

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE
FACULTE DES SCIENCES DE LA TERRE, DE LA GEOGRAPHIE ET DE
L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE

DEPARTEMENT D'ARCHITECTURE ET D'URBANISME

N° d'Ordre.....

Série.....

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

THEME

IMPACT DE LA VEGETATION GRIMPANTE SUR LE
CONFORT HYGROTHERMIQUE ESTIVAL DU
BATIMENT
CAS DU CLIMAT SEMI ARIDE

Présenté par :

M^{elle} BENHALILOU KARIMA

Sous la direction de :

Dr. ABDOU SALIHA

Devant le jury d'examen :

Date de soutenance le:

Président : Dr BOUCHAHM YASMINA	Maître de Conférences	Université de Constantine
Examineur : Dr SAFFIDINE DJAMILA	Maître de Conférences	Université de Constantine
Examineur : Dr FOURA YASMINA	Maître de Conférences	Université de Constantine
Rapporteur : Dr ABDOU SALIHA	Maître de Conférences	Université de Constantine

2008

SOMMAIRE

Table des matières	I
Liste des figures	VI
Liste des tableaux	IX
Liste des photos	IX

Introduction générale

Introduction	1
Problématique	2
Objectifs et hypothèses	4
Méthodologie de la recherche	5

Chapitre I : Architecture et climat

Introduction	7
1. Concepts liés à la bioclimatique	7
1.1. Les changements climatiques	7
1.2. Notion d'énergies renouvelables	8
1.2.1. Sources d'énergies renouvelables	10
1.3. Le développement durable	11
1.3.1. Objectifs du développement durable	13
1.4. La haute qualité environnementale	15
1.4.1. Objectifs de la HQE	17
1.4.2. Relation : architecture/climat	17
1.5. La démarche bioclimatique	18
1.5.1. Principes de base de l'architecture bioclimatique	19
1.5.2. Végétalisation, démarche bioclimatique durable et HQE	20
2. Notion d'économie d'énergie	22
2.1. Consommation énergétique en Algérie	22
2.2. Consommations dans le secteur ménager en Algérie	23
2.3. Consommation du gaz naturel et d'électricité	24
2.4. Consommation énergétique du gaz et d'électricité au niveau de la ville de Constantine	26
Conclusion	27

Chapitre II : Paramètres influents sur le confort intérieur

Introduction	29
1. Notion de confort	29
1.1 Le confort dans l'habitat	30
1.2. Le confort thermique	30
1.2.1 L'approche analytique	31
1.2.2. L'approche adaptative :	32
1.3. Le confort hygrothermique	32
1.4. Les paramètres influençant le bilan thermique	33
1.5. Outils d'évaluation du confort thermique	35
2. Les outils d'aide à la conception bioclimatique	37
3. Rappel des grandeurs physiques fondamentales en thermique	38
3.1. Concepts de température et de chaleur	38
3.1.1. La chaleur	38
3.1.1.1. La chaleur sensible	38

3.1.1.2. La chaleur latente	38
3.1.2. La température	39
4. Facteurs influant sur le confort thermique	39
4.1. Facteurs liés aux conditions climatiques	39
4.1.1. La température de l'air	39
4.1.2. L'humidité de l'air	40
4.1.3. Le vent	40
4.1.4. Rayonnement vers la voûte céleste	40
4.1.5. L'ensoleillement	40
4.1.5.1. Composition du rayonnement solaire	41
4.1.5.1.1. Intensité du rayonnement solaire sur une paroi	41
4.1.5.1.2. Le flux solaire intercepté par une paroi	43
4.1.5.2. Les différents modes de transfert de chaleur dans le bâtiment	45
4.1.5.2.1. Transfert de chaleur par conduction	45
4.1.5.2.2. Transfert de chaleur par convection	46
4.1.5.2.3. Transfert de chaleur par rayonnement	47
4.1.5.3. Comportement thermique des parois	48
4.1.5.3.1. Les parois opaques	48
4.1.5.3.2. Les parois transparentes	50
4.2. Facteurs liés à la conception	53
4.2.1. Effet de l'orientation	53
4.2.2. L'albédo	55
4.2.3. Systèmes d'occultation des parois	57
4.2.3.1. Auvents et écrans végétaux	57
4.2.4. Effet de l'inertie thermique	58
4.2.5. Effet de la ventilation sur l'ambiance intérieure	60
4.2.5.1. Effet de la ventilation transversale sur la température interne	61
4.2.5.2. Effet de la ventilation nocturne	62
4.2.6. Occupation et gains internes	63
Conclusion	64

Chapitre III : Effets de la végétation

Introduction	65
1. Typologie végétale	65
1.1. Structure des feuilles	65
1.2. Morphologie : types et formes de feuilles	66
1.3. Adaptation des plantes	66
1.4. Différents types de végétaux	67
1.5. La végétation caduque et persistante	68
1.6. Ambiances saisonnières des plantes	69
1.6.1. Les ambiances d'hiver	69
1.6.2. Les ambiances d'été	69
1.6.3. Les ambiances de mi-saison	70
1.7. Les plantes grimpantes	70
1.7.1. Exemples de Plantes grimpantes à feuillage persistant	71
1.7.1.1. Le lierre (Hedera Helix)	71
1.7.2. Exemples de Plantes grimpantes à feuillage caduc	72
1.7.2.1. La vigne (vitis)	72
1.7.2.2. La vigne vierge	73
1.7.2.3. La vigne vierge de Virginie (Parthenocissus Quinquefolia)	74
1.7.2.4. La glycine (Wisteria)	74

1.8. Choix des végétaux selon l'orientation	76
2. Effets particuliers de la végétation	77
2.1. Effet d'oxygénation	77
2.2. Effet d'évapotranspiration	77
2.3. Effet d'ombre	78
2.4. Effet de brise vent	80
2.5. Effet de Séquestration des polluants	81
2.6. Effet d'isolation acoustique	82
2.7. Effet esthétique et valeur économique	83
3. Les toitures végétalisées	83
3.1. Définition	84
3.2. Type de toiture végétalisée	84
3.3. Les éléments d'un toit vert	85
3.4. Les plantes à privilégier pour les toits verts	86
3.5. Les avantages des toits verts	87
3.5.1. Prolongement de la durée de vie des toitures	87
3.5.2. Rétention des eaux de ruissellement	87
3.5.3. Assainissement de l'air extérieur en milieu urbain	87
3.5.4. Efficacité énergétique et performance thermique	88
3.5.5. Isolation acoustique	92
4. Verdissage des cours	93
5. Les murs végétalisés	93
5.1. Composition du mur végétalisé	94
5.2. Avantages des murs verts	94
Conclusion	97

Chapitre IV : Impact des plantes sur le confort des bâtiments

Introduction	99
1. Performances de refroidissement des plantes grimpantes	100
1.1. Effets thermiques des murs couverts de lierre	100
1.1.1 Expérience à Hong Kong	100
1.1.2. Expérience à Pékin	103
1.1.3. Expérience au Japon	106
1.2. Effets thermiques d'une variété de vignes sur les températures des murs	108
1.2.1. Expérience aux états unis	108
1.2.1.1. Essai d'une couverture de Glycine sur une pergola ouest	109
1.2.1.2. Essai des vignes grimpant contre un mur de brique orienté sud	110
1.2.1.3. Essai des Espaliers accroissant sur un mur ouest en stuc	111
1.2.2. Expérience au Japon	113
1.3. Effet thermique des vignes sur l'environnement thermique interne d'une façade vitrée	114
1.3.1. Expérience en Angleterre	114
1.3.2. Expérience à Toronto	116
1.4. Effets thermiques d'une combinaison de végétation à feuilles caduques et persistantes sur les murs extérieurs	119
2. Performances de refroidissement des arbres	119
2.1. Refroidissement à travers l'ombre	119
2.2. Refroidissement à travers l'ombre d'arbre à feuilles persistantes	120
2.3. Relation entre la quantité d'ombre d'arbre et la température intérieure des bâtiments dans un climat chaud et sec	122

