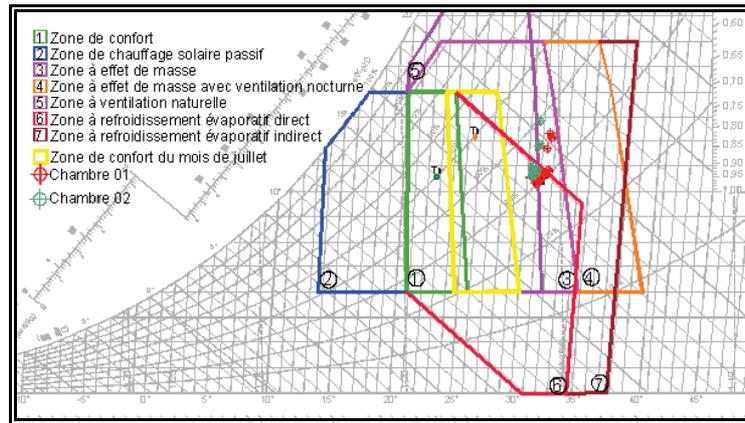


Figure VI- 24. Représentation sur le diagramme de Szockolay des températures de l'air moyennes des deux chambres pour une période à journées caniculaires (22- 23 juillet)
(Source. Auteur)

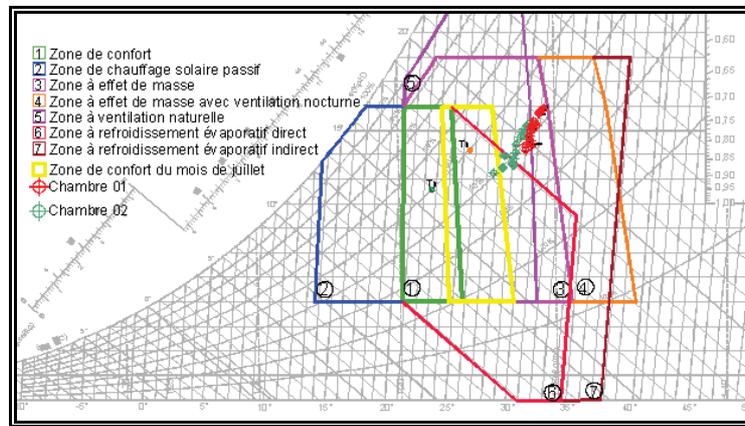


Figure VI- 30. Représentation sur le diagramme de Szockolay des températures de l'air moyennes des deux chambres pour une période à journées fraîches (24- 25 juillet)
(Source. Auteur)

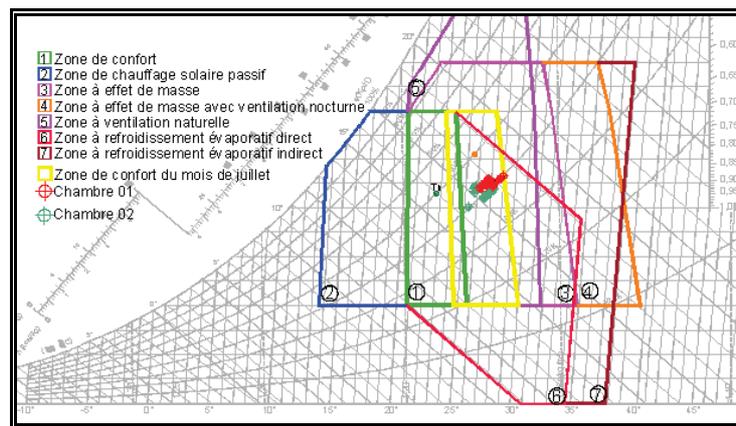


Figure VI- 25. Représentation sur le diagramme de Szockolay des températures de l'air moyennes des deux chambres pour une période à journées fraîches (26- 27 juillet)
(Source. Auteur)

- Durant les journées caniculaires du 22-23 juillet (Fig. VI-29) : malgré la couche supplémentaire du complexe de culture et de la végétation qui constituent une masse thermique, leur effet semble amoindri pour des températures extérieures très élevées. Tous les points des deux chambres sont situés en dehors de la zone de confort. La chambre 02 avec un toit végétal a aussi besoin que la chambre 01 de l'effet de masse, puisque ses points sont situés dans la zone (3). D'où, la confirmation qu'une importante épaisseur du substrat et une couverture foliaire élevée, sont recommandés durant les journées très chaudes. Ce que, attestent Theodosiou⁶⁷ et Kanellopoulou⁶⁸. D'autre part, vu que les points de cette période (22-23 juillet) sont situés dans l'intersection de la zone (3) avec la zone de ventilation naturelle (5) et la zone du refroidissement évaporatif direct (6), le confort dans les deux chambres peut être amélioré par ces éléments.
- Pour des journées fraîches (24-25 juillet) (Fig. VI-30), l'importance de la ventilation est confirmée puisqu'un seul point de la chambre 02 est situé dans la zone de confort du mois de juillet. Il s'agit des mesures effectuées à (22 :00h) avec ventilation naturelle. Sachant que les autres points de la chambre 02 se rapprochent de la zone de confort du mois de juillet, ils restent cependant avec les points de la chambre 01 dans l'intersection de la zone (3) à effet de masse et la zone (5) à ventilation naturelle.

Pour les journées fraîches du 26-27 juillet (Fig. VI-31), lorsque les deux chambres auront évacué la chaleur par le transfert thermique à travers les parois en absence de ventilation, tous les points sont dans la zone de confort du mois de juillet. Par contre, ceux de la chambre 02 avec un toit végétal se rapprochent de la zone de confort (1). Ce qui aurait pu être atteint avec une meilleure ventilation la nuit et l'arrosage du substrat.

Conclusion :

La présente investigation est basée sur la comparaison des températures de l'air, des températures surfaciques du toit et des humidités relatives mesurées dans une chambre avec un toit végétal (chambre 02) et une autre chambre sans toit végétal (chambre 01). Les résultats trouvés ont confirmé les hypothèses concernant l'importance de la protection des parois

⁶⁷ **Theodore G. Theodosiou.** «*Summer Period Analysis of The Performance of Planted Roof as a Passive Cooling Technique*», Energy and building, vol. 35, 2003, pp. 909-919.

⁶⁸ **Kanellopoulou, K.** «*Cooling Performance of Green Roofs*», PLEA 2008, 25^{ème} Conférence, Dublin, 22- 24 Oct.2008.

horizontales des radiations solaires qui génèrent des surchauffes incontournables dans le bâtiment en été sous le climat semi aride de Constantine.

En effet, la toiture végétale testée, dotée d'une fine couche de substrat et faiblement recouverte d'espèces succulentes, a pu rafraîchir passivement la chambre 02 durant la saison estivale alors qu'elle reçoit plus de radiations solaires sur le toit comparativement à la chambre 01. L'amélioration du taux d'humidité intérieur est relativement stable à 1.5%, en revanche la baisse moyenne des températures de l'air est de 1.2°C au mois de juin et de 1°C au mois de juillet. Il s'avère que la température de l'air intérieur est fonction de plusieurs paramètres, dont l'interrelation conditionne le comportement thermique de la toiture végétale et son efficacité.

On distingue d'abord, la variation de la température de l'air extérieur qui engendre une meilleure baisse des températures de l'air lorsque les journées sont relativement fraîches. Alors qu'elle diminue pour des journées caniculaires. Ceci, prouve que le substrat fin a une efficacité limitée durant ces journées, qui peut néanmoins être améliorée par l'arrosage. En effet, l'arrosage a permis une meilleure réduction des températures de l'air dans la chambre 02 lorsqu'il est effectué le matin.

Par ailleurs, la ventilation constitue le moyen le plus efficace quand à l'extraction de la chaleur du bâtiment (même lorsque celui-ci est protégé par un toit végétal), et ce, qu'elle soit simple (écart maximal avec la chambre 01 de 2.6°C) ou transversale (écart maximal de 3.5°C).

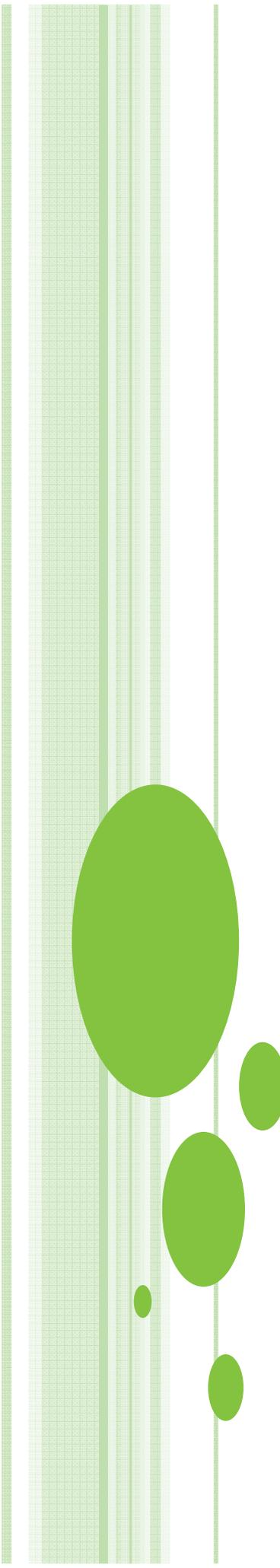
On a pu confirmer l'hypothèse concernant la densité de la couverture foliaire. Il s'avère que plus celle-ci est importante, plus la surface externe du toit conserve des températures basses et stables, puisque la végétation protège la surface externe du substrat des radiations solaires grâce à l'ombrage. Il est cependant important à signaler que c'est le substrat qui procure la plus importante protection de la surface externe du toit (vu la faible couverture foliaire de la toiture testée), grâce à son inertie et sa capacité thermique qui amortissent le transfert de chaleur vers l'intérieur. Pourtant ses caractéristiques agissent aussi sur l'efficacité thermique de la toiture végétale telle que, l'épaisseur faible du substrat qui semble être meilleure pour des journées clémentes lorsque la toiture est dotée d'une faible couverture foliaire. Mais aussi son albédo, sa teneur en eau et surtout sa capacité à retenir l'eau lorsque les températures de l'air sont extrêmes.

En ce qui concerne l'espèce végétale de type CAM (*Crassulacéen Acid Metabolism*), la végétation plantée sur le toit testé a apporté deux avantages précieux quand au rafraîchissement de l'air intérieur et extérieur. D'une part, l'ombrage qu'elle procure protège la surface externe du substrat et la surface externe du toit des fluctuations de températures importantes, ce qui consiste

en son rôle principal. Celui-ci est, tout de même, meilleur sous une végétation dense qu'une végétation éparse, mais aussi, sous une végétation rampante par rapport à une végétation à port érigé.

D'autre part, toutes les plantes succulentes testées ont eu le même comportement en réduisant leur transpiration durant les heures plus chaudes de la journée. Cependant elles ont amélioré les conditions climatiques lorsque l'air extérieur est chaud et sec, en humidifiant l'air et en baissant sa température. C'est au contact de la végétation que cette dernière est plus importante alors que l'humidification de l'air est plus ressentie à 1m du toit. Par ailleurs, l'effet de la végétation sur la baisse de la vitesse du vent n'est ressenti qu'au contact du feuillage.

Outre la baisse des températures de l'air intérieur et extérieur et les températures surfaciques de la dalle durant toute la journée, la toiture végétale engendre comme seul désavantage, la hausse des températures surfaciques externes durant la nuit (écart maximal de 6°C entre les deux toits). Ceci est dû au blocage du rayonnement de grande longueur d'onde, alors que la surface du toit de référence refroidit mieux.



Conclusion générale

Conclusion générale :

La consommation énergétique des bâtiments est en cesse accroissement et tend à être de plus en plus importante dans les années à venir, à cause de l'augmentation de la population urbaine et la vie moderne, qui imposent le développement perpétuel des technologies.

En effet, dans leur quête du confort thermique, pour des intérieurs de plus en plus chauds en saison estivale, les habitants des centres urbains trouvent dans l'usage des nouvelles technologies un havre de paix à leur mal- être. Les climatiseurs ont donc envahis les marchés du monde entier, comme solution instantanée aux problèmes de surchauffes dans les bâtiments. Ce qui est légitime puisque ces problèmes peuvent être très dangereux pour la santé humaine (été 2003 en France).

Toutefois, l'interaction entre l'urbanisation densifiée, l'architecture inadaptée au climat, la réduction des surfaces évaporatives et l'usage abusif des appareils énergivores causent des îlots de chaleur dans tous les centres urbains, dont les conséquences sont alarmantes. De ce fait, l'urgence de trouver des techniques de rafraîchissement passif adaptables autant pour les bâtiments existants que pour les futurs projets, est devenu rapidement le souci majeur dans les pays développés. L'objectif visé consiste à réduire la consommation énergétique, diminuer l'effet d'îlot de chaleur urbain et préserver l'environnement.

L'inspiration des nouvelles stratégies de rafraîchissement passif trouva sa source dans les techniques ancestrales utilisées dans les divers pays chauds, pour apprivoiser l'aridité du climat et rendre le confort thermique intérieur possible dans ces régions. On a développé donc, un regard neuf et de plus en plus admiratif sur la technicité de l'architecture vernaculaire qui tant à être climatique. En effet, celle-ci est caractérisée par une parfaite osmose entre l'homme, l'environnement et son habitat, permettant d'améliorer le confort thermique estival dans les habitations par différents stratagèmes. La conception était basée sur l'observation, le respect de la nature et une réflexion de bon sens qui permettaient à nos ancêtres de puiser de la nature les ressources aptes à rafraîchir passivement leurs intérieurs. De ce fait, la protection des radiations solaires était systématique, mais aussi, on exploita largement la puissance du vent et les sources évaporatives (eau et végétation) pour adoucir et améliorer le microclimat autour et dans les habitations.

La végétalisation jouxtant ou, sur l'enveloppe des bâtiments procure non seulement ombrage mais aussi crée un microclimat bénéfique pour le confort thermique extérieur et

intérieur, en humidifiant l'air et en réduisant les températures. La végétalisation des toits, anciennement utilisée comme régulateur thermique dans les pays nordiques mais aussi chauds, s'est vu revalorisée et modernisée depuis les années 70 dans le cadre : du développement durable, de la protection de l'environnement et de la préservation des ressources naturelles.

Le principe fondamental de la modernisation des toits végétaux était basé sur la réduction de leur poids, leur coût et leur entretien. Et ce, par le développement : d'une étanchéité anti-racine plus efficace à long terme, des composants légers pour le complexe de culture et surtout, par des études approfondies sur la phytosociologie et sur la flore. On s'est rendu compte que la végétation plantée sur la paroi la plus exposée aux aléas climatiques, doit survivre sans entretien régulier et doit résister aux situations les plus extrêmes et stressantes.

Deux nouveaux systèmes se sont donc rajoutés aux « *toitures- terrasses jardins* », dont la construction et l'entretien sont coûteux et contraignants. On distingue « *la végétalisation semi-intensive* » et « *la végétalisation extensive* » des toits. Cette dernière, présente de multiples avantages par rapport à l'ancien système, cependant toute conception de toit végétal doit tenir compte des contraintes caractérisant le site d'installation afin de choisir les composantes les plus adaptées pour la survie des plantes et la pérennité du toit végétal. Notons que les plantes préconisées pour le système extensif sont généralement des succulente de type CAM (crassulacées) dans la régulation de la transpiration en période de canicule leur permet de survivre dans des milieux arides, d'où leur choix impératif pour les régions chaudes.

De nos jours, les pays développés incitent ou imposent l'installation des toits végétaux extensifs dans le but de retenir l'eau des pluies, mais aussi pour leur capacité à réduire la consommation énergétique pour la climatisation. Cette approche constitue le principal axe de cette recherche, dont l'objectif est de vérifier la capacité de rafraîchissement intérieur d'une toiture à végétation extensive sous le climat semi- aride de Constantine.

Pour ce faire des mesures In situ, des températures de l'air, des températures surfaciques et des taux d'humidités à l'intérieur et à l'extérieur du bâtiment, ont été effectuées pour des espaces avec et sans toit végétal. La toiture végétalisée testée fût installée pour le profit de la présente recherche sur la terrasse accessible d'une habitation individuelle. Elle recouvre la surface totale d'une chambre, pour une épaisseur de substrat de 6cm et une couverture foliaire relativement faible constituée essentiellement de plantes crassulacées et de vivaces succulentes. Les résultats obtenus sont révélateurs de la parfaite convenance de cette stratégie de rafraîchissement passif sous un climat semi aride.

En effet, l'installation de la toiture végétale au dessus de la chambre testée a réduit les températures de l'air intérieur et les températures de la surface interne du toit, alors qu'une légère hausse du taux d'humidité a été constatée tout au long de la journée. Ceci est prometteur vu la faible épaisseur du substrat et le pourcentage de couverture foliaire. Le rafraîchissement passif obtenu à l'intérieur de la chambre avec un toit végétal est dû essentiellement à la protection de la surface externe du toit des radiations solaires intenses. La diminution des températures de la surface externe du toit et ses amplitudes thermiques est induite par l'ensemble : substrat (grâce à sa masse thermique) et végétation (par son ombrage). Par ailleurs, la végétation améliore aussi les conditions climatiques au dessus du toit grâce à l'évapotranspiration.

L'efficacité thermique de la toiture végétalisée reste cependant fonction de certains paramètres qui peuvent améliorer le rafraîchissement intérieur. Tels que, la ventilation nocturne continue et l'arrosage du substrat avant le levé du soleil. Par ailleurs, les caractéristiques du complexe de culture (épaisseur du substrat, capacité de rétention de l'eau, couleur...) ainsi que le pourcentage de couverture foliaire sont autant de paramètres, dont chacun agit sur le comportement thermique de la toiture végétale.

L'efficacité des plantes crassulacées est incontestable quand au rafraîchissement thermique intérieur, puisque leur rôle principal consiste en la protection des surfaces externes du substrat des surchauffes. Néanmoins, malgré leur mécanisme qui leur permet de réduire les pertes d'eau en été, elles participent tout de même à humidifier l'air extérieur et à baisser les températures au contact et au dessus de la paroi horizontale, ce qui est bénéfique pour le rafraîchissement intérieur mais aussi extérieur.

De ce fait, à travers les résultats de cette recherche, il est tout aussi important de prendre en considération dans les années à venir la possibilité de verdir les toits par le système extensif sous le climat semi aride de Constantine. Ce verdissement, permettra non seulement d'agrémenter les espaces urbains, d'harmoniser et d'intégrer les bâtiments dans leurs environnements, de rajouter des surfaces végétales et de purifier l'air grâce à la photosynthèse. Mais surtout, c'est sa performance en tant que stratégie écologique qui est mise en avant à travers cette recherche, puisqu'elle s'avère très efficace pour le rafraîchissement passif des bâtiments et l'économie d'énergie.

Propositions:

D'après l'analyse des résultats obtenus et les informations de base acquises de la partie théorique du présent travail. Mais aussi de la *literature review* concernant l'efficacité thermique de la toiture végétalisée, le constat qui ressort, est que certains paramètres doivent impérativement être pris en considération dès la conception de la toiture végétale. Puisqu'ils ont fait défaut et ont conditionné les résultats de la présente recherche. Pour cela, les paramètres cités ci-dessous auraient pu améliorer l'efficacité thermique de la toiture végétalisée testée. Et qu'ils devraient faire l'objet de plus d'attention pour les futures recherches ou réalisations de toiture à végétation extensive. Cependant, on ne peut généraliser ces propositions après une seule expérimentation, elles doivent encore être observées à long terme puisque la recherche dans le domaine de la végétalisation des toits en Algérie est encore vierge. On note donc pour :

Le complexe de culture :

- L'épaisseur du substrat : testée (6cm) peut être considérée comme convenable durant les mois les plus chauds sous le climat semi aride de Constantine, et pour une dalle à corps creux, si toute fois le substrat est arrosé de temps en temps. Et surtout s'il est mieux recouvert par la strate végétale. Par contre, lorsque l'arrosage est très limité en saison estivale, mieux vaut avoir une épaisseur plus importante, ou bien carrément avoir une composition de substrat conforme aux exigences des règlements et directives de constructions de ces toitures.
- La composition du substrat : doit avoir 10% de capacité de rétention de l'air à l'état saturé d'après la réglementation française des toits végétaux (annexe II). Puisque l'air se trouvant entre les particules est plus isolant que la terre végétale (utilisée dans cette recherche). En effet, cette dernière protège les surfaces inférieures plus par sa masse que par sa résistance thermique. Par ailleurs, le substrat doit être composé d'agrégats minéraux poreux rétenteurs d'eau tels que (pouzzolane, pierre ponce ou autre...) qui retardent l'assèchement du sol. Et donc, la capacité maximale de rétention en eau du substrat doit être élevée (CME) afin qu'il maintienne des températures surfaciques du substrat basses pour des températures de l'air extérieur élevées.
- La couleur du substrat : à défaut d'être de couleur claire, le substrat doit être suffisamment recouvert de végétation pour différer l'absorption des radiations solaires, l'augmentation des radiations infrarouges et l'assèchement du substrat.