3. Le rôle de la végétation dans la conservation d'énergie	124
3.1. Incidence sur la consommation d'énergie de climatisation	124
3.2. Incidence sur la consommation d'énergie de chauffage dans un climat froid	126
4. Impact de la végétation sur la pollution	127
Conclusion	130

Chapitre V : Méthodologie et présentation du cas d'étude

Introduction	131
1. Rappel des hypothèses de l'étude	131
2. Objectif de l'étude	132
3. Technique et méthode d'investigation	132
4. Présentation et situation de la ville	133
5. Analyse des éléments du climat	133
5.1. La température de l'air	135
5.2. Le rayonnement solaire	136
5.3. Humidité relative	136
5.4. Précipitations	137
5.5. Vent	138
5.6. Diagramme ombrothermique	139
6. Analyse bioclimatique de la ville de Constantine	139
6.1. Application de la méthode de Mahoney	139
6.2. Application de la méthode de Szokolay	140
6.3. Position du soleil à Constantine	141
6.4. Détermination des zones d'ensoleillement et d'ombre	143
7. Critères de choix du site	145
8. Critères de choix des échantillons	145
9. Conditions de déroulement des mesures	148
10. Descriptif des maisons testées	150
11. Choix des points de mesure et paramètres mesurés	151
12. Instrumentation utilisée	153
13. Choix de la période de mesures et son déroulement	155
14. Scénarios spécifiques aux pièces testées	156
14.1. Maison "A"	156
14.2. Maison "B"	158
14.3. Maison "C"	159
14.4. Maison "D"	160
Conclusion	162

Chapitre VI : Interprétation et discussion des résultats

Introduction	163
1. Etude du comportement thermique des maisons et de leur confort au mois de juillet	163
1.1. Etude comparative des maisons "A" et "B"	163
1.1.1. Variation des températures dans les maisons "A" et "B"	163
1.1.2. Variation des températures surfaciques dans les maisons "A" et "B"	165
1.1.3. Etude de la variation de la vitesse de l'air intérieur et extérieur dans la maison "A"	170
1.1.4. Etude de la variation de l'humidité relative moyenne intérieure et extérieure des maisons "A" et "B"	171
1.2. Etude comparative des maisons "A" et "C"	173
1.2.1. Variation des températures dans les maisons "A" et "C"	173
1.2.2. Etude de la variation des températures surfaciques des maisons "A" et "C"	174

1.2.3. Variation des températures du feuillage des maisons "A" et "C"	177
1.2.4. Etude de la variation de l'humidité relative moyenne intérieure et extérieure dans les maisons "A" et "C"	179
1.2.5. Etude de la variation de l'humidité relative moyenne du feuillage dans les maisons "A" et "C"	180
1.3. Analyse comparative des trois échantillons	182
1.3.1. Evaluation de la performance thermique des trois pièces	182
1.3.2. Comparaison des écarts de température moyenne intérieure et extérieure (ti-te).....	184
1.3.3. Comparaison des températures surfaciques externes des trois maisons	185
1.3.4. Comparaison des humidités relatives dans les trois échantillons	185
1.3.5. Comparaison de la température du feuillage "A" et la température de surface "B"	186
2. Etude comparative du comportement thermique des maisons A et D au mois d'août	187
2.1. Comparaison des températures moyennes intérieures et extérieures des maisons "A" et "D"	187
2.2. Comparaison des températures surfaciques internes et externes des maisons "A" et "D"	188
2.3. Evaluation de la performance thermique des deux pièces	191
2.4. Comparaison des écarts de température moyenne intérieure et extérieure (ti-te)	192
2.5. Comparaison des températures du feuillage des maisons "A" et "D"	193
2.6. Comparaison des humidités relatives internes et externes et celles du feuillage des maisons "A" et "D"	194
3. Simulation à l'aide du logiciel TRNSYS version 14.1	196
3.1. Description du logiciel	196
3.1.1. Avantages du logiciel TRNSYS	197
3.1.2. Inconvénients du logiciel TRNSYS	197
3.2. Déroulement de la simulation	197
3.3. Comparaison entre températures mesurées et calculées par TRNSYS	199
3.3.1.a. Vérification des températures mesurées et celles simulées par TRNSYS dans la maison "B"	199
3.3.1.b. Vérification des températures surfaciques mesurées et celles simulées par TRNSYS dans la maison "B"	200
3.3.1.c. Vérification des humidités relatives mesurées et celles simulées par TRNSYS dans la maison "B"	200
3.3.2.a. Comparaison des températures intérieures mesurées et celles simulées sans l'écran végétal par TRNSYS dans la maison "A"	201
3.3.2.b. Comparaison des températures surfaciques mesurées et celles simulées sans l'écran végétal par TRNSYS dans la maison "A"	202
3.3.2.c. Comparaison des humidités relatives mesurées et celles simulées sans l'écran végétal par TRNSYS dans la maison "A"	202
3.3.3.a. Comparaison des températures intérieures mesurées et celles simulées sans l'écran végétal pour une couleur claire dans la maison "A"	203
3.3.3.b. Comparaison des températures surfaciques mesurées et celles simulées sans l'écran végétal pour une couleur claire dans la maison "A"	204
Conclusion	205
Conclusion générale	207
Bibliographie	214
Annexes	224
Résumés	251

Liste des figures :

Figure I-1 : Evolution de la température moyenne à la surface de la terre	8
Figure I-2: Ressources énergétiques fossiles et consommation d'énergie	9
Figure I-3: Schéma des trois piliers du développement durable	14
Figure I-4: Les quatorze cibles de la Haute Qualité Environnementale des bâtiments	16
Figure I-5 : Consommation d'énergie par secteur (période 1980-2000)	23
Figure I-6 : Consommation énergétique dans le secteur ménager en Algérie	24
Figure I-7 : Consommation de gaz et d'électricité dans le secteur ménager en Algérie	25
Figure I-8 : Consommation électrique de la ville de Constantine en (GWh)	26
Figure I-9 : Consommation gazière de la ville de Constantine (en Mth)	27
Figure II-1 : Les échanges thermiques du corps humain	34
Figure II-2 : Indice PMV-PPD	36
Figure II-3: Rayonnement solaire direct sur une surface	42
Figure II-4 : Rayonnement solaire diffus sur une surface	42
Figure II-5 : Radiations solaires globales	43
Figure II-6 : Composantes de l'équilibre thermique sur une surface opaque	45
Figure II-7: Transfert de chaleur par conduction	46
Figure II-8: Mode de transfert de chaleur à travers une paroi opaque	49
Figure II-9: Flux énergétique incident sur une paroi opaque	49
Figure II-10 : Absorption, réflexion et transmission de la radiation solaire par une simple paroi de verre ordinaire	51
Figure II-11 : Radiations directes pour une surface verticale pour différentes orientations durant un mois chaud de l'année – Juillet- pour la ville de Constantine	54
Figure II-12: Coefficients d'absorption pour différents matériaux et différentes couleurs	56
Figure II-13 : Solutions de protection solaire pour une paroi Ouest	58
Figure II-14 : Protections solaires pour une paroi verticale Sud	58
Figure II-15 : Temps de déphasage de différents matériaux de construction en fonction des épaisseurs types	59
Figure II-16 : Régime des flux d'air subdivisés intérieurement d'une manière différente	62
Figure II-17: Effet de la ventilation nocturne sur la température d'air intérieure	63
Figure III-1: Forme et type de feuilles	66
Figure III-2: Arbres d'alignement	67
Figure III-3: Le cycle saisonnier des plantes grimpantes à feuillage caduc	69
Figure III-4: Plantes grimpantes sur terrasse et pergola	71
Figure III-5: la plante du lierre	72
Figure III-6: La vigne californica	73
Figure III-7 : La vigne vierge de Virginie	74
Figure III-8 : Plante de Glycine	75
Figure III-9: Traitement de la façade OUEST	76
Figure III-10 : Influence de la forme d'arbre par rapport à l'ombre	79
Figure III-11 : Coupe d'un toit végétalisé	86
Figure III-12: Séparation des deux toits : le toit vert (à gauche) et le toit de référence (à droite)	88
Figure III-13: Fluctuations journalières des températures sur un toit végétalisé et un toit nu à Toronto	89
Figure III-14: Modèle des deux toitures simulées	90
Figure III-15: Variations de températures journalières du toit de référence, toit vert et l'air ambiant, par saison (Nov 2000 à sept 2001)	90
Figure III-16: Comparaison du flux de chaleur avant et après végétalisation du toit	92
Figure III-17: Coupe d'un mur végétal	94

<i>Figure III-18: Usage des plantes grimpantes à feuilles caduques</i>	96
<i>Figure III-19 : Mur végétal du musée Quai Branly réalisé par Patrick Blanc</i>	97
<i>Figure IV-1: Model du mur couvert de lierre</i>	100
<i>Figure IV-2: Rapport entre HF et H</i>	101
<i>Figure IV-3: Modèle de température dans un mur couvert de lierre</i>	102
<i>Figure IV-4: Relation entre HF et rapport de couverture (r)</i>	102
<i>Figure IV-5: Vue Ouest de la bibliothèque d'université de Tsinghua</i>	103
<i>Figure IV-6: Installation expérimentale</i>	104
<i>Figure IV-7: Variation des températures pendant le jour</i>	105
<i>Figure IV-8: Transfert d'énergie à la couche de feuilles le 24-07-1996</i>	105
<i>Figure IV-9: Variations journalières du flux de chaleur aux surfaces du mur ouest</i>	107
<i>Figure IV-10: Installation de l'expérience</i>	108
<i>Figure IV-11 : Section de la Pergola montrant les endroits de mesures</i>	109
<i>Figure IV-12: Vigne de Campsis sur un mur sud de brique</i>	110
<i>Figure IV-13 : Températures maximales journalières en septembre 2001</i>	111
<i>Figure IV-14: Mur en stuc couvert d'espaliers.</i>	112
<i>Figure IV-15: Diagramme des données de pergola et d'espalier</i>	112
<i>Figure IV-16: Variations journalières du rayonnement solaire incident sur la véranda avec et sans écran de vigne</i>	113
<i>Figure IV-17 : Le Bioshader</i>	115
<i>Figure IV-18 : Ecart de température entre la salle d'essai et la salle témoin</i>	116
<i>Figure IV-19: Jardin vertical testé à l'université de Toronto</i>	117
<i>Figure IV-20 : Variation des températures surfaciques entre une protection avec arbre et sans arbre</i>	121
<i>Figure IV-21: Rapport : distance/ hauteur d'arbre pour ombrager une maison à deux étages.</i>	122
<i>Figure IV-22 : Diagramme de l'impact de l'augmentation de la couverture d'arbre en % sur la température intérieure d'un bâtiment dans des conditions atmosphériques claires</i>	124
<i>Figure V-1: Situation de la ville de Constantine</i>	133
<i>Figure V-2 : Zones climatiques d'été</i>	134
<i>Figure V-3 : Zones climatiques d'hiver</i>	134
<i>Figure V-4: Variation des Températures de l'air extérieur (Période : 1996-2005)</i>	135
<i>Figure V-5: Durées d'insolation de la ville de Constantine Période « 1996-2005 »</i>	136
<i>Figure V-6: Variation de l'Humidité relative (période : 1996-2005)</i>	136
<i>Figure V-7 : Précipitations de la ville de Constantine (période : 1996-2005)</i>	137
<i>Figure V-8: Variation de la vitesse moyenne des vents (période : 1996-2005)</i>	138
<i>Figure V-9: Diagramme ombrothermique de la ville de Constantine</i>	139
<i>Figure V-10 : Diagramme psychrométrique de Szokolay appliqué à la ville de Constantine ...</i>	140
<i>Figure V-11: Diagramme polaire de la ville de Constantine</i>	143
<i>Figure V-12 : Isothermes de la ville de Constantine</i>	144
<i>Figure V-13: Localisation des quatre échantillons testés</i>	146
<i>Figure V-14: Orientation des maisons testées et trajectoire solaire</i>	147
<i>Figure V-15: Irradiations solaires sur une paroi verticale orientée Sud-ouest (azimut mur = 30)</i>	148
<i>Figure V-16: Composition de la paroi extérieure</i>	148
<i>Figure V-17: Points de mesures dans la maison « A »</i>	152
<i>Figure V-18: Plan d'étage de la maison "A"</i>	156
<i>Figure V-19: Plan d'étage de la maison "B"</i>	158
<i>Figure V-20 : Plan d'étage de la maison "C"</i>	159
<i>Figure V-21 : Plan d'étage de la maison "D"</i>	161