- Le drainage : on ne peut prédire l'importance de son rôle sur l'efficacité thermique de la toiture végétalisée. Cependant, on pense que des agrégats minéraux poreux comme drainage auraient pu augmenter la rétention de l'eau dans le complexe de culture, ce qui aurait retardé la hausse des températures internes du substrat. D'autre part, on suppose que l'air contenu dans les vides entre les particules peut jouer le rôle d'isolant.
- L'arrosage : effectué le matin fût plus bénéfique (par rapport au soir) à la baisse des températures de l'air intérieur pour une journée caniculaire. De ce fait, pour les régions extrêmement chaudes et pour des substrats fins, l'intégration d'un système d'arrosage économique au «goutte à goutte» dans le complexe de culture (chapitre III) peut maintenir des températures basses dans le substrat. Et ce, lorsque celui-ci est administré à intervalle régulier durant la journée. Cependant la capacité de rétention de l'eau du substrat et du drainage doit être très importante afin de minimiser les pertes d'eau par évaporation.

La végétation :

- Espèces végétales : les espèces testées ont résisté à la sécheresse de l'été 2010 malgré la faible fréquence d'arrosage. Toutefois, une seule espèce s'est desséchée vers la fin juin (*Sedum album*) malgré l'arrosage administré les premiers mois de l'installation. Par ailleurs, d'après les résultats constatés de par la variation du port de la végétation (érigée, rampante...) ou de la forme des feuilles (larges ou oblongues...), on pense qu'il faut varier les espèces succulentes sur une toiture végétale. Puisque leur comportement (par rapport à l'ombrage, le rafraîchissement ou à l'humidification de l'air) n'est pas toujours identique et peut être complémentaire. Pour cela, des études sur la phytosociologie accompagnées d'observations sur au moins trois ans sont nécessaires selon Lassalle (2006).
- La couverture foliaire : en général on recommande une couverture foliaire importante, ce qui ressort aussi à travers les résultats de la présente recherche. Une couverture foliaire plus importante aurait pu maintenir des températures de substrat plus basses, mais aussi à l'intérieur de la pièce même avec une faible épaisseur du substrat. Pour cela, le mode de mise en œuvre par la plantation de micro mottes est meilleur que le bouturage.

La ventilation : la ventilation nocturne est à recommander pour tous les bâtiments sous le climat semi aride de Constantine d'après l'analyse bioclimatique de la ville. De ce fait, même pour un espace recouvert de toit végétal, les résultats sont formels sur la meilleure extraction de la chaleur de l'intérieur. Cependant celle-ci doit être continue durant les nuits fraîches afin de maintenir des températures de l'air basses sous le toit végétal durant la journée.

Pistes de recherches :

Il est clair que, la recherche dans le domaine de la végétalisation des toits peut être aussi variée que les avantages que ces derniers procurent. Les résultats obtenus de cette recherche restent spécifiques aux caractéristiques de la toiture végétalisée testée et ouvrent la voie à de nouveaux champs d'expertise. Que ce soit dans le domaine urbanistique, environnemental (vérification de sa capacité de rétention de l'eau et du retard à l'évacuation de l'eau), technique (possibilité d'isolation acoustique des bâtiments...) mais aussi en ce qui concerne l'intégration du bâtiment dans son environnement, ou autre...

Cependant ce travail est conclu par d'éventuels pistes de recherches proposées pour le futur dans le cadre de la vérification uniquement du comportement thermique de la toiture végétalisée. Par ailleurs, il est clair que c'est un domaine qui doit faire intervenir la collaboration des spécialistes en biologie végétale et en horticulture puisque la composition des substrats et comportement des végétaux n'est pas du ressort des architectes. De ce fait, les propositions émises,

Pour l'intérieur :

- Evaluer l'efficacité thermique d'une toiture végétale pour une couverture foliaire mieux développée, à long terme en été et en hiver. Puisque le climat de Constantine est contrasté et qu'en hiver c'est la diminution des pertes de chaleur qui est recherchée et qu'on ne peut négliger.
- Vérifier son efficacité en terme d'économie d'énergie pour la climatisation et le chauffage en utilisant des logiciels adaptés.
- Evaluer la toiture végétale pour divers toits tels que, dalle pleine, toit métallique ou autre. afin de vérifier son adaptabilité pour les terrasses inaccessibles ou les toits des bâtiments industriels qui génèrent d'importantes surchauffes.
- Evaluer la capacité de rafraîchissement ou d'isolation des toits végétaux lorsque les toits sont dotés de matériaux isolants.

Par ailleurs, la capacité de rafraîchissement de la toiture végétale est étroitement liée aux caractéristiques du complexe de culture. Pour cela, il faudra :

- Tester les composantes du substrat aussi élaboré que ceux que recommande la réglementation française, afin d'aboutir à un complexe de culture capable de retenir l'eau sous un climat à températures estivales extrêmes.
- Tester la longévité des plantes succulentes utilisées ou d'autres espèces et leur adaptabilité à long terme sous des conditions stressantes à travers les diverses saisons.
- Tester l'efficacité thermique des toits avec une seule espèce végétale ou plusieurs espèces, mais aussi pour différentes hauteurs, puisque certaines plantes semblent plus efficaces la nuit que le jour.

En ce qui concerne le confort thermique extérieur, il faudra:

- Vérifier l'apport réel d'une toiture végétalisée quand à la diminution de l'îlot de chaleur urbain ou la création de microclimat et son impact sur l'environnement immédiat du bâtiment, y compris au niveau du sol.
- Vérifier son impact sur le confort thermique extérieur sur des terrasses utilisées comme espaces complémentaires (très répandues en Algérie) avec les indicateurs de confort thermique (par des logiciels).
- Vérifier son efficacité à améliorer le microclimat dans un quartier par rapport à d'autres végétalisations de proximité telles que : la végétalisation des murs ou la plantation d'arbres au contact des bâtiments, et ce dans le cadre de la création de quartier durable.

Livres :

1. **ADEME** (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie). « *Réussir un projet d'urbanisme durable* », Editions Le Moniteur, Paris, 2006. p. 353.
2. **BONDUEL, Philippe**. « *Jardins de poche* », Editions Solar, Paris, 2005. p. 95.
3. **C.T.U.R** (Centre d'Etude des Transports et du Tourisme). « *Végétal et entrées des villes* », Edition C.T.U.R, France, 1993. p 135.
4. **CAPDEROU, M.** « *Atlas solaire de l'Algérie, Aspect énergétique* », Tome 2, OPU Alger, 1985.
5. **CHALINE, Claude**. « *Les étapes d'un interface complexe entre ville et environnement* » In « *Ville et environnement* », Editions Ellipses, coll. «Carrefours», Paris, 2005.
6. **COME, Daniel G. et Françoise Corbineau**. « *Dictionnaire de la biologie des semences et des plantes* », Edition TEC & DOC, Paris, 2006.
7. **COURTAT, Emilie**. « *Aménager balcons et terrasses* », Edition Hachette livre, Paris, 2007. p. 143.
8. **DAJOZ, Roger**. « *Précis d'écologie* », 8^e éd., Edition DUNOD, Paris, 2006. p. 631.
9. **DUCHAUFOUR, Philippe, E. WINFRIED and H. BLUM**. « *Introduction à la science du sol : sol, végétation, environnement* », 6^e éd. Edition Dunod, Paris, 2001. p. 331.
10. **Encyclopédie de botanique et d'horticulture**. « *Plus de 10 000 plantes du monde entier* », Edition Botanica, Paris, 2003-2005.
11. **ESCOURROU, Gisèle**. « *Le climat et la ville* », Editions NATHAN, France, 1991. p. 190.
12. **FAURIE, Claude et al.** « *Ecologie ; approche scientifique et pratique* », 5^e éd. Editions TEC & DOC, Paris, 2006. p. 407.
13. **FAZIO, Faustine M.** « *Le jardin en terrasse et balcon* », Editions De Vecchi S.A., Paris, 1989. p. 63.
14. **FURLANI, A.Pedoja**. « *Comment fleurir terrasse et balcons* », Editions De Vecchi S.A., Paris, 1996. p. 167.
15. **GAUZIN-MÜLLER, Dominique**. « *L'architecture écologique ; 29 exemples européens* ». Editions Le Moniteur, Paris, 2001. p. 287.
16. **GEORGET, P.** « *La floriculture* », 3^e éd. Edition Dunod, Paris, 1966.
17. **GIVONI, B.** « *L'homme, l'architecture et le climat* », Edition Le Moniteur, Paris, 1978. p. 460.
18. **HOPKINS, William G.** « *La physiologie végétale* », 2^{ème} éd. Edition De Boeck, Bruxelles, 2003. p. 514.
19. **HUETZ DE LEMPS, A.** « *La végétation de la terre* », Editions Masson et Cie, Paris, 1970. p. 113.
20. **LARCHER, Jean Luc et Thierry GELGON**. « *Aménagement des espaces verts urbains et du paysage rural* », 3^e éd. Edition TEC & DOC, Paris, 2000. p. 502.
21. **LASSALLE, François**. « *Végétalisation extensive des terrasses et toitures : 34 réalisations exemplaires* », Editions Le Moniteur, Paris, 2006. p. 219.

22. **LHOMME, Jean-Christian.** «*La maison économe* », Editions Delachaux et Niestlé SA, Paris, 2005.
23. **LIEBARD, Alain et André De Herde.** «*Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique* », Editions le Moniteur, Paris, p. 773.
24. **MINISTERE DE L'HABITAT.** «*Recommandations Architecturales*», éditions ENAG, Alger, 1993.
25. **MOUCHEL, A. et T. BALAYER.** «*La couverture : Etanchéité des toitures- terrasses*», Editions Eyrolles, Paris, 1978. p.289.
26. **RAINER, Roland.** «*Les extérieurs vivants* », « s. éd. », Suisse, 1972. p. 227.
27. **RISSER, Pierre- Alexandre.** «*Terrasses et balcons en ville* », Editions Solar, Paris, 2006. p. 119.
28. **ROGERS, Richard.** «*Des villes pour une petite planète* », éd. Le Moniteur, 2000.
29. **SAINT MARC, Philippe.** «*La socialisation de la nature* », 7^e éd. Editions Stock, France, 1975. p. 392.
30. **SCIAMA, Yves.** «*Le changement climatique ; une nouvelle ère sur la terre*», Editions Petite encyclopédie LAROUSSE, France, 2007. p.128.
31. **SOULIER, Louis.** «*Espace vert et urbanisme* », 2^e éd. «s. éd.», «s.l.». « s. d. ». p. 328.
32. **STEVENS, David.** «*Terrasses et petits jardins* », Editions Gründ, Paris, 1988.
33. **STEVENS, David.** «*Terrasses et petits jardins*», Editions Gründ, Paris, 1988. p. 80.
34. **WATSON, Donald et Roger CAMOUS.** «*L'habitat bioclimatique*», Edition L'Etincelle, Canada, 1986. p. 186.
35. **WRIGHT, David.** «*Soleil, Nature, Architecture* », éd. Parenthèse, France, 1979.

Mémoires, thèses et cours :

1. **ABDOU, Saliha.** «*Investigation sur l'intégration climatique dans l'habitation traditionnelle en régions arides et semi-arides d'Algérie: Cas du Ksar de Ouargla et de la Medina de Constantine* » Thèse de doctorat d'état Université de Constantine, 2004.
2. **ABDOU, Saliha.** «*La thermique dans le bâtiment*», cours de post graduation, option Architecture Bioclimatique, Université de Constantine, 2007-2008.
3. **BACHA NASROUCHE, Hinda.** «*Approche écologique, une ville saine pour un développement durable- cas de Constantine*»- Mémoire de magistère, Université de Constantine, 2007.
4. **BENCHEIKH, Hamida.** «*Etude et réalisation d'un système de refroidissement passif en utilisant une toiture radio- évaporative dans les climats chauds et arides* », thèse de doctorat, Université de Constantine, 2007.
5. **BENHALILOU, Karima.** «*Impact de la végétation sur le confort hygrothermique estival du bâtiment* », Mémoire de magistère, Université de Constantine, 2008.

6. **BOIVIN, Marie-Anne.** «*Influence de l'épaisseur du substrat de culture et du microclimat sur l'acclimatation de six espèces vivaces herbages cultivées 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, 1999.
7. **BOUAKAZ, Nawel.** «*La relation entre l'îlot de chaleur urbain, phénomène du changement climatique et la densité du plan bâti : cas de la ville d'Alger*», magister en architecture bioclimatique, Université Mentouri de Constantine, 2005.
8. **DEBACHE BENZEGOUTA, Samira.** «*La nature et la ville* », cours Post-Graduation, Université de Constantine, 2007-2008.
9. **EMILSSON, Tobias.** «*Extensive Vegetated Roofs in Sweden Establishment, Development and Environmental Quality*», Thèse de doctorat, Swedish University of Agricultural Sciences, 2005.
10. **HENDERSON, Beau.** «*Human-Driven Extensive Greenroof Design* », Master of Landscape Architecture, Virginia Polytechnic Institute & State University, June 12, 2003.
11. **HILTEN, N. Roger.** «*An Analysis of the Energetics and Stormwater Mediation Potential of Greenroofs*», Mémoire de master en science, Université GEORGIA, 2005.
12. **LANHAM, Johnnel Kiera.** «*Thermal Performance of Green Roofs in Cold Climates*», mémoire de master en science, Queen's University Kingston, Ontario, Canada, Septembre 2007.
13. **LEROUX, François,** «*Intégration végétale des bâtiments, contributions environnementales sur une maison individuelle*», Mémoire de formation continue- Architecture HQE, Ecole d'Architecture de Lyon, Session 2005.

Articles publiés :

1. **AKBARI, H., M. POMERANTZ et H. TAHA.** «*Cool Surfaces and Shade Trees to Reduce Energy Use and Improve Air Quality in Urban Areas*», Elsevier Science, Solar Energy, Vol. 70, no 3, 2001, pp. 295–310.
2. **ALEXANDRI, Eleftheria and Phil JONES.** «*Ponds, Green Roofs, Pergolas and High Albedo Materials; Which Cooling Technique for Urban Spaces?* », PLEA 2006, 23^{ème} conférence, Genève, 6-8 Sep. 2006.
3. **ALEXANDRI, Eleftheria et Phil JONES.** «*Developing a one- Dimensional Heat and mass Transfer Algorithm for Describing the Effects of Green Roofs on the Built Environment: Comparison with Experimental Results*», Building and Environment, Vol. 4, 2007. pp. 2835-2849.
4. **ALEXANDRI, Aleftheria and Phil JONES.** «*Temperature Decreases in an Urban Canyon Due to Green Walls and Green Roofs in Diverse Climates*», Building and Environment, vol.43, 2008. pp. 480–493.
5. **AMER, H.Emad.** «*Passive Options for Solar Cooling of Buildings in Arid Areas*», Energy, vol .31, 2006, pp.1332-1344.
6. **ATTIA, Shady.** «*The Role of Landscape Design in Improving the Microclimate in Traditional Courtyard-Buildings in Hot Arid Climates*», PLEA 2006, 23^{ème} conference, Genève, 6- 8 Sept. 2006.

7. **CHIH, Fang Fang.** «*Evaluating the Thermal Reduction Effect of Plant Layers on Rooftops*», Energy and Building, vol. 40, 2008, pp. 1048-1052.
8. **CRUZ DO NASCIMENTO, Wânia and Aloísio LEONI SCHMID.** «*From the Modern Toits Jardins to the Current Green Roofs: Can a Hit Become Classic?*», PLEA 2008, pp. 684, 25^{ème} Conference, Dublin, 22-24 Octobre 2008.
9. **DEL BARIO PALOMO, Elena.** «*Analysis of the Green Roofs Cooling Potential in Buildings*», Energy and Buildings, vol. 27, 1998, pp. 179-193.
10. **KANELLOPOULOU, Kleanthi.** «*Cooling Performance of Green Roofs*», PLEA 2008, 25^{ème} Conférence, Dublin, 22- 24 Oct.2008.
11. **KUMAR, Rakesh and S.C.KAUSHIK.** «*Performance Evaluation of Green Roof and Shading for Thermal Protection of Building* », Building and Environment, Vol. 40, 2005, pp. 1505-1511.
12. **LA ROCHE, Pablo.** «*Low Cost Green Roofs for Cooling: Experimental Series in a Hot and Dry Climate*», PLEA- 26^{ème} conférence, Quebec, Canada, 22-24 Juin 2009.
13. **LAAR, Michel and Friedrich Wihelm GRIMME.** «*Thermal Comfort and Reduced Flood Risk Through Green Roofs in the Tropics*», PLEA -23^{ème} conférence, Genève, 6-8 Sep. 2006.
14. **LAZZARIN, M. Renato, Francesco CASTELLOTTI and Filippo BUSATO.** «*Experimental Measurements and Numerical Modelling of a Green Roof*», Energy and Buildings, vol. 37, 2005, pp.1260–1267.
15. **LIU, K. and J. MINOR.** «*Performance evaluation of an extensive green roof*», NRC-CNRC, NRCC-48204, 2005, Fichier PDF, [En ligne] <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/irepubs>.
16. **LIU, Karen and A.BASKARAN.** «*Des toitures- jardins pour une meilleur durabilité des enveloppes des bâtiments* », Solution constructive n°65, CNRC-NRC, Canada, 2005.
17. **LIU, Karen.** «*Sustainable Building Envelope- Garden Roof System*», NRC-CNRC, NRCC-47354, Canada, 2004, Fichier PDF, [En ligne] <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/ircpubs>.
18. **LIU, Karen.** «*Vers des systèmes de couvertures durables*», NRCC-48173f, NRC-CNRC, Canada, 2005. Fichier PDF, [En ligne], In <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca>.
19. **NIACHOU,A., K.PAPAKONSTANTINO, M.SAMTAMOURIS and G.MIHALAKAKOU.** «*Analysis of the Green Roof Thermal Properties and Investigating of its Energy Performance*», Energy and Building, vol. 33, 2001, pp.719-729.
20. **ONMURA, S., M.MATSUMOTO and S.HOKOI.** «*Study on Evaporative Cooling Effect of Roof Lawn Gardens*», Energy and Environment, vol. 33, 2001. pp. 653-666.
21. **SAILOR, D.J., D.HUTCHINSON and L.BOKOVOY.** «*Thermal Property Measurements for Ecoroof Soils Common in Western U.S.* », Energy and Building, vol. 40, 2008, pp.1246-1251.
22. **SANTAMOURIS, M., C.PAVLOU, P.MIHALAKAKOU, A.SYNNEFA, A.HATZIBIRO, P.PATARGIAS.** «*Investigating and Analysing the Energy and Environmental Performance of an Experimental Green Roof System Installed in a Nursery school building in Athens, Greece*», Energy, vol. 32, 2007, pp. 1781–1788.
23. **SHAHIDAN, Mohd Fairuz and Philip JONES.** «*Plant Canopy Design in Modifying Urban Thermal Environment: Theory and Guidelines*», PLEA 2008, 25^{ème} conférence, Dublin, 22-24 Oct. 2008. pp179.

24. **STEPHENSON, D.G.** «*Températures extrêmes à la surface extérieure des bâtiments*», Publication n° CBD-47-F, Publié à l'origine en Août 1966. (Page consultée le 30-04-2008), [En ligne] www.darkweb.nl.
25. **TAKAKURA, T., S.KITADE and E.GOTO.** «*Cooling Effect of Greenery Cover Over a Building*», Energy and building, vol. 31, 2000, pp. 1-6.
26. **TEEMUSK, Alar et Ülo MANDER.** «*Greenroof potential to reduce temperature fluctuations of a roof membrane: a case study from Estonia*», Building and Environment, 2008.
27. **THEODOSIOU, G.Theodore.** «*Summer Period Analysis of The Performance of Planted Roof as a Passive Cooling Technique*», Energy and building, vol. 35, 2003, pp. 909-919.
28. **TIBBETTS, D.C. et M.C.BAKER.** «*Revêtements des toits en agrégats minéraux* ». Publication n° ; CBD-65-F. Publié à l'origine en Sept. 1967. In www.darkweb.nl.
29. **WONG, Nyul Hien, Chen YU, Leng Ong CHUI and Angelia SIA.** «*Investigation of Thermal Benefits of Rooftop Garden in the Tropical Environment* », Building and Environment, vol. 38, 2003, pp. 261- 270.
30. **WONG, Nyuk Hien, Chen YU, Siu Tee WONG and Calvin CHUNG.** «*Exploring the Thermal Benefits of Plants in Industrial Areas with Respect to the Tropical Climate*», PELA 2006, 23^{ème} conférence, Genève, 6-8 Sep. 2006.
31. **YU, Chen et Nyuk Hien WONG.** «*A green experiment conducted in the tropical climate*», PLEA 2006 – 23^{ème} Conférence, Genève, 6-8 September, 2006.

Rapports d'études et comptes rendus de colloques et congrès :

1. **ABDULAC, Samir.** «*Traditional Housing Design in Arab Countries*», In «*Urban Housing*», Sous la direction de Margaret Bentley, Edition Sevckenko, 1982, p.5, (Fichier PDF consulté le 27-02-2008), [En ligne] www.archinet.org.
2. **ARENE** (Agence régionale de l'environnement et des nouvelles énergies). «*Toitures végétalisées extensives*», Fichier PDF, (consulté en Janv. 2010), [En ligne], www.arenidf.org.
3. **BANTING, Doug et al.** «*Report on the Environmental Benefits and Costs of Green Roof Technology for the City of Toronto*», Earth and Environmental Technologies (OCE-ETech), Ryerson University, Toronto, Ontario, 2005. p. 63.
4. **BASS, B. and B. BASKARAN.** «*Evaluating Rooftop and Vertical Gardens as an Adaptation Strategy for Urban Areas*», NRCC-46737, Projet N° A020, NRC-CNRC, Canada, 2003. p. 111. Fichier PDF, [En ligne] <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/ircpubs>.
5. **BELABI, Rafik et Phillipe FAUCON.** «*La contribution thermique des toitures végétalisées*» colloques toitures végétalisées, 5.12.2007, fichier PDF, (consulté le 07-06-2008), [En ligne], www.cstb.fr.
6. **CASANOVAS, Xavier et Ramon GRAUS.** «*Au sujet des valeurs bioclimatiques dans la réhabilitation de l'architecture traditionnelle méditerranéenne* » In «*Connaître l'architecture traditionnelle pour la mettre en valeur*», Outil 1, Fichier PDF, [En ligne] www.rehabimed.net. pp 78-86.

7. **CHRISOMALLIDOU, N., M. CHRISOMALLIDIS and T. THEODOSIOU.** « *Principes de conception et applications* », In « *Concevoir des espaces extérieurs en environnement urbain : une approche bioclimatique* », projet RUROS, CRES, Grèce, 1998- 2002. p. 64.
8. **LAROCHE, Dany, Anne-Marie MITCHELL et Sophie PELOQUIN.** « *Les toits verts aujourd'hui ; c'est construire le Montréal de demain* », Mémoire présenté à L'office de consultation publique de Montréal dans le cadre du nouveau plan d'urbanisme 2004, 30 juin 2004. p. 21.
9. **LAVOIE, Brigitte, Valéry SIMARD et Manon TARDIF,** « *Toiture végétale à l'ITA : un projet d'étudiant qui voit grand...* », Fichier PDF (consulté le 06-06-2008), [En ligne], www.aqpere.qc.ca.
10. **MOURTADA, Adel.** « *Consultation nationale sur les perspectives d'application de la réglementation thermique et énergétique des bâtiments neufs* », MED-ENEC, Tunis, 2008, Fichier PDF (consulté en Octobre 2008).
11. **PECK, Steven and Monica KUHN.** « *Lignes directrices de conception des toits verts* », Fichier PDF, (consulté en Janv. 2010), [En ligne], www.cebq.org-Lignesdirectricesdeconceptiondetoitsverts. p. 22.
12. **SANTAMOURIS, Matheos.** « *Passive cooling of buildings* », Advances of Solar Energy, ISES, James and James Science Publishers, London, 2005. p. 57.
13. **TAREB,** « *Intégration architecturale* » In « *The Low Energy Architecture Training Course* ». London Metropolitan University, 2004. Fichier PDF, [En ligne], www.iee-library.eu.

Revues et Guides :

1. **ANAH** (Agence Nationale pour l'Amélioration de l'Habitat ». « *Confort d'été* », Fiche technique, Fichier PDF, [En ligne] www.anah.fr.
2. **BLUMENTHAL, Max.** « *Le végétal et l'architecture* », Revue Technique et Architecture, N° 313. Edition Regirex, France, Janv.- Fév. 1977.
3. **CAILLE, Emmanuel.** « *Façades et toitures végétales* », Revue AMC- Le Moniteur Architecture, n° 126, Juin- Juillet 2002.
4. **CHEMETOFF, Alexandre, Jacques COULON et Alain MARGUERIT.** « *Le végétal et l'architecture* », Revue Technique et Architecture, N° 313, Edition Regirex, France, (Janv.- Fév 1977).
5. **CORBET, Michel.** « *La technique des jardins sur dalles* », Article In « *Le végétal et l'architecture* », revue Technique & Architecture, n°313, (Jan.- Fev. 1977), Edition, Regirex, France.
6. **CREGUT, Alain.** « *La toiture végétalisée: une technique d'aménagement durable* », Revue Technique du solaire thermique, [En ligne], www.resosol.org.
7. **DALI, Kamel.** « *Mise en application de la réglementation thermique des bâtiments* », la Lettre, Bulletin trimestriel de l'APRUE, n° 10, (Dec. 2006), Fichier PDF, (En ligne) www.aprue.org.dz.
8. **EYCKENS, M. et M.P. Kerstenne.** « *Toitures vertes: classification, composition et caractéristiques (1)* », In Roof Belgium (Edition 99/5. p.26), (page consultée le 06/06/2008), [En ligne], <http://www.dakweb.nl/rbf/99inhoud.htm>.

9. **HAMOUDA, C. et A. Malek.** «Analyse théorique et expérimentale de la consommation d'énergie d'une habitation individuelle dans la ville de Batna», Revue des Energies Renouvelables, Vol. 9, n°3, (2006). pp.211- 228.
10. **IBGE** (Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement). «Redéfinir la notion de confort thermique», Guide pratique pour la construction et la rénovation durable de petits bâtiments, Recommandation pratique CSS13, Fév. 2007, Fichier PDF.
11. **Intemper.** «Système de toitures végétalisées », Fichier PDF, [En ligne], www.Intemper.com.
12. **LEGGET, R.F. and C.B. CRAWFORD.** «Arbres et immeubles» in «Digest de la construction», N° : CBD-62-F, Canada, 1967.
13. **MUSY, Marjorie.** «Le rôle climatique de la végétation urbaine », CERMA, Revue Culture Et Recherche, N° 113, (automne 2007). Fichier PDF, [En ligne] <http://www.cerma.archi.fr>.
14. **OFEFP** (L'office Fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage). « Cahier de l'environnement : Toits végétalisés », n°216, Berne, 1995.
15. **SONELGAZ.** "Guide confort".
16. **TORRES, Emmanuel.** «L'économie de l'environnement appliquée à la ville», In «Développement durable et territoires », Revue semestrielle, n°37, Editions L'Harmattan, Université de Lille- France, (1^{er} semestre 2001). p. 173.
17. **WOLFGANG, Grün.** «La verdure sur les façades et les toitures », Revue Technique & Architecture, n°313, Jan.- Fev. 1977, Edition, Regirex, France.

Documents techniques :

1. **Adivet, CSFE, SNPPA, UNPE.** «Règles Professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées», 2^e éd. Paris, novembre 2007. p. 37.
2. **AISSAOUI, S.** «Consommation d'électricité basse tension», récapitulatif de la consommation en électricité des abonnés ordinaires, Direction de Distribution de l'électricité et Gaz Est, Constantine, 2009.
3. **Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (C.G.S).** «Charges permanentes et charges d'exploitation », DTR. B.C. 2.2, C.G.S., Alger, 1988. p.27.
4. **CNERIB.** «Travaux d'étanchéité des toitures : terrasses et toitures inclinées : support en maçonnerie», Document Technique Règlementaire, D.T.R. E4-1, CNERIB, Alger, 2005.
5. **Meple.** « Cahier des clauses techniques de définition et de mise en œuvre pour toitures végétalisées ; Procédés Meps Sepervivum », MEPLÉ, 9^e éd., France, Juil. 2006.
6. **Office météorologique National d'Alger.** «Tableaux récapitulatifs des données météorologiques de la ville de Constantine de 1980-2005 ».
7. Plan de réalisation d'une habitation individuelle R+2.
8. **Plan directeur de quartier n°29298 B.** «Aménagements extérieurs et concept énergétique», Les constructions Pac La Chapelle - Les Sciens. Fichier PDF (consultée le 11.01.2008).
9. **SOPREMA- Algérie.** «Etanchéité terrasse jardins», vidéo In «Etanchéité bitume modifié SBS», [CD-ROM], Soprema- Algérie.

10. **SOPREMA.** « *Sopranature, sur toiture de pentes ≤ 20%* », Cahier de Prescriptions de Pose (CCP), N° 02/055F, éd. Du 20 dec. 2002, France. 2002.
11. **Toit vert.** « *Cahier des Charges : semis de pousse de sedum sur substrat minéral* » (Système B), notice de prescription de pose, Edition Toit vert sarl, Mise à jour février 2008, Fichier PDF (consulté le 22-04-2008), [En ligne] <http://www.toitvert.fr>.
12. **Vertige.** « *l'ABC de la végétalisation selon Vertige* », Fiche technique, Fichier PDF, (consultée le 23-04-2008), [En ligne] www.vert-tige.eu. p.02.
13. **Toit Vert Sarl.** « *Toitures végétalisées : Substrat spécial pour végétation extensive* », Fiche technique, (page consultée le 11-11-2008), [En ligne], www.toitvert.fr.

Lois et normes :

1. **Décret exécutif n°2000-90.** « *Portant réglementation thermique dans les bâtiments neufs* », Journal officiel de la république algérienne, Fichier PDF.
2. **Loi n° 07-06 du 13 mai 2007.** « *Relative à la gestion, à la protection et au développement des espaces verts* » Journal officiel de la république algérienne, Fichier PDF.
3. **Ministère de l'emploi de la cohésion sociale et du logement.** « *La Réglementation Thermique 2005* », Fichier PDF, (Consulté le 29/04/08) [En ligne] www.CSTB-rt-batiment.fr.

Journaux et brochures :

1. **BOUSAID, A.** « *Pour un programme de réhabilitation des espaces verts* », Journal El Watan, Algérie, Jeudi 03-1-2009, p.11.
2. Brochure Verdura. « *les bacs Hydopacs* », 2008.
3. **Canevaflor,** « *Toitures et murs végétalisées* », Fichier PDF, [En ligne] www.canevaflor.com.
4. Eternit. « *Système Verdura, système de toiture végétalisée « prête- à- poser* », Brochure, Eternit, France, 2008.
5. Siplat, Brochure 2008.
6. Sopranature- Soprema. « *Toiture végétalisées* », Brochure n° 08/006, Studio Mark C.Ashcroft, Strasbourg, 2008.
7. Soprema Algérie, Borchure 2009.
8. Verdura, Eternit, Brochure 2008.

Encyclopédies et dictionnaires :

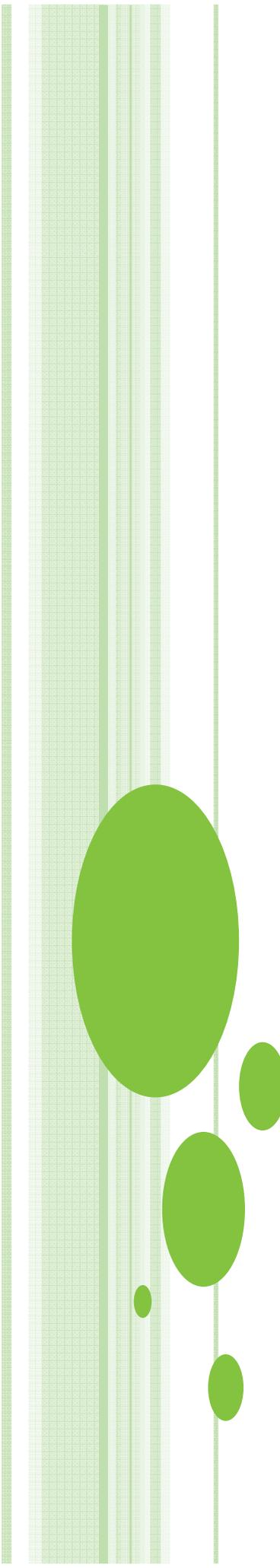
1. **Dictionnaire Hachette,** édition Hachette livre, 2005.
2. **Dictionnaire Sensagent.** « *Quinzième cible HQE* », (Page consultée le 12-2009), [En ligne], <http://dictionnaire.sensagent.com>.
3. **Encyclopédie Ekopedia.** « *Toit vert : les composantes de la toiture végétalisée* », (page consultée le 28-12-09), [En ligne], <http://fr.ekopedia.org>.
4. **Encyclopédie Larousse.** « *La toiture végétalisée* », (page consultée le 28.12.09), [En ligne], <http://www.larousse.fr>.
5. **Encyclopédie Wikipédia.** [En ligne], <http://fr.wikipedia.org>.

6. **Microsoft ® Encarta ® 2007.** © 1993-2006 Microsoft Corporation. Tout droits réservés. [CD- ROM].
7. **Microsoft ® Encarta ® 2008.** © 1993-2007 Microsoft Corporation. Tout droits réservés [CD-ROM].
8. **Microsoft® Encarta®** [En ligne] 2009.

Sites Internet :

1. **ADIT-AFP.** «*Toitures végétalisées : un procédé ancien, des techniques d'avenir*», (article paru en 2004), [En ligne], <http://www.actu-environnement.com>.
2. **Adivet.** «*Principes et techniques*», (page consultée en Oct. 2009), [En ligne], <http://www.adivet.net>.
3. **Adivet.** «*Questions fréquentes*», (page consultée en Mars 2008), [En ligne], <http://www.adivet.net>.
4. **AFFOLTER, Vincent et Lucas PRETRE.** «*L'écosystème forestier*», (page consultée 13-01-2008), [En ligne] <http://www.lpretre.com/travaux/forêt/>.
5. **ARENE** (Agence Régionale de l'Energie). «*Confort d'été en Provence-Alpes-Côte d'Azur : traitement des espaces extérieurs*», Fichier PDF, [En ligne] www.arena.fr.
6. **CSTB.** «*Technique du solaire thermique. Architecture : la toiture végétalisée... à l'étranger...*», (page consultée le 03-03-2008), [En ligne], www.resosol.org.
7. **Ecosedum.** «*Produits de végétalisation de surfaces horizontales et inclinées*», (Article paru le 27/11/03), [En ligne], <http://www.ecovegetal.fr/misenoeuvre.htm>.
8. **Ecovegetal.** «*Entretien des systèmes de végétalisation extensive et semi- intensive*», fichier PDF (consultée le 23-04-2008) [en ligne], www.ecovegetal.fr.
9. **Ecovegetal.** «*Végétalisation des toitures*», (page consultée le 06-04-2008), [en ligne] www.ecovegetal.fr.
10. **GUYOT, M.A.** «*L'arbre urbain : un composant de confort pour l'architecture et l'espace public*», (page consultée le 13-01-2008), [En ligne], www.arbreurbain.com.
11. **IDM.** «*Sedums renforcé : tapis de sedums précultivé*», édition 03/05 Fichier PD. [En ligne] www.vegetalid.com.
12. **Lassalle, François.** «*Toitures végétalisées : Un retard français que l'excellence des entreprises peine à combler*», (Page consultée le 27-12-2009), [En ligne], www.actu-environnement.com.
13. **MICHEL, Sylvain.** «*Toitures végétalisées obligatoires à Toronto*», (Article paru le 29 Mai 2009, consultée le 29-12-09), [En ligne], www.ddmagazine.com.
14. **Nahla Rif.** «*L'habitat durable en Algérie*», (page consultée en Oct. 2008), [En ligne] <http://adelahfir.blogspot.com>.
15. **Rairies Montrieux.** 2008. [En ligne] www.rairies.com.
16. **Stéphanie Philippidès.** (page consultée en 01-2008), [En ligne] In www.notre-planete.info.
17. **Toit vert.** «*Toitures inclinées*», (page consultée le 22-04-2008), [En ligne] <http://www.toitvert.fr>.

18. **Vegetalid.** «*Foires aux questions*», (page consultée le 22-04-2008), [En ligne] <http://www.vegetalid.com>.
19. «*Architectures ; Ici, ailleurs, autrement*», (Page consultée le 09.2005), [En ligne] www.fondationpourlarchitecture.be.
20. «*Ilot de fraîcheur*», (page consultée le 13-01-2008), [En ligne], www.ecologieurbaine.net.
21. «*La toiture végétalisée : Une technique d'aménagement durable*», (Page consultée le 07-06-2008), [En ligne], <http://www.toiture-bio.com/toitvert.htm>.
22. «*Le bien-être thermique*», (Page consultée le 02.02.2008), [En ligne] www.perso.wanadoo.fr.
23. «*Le besoin d'une nature urbaine : un rapport de recherche*», (page consultée le 13-01-2008), [En ligne], <http://www.evergreen.ca>.
24. «*Le système terre- atmosphère et l'effet d'albédo*», (page consultée le 20-01-2008), [En ligne] <http://www.meteofrance.com>
25. «*Toiture végétalisée*», (page consultée le 11-01-2008), [En ligne], <http://www.init-environnement.com>.
26. «*Normes et réglementations*», (Page consultée le 30-12-2009) [En ligne] www.pages.energies.com). *Végétalisation des bâtiments : mettons le coût- vert !* », (Paru le 19 octobre 2008, consultée le 30-12-09), [En ligne] <http://www.lyon-democrate.org>.
27. [En ligne] [http:// www.siplat.fr](http://www.siplat.fr).
28. [En ligne] [http:// www.vegetorpin.fr](http://www.vegetorpin.fr).
29. [En ligne] [http:// www.Wikipédia.com](http://www.Wikipédia.com).
30. [En ligne] <http://www.aujardin.info>. (Page consultée le 04-2010).
31. [En ligne] <http://www.davarree.free.fr>. (Page consultée le 27-12-2009 et le 01-04-2010).
32. [En ligne] <http://www.ec.gc.ca>.
33. [En ligne] <http://www.gardening.eu>, (page consultée le 02-04-2010).
34. [En ligne] <http://www.googleearth.com>, 2009.
35. [En ligne] <http://www.jardindupicvert.com>, (page consultée le 02-04-2010).
36. [En ligne] <http://www.lithops.net>. (page consultée le 02-04-2010).
37. [En ligne] <http://www.météo.infospace.ru>, (page consultée le 01-07-2010 et 29-07-2010).
38. [En ligne] <http://www.pépinière-bouetservat.com>.
39. [En ligne] <http://www.public.fotki.com>. (page consultée le 02-04-2010).
40. [En ligne] <http://www.rooftopgardens.ca>.
41. [En ligne] <http://www.vegetalid.com>.
42. [En ligne] <http://www.wondertree.co.uk>.



Annexes

La démarche HQE et ses cibles :

La Haute Qualité Environnementale (ou HQE) est la dénomination de l'approche française de l'architecture écologique promue par les membres de l'association HQE.