<i>Figure VI-1:Variation des températures intérieures et extérieures dans les maisons "A" et "B"</i>	164
<i>Figure VI-2: Variation des températures de surfaces moyennes intérieures et extérieures dans les maisons "A" et "B"</i>	166
<i>Figure VI-3:Tracé du gradient thermique au niveau de la paroi extérieure des maisons "A" et "B"</i>	167
<i>Figure VI-4: Evolution de la température dans les maisons "A" et "B"à différents points de mesure et à différentes heures</i>	169
<i>Figure VI-5: Variation de la vitesse de l'air intérieur et extérieur dans la maison "A"</i>	170
<i>Figure VI-6: Variation de l'humidité relative moyenne intérieure et extérieure dans les maisons "A" et "B"</i>	171
<i>Figure VI-7 : Variation de l'humidité relative moyenne et de la température moyenne de l'air intérieur dans la maison "B"</i>	172
<i>Figure VI-8: Variation des températures de l'air intérieur et extérieur dans les maisons "A" et "C"</i>	174
<i>Figure VI-9:Variation des températures surfaciques moyennes intérieures et extérieures dans les maisons "A" et "C"</i>	175
<i>Figure VI-10:Tracé du gradient thermique au niveau de la paroi extérieure de la maison "C"</i>	175
<i>Figure VI-11 : Prospect de la rue bordée de maisons (maison "C" à droite).....</i>	176
<i>Figure VI-12 : Variation des températures moyennes intérieures et extérieures et celles du feuillage dans les maisons "A" et "C"</i>	177
<i>Figure VI-13: Evolution des températures dans les maisons "A" et "C" à différents points de mesure à 14h00</i>	178
<i>Figure VI-14 : Variation de l'humidité relative moyenne intérieure et extérieure dans les maisons "A" et "C"</i>	180
<i>Figure VI-15 : Variations des humidités relatives moyennes intérieures et extérieures et celles du feuillage dans les maisons "A" et "C"</i>	180
<i>Figure VI-16 : Variation du taux de transpiration des feuilles et des températures de l'air pour différentes vitesses du vent</i>	181
<i>Figure VI-17: Comparaison des températures moyennes intérieures des trois maisons avec les limites de confort</i>	183
<i>Figure VI-18:Variation de l'écart de température intérieure et extérieure pour les trois échantillons</i>	184
<i>Figure VI-19 : Variation des températures surfaciques extérieures des trois maisons "A", "B" et "C"</i>	185
<i>Figure VI-20:Variation de l'humidité relative moyenne des trois échantillons "A", "B" et "C"</i>	186
<i>Figure VI-21 : Variations des températures du feuillage de la maison "A" et les températures de surface de la maison "B"</i>	187
<i>Figure VI-22: Variations de la température moyenne dans les maisons "A" et "D"</i>	188
<i>Figure VI-23: Variation des températures surfaciques des maisons "A" et "D"</i>	189
<i>Figure VI-24 : Prospect de la rue</i>	189
<i>Figure VI-25 :Tracé du gradient thermique au niveau de la paroi extérieure de la maison "D"</i>	191
<i>Figure VI-26: Comparaison des températures moyennes intérieures avec les limites de confort ...</i>	
<i>Figure VI-27: Ecart de températures bi-horaires intérieures et extérieures des échantillons "A" et "D"</i>	192
<i>Figure VI-28: Comparaison des températures intérieures et celles du feuillage des maisons "A" et "D"</i>	193
<i>Figure VI-29 :Variation de l'humidité relative moyenne intérieure et extérieure et celle du feuillage des deux échantillons "A" et "D"</i>	194
<i>Figure VI-30: Schéma de déroulement de la simulation</i>	199
<i>Figure VI-31: Comparaison des températures intérieures mesurées et simulées pour la maison "B"</i>	199
<i>Figure VI-32: Comparaison des températures surfaciques mesurées et simulées pour la maison</i>	200

"B"	201
Figure VI-33: Comparaison des humidités relatives mesurées et simulées pour la maison "B"	
Figure VI-34: Comparaison des températures intérieures mesurées et simulées pour la maison "A"	201
Figure VI-35: Comparaison des températures surfaciques mesurées et simulées pour la maison "A"	202
Figure VI-36: Comparaison des humidités relatives mesurées et simulées pour la maison "A"	203
Figure VI-37: Comparaison des températures intérieures mesurées et simulées pour la maison "A"	203
Figure VI-38: Comparaison des températures surfaciques mesurées et simulées pour la maison "A" pour une couleur claire	204

Liste des tableaux :

Tableau I-1 : Consommation d'électricité par habitant (en kWh)	25
Tableau II-1 : Echelle de sensation thermique de l'ASHRAE	32
Tableau II-2: Apports calorifiques sur une paroi selon son orientation	53
Tableau III-1: plantes grimpantes utilisées et leurs critères de sélection	75
Tableau III-2 : Performances des arbres face au bruit	83
Tableau III-3: Eléments composants des toits verts	85
Tableau IV-1: Les conditions d'ombrage	123
Tableau IV-2: Résumé des différentes expériences sur l'impact de la végétation sur le confort des bâtiments	129
Tableau V-1 : Vitesse et direction des vents à Constantine (période 1996-2005).....	138
Tableau V-2 : Hauteur et azimut du soleil à Constantine (36°17').....	142
Tableau V-3: Récapitulatif des caractéristiques technologiques des différents échantillons ...	149
Tableau V-4 : Paramètres mesurés	152
Tableau VI-1 : caractéristiques des maisons "A" et "B"	163
Tableau VI-2 : Caractéristiques des maisons "A" et "C"	173
Tableau VI-3: Caractéristiques de la maison "D"	187

Liste des photos :

Photo V-1: Vue aérienne du site d'étude	145
Photo V-2: Vues sur les différents échantillons testés	146
Photo V-3: Vues sur la maison "A"	150
Photo V-4: La vigne vierge vraie sur le mur de la maison "A"	150
Photo V-5: Appareils de mesures utilisés	154
Photo V-6: Aménagement de la pièce testée dans la maison "A"	157
Photo V-7: Aménagement de la pièce testée dans la maison "B"	159
Photo V-8: Aménagement de la pièce testée dans la maison "C"	160
Photo V-9: Aménagement de la pièce testée dans la maison "D"	162

Introduction :

Comme les phénomènes d'îlots de chaleur urbains, de changements climatiques et de pollution atmosphérique sont interreliés, les moyens à mettre en œuvre pour lutter contre ces problématiques le sont aussi. Or, les moyens employés actuellement pour contrer les impacts de ces vagues de chaleur sont très énergivores, souvent polluantes (certains appareils contiennent des CFC), et ne profitent qu'à un nombre restreint de personnes. Alors, il est urgent de penser à la problématique énergétique, au confort des occupants et à la préservation de l'environnement.

En ce début du 21^{ème} siècle, le contexte énergétique rappelle sous certains aspects celui des années 1980, au cours desquelles la problématique de l'énergie, conséquence du second choc pétrolier, s'est révélée comme une préoccupation planétaire de premier plan.

Cette crise énergétique allait brutalement mettre au devant de la scène l'importance du volume de combustible utilisé pour le chauffage et la climatisation des bâtiments et ses répercussions sur les économies nationales en termes de coûts d'exploitation et d'impact écologique et environnemental.

En Algérie, le secteur résidentiel et tertiaire se trouve parmi les secteurs les plus énergivores, avec une consommation de 46% de l'énergie finale et de 28% de l'énergie primaire¹. Le niveau de consommation de ce secteur, surtout en période estivale, constitue l'un des soucis majeurs exprimés dans le cadre du modèle de consommation énergétique Algérien.

Ainsi, les bâtiments résidentiels sont confrontés, en périodes de grandes chaleurs à des problèmes d'inconfort liés au phénomène de surchauffe et d'exposition des façades aux radiations solaires intenses et de consommation irrationnelle d'électricité pour la climatisation ; le confort hygrothermique étant reconnu, faut-il le souligner, comme une cible de la démarche de haute qualité environnementale.

Avec les préoccupations grandissantes du développement durable, le secteur du bâtiment doit donc répondre à deux exigences fondamentales: maîtriser à la fois les impacts sur l'environnement extérieur, et s'assurer d'ambiances intérieures saines et confortables.

¹ YASEF, A., "*Eléments pour une politique énergétique nationale*", proc. 1^{er} Symposium du comité Algérien d'énergie, Alger, 25-26 Novembre, 1996.

De ce fait, le souci de l'architecture bioclimatique est de permettre au bâtiment de bénéficier d'ambiances intérieures proches du confort pour une plage de variations des conditions extérieures assez large, sans le recours au conditionnement d'air artificiel. Lorsque les moyens mécaniques s'avèrent nécessaires, l'architecture bioclimatique permet de dépenser une quantité d'énergie réduite (chauffage ou climatisation) et de réaliser des économies². Elle vise principalement l'amélioration du confort qu'un espace bâti peut induire de manière « naturelle » c'est à dire en minimisant le recours aux énergies non renouvelables.