La HQE est une démarche proposée aux Maîtres d'Ouvrage et aux intervenants de la construction pour faire les choix les plus conformes au «développement durable» à toutes les phases de la vie du bâtiment : conception, réalisation, utilisation, adaptation et déconstruction. Cette association vise à ; maîtriser les impacts des bâtiments sur l'environnement extérieur ; créer un environnement intérieur sain et confortable et préserver les ressources naturelles en optimisant leur usage. La HQE est essentiellement une pratique et des règles de bon sens. Elle est née du souci d'économiser l'énergie et d'assurer un développement durable (lutte contre les émissions de gaz à effet de serre, développement des écoproduits, tri des déchets de chantier, économie d'eau ...).

La démarche HQE s'appuie sur 14 cibles regroupées en quatre thèmes (Ecoconstruction, Ecogestion, confort, santé).

Maîtriser les impacts sur l'environnement extérieur	
Eco- construction 1. Relation harmonieuse bâtiments- voisinage. 2. Choix des procédés et produits de construction. 3. Chantier à faibles nuisances.	Eco- gestion 4. Gestion de l'énergie. 5. Gestion de l'eau. 6. gestion des déchets d'activité. 7. Gestion de l'entretien et de la maintenance.
Créer un environnement intérieur sain et confortable	
Confort : 8. Confort hygrothermique. 9. Confort acoustique. 10. Confort visuel. 11. Confort olfactif.	Santé 12. Conditions sanitaires des espaces. 13. Qualité de l'air intérieur. 14. Qualité de l'eau.

La quinzième cible :

En 2006, le référentiel HQE porte sur 14 cibles. L'idée de 15^{ème} cible regroupe plusieurs éléments qui semblent aujourd'hui pouvoir utilement compléter la démarche HQE. Un certain nombre d'acteurs ont suggéré que l'approche HQE gagnerait à s'enrichir d'une cible s'intéressant de plus près à la « *Relation écologique du projet* (bâti, infrastructures, non- bâti, fonctionnement) avec l'environnement »

En effet, la biodiversité est restée relativement ignorée dans la démarche HQE durant ses 10 premières années. Elle est au coeur de la quinzième cible, dont les objectifs pourraient être regroupés sous le thème du «*Remboursement de la dette écologique*». Et dont au moins l'enveloppe du bâtiment pourrait offrir autant de place pour la biodiversité naturelle qu'en l'absence de construction, voire plus.

La condition de réussite est que la construction ne doit pas ou peu modifier le milieu, en faisant appel à la « réparation écologique ». L'architecte s'appuiera donc, nécessairement sur le

« génie écologique » et devra utiliser le « Vivant » comme élément dynamique et fonctionnel de sa construction.

Objectif de la 15^{ème} cible :

La 15^{ème} cible a pour objectif d'offrir un réseau d'espaces (d'habitats) retrouvé, reconstruit ou de substitution aux espèces qui devraient être naturellement présentes, au vu du contexte éco- paysager ou de la flore et de la faune potentielles, en veillant à ce que l'architecture soit éco- compatible.

L'objectif à moyen et long terme est celui d'une nature dont le cycle est le plus auto-entretenu possible. Il s'agit donc de durablement restaurer les conditions (dynamiques) d'entretien de la biodiversité, tout en gardant une maîtrise minimale ; par exemple sur les eaux pluviales et de ruissellement et sur la végétation jouxtant ou couvrant le bâti.

Principes généraux de la 15^{ème} cible ¹:

Principe 1 :	«La complexité inhérente au fonctionnement des écosystèmes», vue comme condition nécessaire à la restauration ou au maintien de la <i>biodiversité</i> visée par la 15 ^{ème} cible.
Principe 2 :	«l'auto- entretien du milieu». L'écosystème doit pouvoir se stabiliser et se réguler de lui-même ou à faible coûts pour les occupants humains.
Principe 3 :	«Remboursement de la dette écologique» du construit, en veillant à ce que la faune ou la flore ne posent toutefois pas de problème de compatibilité avec l'infrastructure construite en question.
Principe 4 :	«La sécurité pour l'Homme».

¹ « *Quinzième Cible HQE* », (consultée en dec.2009), [En ligne], www.dictionnaire.sensagent.com, récupérée de www.wikipedia.org.



Figure II-1 .De gauche à droite : végétalisation intensive, semi- intensive et extensive.
(Source. A gauche et milieu : Furlani, 1996- à droite : www.siplat.fr)

Tableau II-1. Comparaison des différents systèmes de végétalisation des toits
(Source. www.cebq.org-Lignesdirectricesdeconceptiondetoitsverts)

Tableau I : Comparaison des systèmes de toit vert intensif et extensif	
TOIT VERT EXTENSIF	TOIT VERT INTENSIF
<ul style="list-style-type: none"> • Substrat mince; peu ou pas d'irrigation; conditions difficiles pour les plantes; faible diversité dans le choix de plantes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sol profond; système d'irrigation; conditions plus faciles pour les plantes; grande diversité dans le choix des plantes; souvent accessible.
<p>Avantages :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Léger; renforcement de la structure du toit rarement nécessaire • Idéal pour les grandes surfaces. • Convient aux toits de 0 à 30 degrés de pente. • Faible entretien et longue durée. • Systèmes d'irrigation et de drainage spécialisé rarement nécessaires • Expertise technique moins cruciale • S'intègre bien à des travaux de rénovation permet une végétation spontanée • Peu onéreux • Apparence plus naturelle • Le service municipal d'urbanisme peut plus facilement l'exiger comme condition à l'autorisation de construire. <p>Inconvénients :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Efficacité énergétique et rétention des eaux pluviales moindres • Choix de plantes plus restreint • Rarement accessible pour des loisirs ou d'autres fonctions • Repoussant pour certains, surtout l'hiver 	<p>Avantages :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Plus grande diversité de plantes et habitats • Bonne propriétés isolantes • Peut simuler un jardin naturel au sol • Peut être très beau • Souvent accessible et permet des fonctions variées : loisirs, espace vert, potager, etc. • Efficacité énergétique et rétention des eaux pluviales supérieures • Durée supérieure de la membrane <p>Inconvénients :</p> <ul style="list-style-type: none"> • charge sur le toit supérieure • nécessité de systèmes d'irrigation et de drainage, d'où consommation d'énergie, d'eau et de matériaux • coûts d'immobilisation et d'entretien supérieurs • systèmes et expertise plus complexes

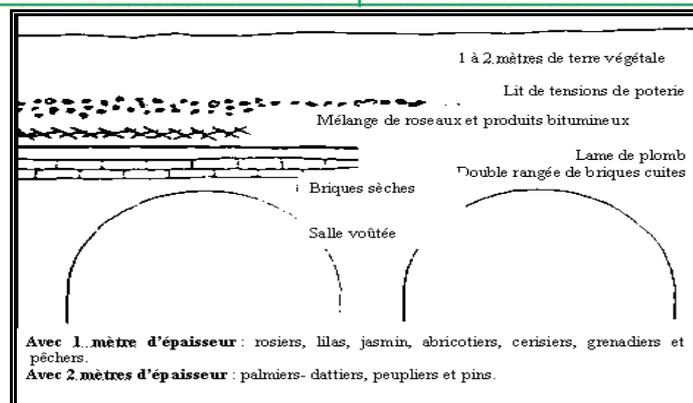


Figure II-2. Illustration de La coupe type des jardins suspendus de Sémiramis selon J.-P. Salomon
(E.P.A.D, Etablissement Public pour l'Aménagement de la Défense)
(Source. Michel Corbet, 1977, In Revue Technique & architecture n° 313)

Les critères de choix des caractéristiques physiques de la couche de drainage :

- **Effet de la pente du toit** : la pente du toit agit sur la vitesse de l'écoulement des eaux. D'après Lassalle (2006), la couche de drainage diminue à mesure que la pente augmente : elle est de 5 à 8cm en pente nulle et on s'en passe à partir de 5% de pente (pas de couche de drainage). La couche de drainage doit avoir une pente de 3% de façon à exclure les difficultés liées aux stagnations d'eau plus au moins permanentes.
- **La capacité de rétention de l'eau** : Selon le type de drainage (agrégats minéraux ou éléments prémoulés synthétiques à réserve d'eau), cette couche est déterminante car elle conditionne l'approvisionnement en eau des plantes. D'après Lassalle (2006), l'emploi de granulats minéraux poreux permet de retenir de l'eau complémentaire à celle de la couche de culture (15% en volume pour les drainages en pouzzolane et en argile expansé concassée et 30% pour la pierre ponce). Alors que les techniques utilisant des éléments prémoulés formant alvéole peuvent retenir jusqu'à 25 litres d'eau par mètre carré.
- **La perméabilité** : représente l'aptitude du sol à laisser passer l'eau vers les couches inférieures. Dans le cas de matériaux synthétiques de faible épaisseur, elle doit être supérieure ou égale à 0,3 cm/s (= 180 mm/min, avec un volume de vide entre 20 et 80 % (40% en moyenne)), alors que la perméabilité du **substrat** est de 0.6mm/min. Les épaisseurs inférieures à 30 mm ne sont admises que pour une pente réelle (Lassalle, 2006. p.101).
- **La résistance** des couches de drainage au gel et au **poïnçonnement** (du aux charges qui leur sont appliquées)
- **La stabilité** structurale.
- **L'épaisseur** minimale : elle doit être supérieure à la hauteur maximale des flaches d'eau¹ observées sur la toiture

Les caractéristiques physiques des granulats minéraux et des drainages synthétiques :

La couche drainante constituée de granulats minéraux légers (pouzzolane, pierre ponce, schiste expansé ...) du procédé SOPRALITHE de Soprature (SOPREMA, CCP, 2002. p.25-26), est mise en oeuvre à la main ou par montage pneumatique, et nivelée au râteau. La répartition doit être régulière et à un nivellement de surface correct en contrôlant en plusieurs points l'épaisseur.

Pour approcher l'épaisseur prévue, il est conseillé de répartir un nombre précis de sacs correspondant à une surface donnée et dans le cas d'un montage pneumatique (par camion- silo), le nivellement doit être fait à l'avance, l'épaisseur étant aussi régulièrement contrôlée.

a. Les agrégats minéraux :

Le schiste expansé : résulte de la cuisson du schiste dans des fours rotatifs à 1.200°C, il est ensuite concassé et calibré pour obtenir une porosité ouverte. Ce dernier est utilisé par Soprature sous forme de grains bruns de forme arrondie et de structure poreuse à capacité maximale de rétention en eau ~ 15% en volume, possède une granulométrie 8/16 et une masse volumique maximum 800 kg /m³ à capacité maximale en eau.

Pouzzolane calibrée : est une roche siliceuse légère, d'origine volcanique. Sa capacité maximale de rétention en eau ~ 20% en volume, elle a une granulométrie 7/15 et une masse volumique maximum 1 100 kg/m³ à capacité maximale en eau.

Pierre ponce calibrée : est une roche poreuse, alvéolaire et légère, d'origine volcanique. Elle a une capacité maximale de rétention en eau ~ 40% en volume, une granulométrie 2/12 et une masse volumique maximum 1 250 kg/m³ à capacité maximale en eau.

b. Les matériaux synthétiques :

Polystyrène expansé : (SOPRADRAIN) (25 kg/m³) en plaques de 1.000 x 1.000 x 36 mm comprenant :

- 225 plots, Ø 40 mm et de hauteur 16 mm.
- 224 trous, Ø 10 mm et 196 trous de Ø 20 mm
- Surface d'écoulement 800 cm²/m² environ
- Surface portante 26 %
- Poids des plaques 0,7 kg/m²

Les plaques sont disposées bord à bord. Il est également possible de fixer les plaques SOPRADRAIN par un plot de bitume ou de colle à froid.

Les géotextile à base de fibres synthétiques : dont une face présente une structure cannelée, d'une épaisseur totale 10 mm, poids 4 kg/m² à capacité maximale en eau. C'est un matériau multifonction dont la structure assure le rôle de filtre et de drain. Il est déroulé cannelures en dessous, avec des recouvrements de 10 cm jusqu'en pente < 10 %.

¹ Flaches d'eau : Sous épaisseurs localisées, de 10 à 25mm d'épaisseur où l'eau stagne en période humide

En pente > 10 %, il participe à la retenue du substrat. Dans ce cas, il est déroulé cannelures dessus.

Le bac précultivé Hydroback :

Le bac précultivé Hydroback est une innovation pour la végétalisation des toitures. Il fait l'objet d'un brevet international la Prieuré Végétal I.D. Il est distribué par Eternit dans le système Verdura en France.

Ce bac prévégétalisé est en polypropylène haute densité (PEHD), recyclé et il est caractérisé par ; un drainage efficace ; une réserve d'eau ; la répartition de la réserve d'eau ; une végétation précultivé ; des accroches résistantes pour une pose facile.

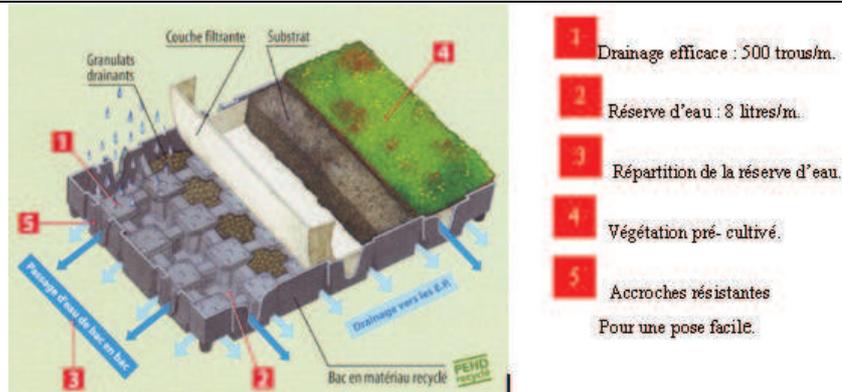


Figure II-3. Bac précultivé (HydroPack) avec réserve d'eau
(Source. Eternit, Brochure 2008)

Les caractéristiques requises pour les couches filtrantes.

D'après Lassalle (2006) et Les Règles Professionnelles pour la Conception et la Réalisation des Terrasses et Toitures Végétalisées (2007) les caractéristiques requises pour la couche filtrante sont :

- **La perméabilité** ; qui devrait être 10 fois supérieure à celle de la couche de culture.
- **La charge**; du filtre doit être de 100 à 200 g/m².
- **La résistance à la déchirure** : de l'ordre de 500 à 1000 N en raison des efforts mécaniques que cette couche est susceptible de subir.
- L'imputrescibilité.
- **La retenue des particules** de diamètre > 0,063 mm.

Les caractéristiques physiques des substrats pour la végétalisation extensive et semi- intensive.

Les caractéristiques physiques du substrat minéral conforme aux exigences les plus récentes de la FLL (Groupe de recherche sur le développement et la réalisation en paysage) sont ²:

- Matières **minérales** : entre 70 et 90 %.
- Diamètre des **particules** : maximum 12 mm.
- Particules de moins de **63 microns** : maximum 15 %.
- Matières **organiques** : entre 3 et 8 %.
- **Résistance** suffisante au gel.
- **Stabilité de structure** : D'après Lassalle (2006), elle est garantie par une courbe granulométrique régulière de la fraction minérale, assurant ainsi la résistance à l'érosion due au vent ou à l'eau.
- **Perméabilité** à l'eau : au moins 0,001 cm/s (0.6mm/min). Lassalle (2006) indique que, l'évacuation interne doit être rapide puisque la structure du sol ne peut être modifiée après l'installation (le sol ne peut être travaillé), c'est sa texture qui devra assurer à elle seule la perméabilité nécessaire, grâce à une macroporosité importante. Pour assurer une perméabilité de l'eau élevée, et une bonne diffusion de l'oxygène, il est nécessaire de limiter la quantité des particules fines dans le substrat. Dans ce sens, les Directives allemandes ont recommandé d'utiliser une quantité maximale de particules fines (<0.063mm) de 15% et 7% du poids total du substrat, respectivement **pour le complexe multicouche et monocouche** (FLL (2002) In Tobias Emilsson, 2005. p.14).
- **Capacité de rétention de l'eau** : doit être importante, au moins 35 % en volume. Pour les substrats fins, on utilise des matériaux inorganiques recyclés tels que la pierre ponce, dont les pores internes et externes peuvent retenir l'eau,

² **Toit Vert Sarl**, «Toitures végétalisées : Substrat spécial pour végétation extensive», Fiche technique, (page consultée le 11-11-2008), [En ligne], www.toitvert.fr.

sachant que les pores externes permettent de réduire la densité du substrat (**Roth-Kleyer**, (2001), In **Tobias Emilsson**, , 2005. p.14). D'après Lassalle (2006), l'emploi de granulats minéraux de granulométrie élevée permet l'autolimitation de l'évaporation par l'obtention d'un effet mulch³ minéral, limitant l'évaporation du sol.

- **Capacité de rétention d'air** à l'état saturé d'eau : au moins 10%. L'air se trouvant dans le compost léger utilisé dans ces toitures est plus isolant que la terre qui ne constitue pas un isolant mais protège l'intérieur des bâtiments seulement par sa masse.

- **Acidité (pH)⁴**: est définie par la concentration en ions H⁺. Le pH du substrat doit être entre 6,5 et 8.

- Teneur en sels : maximum 3,5 g/litre,

- La masse spécifique à l'état sec est entre 1000 et 1200 kg/m³.

- La masse spécifique à l'état saturé est entre 1550 et 1650 kg/m³.

- Absence de plantes vivantes ou de morceaux de plantes pouvant se régénérer.

La photosynthèse- Types et caractéristiques.



Figure II-4. A gauche : Stomate ouvert (350x). Adroite : Stomate ouvert (2900x)

(Source. wikipedia.com)

Les végétaux chlorophylliens autotrophes sont capables de fabriquer de la matière organique en utilisant le gaz carbonique atmosphérique et l'énergie lumineuse tout en libérant l'oxygène grâce à la photosynthèse.

La feuille est l'organe responsable des réactions chimiques de la photosynthèse grâce d'une part à des organites arrondis de couleur verte contenues dans les cellules de la feuille : les chloroplastes, qui captent l'énergie solaire grâce à des antennes collectrices (*light harvesting complex, LHC*)⁵, et d'autre part, grâce aux stomates ; orifices de petite taille se trouvant souvent du côté inférieur de l'épiderme des feuilles. Celles-ci permettent les échanges gazeux et de vapeur d'eau ainsi que la régulation de pression osmotique. La position et le nombre des stomates changent en fonction de l'espèce de la plante et sa capacité d'adaptation au climat, elles peuvent être d'un nombre important variant de 50 à 500 par mm², parfois ils sont peu nombreux et s'enfoncent dans l'épiderme au fond d'un sillon comme chez les xérophytes.

On distingue trois types de photosynthèse (C3- C4- CAM) suivant d'une part ; le nombre d'atome de carbone de la molécule organique formée en premier lors de la fixation du CO₂ ; et d'autre part selon une adaptation à deux caractéristiques du milieu : *la température* et *l'intensité lumineuse*. Le mécanisme en C3 est le mécanisme de « base » (représentant 98% des plantes vertes), les types en C4 et CAM sont des adaptations aux milieux secs⁶.

Les végétaux en C3 (acide phosphoglycérique) renferment trois atomes de carbone dans sa molécule (blé, chou, soja...), elles ont un rendement plus faible que celles en C4 (acide oxal- acétique) qui renferment quatre atomes de carbone tels que les mauvaises herbes, le Maïs et diverses graminées.

Le type de photosynthèse en C4 a une productivité très élevée puisque la photorespiration est faible ou nulle, leurs besoins en eau sont faibles, ce qui fait que se sont des espèces qui vivent dans les régions arides et tropicales⁷. Les végétaux de type CAM (*Crassulean Acid Metabolism*) ou **plantes grasses** : les Cactées, Orchidées, Liliacées... ont une productivité faible puisque la fixation du gaz carbonique se fait la nuit lorsque les stomates sont ouverts. Elles stockent du malate au niveau de la vacuole des cellules photosynthétiques et au cours de la journée, ces malates sont transformés en dioxyde de carbone et le cycle de Calvin peut s'effectuer, malgré la fermeture des stomates, d'où une moins grande perte d'eau par transpiration.

³ **Mulch** : en agriculture est une couche de fumier, de compost, etc. destinée à protéger les plantations.

⁴ Les sols à pH inférieur à 7 sont acides, ceux à pH supérieur à 7 sont basiques, la neutralité correspond à un pH 7.