Par ailleurs, l'une des mesures de planification urbaine durable est de limiter la consommation énergétique des villes, parce qu'elle est coûteuse et qu'elle contribue à la pollution atmosphérique et de gérer les espaces naturels qui sont en effet les garants d'un équilibre écologique au sein des villes, équilibre qui doit être préservé.

Il s'agit, donc, de puiser dans notre environnement naturel, l'essentiel des énergies nécessaires et de trouver des stratégies passives pour pallier au problème de surchauffe.

En fait, la pertinence de l'effet de la végétation comme dispositif de rafraîchissement et son impact sur le confort extérieur et intérieur des bâtiments sont aujourd'hui reconnus à travers la multitude de recherches et de travaux menés jusqu'ici. Il y a lieu, tout d'abord, de poser la problématique et de fixer les objectifs.

Problématique :

L'augmentation de la température dans les villes (2 à 3°C) par rapport à la campagne³, le faible taux d'humidité provoqué par l'insuffisance de plantations et de surfaces gazonnées nous indiquent l'importance, et même l'urgence d'introduire de la végétation en milieu urbain afin de minimiser l'effet des espaces et des parois minéralisées.

Dans les villes à climat aride et semi aride, l'objectif est toujours d'éviter les rayons solaires directs et de rechercher l'ombre et la fraîcheur en saison estivale. En effet, la végétation joue un rôle primordial dans la réduction de la température de l'air par la projection de l'ombre et la réduction des gains thermiques par l'évapotranspiration et la conversion des radiations solaires en une chaleur latente.

² J.L.IZARD-A.GUYOT « *Archi Bio* » Ed Parenthèses 1979.

³ HASHEM AKBARI: [En ligne] Eetd.lbl.gov/heatiland/pubs. (page consultée le 16-05-2006)

Par ailleurs, le végétal quelle que soit sa forme est un élément indispensable d'équilibre de l'écosystème dans lequel nous vivons, il influence l'environnement thermique, la qualité de l'air et l'environnement sonore des bâtiments. Il joue un rôle physiologique et bioclimatique dans le confort quotidien de l'habitation ainsi qu'un rôle de régulation des excès climatiques (ombrage d'été, protection contre les vents forts, humidification de l'air, etc).

En plus de son action efficace sur le microclimat urbain, la végétation peut aussi agir sur les ambiances intérieures des bâtiments. Il s'agit donc de rendre compte du rôle de régulation des ambiances par la végétation à la fois sous l'angle des économies d'énergie et du confort des habitations : une stratégie impliquant une réflexion sur une question d'actualité.

En matière d'ambiance et selon son mode d'implantation, dans les espaces extérieurs de proximité ou attenants aux habitations et à ses effets sur le comportement thermique des bâtiments, le végétal agit sur trois facteurs du climat : ensoleillement, vent et humidité relative⁴ ; c'est un composant bioclimatique susceptible de contrôler les ambiances thermiques et lumineuses autant des espaces publics que des bâtiments⁵.

En 1994, Givoni⁶ a remarqué que la végétation influence la température intérieure et les charges de climatisation des bâtiments de différentes façons :

1. Les grands arbres et les pergolas situés à une courte distance des murs et des fenêtres procurent une bonne protection solaire sans nuire à la ventilation,
2. La vigne grimpant sur les murs et les hauts buissons près des murs offrent également une bonne protection solaire mais réduisent la vitesse de l'air près des parois,
3. La température d'air au voisinage des surfaces extérieures des murs est diminuée, réduisant ainsi les transferts conductifs et les apports de chaleur par la ventilation,
4. La couverture du sol par de la végétation autour d'un bâtiment réduit le rayonnement solaire réfléchi ainsi que les rayonnements de grande longueur d'onde émis par le sol vers les murs, réduisant de ce fait les gains solaires et en grandes longueurs d'onde,

⁴ GUYOT.A/ : « *L'arbre urbain, un composant de confort pour l'architecture et l'espace urbain public* » extrait d'intervention du cours in [En ligne] <http://www.arbreurbain.com.html> (page consultée le 26.06-2006).

⁵ J.L.IZARD ET A.BOUKARA « *le rôle du végétal en architecture et en microclimatique urbaine* » (école d'architecture 1998,2001) in [En ligne] <http://www.archi.fr/pages/recherches/labs.html> (page consultée le 02.09.2006)

⁶ GIVONI.B: « *Climate Considerations in Building and Urban Design* » Van Nostrand Reinhold, NY, 1994.

5. La végétation sur les parois est et ouest d'un bâtiment peut procurer une protection efficace contre les gains solaires en été.

D'après David Wright⁷, les arbres sous de nombreux climats, projettent une ombre bénéfique sur les constructions et dans cette volonté d'abriter un bâtiment des apports solaires, il est essentiel d'intercepter les rayons solaires avant qu'ils aient frappé les vitrages ou les façades. Ils peuvent aussi se comporter en humidificateurs et abaissent, alors, par évaporation la température de l'air.

D'autres recherches de Givoni⁸, ont cependant permis de montrer que le potentiel d'isolation de la végétation peut, parfois, anéantir l'effet de refroidissement passif dû à sa protection solaire. Dans ces conditions, le fait de protéger les murs extérieurs par de la végétation peut très bien être contreproductif car on réduira les émissions de rayonnement de grandes longueurs d'onde. La couleur et le revêtement du mur et la distance entre le mur et la végétation sont ainsi des paramètres très importants.

De plus, Watson et Camous, 1986⁹, rajoutent que la végétation présente un certain inconvénient en été car l'air est en quelque sorte stabilisé contre l'enveloppe. Cela diminue fortement l'effet de refroidissement des brises d'été.

Face à ces deux postulats, peut-on, par l'introduction du végétal à proximité de nos maisons, contrôler au mieux les conditions de confort intérieur sans avoir recours aux techniques de climatisation artificielle? Pour y répondre, cette recherche tend à démontrer l'impact de la végétation en particulier les plantes grimpantes sur le confort hygrothermique à proximité et à l'intérieur des bâtiments.

Objectifs :

Le végétal contribue à l'établissement des microclimats en milieu naturel comme en milieu urbain de par son effet d'oxygénation, d'humidification de l'air, de fixation des poussières..., il peut ainsi agir sur le confort intérieur des bâtiments.

⁷ DAVID WRIGHT: « *Soleil, Nature, Architecture* » Ed Parenthèses 1979

⁸ In TAREB doc pdf "*Intégration architecturale*" enveloppe du bâtiment chapitre2 intégration aux bâtiments p26.

⁹ WATSON. D & CAMOUS. R : « *L'habitat bioclimatique de la conception à la construction* » Ed l'étincelle Canada 1986, p38.

L'étude a pour objectif d'évaluer l'impact de la végétation grimpante à feuillage caduc sur le confort hygrothermique estival des bâtiments sous le climat de Constantine et, par conséquent, sur le confort des individus. Et de démontrer qu'un simple écran végétal à proximité d'une façade d'un bâtiment peut réguler considérablement le confort intérieur ; dans un but de réduire tant la consommation en énergies marchandes que les rejets des polluants.

A cet effet, nous avons émis, pour atteindre cet objectif, des hypothèses exposées comme suit :

- Hypothèse principale :

- La végétation attenante aux bâtiments constitue une protection saisonnière susceptible de remédier aux problèmes liés aux surchauffes, procure de l'ombrage et réduit donc l'insolation directe sur les bâtiments. Elle constitue, par conséquent, une stratégie efficace de rafraîchissement sous le climat de la ville de Constantine marqué par des étés chauds.