⁵ **Article**, « *La photosynthèse* », (page consultée le 10-07-2009), [En ligne], <http://fr.wikipedia.org>

⁶ **Ibid**, [En ligne], <http://fr.wikipedia.org>

⁷ Le rendement des plantes en C3 est plus faible de deux à trois fois que celles en C4 lorsque les températures arrivent à 30 - 40°C avec un éclaircissement de 30 000 lux, en plus elles auront besoin de 2 fois plus d'eau (**R.Dajoz**, 2006, p.75).

La classification des principales familles du groupe des plantes succulentes :

Tableau II-2. Familles des succulentes

(Source. www.davarree.free.fr/)

Famille	Agavaceae	Aizoaceae	Aloaceae	Crassulaceae	Portulacaceae	Euphorbiaceae
Genre	Agave	Conophytum Delosperma Faucaria Lithops Mesembryanthemum Pleiospilos	Aloe Gasteria Haworthia	Adromischus Aeonium Aichryson Cotyledon Crassula Echeveria Kalanchoe Graptopetalum Pachyphytum Sedum Sempervivum	Portulaca Portulacaria Anacampseros	Euphorbia,

Tableau II-3. Exemples de plantes succulentes du genre Sedum

(Source. conception auteur)

Types de sedums.		
<p>Les sedums (ou orpins) ce genre très varié réunit quelques 100 espèces de plantes succulentes, toutes originaires de l'hémisphère nord. De croissance rapide, les sédums peuvent tapisser le sol ou se dresser jusqu'à 1m de hauteur. Ils portent des feuilles entières charnues, tantôt cylindriques, tantôt lancéolées, ovales ou elliptiques et leurs fleurs à cinq pétales sont ordinairement groupés en cymes terminales. Non rustiques à totalement rustiques, les sédums, réclament le plein soleil et apprécient un sol poreux et fertile, même si certains s'accroissent de presque tous les sols⁸.</p>		
 <p><i>Echeveria elegans</i> (Source. www.wikipédia.com)</p>	 <p><i>Sedum floriferum</i> (Source. Brochure MEPLE)</p>	 <p><i>Sedum spurium</i> (Source. Brochure MEPLE)</p>
 <p><i>Sedum reflexum</i> (Source. Brochure MEPLE)</p>	 <p><i>Orpin blanc (Sedum album)</i> (Source. Brochure Soprature)</p>	 <p><i>Orpin âcre (Sedum acre)</i> (Source. www.wikipédia.com)</p>
<p>Les Joubarbes (<i>Sempervivum</i> spp.) : elles ne redoutent pas la sécheresse. Leur nom vernaculaire signifie « barbe de Jupiter » et évoque leur pouvoir de protection des toits de la foudre. Commun en Europe jusqu'en Asie mineure, ce genre de famille des crassulacées compte plusieurs vivaces succulentes à feuilles persistantes⁹. Leur port est tapissant ; idéal en rocaille, sur un muret ou un talus. Cette plante grasse demande très peu de terre, plantées en plein soleil et en sol caillouteux, bien drainé, elles résistent aux froids les plus vifs et craignent en revanche l'humidité stagnante en hiver et en automne</p>		 <p><i>Joubarbes des toits</i> (Source. www.wikipédia.com)</p>

⁸ Encyclopédie de botanique et d'horticulture, « Plus de 10 000 plantes du monde entier », Edition Botanica, Paris, 2003-2005. p.832.

⁹ Ibid, p.835.

Autres plantes succulentes (utilisées pour la présente recherche) :

<p>Aptenia cordifolia : (<i>Mesembryanthemum cordifolia</i>) appelée aussi «ficoïde à feuilles en cœur». C'est une plante succulente vivace de la famille des <i>Aizoacées</i>, du genre <i>Mesembryanthemum</i>, originaire d'Afrique du Sud. La plante est rampante, elle peut tapisser rapidement de vastes étendues, en particulier dans les sols sablonneux. Elle forme un tapis vert tendre à feuillage succulent et persistant de 5 cm de haut, où s'épanouissent de très nombreuses fleurs carminées, de couleur blanche, rose, rouge, jaune du printemps au début de l'automne. Elle ne craint pas la sécheresse mais si on l'arrose abondamment en période de chaleur elle pousse d'autant plus rapidement. Comme elle craint le froid (elle gèle à partir de -5 °C)¹⁰. Cette plante préfère l'exposition au soleil ou à mi-ombre¹¹. On peut la reproduire très facilement par bouturage.</p>	 <p>Figure. <i>Aptenia cordifolia</i> (<i>Mesembryanthemum cordifolia</i>) (Source. www.wikipédia.com)</p>
<p>Le Pourpier de Cooper (<i>Delosperma cooperi</i>) fait partie de la famille des <i>Aizoacées</i>, du genre <i>Delosperma</i>. C'est une plante succulente vivace tapissante. La floraison s'étale de Juillet à Septembre (d'où l'intérêt estival), les fleurs de 4,5 à 5 cm de diamètre sont soyeuses, pourpre violacé. Le feuillage est persistant du type succulent. Avec des feuilles cylindriques (3 à 5 cm de long), de couleur vert clair¹². Le port est tapissant (port adulte de 5x 80 cm de dimension) et de 10cm de hauteur. Le sol doit être bien drainé, plutôt sec. La plante est assez rustique, résiste à (-10°), elle est aussi très résistante au grande sécheresse, préfère l'exposition au soleil (Plus elle a de soleil plus elle fleurit)¹³. Utilisation: rocaille, couvre- sol, bordure, pot, jardinière, bordure. Méthode de multiplication: semis en mars, bouturage, division de la touffe au printemps¹⁴.</p>	 <p>Figure. <i>Pourpier de Cooper</i> (Source. www.jardindupicvert.com)</p>
<p>Sedum palmeri: a un port arbustif, rampant ou retombant selon la culture et l'exposition. Elle peut mesurer jusqu'à 20 cm de haut. La plante forme de petites rosettes de feuilles sessiles bleu-vert, rouge en cas de chaleur ou de gel, de 5 à 8 cm de diamètre, portées par des tiges ramifiées d'une vingtaine de centimètres. Elle donne de nombreuses fleurs jaune d'environ 2 cm de diamètre. L'espèce est rustique (vit jusqu'à (- 10°C) mais dans un sol très drainant. Elle a une croissance très rapide et apprécie le plein soleil. Le bouturage est très facile (tige seule ou rosette avec au moins 1 cm de tige). Un fragment bouturé en été fleurit dès le milieu de l'hiver suivant¹⁵.</p>	 <p>Figure. <i>Sedum palmeri</i> (Source. www.wikipédia.com)</p>
<p>Les Aloinopsis : est une plante succulente de la famille des <i>Aizoacées</i>. Ils ont un nom signifiant « avec l'aspect d'un aloès », une allusion au similitude de quelques espèces d'Aloinopsis aux espèces miniatures de l'aloès. Ces plantes succulentes forment des rosettes de feuilles. Les racines sont épaisses et charnues. Les feuilles sont charnues et la plupart du temps, elles sont rugueuses. La couleur des fleurs varie du jaune, orange au rose. Les pétales sont arrangées dans deux ou trois spirales, et dans les espèces qui fleurissent jaune, elles peuvent avoir parfois une raie rouge brunâtre centrale en bas et au milieu. Les fleurs apparaissent au début du printemps ou en hiver. Elles sont complètement ouvertes en milieu d'après-midi et se referment au coucher du soleil. Ces plantes ont besoins d'un très bon drainage, et une exposition de plein soleil. Elles craignent l'excès d'humidité, préférant un arrosage par semaine de mars à juin et de septembre à octobre, supportant une température minimale de 5°C¹⁶. Le développement de <i>Aloinopsis schooneesii</i> est rampant, tapissant, l'arrosage se fait uniquement lorsque le substrat est bien sec (chaque 4 à 5 semaines), ou même</p>	 <p>Figure. <i>Aloinopsis peersii</i> (Source. www.lithops.net)</p>  <p>Figure. <i>Aloinopsis schooneesii</i></p>

¹⁰ Article, « *Mesembryanthemum cordifolia* », (page consultée le 05-04-2010), [En ligne] www.wikipédia.com.

¹¹ Article, « *Aptenia* », (page consultée le 26-03-2010), [En ligne] www.aujardin.info.

¹² Article, « *Le genre DELOSPERMA* », (page consultée le 0-04-2010), [En ligne], www.jardindupicvert.com.

¹³ Article, « *Asteraceae* », (page consultée le 02-04.2010), [En ligne] www.gardening.eu.

¹⁴ Article, « *Les Aizoaceae* », (page consultée le 0-04-2010), [En ligne] www.aujardin.info.

¹⁵ Article, « *Plantes succulentes* », (page consultée le 03/03/2009), [En ligne], www.wikipédia.com.

¹⁶ Article, « *Aloinopsis* », (page consultée le 02-04-2010), [En ligne], www.public.fotki.com.

moins si le climat est très pluvieux. Les plantes succulentes peuvent supporter même des périodes très longues sans arrosages¹⁷.

(Source. www.lithops.net.)

L'*Echeveria* est un genre de la famille des crassulacées. Il compte plus de 100 espèces originaires d'Amérique Centrale, du Mexique et du Nord du continent sud-américain.

Les Echeveria sont soit sans tige, solitaires ou en touffes, soit des buissons bas assez ramifiés. Leurs feuilles charnues sont disposées en spirale et forment des rosettes, légèrement cylindriques ou aplaties, se terminant en pointe. Elles sont pubescentes, et cirseuses. Et les plus anciennes tombent et la rosette de feuilles laisse apparaître un bout de tige dégarnie, dressée ou rampante. Elles peuvent atteindre de 2 à 30 cm de long et sont de couleurs très variées : du vert au gris bleu, rose ou rouge violacé. Le bord et la pointe des feuilles sont de couleur vive. Les fleurs se présentent sous forme d'inflorescence allongée, parfois ramifiée et ont un peu la forme de clochettes de couleur rouge orangé, jaune de 1,5 à 2,5 cm de long.

La culture : Les Echeveria poussent bien en pot, pour la plupart dans un sol normal (1/3 de terreau, 1/3 de terre végétale, 1/3 de sable).

Les feuilles les plus basses se dessèchent chaque année pour être remplacées par d'autres¹⁸.



Figure. *Echeveria sanchez*
(Source. www.davarree.free.fr)

L'*Aeonium* est un genre qui regroupe au moins 35 espèces distinctes

C'est une plante succulente pérenne arbustive comme l'*Aeonium arborescens* dont la tige est ligneuse à la base. Elles peuvent atteindre une taille de 1m20 de haut, comme de large. Les rosettes peuvent mesurer de 2,5cm à plus de 40cm suivant les variétés. Suivant les espèces, la feuille est glauque (vert olivâtre), vert foncé à vert jaunâtre ou noire, présentant une marge avec cils droits ou légèrement courbes de 0,2-0,8 mm de long, en plus d'une marge rougeâtre. La feuille est veloutée avec des poils glandulaires. Les fleurs sont généralement de couleurs jaunes, mais chez certaines espèces elles sont rouges, blanches, d'un blanc verdâtre, et roses.

les Aeonium poussent surtout en automne et au printemps, mieux les laisser sous la pluie à ce moment là. Sinon, les arroser une fois par semaine durant cette période (si le substrat est adapté, celui-ci doit sécher complètement en 2-3 jours). Lors du repos végétatif qui a lieu en été, les jeunes sujets peuvent être arrosés une fois par mois. En hiver, les Aeonium peuvent être maintenus au sec, cela accroît leur résistance à un gel léger de courte durée (-4°C).

Le bouturage se pratique en prélevant une rosette, un fragment de tige ou une feuille en période de croissance.

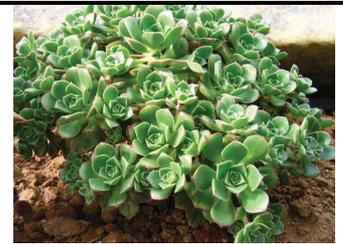


Figure. *Aeonium cyrico*
(Source. www.davarree.free.fr)

La transpiration des végétaux :

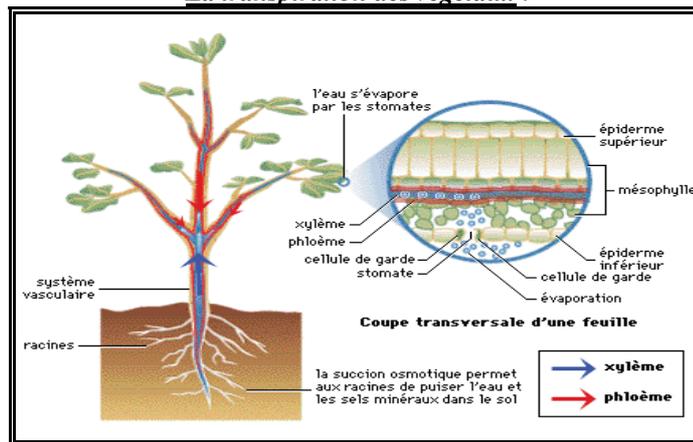


Figure II-5. Transpiration végétale

¹⁷ Article, «*Aizoaceae*», (page consultée le 02-04-2010), [En ligne] www.gardening.eu.

¹⁸ Article, «*Echeveria* », (page consultée le 01-04-2010), [En ligne] www.davarree.free.fr.

(Source. Encyclopédie Microsoft® Encarta® en ligne 2009)
 Tableau II-4: Caractéristiques des modes de mise en œuvre de la végétation
 (Source. Le procédé Le Prieuré, www.vegetalid.com)

	Tapis pré- végétalisé	Plantation de micro- mottes	Semi de fragments
Avantages	Couverture végétale immédiate, un résultat esthétique parfait. Destiné à toutes les toitures, même celles à forte pente ou exposées au vent. Reprise de végétation optimisée. Pose possible toute l'année (sauf périodes de gel et de fortes températures) Pose facile et rapide. Entretien minimisé dès la première année.	Nombreuse possibilité d'association de végétaux. Réalisation de motifs possible.	Coût de fourniture économique. Grande rapidité du semis.
Points faibles	Surcoût de fourniture pour les toitures >500m ²	Temps de pose important. Pose plus technique Système réservé aux toitures plates ou à faible pente. Résultat esthétique au bout de 12 à 18 mois. Reprise plus aléatoire qu'avec les tapis. Entretien et suivi indispensables pendant 1 an.	Résultat esthétique au bout de 18 à 24 mois seulement. Système réservé aux toitures plates ou à faible pente. Reprise aléatoire. Entretien et suivi indispensables pendant 2 ans.
Périodes de pose	Toute l'année (hors période de fortes chaleurs ou de gelées).	Privilégier mars, avril ou septembre.	Mars, avril ou septembre.
Entretien spécifique en phase d'installation	Aucun	Arrosage après plantation 2 à 3 désherbages manuels la première année	Arrosage pendant la période d'enracinement. 4 à 6 passages (désherbages manuels, re-semis éventuel) les deux premières années.

Tableau III-1. Complément d'information sur les toits végétaux en pente
(Source. Conception auteur)

Type de pente	Caractéristiques
La pente nulle	La pente nulle ¹ a pour inconvénient la formation de <i>flaches</i> ² . Celles-ci sont néfastes pour la végétation puisqu'elles provoquent l'asphyxie racinaire des plantes <i>xérophiles</i> et favorisent le développement des espèces consommatrices d'eau (graminées, certaines légumineuses...). Selon F.Lassalle (2006), les toitures allant jusqu'à 2% de pente sont traitées comme des toitures en pente nulle, car présentant fréquemment les mêmes défauts. Dans ce cas là, il faut que le volume d'air au niveau de la couche de drainage soit important et que les matériaux soient peu ou pas hydrorétenteurs. Les toits avec une pente nulle (0°), doivent être munies d'un arrosage par brumisation (OFEFP, 1995. p.27).
Pentes faibles (3% à 5%)	Représentent la situation idéale, car l'eau excédentaire s'évacue lentement, mais sûrement : la végétation profite ainsi au mieux des précipitations naturelles sans subir les effets d'un excès d'humidité. Une couche de drainage reste nécessaire, mais elle peut être réduite à 1 ou 2cm s'il s'agit par exemple d'un matelas drainant synthétique présentant un pourcentage permanent de vides supérieur à 50% (Lassalle, 2006. p.61). La France exige pour la végétalisation extensive, une pente minimale de 3% pour les supports en bois ou en acier (Adivet, CSFE, SNPPA, UNPE, 2007. p.07).
Pentes intermédiaires (5% à 35%)	Les éventuels déplacements du substrat pourraient exercer un effort de traction sur le revêtement d'étanchéité et compromettre la fiabilité de l'ouvrage. La courbe granulométrique assurée par la constitution même du substrat (texture et granulométrie des éléments), joue ici un rôle primordial. La couche de drainage n'est pas indispensable si l'on utilise un substrat suffisamment perméable (perméabilité à 65%) (Lassalle, 2006. p.61). Ceci dit, selon plusieurs sources ; à partir d'une pente de 18% (10°) à 20%, il faut protéger la couche de substrat de l'érosion par des systèmes de retenue du complexe de culture. Le choix des végétaux et leur mode de mise en oeuvre doivent être adaptés à la pente de la toiture et à son exposition. Par exemple, la société « Toit-vert » spécialisée dans la végétalisation des toitures à base de sédum, recommande pour un plan incliné (toit en pente) l'exposition Nord, Nord-Est ou Sud-Est. L'exposition plein Sud doit être évitée car l'incidence des rayons du soleil sur la végétation est telle qu'une trop longue exposition au soleil, en été, pourrait mettre en danger la survie du complexe végétalisé (Toit vert, www.Toit vert.fr). Certaines sociétés vont jusqu'à imposer la densité de plantation en fonction de la pente du toit. Par exemple, on préconise une plantation par des godets de sedums et de vivaces selon la pente (www.ecovegetal.fr) : - Pente de 15 à 25% : densité de plantation : 16 plantes/m ² . - Pente de 25 à 35% : densité de plantation : 20 plantes/m ² . - Pente de 35 à 45% : densité de plantation : 24 plantes/m ² . (Sachant que 45%=25°).
Les pentes moyennes (35% à 60%) :	on augmente dans ce cas l'épaisseur du substrat pour corriger la perte rapide de l'eau de gravité. Ces pentes nécessitent un dispositif de retenue spécifique par des éléments en bas de pente sur l'acrotère, ou un système fixé en haut de pente, ou d'autres systèmes définis selon la configuration précise de la toiture.
Les fortes pentes (60% et plus)	situations très rares, utilisées surtout pour des réalisations de petite taille de type chalet norvégien ou quelques projets audacieux. Le risque dans cette installation est l'érosion de surface suite à de violents orages en phase d'installation. Les mesures spécifiques à adopter sont les lignes de retenue à espacement réduit (1 mètre en général). La mise en oeuvre de la végétation est faite par les plaques ou rouleaux précultivés avec une fixation en haut de la pente. Les espèces sont une association de graminées- sedum (complétée par des vivaces) (Lassalle, 2006. p.67).

¹ La pente nulle n'est autorisée qu'en France selon François Lassalle (2006), et que pour des éléments porteur en béton.

² Flaches : Sous épaisseurs localisées, de 10 à 25mm d'épaisseur où l'eau stagne en période humide.

Exemple de disposition des bacs précultivés sur toiture en pente :

Le procédé Verdura de la société Eternit, utilisant des bacs Hydropack adaptable à des pentes jusqu'à 60% en accrochant une simple lisse de butée en partie basse du rampant et en emboîtant sur le toit ces bacs pré- végétalisés.

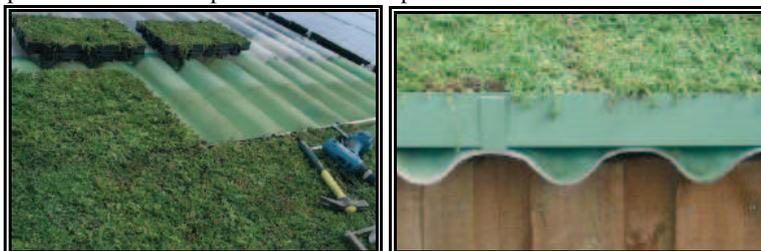


Figure III-1. A gauche : assemblage des bacs pré- végétalisés sur un toit en pente
A droite. Cornière anti- glissement en bas de pente.
(Source. Brochure Verdura, Eternit, 2008)

Période de confortement pour l'entretien des toitures à végétations extensive et semi- intensive :

Le tableau suivant (III-2) montre la durée type de la période de confortement de l'entretien pour chaque mode de mise en œuvre.