- Hypothèses secondaires :

- La vapeur d'eau émise par évapotranspiration des feuilles de la végétation grimpante permet de rafraîchir l'air ambiant à côté du bâtiment (joue un rôle d'enveloppe thermique complémentaire) et, par conséquent, concourt à la régulation de l'ambiance hygrothermique intérieure.
- De par sa densité, la vigne vierge vraie constitue un dispositif performant d'ombrage saisonnier et de rafraîchissement en période estivale comparé aux autres plantes grimpantes. Plus le feuillage est dense, plus grande est sa performance thermique sur l'ambiance intérieure.

Méthodologie et outils de recherche :

Afin de répondre à ces objectifs, l'étude s'est attelée à confirmer ou à infirmer ces hypothèses à travers une structuration de la recherche qui va s'articuler autour de deux parties :

Une 1^{ère} partie théorique: elle consiste en une recherche bibliographique et documentaire scindée en quatre chapitres ayant pour objectif de cerner et de comprendre tous les éléments théoriques de base en rapport avec le sujet de recherche contribuant à la canalisation de la présente étude vers les objectifs ciblés.

Le premier chapitre introductif définit les différents concepts rappelant le rapport architecture et climat ainsi que la problématique énergétique en Algérie. Le deuxième chapitre, a pour objet de fournir un maximum d'information concernant les différents paramètres influant sur le confort thermique du bâtiment. Cette partie permettra d'assimiler tous les mécanismes de transfert de chaleur par rapport à la paroi verticale opaque et vitrée. Par la suite, il y a lieu de cibler les effets de la végétation, ses typologies ainsi que ses multiples usages en milieu urbain, ce qui constituera l'essentiel du troisième chapitre.

Quant au quatrième chapitre, il évoquera une analyse synthétique d'une littérature des différentes recherches scientifiques menées à travers le monde par bon nombre de chercheurs sur l'impact de la végétation comme système de rafraîchissement passif. Cette partie servira comme base de données pour l'interprétation des résultats de l'investigation.

Une 2^{ème} partie : concerne le volet pratique, basée sur une campagne de mesures in situ faisant l'objet du cinquième et sixième chapitre. Le premier abordera la présentation du cas d'étude et la méthodologie de travail sur terrain ainsi que l'étude climatique et bioclimatique de Constantine afin d'identifier le climat de cette dernière qui servira de base pour les interprétations du cas d'étude. Le second et dernier chapitre concernera l'interprétation des résultats de l'investigation.

Cette partie de la recherche s'est basée sur une étude comparative de quatre échantillons qualifiés de représentatifs, choisis selon des critères préalablement définis. En effet, l'investigation a concerné des maisons individuelles situées à Constantine dans lesquels une série de relevés bi horaires de plusieurs paramètres physiques a été menée tels que : la température de l'air, les températures de surface, l'humidité de l'air et la vitesse de l'air. Ces mesures in situ ont été effectuées en deux périodes défavorables de l'été par le biais d'un ensemble d'appareils à savoir : un thermocouple, un hygrographe, une centrale météo sans fil et un multimètre dans le but de tester l'effet de refroidissement de l'écran végétal sur l'ambiance hygrothermique de ces bâtiments sous le climat de Constantine.

Au sein de la même partie, une simulation à l'aide d'un programme numérique TRNSYS version 14.1, permettra de comparer les résultats obtenus sur terrain et ceux simulés. La variation du paramètre de la couleur extérieure a permis de comparer la paroi végétalisée et celle d'une couleur claire dans un but de vérifier la performance et l'efficacité de chacune d'elle sur le confort thermique des bâtiments.

Introduction :

La maîtrise de l'énergie est un des problèmes majeurs auxquels notre société va devoir faire face dans les décennies à venir, à la fois en termes d'épuisement des ressources et d'impact sur le réchauffement de la planète. Les tentations des concepteurs pour créer des ambiances intérieures confortables dans une optique de développement durable se matérialisent par l'apparition de nouveaux vocabulaires et concepts.

Ces nouveaux concepts qui, aujourd'hui, prennent une nouvelle dimension d'économie d'énergie et de rentabilité, tentent de s'intégrer dans une démarche plus généreuse liée à la notion globale d'éco-bâtiment ou éco-construction. Le pari est de maîtriser naturellement les confort d'été et d'hiver, en privilégiant des solutions simples et de bon sens telles que : la bonne orientation, le choix judicieux du matériau, la prise en compte de l'environnement, la végétation, etc.

Etant donné que cette recherche va aborder l'un des principes majeurs de la démarche bioclimatique comme élément acteur dans le confort thermique des bâtiments, en l'occurrence la végétation, il est donc impératif de présenter et de définir ces concepts.

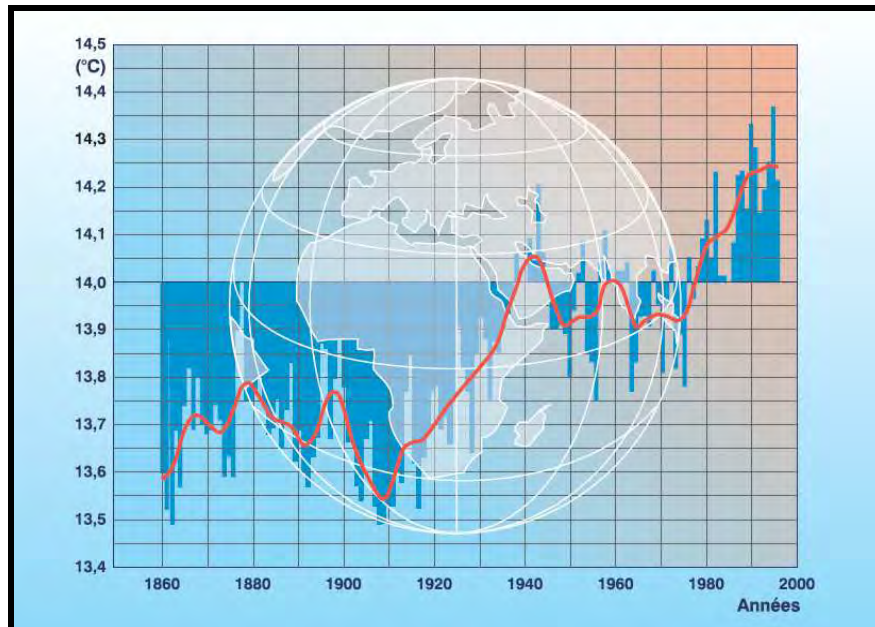
1. Concepts liés à la bioclimatique :**1.1. Les changements climatiques :**

Les changements climatiques planétaires ont porté la protection de l'environnement au premier plan des préoccupations actuelles et constituent, dans une perspective de développement durable, le défi majeur de ce XXI^{ème} siècle.

Actuellement, le climat terrestre est entrain de changer. Au 20^{ème} siècle, la température de la surface du globe a été clairement plus élevée que pendant n'importe quel siècle au cours des 1000 dernières années. Le climat du 20^{ème} siècle a été vraiment atypique.

Ce changement de climat est le résultat de nombreux facteurs assez complexes, entre autre ceux liés aux nouvelles conditions atmosphériques qui ne cessent de subir des modifications dont certaines n'ont pu être expliquées jusqu'à nos jours. Ces changements deviennent de plus en plus perceptibles tout au long des mois et des saisons selon les nombreux travaux de recherche qui se sont consacrés au diagnostic de ce phénomène (afin de pouvoir estimer ses conséquences et ses influences dans leurs dimensions spatiales et temporelles).