Tableau III-2. Fréquence de l'entretien d'une toiture à végétalisation extensive
Selon le mode de mise en œuvre de la végétation
(Source. François Lassale, 2006)

Type de Végétalisation.	Éléments précultivés.	Plantation de micromottes, godets.	Semis.
Durée de la période de confortement	3 à 6 mois	1 à 2 ans	1 à 3 ans
Fréquence minimale d'intervention	1 à 2 ^a /an	3 à 4 /an	3 à 4 /an

^a : en cas de terrasse ombragée.

Dispositions des bacs prévégétalisés.

Les bacs précultivés permettent la réalisation économique de formes géométriques par juxtaposition d'autres finitions rythmant la toiture (gravillons ordinaires ou colorés, dalles en bois disposées sur plots...etc). D'autre part, on peut ne pas prévoir de zones stériles pour les bacs précultivés, puisque ces derniers sont amovibles. L'accès pour l'examen et l'entretien des relevés d'étanchéité reste facilement assuré.

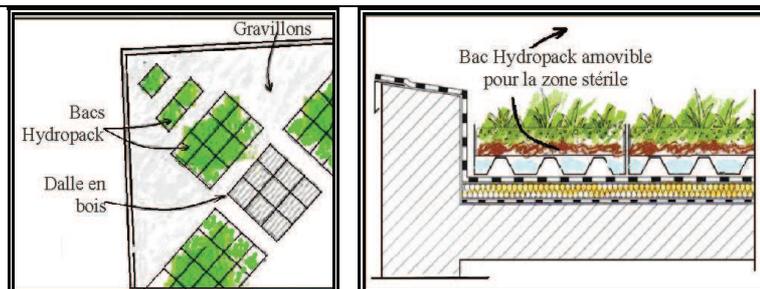


Figure III- 2. Esquisse d'un plan d'aménagement avec les bacs Hydropack, et coupe sur une zone stérile aménagée avec des bacs amovibles
(Source. www.siplat.fr)

Exemple plan de conception d'une toiture à végétation extensive avec l'aménagement de la zone stérile minimale autour des édicules, des émergences diverses et des entrées d'eau pluviales.

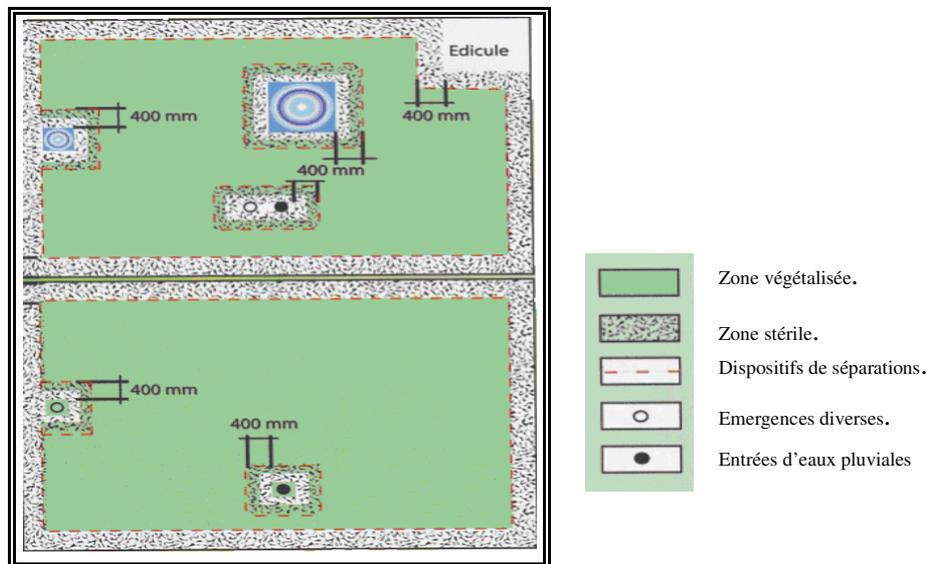


Figure III-3. Exemple d'aménagement type avec zones stériles à respecter
(Source. Brochure Meple, 2006)

Chemin de circulation.

L'accès direct aux appareils en toitures n'utilise pas les zones stériles en rive présentant un risque de chute. Mais si les zones stériles seront aménagées en chemin de circulation, on doit prévoir un garde corps, en rive de toiture pour la sécurité des usagers (Fig. III-5)

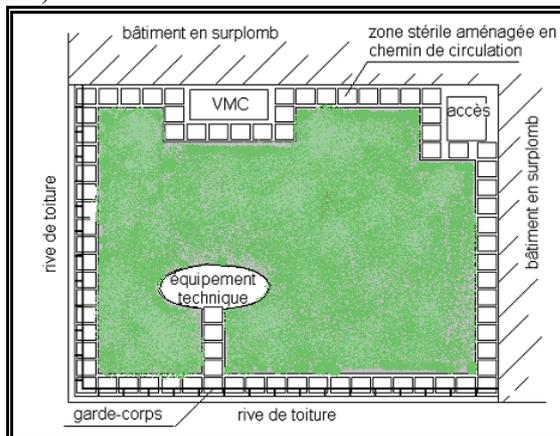
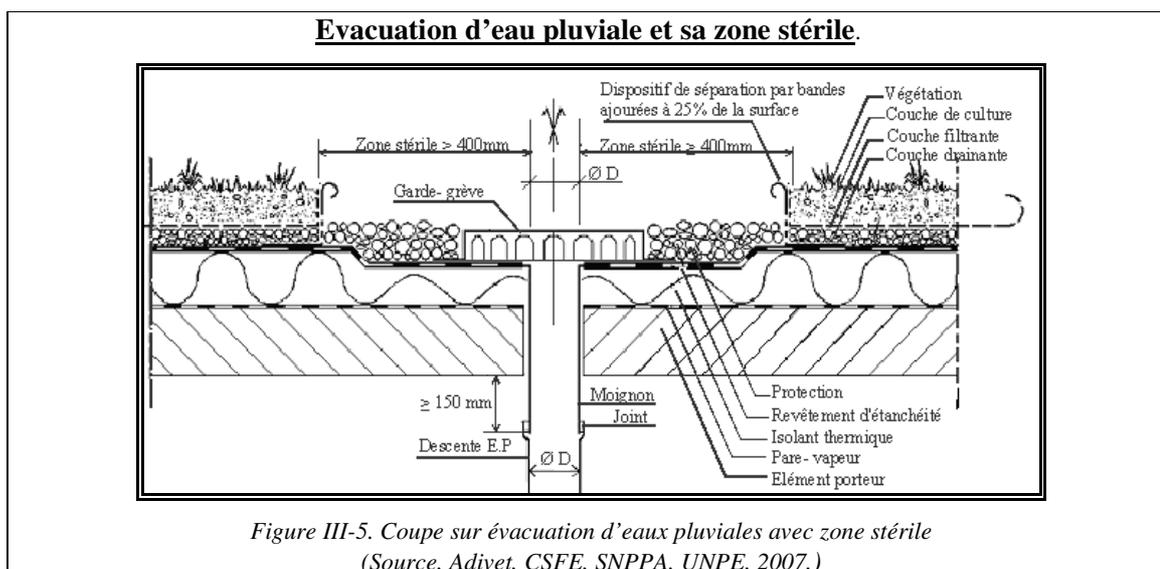


Figure III-4. Aménagement des chemins de circulation sur le toit végétal
(Source. Adivet, CSFE, SNPPA, UNPE, 2007. Réadaptée par auteur)



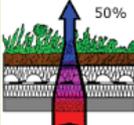
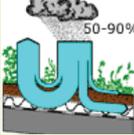
La rétention de l'eau : Le coefficient d'imperméabilisation moyen correspond à la proportion d'eau de pluie renvoyé au réseau après environ 3 heures).

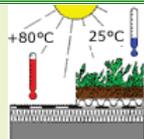
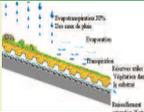
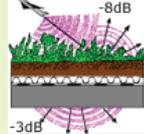
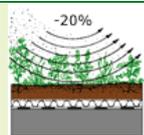
*Tableau III-3. Rétention de l'eau selon les formes de végétalisation
(Source. Lassalle, 2006)*

Type de végétalisation.	Epaisseur du complexe (cm).	Formes de végétalisation.	Rétention en eau (moyenne annuelle en pourcentage volumique)	Coefficient d'évacuation annuel/facteur d'imperméabilisation.
Extensive	2- 4	Mousse- Sedum	40- 55	0,60
	4- 6	Sedum- mousse	45- 50	0,55
	6- 8	Sedum	50- 55	0,50
	8- 10	Sedum- graminées	50- 55	0,50
	10- 12	Sedum- graminées- vivaces	55- 60	0,45
	12- 15	Graminées- vivaces- Sedum	55- 60	0,45
Intensive	15- 25	Gazon, vivaces, petits ligneux	60- 70	0,40
	25- 50	Gazon, vivaces, arbustes	70- 90	0,30
	> 50	Gazon, vivaces, arbustes, arbres	> 90	0,10

Réponses de la toiture végétalisée aux Cibles de la HQE :

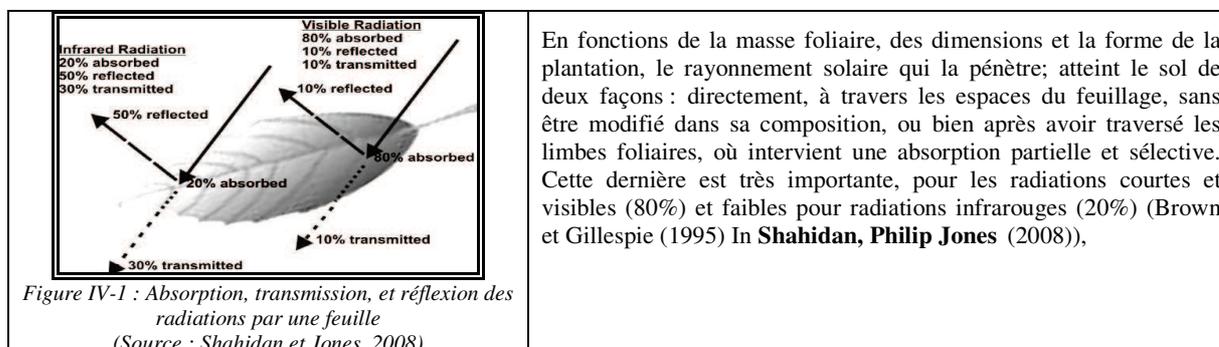
Tableau III-4. Synthèse des contributions de la toiture végétalisée à la Démarche HQE
(Source. Soprema, 2008, réadapté et complété par auteur, Figures : www.resosol.org, www.areneidf.org, www.ecovegetal.fr)

Problèmes environnementaux des villes	Thème/ Réponses des toitures végétalisées	Cibles HQE	
Eco- construction			
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Manque d'espaces verts ▪ Aspect artificiel des constructions et des aménagements urbains ▪ Appauvrissement du milieu urbain en biodiversité 	<p>Restitution d'espaces verts : la surface occupée par le bâtiment est récupérée sur les toits comme un espace vert à fréquenter ou à voir. Avantage dans le calcul du taux d'occupation des sols permettant d'arriver au maximum de surfaces vertes dans un projet.</p> <p>Insertion paysagère du bâtiment : dans son environnement et création de relation harmonieuse bâtiments- voisinage.</p> <p>Biodiversité : la toiture végétalisée peut être un espace privilégié pour les espèces végétales ou la faune, menacées dans les villes. (Ce qui peut répondre dans le futur à la 15^{ème} cible de la HQE)</p>	 	<p>Cible 1 : Relation harmonieuse du bâtiment avec son environnement immédiat</p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Membrane d'étanchéité et revêtement exposés aux dégradations 	<p>Protection supplémentaire de l'étanchéité : protection mécanique, thermique et contre les UV, grâce à la couverture végétale et le substrat. Ce qui contribue à accroître la durée de vie du revêtement d'étanchéité et diminue les travaux de réparation</p>		<p>Cible 2 : Choix des procédés et produits de construction</p>
Eco- gestion			
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pics de consommation énergétique pour la climatisation et le chauffage 	<p>Amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments : le substrat et les végétaux augmentent l'isolation thermique et de ce fait diminuent l'échange thermique entre l'intérieur et l'extérieur, surtout en été.</p>		<p>Cible 4 : Gestion de l'énergie</p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Inondations ▪ Traitement des eaux usées ▪ Gaspillage des ressources 	<p>Retenue temporaire des eaux pluviales : dans le drainage et le substrat à CME et par les plantes pour le fonctionnement biologique.</p> <p>Facilité : par la non restitution d'eau au réseau</p> <p>Récupération de l'eau de pluie : qui est aussi filtrer par le substrat et restitué dans les réseaux séparatifs pour usage domestique</p>		<p>Cible 5 : Gestion de l'eau</p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Production de déchets 	<p>Diminution des déchets : à la construction, l'exploitation, surtout pour la végétalisations extensives, puisqu'elle forme un écosystème qui fonctionne en circuit fermé et dont les déchets sont utilisés comme humus</p> <p>Traitement facilité des déchets : déconstruction et récupération des matériaux de la toiture végétalisée facile.</p>		<p>Cible 6 : Gestion des déchets d'activité</p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Entretien des espaces verts conséquent 	<p>Faible coût d'entretien : entretien minimisé pour les végétalisations extensives (sauf pour celles intensives)</p>		<p>Cible 7 : Gestion de l'entretien et de la maintenance</p>

Problèmes environnementaux des villes	Thème/ Réponses des toitures végétalisées	Cibles HQE	
Confort			
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ilot de chaleur urbain ▪ Haute température ▪ Effet de serre. 	Régulation de la température des villes : le tapis végétal absorbe les rayonnements solaires et va à l'encontre de l'effet de serre et de l'îlot de chaleur urbain.		Cible 8 : Confort Hygrothermique
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Manque d'humidité 	Humidification de l'air : le substrat et les végétaux retiennent l'eau, puis la restitue avec un retard d'évacuation ce qui humidifie l'air ambiant et le rafraîchit.		
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pollution acoustique 	Diminution de la contamination acoustique : bonne isolation des bruits aériens extérieurs (réverbération) et isolement acoustique amélioré à l'intérieur (effet de masse) puisque le substrat et les plantes absorbent le son.		Cible 9 : Confort acoustique
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aspect visuel manquant d'originalité et d'esthétisme 	Amélioration du paysage urbain : valorisation du bâtiment en végétalisant sa 5 ^{ème} façade, ce qui participe à l'harmonie visuelle des villes et leur donne une valeur esthétique.		Cible 10 : Confort visuel
Santé			
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dégagement des membranes d'étanchéité de substances volatiles nuisibles en se réchauffant 	Aucun dégagement de substances dangereuses : par la protection des membranes bitumineuses des réchauffements excessifs nuisibles grâce au complexe de culture		Cible 12 : Conditions sanitaires des espaces
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Pollution atmosphérique 	Dépollution et oxygénation de l'air : absorption des poussières environnantes et fixation du CO ₂ par les végétaux pour la photosynthèse.		Cible 13 : Qualité sanitaire de l'air
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Eaux pluviales rapidement évacuées et polluées par les surfaces minérales 	Filtrage des eaux de pluie : le substrat récupère l'eau de pluie puis l'évacue lentement en vue d'un stockage pour un réemploi domestique d'une eau utilisable.		Cible 14 : Qualité sanitaire de l'eau

Les propriétés des matériaux :

La conductivité thermique [λ]	Pour un matériau c'est le flux de chaleur en watt [W/m.°C] qui traverse sa paroi sur 1 mètre d'épaisseur pour 1 mètre carré de surface avec une différence de température de 1 degré entre les 2 faces de cette paroi. Cette propriété traduit la capacité d'un matériau à transmettre la chaleur par conduction. La chaleur se propage à l'intérieur du matériau de particule à particule. C'est une donnée intrinsèque à chaque matériau qui caractérise donc uniquement ses performances isolantes. Plus le lambda est faible, plus le matériau est résistant au transfert par conduction.
La résistance thermique [R]	La résistance thermique fait intervenir l'épaisseur de la paroi (ou du matériau) pour caractériser le passage du flux de chaleur. Le R de chaque matériau composant une paroi s'additionne afin de déterminer le R total. Plus le R est grand et plus le matériau est isolant. Elle exprime le rapport entre l'épaisseur et la conductivité thermique d'un matériau. Par exemple un mur en bois massif dont la conductivité lambda est de 0,13 W/m et l'épaisseur de 10cm, la résistance thermique R sera égale à 0,77 (épaisseur en mètre divisée par la conductivité).
Le coefficient de transmission calorifique [U]	En référence à la réglementation, le coefficient de transmission surfacique U caractérise les déperditions thermiques en watt [W/m ² .°C] d'un matériau ou d'une paroi. C'est l'inverse de la résistance thermique (R). Plus U est faible, plus la paroi est isolante.
L'inertie thermique	L'inertie thermique est la capacité d'un corps à stocker de la chaleur et elle est caractérisée par la capacité thermique. L'objectif de l'inertie thermique d'une paroi opaque est de restituer la chaleur ou la fraîcheur stockée en décalage avec les variations thermiques en dehors et dans le bâtiment. La vitesse de stockage ou déstockage de la chaleur est déterminée par deux autres grandeurs que sont la diffusivité et l'effusivité.
La capacité thermique.	C'est la quantité de chaleur [Wh/m ³ .°C] que peut emmagasiner un matériau par rapport à son volume. Elle est définie par la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1 °C la température de 1 mètre cube du matériau. Elle s'exprime par le rapport de la densité par la chaleur spécifique d'un matériau. Plus la capacité thermique est élevée, plus la quantité de chaleur que peut stocker le matériau est grande. Généralement ce sont les matériaux les plus lourds qui possèdent la plus grande capacité thermique. Le champion toute catégorie est l'eau.
La diffusivité thermique [d]	C'est la vitesse à laquelle la chaleur se propage par conduction dans un corps. Elle fait intervenir la conductivité thermique lambda et la capacité thermique d'un matériau et s'exprime en m ² /heure. Plus la valeur de diffusivité thermique est faible, plus le front de chaleur mettra du temps à traverser l'épaisseur du matériau, et donc, plus le temps entre le moment où la chaleur est arrivée sur une face d'un mur et le moment où elle atteindra l'autre face est importante. C'est une grandeur de l'inertie thermique.