Dès 1990, le Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le climat (GIEC) annonçait des changements climatiques majeurs pour ce siècle et démontrait le lien de causalité entre les activités humaines et le réchauffement du climat global de notre planète depuis l'ère industrielle (fig I-1).



*Figure I-1: Evolution de la température moyenne à la surface de la terre
(Source : Liébard.A et De Herde.A, 2005)*

Dans son troisième rapport d'évaluation remis en 2003, le GIEC confirme à nouveau la gravité de ce diagnostic et prévoit pour 2100 une augmentation de la température de l'air en surface de 1,5°C à 6°C en moyenne globale¹. Cette hausse n'est donc pas négligeable et ne peut être imputée uniquement à des phénomènes naturels cycliques.

Nous sommes donc confrontés à une double problématique : celle du réchauffement climatique qui menace notre survie sur Terre et celle de la pénurie en énergie fossile, avec pour conséquence une grave crise économique si la facture énergétique n'est pas contrôlée.

1.2. Notion d'énergies renouvelables :

Les retombées néfastes de la consommation fulgurante des énergies fossiles, constitués lors de la formation du système solaire et au cours des âges géologiques et dont les stocks forcément limités à plus au moins brève échéance (fig I-2), font de plus en plus

¹ LIEBARD.A et DE HERDE.A : « *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques : Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable* » Presses de l'imprimerie Moderne de l'Est, Baume-les-Dames-décembre.2005, P181.

parler d'eux et leur impact en matière de changements climatiques et de réchauffement de notre planète est un fait indéniable et surtout irréversible.

En effet, la raréfaction des ressources fossiles (pétrole, gaz, charbon), la recherche d'une moindre dépendance énergétique et la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre, imposent de plus en plus le recours à des sources d'énergies renouvelables.

C'est dans ce contexte que ces énergies sont devenues plus que jamais d'actualité. Par définition, une énergie renouvelable est une énergie produite à partir d'une source qui, contrairement aux énergies fossiles, se régénère au moins au même rythme que celui auquel on l'utilise. Le soleil étant la source de réapprovisionnement énergétique quotidien qui crée le vent et la pluie, son énergie constamment renouvelée peut être récoltée et consommée sans polluer l'environnement.

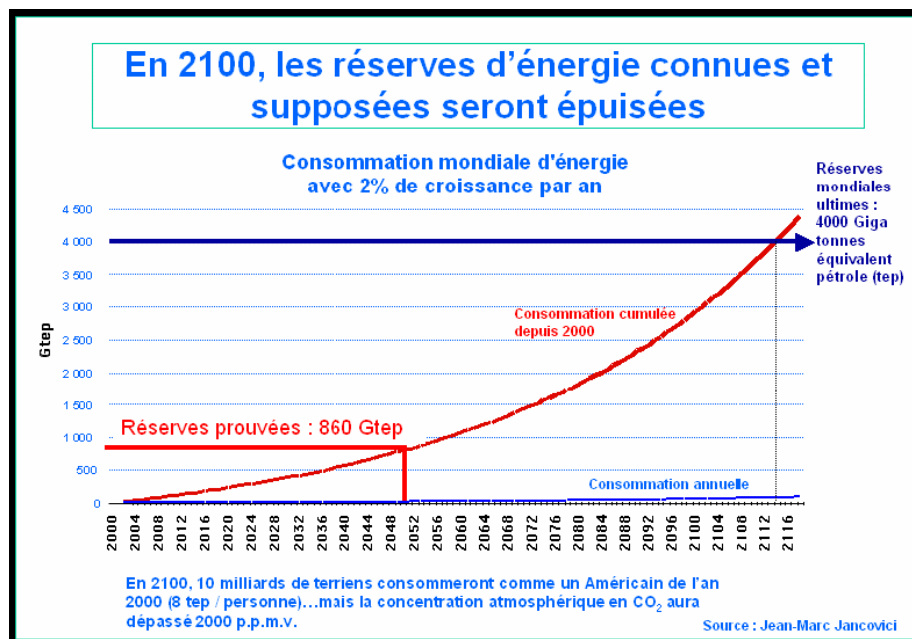


Figure I-2: Ressources énergétiques fossiles et consommation d'énergie
(Source : SIDLER Olivier, 2007)

Selon Sidler.O, 2007², dans la situation d'urgence actuelle, il faut d'abord maîtriser l'énergie parce que c'est facile et spectaculaire, puis rechercher des solutions énergétiques de substitution pérennes capables de répondre à nos besoins à long terme.

² **SIDLER Olivier**, Directeur ENERTECH : « *Les bâtiments à faible consommation d'énergie - Eléments de contexte* » Journée technique sur l'étanchéité à l'air des bâtiments Dijon - 21 Novembre 2007.

Dès 2006, et pour se conformer à une Directive européenne³, la réglementation devra considérer la performance énergétique globale du bâtiment, c'est à dire son niveau d'isolation, la ventilation mais aussi la valorisation des apports solaires, le rendement des systèmes de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire, la possibilité d'utiliser des énergies renouvelables...

1.2.1. Sources d'énergies renouvelables :

Les énergies renouvelables constituent une solution respectueuse de l'environnement. Elles permettent d'acquérir une certaine autonomie énergétique et de réaliser des économies à moyen et long terme. En fonction de la situation géographique, plusieurs types d'énergies renouvelables sont utilisables⁴ :

- **La force hydraulique** (énergie hydraulique) ;
- **Le vent** (énergie éolienne) ;
- **le soleil** : => Pour chauffer de l'eau à destination sanitaire ou pour le chauffage (énergie solaire thermique) ;
 => Pour produire de l'électricité (photovoltaïque) ;
- **la chaleur du sous-sol** (énergie géothermique) ;
- **la biomasse** : => Les déchets des industries de transformation du bois, ainsi que certaines cultures énergétiques (bois-énergie) ;
 => Les effluents d'élevage et de l'industrie agro-alimentaire (biométhanisation) ;
 => Les cultures énergétiques et les déchets des industries de transformation du bois (biocarburants).

L'hydroélectricité et la biomasse sont actuellement les plus exploitées, et l'utilisation de l'énergie éolienne progresse rapidement. En 2004, ces énergies renouvelables, biocarburants compris, ont couvert environ 13 % de la demande mondiale d'énergie primaire⁵.

³ **Division de l'Énergie du Ministère de la Région wallonne** : « *Guide pratique destiné aux candidats bâtisseurs* » 2005 [En ligne] <http://energie.wallonie.be>

⁴ **BEGUIN Daniel** : « *Guide de l'éco-construction* » Agence Régionale de l'Environnement en Lorraine, ADEME Février 2006.p23

⁵ [En ligne] <http://energie.wallonie.be/xml/doc-IDC-2833-html> (page consultée le 23-12-2007)

L'utilisation des énergies renouvelables permet le plus souvent de valoriser des ressources locales (résidus d'exploitation forestière, co-produits agricoles, un site venteux, le soleil, ...) et d'éviter ainsi d'importer des combustibles. En outre, par rapport aux autres sources d'énergie, leur utilisation génère un impact relativement limité sur l'environnement. En effet, dans le cas de la biomasse, le CO₂ émis par sa valorisation énergétique ou sa dégradation est à nouveau absorbée par les plantes pour leur croissance. Il ne contribue donc pas à l'effet de serre.