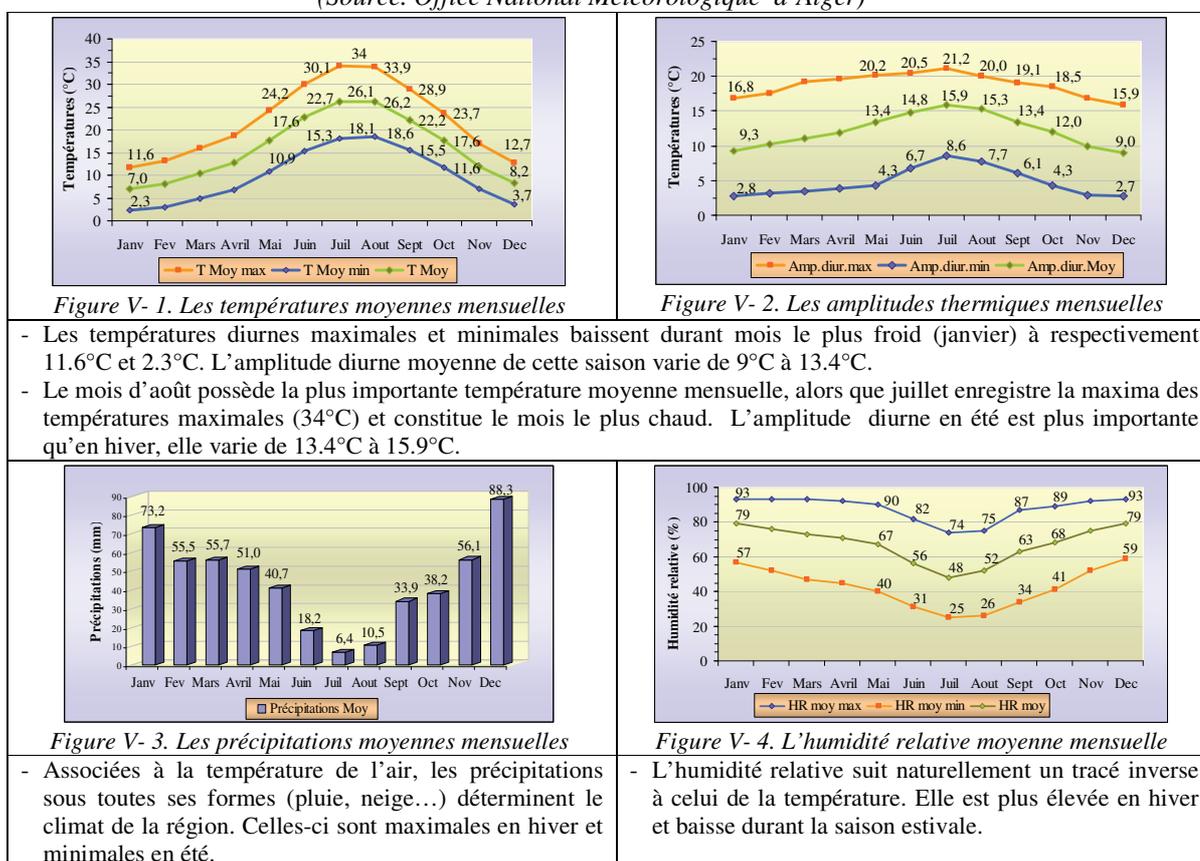
Interception des radiations solaires par les feuilles :

Les données météorologiques de la ville de Constantine :

Tableau V-1. Données météorologiques de la ville de Constantine de 1980 à 2005
(Source. Office National Météorologique d'Alger)

	Janv	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Jul	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
T° Moy max (°C)	11,6	13,1	15,9	18,8	24,2	30,1	34	33,9	28,9	23,7	17	12,7
T° Moy min (°C)	2,3	2,9	4,8	6,9	10,9	15,3	18,1	18,6	15,5	11,6	7,0	3,7
T° Moy (°C)	7,0	8,0	10,4	12,8	17,6	22,7	26,1	26,2	22,2	17,6	12,0	8,2
HR moy max	93	93	93	92	90	82	74	75	87	89	92	93
HR moy min	57	52	47	45	40	31	25	26	34	41	52	59
HR moy	79	76	73	71	67	56	48	52	63	68	75	79
Vent moy	2,59	2,91	2,49	2,86	2,48	2,38	2,43	2,4	2,06	2,15	2,77	2,94
Précipitations	73,2	55,5	55,7	51,0	40,7	18,2	6,4	10,5	33,9	38,2	56,1	88,3

Tableau V-2. Variation des paramètres climatiques de la ville de Constantine de 1980 à 2005.
(Source. Office National Météorologique d'Alger)



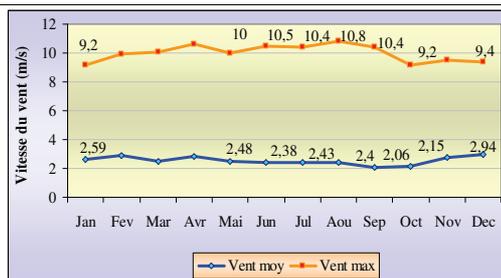


Figure V- 5. La vitesse du vent

- Les vents dominant d'été sont du Nord et ceux d'hiver sont du Nord Ouest. La vitesse du vent maximale varie de 9.2m/s en janvier et octobre à 10m/s au mois d'août, correspondant à la force 6 de l'Echelle de Beaufort et donc entre 39 à 49Km/h. (Grosse branches agitées)¹.

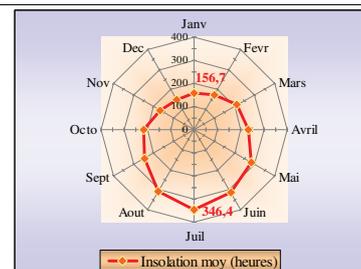


Figure V- 6. Durée d'insolation mensuelle moyenne

- En été la durée d'insolation atteint un max de 346.4h (juillet). Par contre en hiver le maximum d'heures d'insolation est de 156.7h (décembre). Ce qui impose une réelle réflexion en matière de conception des bâtiments afin de profiter des moindres rayons du soleil en hiver tout en, s'en protégeant en été.

Détermination de la zone climatique de la ville de Constantine : Les caractéristiques climatiques d'une région peuvent être exprimées soit par formule mathématique (Indice d'aridité De Martone, Quotient pluviométrique d'Emberger), soit par un graphique (Diagramme ombrothermique...). L'application de la formule De Martonne pour la ville de Constantine a été vérifiée par la formule d'Emberger pour la région méditerranéenne.

Tableau V-3. Application de l'indice De Martonne et du Quotient d'Emberger. (Source. Auteur)

	Indice De Martonne	Indice d'Emberger pour la région méditerranéenne
Formules.	$I = P / T + 10$	$Q = P \times 100 / (M + m) (M - m)^2$
Désignations	- P : précipitations annuelles (mm) - T : température moyenne annuelle (°C)	- Q : Quotient pluviométrique. - P : total des précipitations (mm). - M : la température moyenne des maxima du mois le plus chaud. - m : la température moyenne des minima du mois le plus froid
Type de climat	- $Im < 5$ Climat hyper- aride. - $5 < Im < 10$ Climat aride. - $10 < Im < 20$ Climat semi-aride. - $20 < Im < 30$ Climat semi- humide. - $30 < Im < 55$ Climat humide.	- Humides pour $Q > 100$ - Tempérées pour $100 > Q > 50$ - Semi arides pour $50 > Q > 25$ - Arides pour $25 > Q > 10$ - Désertiques pour $Q < 10$
Résultats	P = 527.7mm. T = 15.9°C I = 20.37 → ($20 < I < 30$). Climat semi humide	M = 34°C (juillet). m = 2.3°C (janvier) P = 527.7mm Q = 45.85 → ($50 > Q > 25$) Climat semi-aride
Donc, le climat de Constantine est semi aride puisque l'indice De Martonne ne dépasse pas de beaucoup la zone semi aride.		

L'indice De Martone mensuel :

L'indice De Martone annuel peut être complété par un indice mensuel³:

¹ Faurie et al. « Ecologie ; approche scientifique et pratique » 5^e éd. Editions TEC& DOC, Paris, 2006. p 71.

² Faurie et al. « Ecologie ; approche scientifique et pratique » 5^e éd. Editions TEC& DOC, Paris, 2006. p.73.

³ Ibid. p.73.

Tableau V-4. Application de l'indice De Martonne mensuel. (Source. Auteur)

Formule	Désignations	Type de climats
$i = 12 p / t + 10$	- p : pluviométrie du mois - t : température moyenne du mois	- $i < 10$ très sec / $i < 20$ sec - $i < 30$ humide / $i > 30$ très humide

L'ensemble des indices d'aridité par mois est résumé dans le tableau (V-5).

Tableau V- 5. Résumé des Indices d'aridité De Martonne mensuels pour la ville de Constantine (Source. Auteur)

Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Dec
51.67	37	32.76	26.84	17.69	6.67	2.12	3.48	12.63	16.60	30.6	58.22
Mois Très humides			Humide	Sec	Mois très secs			Secs	Très humides		

Diagramme ombrothermique : Le diagramme ombrothermique permet de comparer mois par mois les températures et la pluviométrie. Sur la ligne des ordonnées on fait en sorte de faire correspondre 10°C à 20mm de pluie. La saison aride apparaît lorsque la courbe des précipitations passe en dessous de celle des températures (partie hachurée du diagramme) (Fig. V-7). C'est-à-dire, quand la pluviométrie (P) est inférieure à deux fois la température (T) ($P < 2T$)

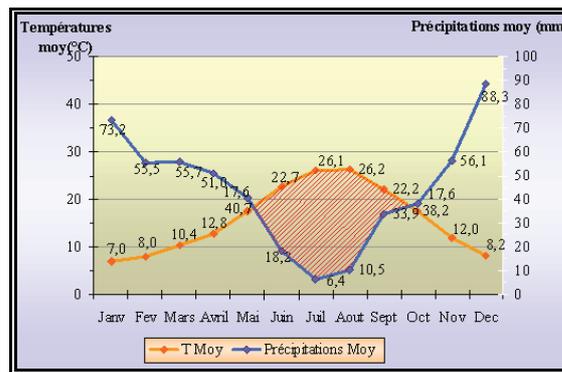


Figure V- 7. Diagramme ombrothermique de la ville de Constantine (période 1980-2005)
(Source. Office National Météorologique d'Alger. Conception : auteur)

Application de la méthode de « Steeve SZOCKOLAY » à la ville de Constantine:

La méthode SZOKOLAY consiste à établir la zone neutre dite «zone de confort» et les différentes autres zones, ceci est fait sur la base des données climatiques propre à chaque région. SZOKOLAY s'est inspiré des travaux de ces prédécesseurs OLGAY et GIVONI. Son but était d'intégrer les données climatiques comme faisant partie intégrante de la conception architecturale. Cette méthode permet de déterminer les différentes zones qui composent le diagramme avec les données climatiques préalablement calculées. En localisant la zone de confort, on détermine selon les mois les moyens devant être utilisés soit passifs ou actifs.

<p>1- Détermination de la zone de confort : Etablir la température moyenne annuelle : - $T_m = \sum t_m / 12 = 190.8 / 12 = 15.9^\circ\text{C}$ La température neutre sera : $T_n = 17.6 + (0.31 \times T_m)$ $T_n = 22.53^\circ\text{C}$ - Porter sur le graphe le point neutre à l'intersection de T_n et la ligne représentant 50% d'humidité relative. - Les points 1 et 2 correspondront à celle de 12g/kg. - La température du point 1 sera : $T_1 = T_n + [(Ahn - 12) \times 0.025 \times (T_n - 14)] - 2$ Où Ahn représente l'humidité absolue du point de neutralité. $Ahn = 8.5\text{g/kg}$ Donc $T_1 = 19.78^\circ\text{C}$ - Les points : $T_2 = T_1 + 4 = 23.78^\circ\text{C}$ $T_3 = T_1 + 0.2 \times (T_1 - 14) = 20.93^\circ\text{C}$ $T_4 = T_2 + 0.2 \times (T_2 - 14) = 25.73^\circ\text{C}$</p> <p>2- Détermination de la zone de contrôle potentiel pour les périodes froides : Zone de chauffage solaire passif : - $T_5 = T_n + 0.36 - 0.0025 \times H_v$ Où H_v représente la moyenne journalière totale d'irradiations solaires en wh/m^2 d'une surface verticale sud pour le mois le plus froid. - Pour la ville de Constantine, $H_v = 3732\text{wh/m}^2$ (Pour le mois de Janvier avec $T^\circ = 7^\circ\text{C}$) $T_5 = 13.56^\circ\text{C}$ Le point 5 correspond à la ligne de saturation $HB=100\%$.</p> <p>3- Détermination de la zone de contrôle potentiel pour les périodes chaudes : a. Zone d'effet de masse : - Détermination de la variation moyenne de température pour le mois le plus chaud. $DT_m = T_{\text{moy.max}} - T_{\text{moy.min}} = 33.9 - 18.6 = 15.3^\circ\text{C}$ (pour le mois d'août) $T_6 = T_2 + 0.5 (DT_m) = 31.43^\circ\text{C}$ Situé à la ligne d'humidité absolue qui correspond à 12g/kg. $T_7 = T_6 - 0.05 (T_6 - 14) = 30.56^\circ\text{C}$ Correspond à la ligne 14g/kg. $T_8 = T_6 + 0.2 (T_6 - 14) = 34.92^\circ\text{C}$ Correspond à la ligne 4g/kg d'humidité absolue. La limite d'humidité la plus élevée correspond à la courbe d'humidité relative du point 1.</p>	<p>b. Zone d'effet de masse avec ventilation nocturne : $T_9 = T_2 + 0.8 (DT_m) = 36.02^\circ\text{C}$ Le point 9 correspond à la ligne 12g/kg. $T_{10} = T_9 - 0.05 (T_9 - 14) = 34.92^\circ\text{C}$ Le point 10 correspond à la ligne 14g/kg. $T_{11} = T_9 + 0.2 (T_9 - 14) = 40.42^\circ\text{C}$ Le point 11 correspond à la ligne 4g/kg. Cette zone est délimitée par les points 9, 10, et 11.</p> <p>c. Zone de ventilation naturelle – Mouvement d'air sur la surface de peau : - Pour 1 m/s : $T_{12} = T_2 + 5$ Correspond à la ligne 12g/kg (HA). - Pour 1.5 m/s : $T_{12} = T_2 + 6.5 = 30.28^\circ\text{C}$ Correspond à 12g/kg - Pour 1 m/s : $T_{13} = T_{12} + 0.1 (T_{12} - 14)$. Correspond à la ligne 4g/kg (HA). - Pour 1.5 m/s : $T_{13} = T_{12} + 0.1 (T_{12} - 14) = 31.91^\circ\text{C}$ Correspond à 4g/kg (HA). - $T_{14} = T_1 = 19.78^\circ\text{C}$. Mais le point 14 sera localisé par la courbe de 90% d'humidité relative. - $T_{15} = T_{12} - 0.18 (T_{12} - 14) = 27.35^\circ\text{C}$ Le point 15 sera situé sur la courbe 90% d'humidité relative.</p> <p>d. Zone de refroidissement évaporatif direct : - La température limite la plus élevée est : $T_{16} = T_n + 12 = 34.53^\circ\text{C}$. Les limites supérieures et inférieures de cette zone sont tracées à partir des lignes de températures humides des points 2 et 3.</p> <p>e. Zone de refroidissement évaporatif indirect : - La température limite la plus haute : $T_{17} = T_n + 15 = 37.53^\circ\text{C}$. La limite supérieure de cette zone correspond à la ligne de 14g/kg (HA)</p> <p>4- Représentation des conditions climatiques qui prévalent : - Chaque mois est représenté par une ligne dessinée entre 2 points : - La température moyenne maximale mensuelle avec l'humidité relative minimale. - La température moyenne minimale mensuelle avec l'humidité relative maximale.</p>
---	--

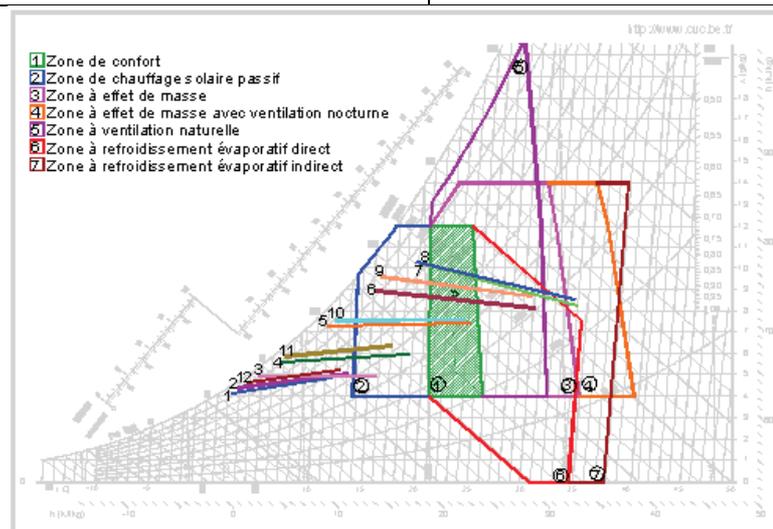


Figure V-8. Diagramme psychrométrique de S. Szokolay appliqué à la ville de Constantine.
(Source. Auteur)

Calcul des températures de la zone de confort du mois de juillet :

La température neutre calculé par la formule d'Auliciems :

$T_n = 17.6 + (0.31 \times T_m) /$ pour une température de l'air moyenne de 26.1°C :

$T_n = 25.6 \text{ °C} / T_1 = 22.58 \text{ °C} / T_2 = 26.58 \text{ °C} / T_3 = 24.29 \text{ °C} / T_4 = 28.63 \text{ °C}.$

Les tables de mahoney appliquées pour la ville de Constantine :

TABLE 01

Localisation	CONSTANTINE											
Longitude	6.37° E											
Latitude	36.17° N											
Altitude	697m											

Air Temperature: °C

	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Dec
Monthly mean max	11.6	13.1	15.9	18.8	24.2	30.1	34	33.9	28.9	23.7	17	12.7
Monthly mean min	2.3	2.9	4.8	6.9	10.9	15.3	18.1	18.6	15.5	11.6	7.0	3.7
Monthly mean range	7.9	8.3	9.9	12.6	17.8	22.7	24.9	25.2	13.2	11.9	12.8	8.2

AMT = T_{max} + T_{min} / 2
AMR = T_{max} - T_{min}

High	34	18.10
Low	2.3	21.8
AMR		19.7

Relative humidity: %

	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Dec
Monthly mean max a.m	83	83	83	82	80	82	74	76	87	89	82	83
Monthly mean min p.m	57	52	47	45	40	31	26	26	34	41	52	59
Average	79	76	73	71	67	56	48	52	63	68	75	79

Humidity group

1	Average RH below 20%
2	30-50%
3	50-70%
4	Above 70%

Rain and wind

	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Dec
Rainfall mm	73.2	55.5	55.7	51.0	40.7	18.2	6.4	10.5	33.9	38.2	56.1	88.3
Wind secondary	2.58	2.91	2.49	2.86	2.68	2.38	2.43	2.4	2.06	2.15	2.77	2.94

Comfort limits

	AMT over 20°C			AMT 18-20°C			AMT below 15°C		
Humid. Group	Day	Night	Day	Day	Night	Day	Day	Night	
1	26-34	17-25	23-32	14-23	21-30	12-21			
2	25-31	17-24	22-30	14-22	20-27	12-20			
3	23-29	17-23	21-28	14-21	19-26	12-19			
4	22-27	17-21	20-25	14-20	18-24	12-18			

TABLE 02

DIAGNOSIS: °C

	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Dec
Monthly mean max	11.6	13.1	15.9	18.8	24.2	30.1	34	33.9	28.9	23.7	17	12.7
Day comfort upper	25	25	25	25	28	28	30	28	28	28	25	25
lower	20	20	20	20	21	21	22	21	21	21	20	20
Monthly mean min	2.3	2.9	4.8	6.9	10.9	15.3	18.1	18.6	15.5	11.6	7.0	3.7
Night comfort upper	20	20	20	20	21	21	22	21	21	21	20	20
lower	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Thermal stress day	C	C	C	C	O	H	H	H	H	O	C	C
night	C	C	C	C	C	O	O	O	O	C	C	C

C: Cold (froid) O: Comfort (confort) H: Hot (chaud)

Indicators	4	4	4	4	3	3	2	3	3	3	4	4
Humid: H1												0
H2												0
H3												0
Acid: A1						✓	✓	✓	✓	✓		6
A2							✓					1
A3	✓	✓	✓	✓							✓	6

Applicable when

Meaning	Indicator	Thermal stress Day	Night	Rainfall	Humidity Group	Monthly mean range
Air movement essential	H1	H			4	
Air movement desirable	H2	H			2,3	Less than 10°C
Rain protection necessary	H3			Over 200mm		
Thermal capacity necessary	A1				1,2,3	More than 10°C
Out door sleeping desirable	A2		H		1,2	
Protection from cold	A3	C				More than 10°C

TABLE 03

RECOMMENDED SPECIFICATIONS

Indicator totals from TABLE 02						
H1	H2	H3	A1	A2	A3	
0	0	0	6	1	6	

LAYOUT

	0-10					
		5-12	✓	1	Orientation North and South (long axis East- West)	
	11-12	0-4		2	Compact courtyard planning	

Spacing

11-12				3	Open spacing for breeze penetration
2-10				4	As 3 but protection from hot and cold wind
0-1			✓	5	Compact lay-out of estates

Air movement

11-12				3	Open spacing for breeze penetration
2-10				4	As 3 but protection from hot and cold wind
0-1			✓	5	Compact lay-out of estates

Openings

	0-1	0		9	Large openings 40-80%
	11-12	0-1		10	Very small opening 10-20%
Any other conditions			✓	11	Medium opening 20-40%

Walls

	0-2			12	Large walls, short time-lag
	3-12		✓	13	Heav external and internal walls

Roofs

	0-5			14	Light insulated roofs
	6-12		✓	15	Heav roofs, over 8h time-lag

Out-door sleeping

		2-12		16	Space for out-door sleeping required
--	--	------	--	----	--------------------------------------

Rain protection

	3-12			17	Protection from heavy rain necessary
--	------	--	--	----	--------------------------------------

TABLE 04

DETAIL RECOMMENDATION

Indicator totals from table 02						
H1	H2	H3	A1	A2	A3	
0	0	0	6	1	6	

Size of opening

		0	1	Large:	40-80%	
	0-1	1-12		2	Medium:	25-40%
	2-5			3	Small:	15-25%
	6-10		✓	4	Very small:	10-20%
	11-12			5	Medium:	25-40%

Position of openings

3-12				6	In North and South walls at body height on windward side
		0-5			
		6-12			
0	2-12		✓	7	As above, opening also in internal walls

Protection of openings

		0-2		8	Exclude direct sunlight
		2-12		9	Provide protection from rain

Walls and floors

	0-2			10	Light, low thermal capacity
	3-12		✓	11	Heav. over 8h time-lag

Roofs

	0-2			12	Light, reflective surface, cavity
	3-12				
10-12				13	Light, well insulated
	0-5				
0-9	6-12		✓	14	Heav. over 8h time-lag

Extrenal features

		1-12		15	Space for out-door sleeping
				16	Adequate rainwater drainage

Position du soleil à Constantine :

Les radiations solaires conditionnent les températures de l'air qui changent d'un endroit à un autre. Elles sont intenses en été et diminuent en hiver avec la diminution de la durée d'insolation. L'étude de la trajectoire du soleil annuelle dans la ville de Constantine (Latitude $36^{\circ}17'$ Nord- Longitude $6^{\circ}37'$ Est) a été faite par le calcul des hauteurs et des azimuts solaires pour le 21 de chaque mois. Le diagramme polaire de Constantine (Fig.V-9) montre la variation saisonnière de la trajectoire du soleil et de la durée d'insolation le 21 de chaque mois. La trajectoire du soleil est presque identique en hiver, pour le mois de novembre, décembre et janvier. De même en été pour les mois de mars, juillet et juin.

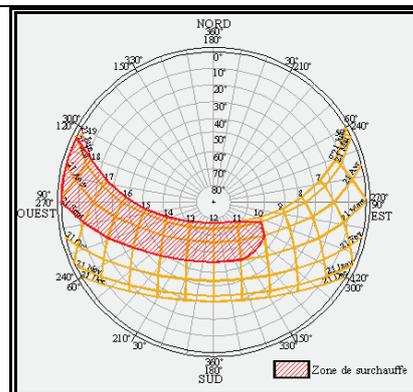


Figure V- 9. Diagramme polaire de la ville de Constantine
(Source. Auteur)

C'est au solstice d'hiver (21 décembre), jour le plus court, que le soleil possède la trajectoire la plus courte et où il est bas avec une hauteur maximale de $30^{\circ}28'$ à (12 :00h). Le soleil se lève durant cette période au Sud- Est (azimut -60°) à (7 : 30mn) et se couche au Sud- Ouest (azimut $+60^{\circ}$) à (16 :30mn). L'incidence des rayons du soleil atteignant les façades des bâtiments se fait sentir vers (8 :30mn) lorsque le soleil a une hauteur de 15° .

Aux équinoxes d'automne et de printemps, le soleil a une position médiane, se levant exactement à l'Est (-90°) à (6 :00h) du matin et se couchant à l'Ouest ($+90^{\circ}$) vers (18 :00h). En mars et septembre, le soleil atteint une hauteur maximale de $53^{\circ}83'$ à midi.

Au solstice d'été (21 juin) jour le plus long, le soleil se lève du Nord-Est (azimut -130°) à (4 :72mn) et se couche au Nord- Ouest (azimut $+130^{\circ}$) vers (19 :15mn). Le soleil passe presque par le zénith à (12 :00 h) avec une hauteur de $77^{\circ}19'$. Soit une différence de $46^{\circ}91'$ avec la hauteur du soleil à (12 :00 h) au solstice d'hiver, ce qui est important.

Tableau V-6. Position du soleil à Constantine (Latitude $36^{\circ}17'$ Nord, Longitude $6^{\circ}37'$ Est)
(Source. Auteur)

Heure	Angle	21-juin	21-mai	21-avr	21-mars	21 Fev	21-janv	21 Dec
			21-juil	21-août	21-sept	21-oct	21-nov	
12h	hauteur	$77^{\circ}19'$	$74^{\circ}14'$	$65^{\circ}49'$	$53^{\circ}83'$	$42^{\circ}36'$	$33^{\circ}48'$	$30^{\circ}28'$
	Azimut	0°						
13h	hauteur	$71^{\circ}79'$	$69^{\circ}43'$	$62^{\circ}64'$	$51^{\circ}24'$	$40^{\circ}98'$	$32^{\circ}31'$	$29^{\circ}08'$
	Azimut	$49^{\circ}72'$	$43^{\circ}94'$	$33^{\circ}65'$	$24^{\circ}53'$	$19^{\circ}74'$	$16^{\circ}79'$	$15^{\circ}84'$
14h	hauteur	$61^{\circ}15'$	$59^{\circ}37'$	$53^{\circ}97'$	$44^{\circ}36'$	$35^{\circ}19'$	$27^{\circ}29'$	$24^{\circ}31'$
	Azimut	$71^{\circ}85'$	$67^{\circ}00'$	$56^{\circ}39'$	$44^{\circ}36'$	$36^{\circ}88'$	$31^{\circ}88'$	$30^{\circ}22'$
15h	hauteur	$49^{\circ}31'$	$47^{\circ}73'$	$42^{\circ}98'$	$34^{\circ}80'$	$26^{\circ}69'$	$19^{\circ}68'$	$17^{\circ}03'$
	Azimut	$83^{\circ}93'$	$81^{\circ}41'$	$71^{\circ}95'$	$59^{\circ}42'$	$51^{\circ}21'$	$45^{\circ}07'$	$42^{\circ}94'$
16h	hauteur	$37^{\circ}23'$	$35^{\circ}68'$	$30^{\circ}91'$	$23^{\circ}81'$	$16^{\circ}31'$	$10^{\circ}12'$	$7^{\circ}78'$
	Azimut	$85^{\circ}85'$	$89^{\circ}76'$	$81^{\circ}42'$	$71^{\circ}17'$	$62^{\circ}26'$	$55^{\circ}68'$	$53^{\circ}31'$
17h	hauteur	$25^{\circ}29'$	$23^{\circ}54'$	$18^{\circ}85'$	$12^{\circ}11'$	$5^{\circ}17'$		
	Azimut	$78^{\circ}15'$	$81^{\circ}24'$	90°	$79^{\circ}06'$	$72^{\circ}06'$		
18h	hauteur	$13^{\circ}58'$	$11^{\circ}81'$	$6^{\circ}80'$				
	Azimut	$70^{\circ}62'$	$68^{\circ}61'$	$80^{\circ}61'$				
19h	hauteur	$2^{\circ}42'$	$0^{\circ}45'$					
	Azimut	$62^{\circ}33'$	$64^{\circ}53'$					
20h	hauteur							
	Azimut							
Angle horaire du soleil		$70^{\circ}74'$	$73^{\circ}45'$	$81^{\circ}33'$	90°	$82^{\circ}62'$	$74^{\circ}75'$	$70^{\circ}74'$
Levé & couché		4h72	4h90	5h42	6h	5h51	4h98	4h72

La zone de surchauffe sur le diagramme polaire a été reportée des isothermes établies pour la ville de Constantine (Fig. V-10) et les températures horaires ont été obtenues de la calculatrice des températures horaires.

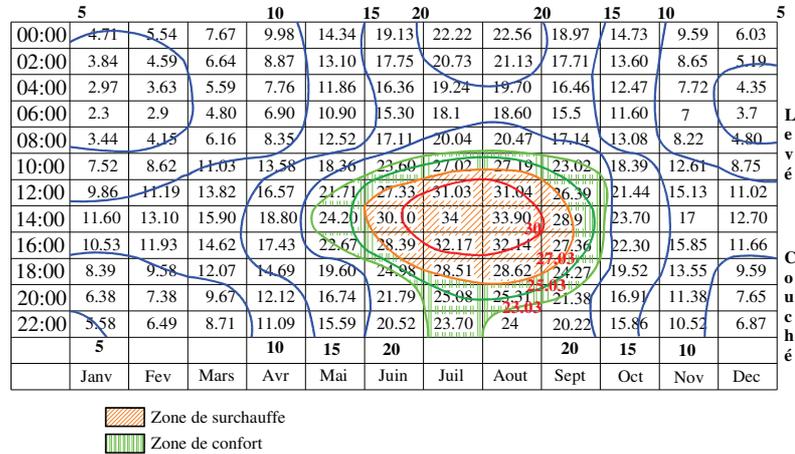


Figure V-10. Isothermes de la ville de Constantine (Source. Auteur)

<p>Zone très froide : janvier, février, mars avril, novembre et décembre sont concernés puisque leurs températures sont en dessous de 10°C.</p>	<p>Zone froide : concerne les mois de mars, avril, mai, octobre et novembre, dont les températures sont comprises entre 10°C et 15°C.</p>	<p>Zone de confort : est comprise entre les températures 15°C et 20°C et englobe le mois de mars, avril, mai, octobre, et novembre, où le chauffage passif est nécessaire l'après midi</p>	<p>Zone chaude : englobe le mois de juin, juillet, août et septembre, est comprise entre les courbes 20°C et 25°C.</p>	<p>Zone de surchauffe : pour les mois les plus chaud (juillet et août et une partie de juin) pour des températures au dessus de 25°C, générées par des radiations solaires perpendiculaires d'une intensité maximale.</p>
--	--	---	---	--

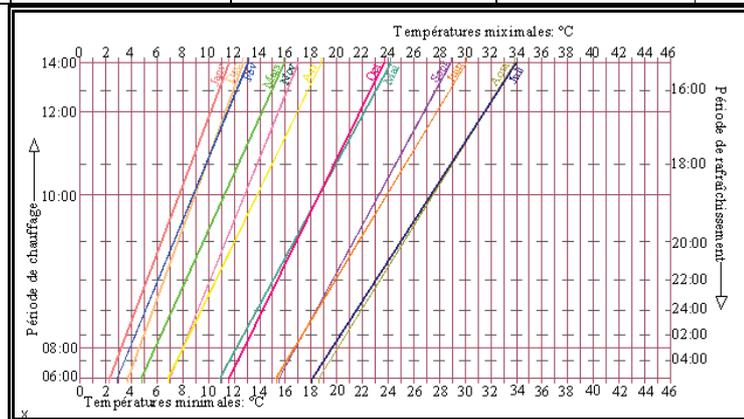


Figure V-11. Calculatrice des températures horaires appliquée à la ville de Constantine (Source. Auteur)

La zone de confort représentée dans les isothermes de Constantine représente les limites de confort Tc et la température neutre Tn, calculées par la formule de Humphrey :

$$T_n = 11.09 + 0.534 T_0 \dots\dots\dots \text{Équation 1}$$

Où ; Tn est la températures neutre et T0 est la température moyenne du mois de Juillet (26.1°C)

$T_n = 25.03^{\circ}\text{C}$.

Les limites de confort sont calculées par la formule suivante : $T_c = T_n \pm 2\text{ K}$

$T_c = T_n + 2\text{ K} = 27.03^{\circ}\text{C}$ c'est la limite supérieure du confort.

$T_c = T_n - 2\text{ K} = 23.03^{\circ}\text{C}$ c'est la limite inférieure du confort.

Les maques d'ombres des différentes stations de la toiture végétale :

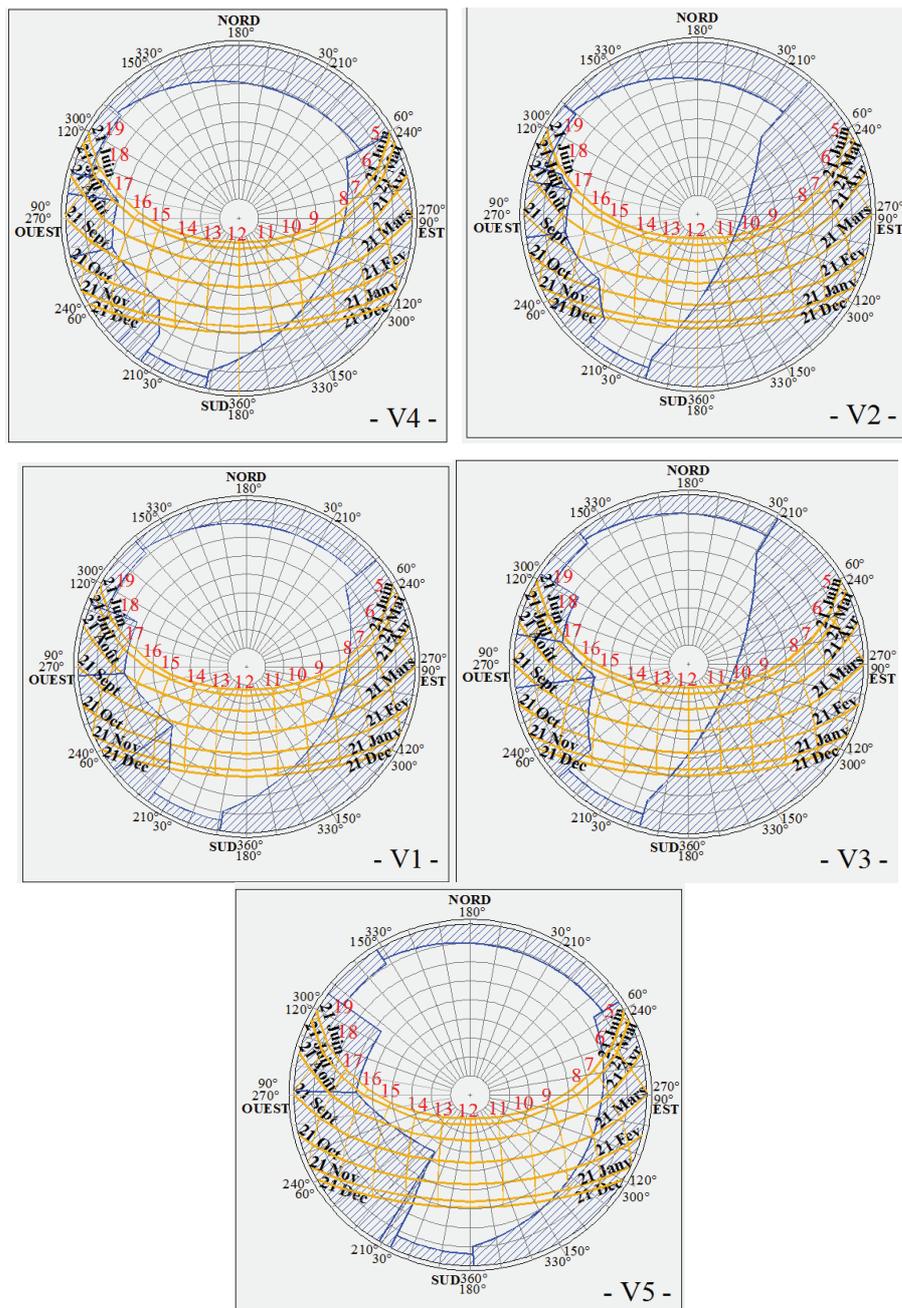


Figure V-8. Diagrammes stéréographiques des masques d'ombres au dessus de la chambre 2(V1-S2- S3- V4-V5) (Source. Auteur)

Abstract :

Uncontrolled urban spreading out with the detriments of green surfaces as well as constructions unsuited to the places and the climates contributed to the current climatic upheavals, because of the over consumption of energy for the heating and air-conditioning. For that, to reconsider town planning, the architecture and the thermal regulations of the buildings became the prevalent to be adopted, based mainly on the creation of wild local microclimate. Knowing that, it is in summer that the lack of evaporative sources is felt the most in the urban centres, but also inside the buildings, especially in the countries with hot and dry climate.

Greenroofs constitutes a substitution for the parks on the ground sacrificed for the urbanization, since they allow the restitution of vegetable surfaces on the roofs, the creation of microclimates and several other advantages; environmental, ecological, economic, social... However since few years, it is, its role of passive cooling of the buildings which is the most searched in developed countries. The aim of this consists on decreasing the systematic use of air-conditioners, reducing then gas emissions and urban heat island.

In fact, greenroof is an old technique widely used in either Scandinavian countries or hot countries, as a thermal regulator. It has been modernized in low-cost and efficient extensive system for sustainability. The main goal through this research is thus, to assess the capacity of passive cooling of the buildings and to evaluate the thermal comfort generated by this light system under the semi- arid climate of Constantine. With this intention, an experimental roof with extensive vegetation was installed on the accessible terrace from an individual dwelling. It consists of substrate of 6cm depth, planted with various species of CAM type (*Crassulacean Acid Metabolism*) and other succulent vegetation, which are resistant to dryness. On site, measurements are undertaken to read air temperatures, surface temperatures and relative humidity into the building. The results of this investigation attest of capacity of passive cooling of greenroofs and importance of protection surfaces of the roofs from intense solar radiations in summer under the semi-arid climate. This cooling effect is induced by the shade, evapotranspiration of the vegetation but also with the thermal mass of the substrate.

Key words. Extensive green roof, passive cooling, interior thermal comfort, crassulacean and succulent vegetation, semi- arid climate.

الملخص

إن التوسع الحضري الغير المنضم على حساب المساحات الخضراء بالإضافة إلى البنايات الغير الملائمة مع المقر و المناخ ساهموا في التغيرات المناخ الحالي. و ذلك بسبب الاستهلاك المفرط للطاقة للتدفئة وتكييف الهواء في الصيف. لذلك إعادة النظر في التخطيط الحضري والهندسة المعمارية وبناء القوانين الحرارية أصبحت شعار يجب أن نعتد عليه بالاستناد في المقام الأول على خلق مناخ محلي في المنطقة المجاورة للمباني. مع العلم أنه في فصل الصيف أين تكثر الحاجة إلى مصادر التبخر في المراكز الحضرية، و لكن أيضا داخل المباني ، لا سيما في البلدان ذات المناخ الحار. السطح الأخضر هو بديل المساحات الخضراء على الأرض التي استعمرت من أجل التنمية الحضرية. و ذلك لأنه يسمح بخلق المناخ المحلي فوق الأسطح و عدة استحقاقات أخرى لا تعد ولا تحصى ، بالإضافة إلى استحقاقات الإيكولوجية، البيئية، الاقتصادية والاجتماعية وغيرها... ولكن يعد دور هذه المساحات في تبريد للمباني هو الأكثر شعبية في معظم البلدان المتقدمة في السنوات الأخيرة. و لذلك، لأنه يمكن الحد من الاستخدام الغير المنضم للمكيفات الهواء وتقليل الانبعاث الغازات المسببة للاحتباس الحراري و جزيرة الحرارة الحضرية.

وبالفعل ، فإن حدائق السطح هي تقنية قديمة تستخدم على نطاق واسع في البلدان الشمال الأوروبي و البلدان ذات المناخ الحار كمنظم الحراري غير مكلف. و تم تحديثه تحت شعار التنمية المستدامة في منظومة واسعة غير مكلفة وفعالة. و لذلك إن الهدف الرئيسي من خلال هذا البحث هو التحقق من قدرة التبريد للمباني ولتقييم الراحة الحرارية المتولدة عن هذا النظام الخفيف الوزن في المناخ شبه القاحل في قسنطينة. و للقيام بذلك، تم بناء سقف مخضر تجريبي على سطح منزل فردي. هذا الأخير يتألف من 6 سم من التربة تم زرعه بأنواع مختلفة النباتات مقاومة للجفاف من نوع CAM (*Acid Metabolism crassulacean*).

لقد تم قياس درجات حرارة الهواء ودرجة حرارة مساحة السطح و نسبة الرطوبة الناتجة. نتائج هذا التحقيق أثبتت قدرة التبريد الغير المكلف لهذا النوع من الأسطح الخضراء وأهمية حماية مساحة السطح من أشعة الشمس مكثفة خلال الصيف في مناخ شبه القاحل. ينتج هذا التبريد من قدرة التظليل، والتبخر الناتج من النباتات ولكن أيضا إلى الكتلة الحرارية التربة.

كلمات البحث: السقف المخضر، التبريد الغير المكلف، الراحة الحرارية، النباتات المقاومة للجفاف، المناخ شبه القاحل.