La demande mondiale d'électricité augmente rapidement, de même que la demande d'énergie pour les transports. Les énergies renouvelables ne sont pas encore en mesure d'égaliser la densité énergétique des combustibles fossiles, et elles nécessitent de vastes superficies de terres, notamment pour produire des panneaux solaires. De l'énergie solaire à l'hydraulique, ces sources ne sont pas également réparties et leur fourniture peut être irrégulière.

De toutes façons, la croissance rapide de pays comme l'Inde et la Chine réclame des densités d'énergie supérieures à celles que peuvent offrir actuellement les énergies renouvelables. Ces pays commencent à élaborer des politiques en faveur des énergies renouvelables, notamment pour réduire la pollution. Néanmoins, l'impact local des installations solaires ou éoliennes sur l'habitat ou la végétation, voire sur les caractéristiques climatiques, est encore à l'étude.

Par conséquent, les technologies des énergies renouvelables sont prometteuses. Avec le réchauffement climatique, il est de l'intérêt de tous qu'une nouvelle économie fondée sur les énergies renouvelables s'implante fermement et de manière stable.

1.3. Le développement durable :

Après la forte croissance, suite à la 2^{ème} guerre mondiale, la fin du 20^e siècle a été marquée par de grandes catastrophes environnementales qui contribuèrent à la naissance d'une certaine conscience écologique et humaniste. Les hommes ont, ainsi, pris conscience :

- de l'aggravation de l'effet de serre avec des conséquences visibles qui ont marqué les esprits, en France par exemple : tempête de 1999, canicule de 2003...
- de l'explosion démographique entraînant le risque d'épuisement des ressources naturelles et la concentration de la population dans les villes (80% au niveau mondial)

- des catastrophes industrielles (Tchernobyl, ...)
- des impacts graves de pollutions sur la santé : le plomb, l'amiante...

Développement durable et Qualité Environnementale sont devenus depuis quelques années les lignes directrices des nouvelles politiques de développement, dans plusieurs domaines : industries, agroalimentaire, puis construction et maintenant urbanisme. Bien plus qu'un phénomène passager, ce changement de cap traduit une prise de conscience tardive des enjeux environnementaux dans tous les milieux où l'influence humaine est préoccupante. Cette prise en compte de l'environnement et des impacts des activités humaines, à l'échelle de la construction, s'inscrit dans une sensibilisation mondiale amorcée il y a déjà une trentaine d'années. Une série de conférences et de sommets internationaux ont peu à peu ouvert les yeux de l'humanité sur les dangers de sa croissance irréfléchie. C'est ainsi que le « Développement Durable » est apparu à l'aube des années 90.

En effet, notion récente mais néanmoins incontournable, le développement durable est l'un des défis de ce 21^e siècle. Selon GAUZIN-MÜLLER, 2001⁶, le constat mondial est plutôt sombre : le climat se dégrade, les pollutions sont de plus en plus tenaces, les ressources trop souvent surexploitées, de nombreuses espèces sont en danger, et la prospérité réservée à seulement 20% des habitants de la planète. Concept à priori obscur, cette notion de « développement durable » doit tout simplement permettre à chacun de nous de s'épanouir dans une société plus humaine et un environnement préservé.

C'est dans ce contexte, que l'Organisation des Nations Unies a mobilisé en 1992 plus de 170 chefs d'état lors de la conférence Internationale sur l'environnement et le Développement qui s'est tenue à Rio de Janeiro. L'agenda 21 proposé au terme de ce premier sommet de la terre reprend les lignes directrices définies en 1987 dans le rapport de Brundtland intitulé « Our Common Future » et fixe les objectifs à suivre pour tendre vers un « développement durable ou soutenable » au XXI^{ème}. Le paradigme de développement durable tel qu'adopté par l'assemblée générale des Nations Unies y est défini comme suit :

« Le développement durable est le développement qui permet de satisfaire les besoins actuels sans pour autant compromettre les possibilités des générations futures de satisfaire leurs propres besoins ».

⁶ GAUZIN-MÜLLER Dominique: « *L'architecture écologique, 29 exemples européens* » éd Le Moniteur, 2001

Ces concepts rappellent le propos prêté à Antoine de Saint-Exupéry : « *Nous n'héritons pas de la Terre de nos ancêtres, nous l'empruntons à nos enfants* ».

Néanmoins, il a fallu attendre la conférence de Kyoto en décembre 1997 pour que les intentions souscrites à Rio soient traduites en objectifs chiffrés en terme de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Dix ans après Rio, c'est finalement lors des conférences de Bonn et de Marrakech en 2001 qu'un accord sur les modalités d'application du protocole de Kyoto a été trouvé entre les différents pays membres de la convention sur les changements climatiques en considérant aussi bien les aspects économiques, politiques, environnementaux que sociaux.

1.3.1. Objectifs du développement durable :

L'objectif du développement durable est de définir des schémas qui concilient les trois aspects *économique, social, et environnement* des activités humaines (fig I-3), les « trois piliers » du développement durable à prendre en compte, par les collectivités comme par les entreprises sont⁷ :

- **L'efficacité économique** : la collectivité recherche le plus grand bénéfice en comptabilisant les coûts sociaux et environnementaux ;
- **La prudence environnementale**, c'est-à-dire la préservation des ressources naturelles non renouvelables et la limitation des impacts des activités anthropiques ainsi que l'application du système de précaution ;
- **L'équité sociale** : le développement doit se forger sur la solidarité envers les plus défavorisés et sur la contribution à la réduction des inégalités.

⁷ Optimisation des systèmes énergétiques [En ligne] <http://www.ose.cma.fr/evenements/2001/conférences.htm>

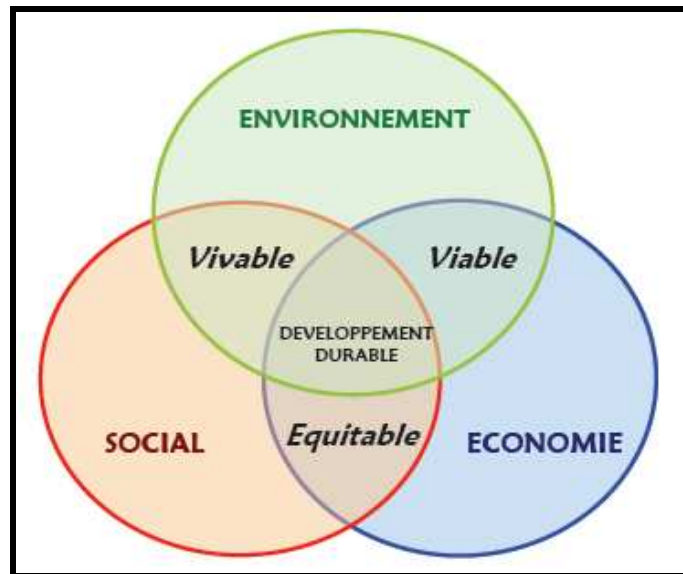


Figure I-3: Schéma des trois piliers du développement durable.
 (Source : Encyclopédie libre [En ligne] www.wikipedia.fr)

Pour l'Europe, l'objectif est de baisser les émissions de 8% par rapport à 1990. Pour la France, cela revient à diviser par 4 ses émissions de CO₂ dont 17 % dans le bâtiment. Les répercussions de ces engagements sont strictes et ont donné lieu en France à de nouvelles lois et réglementations. Elle a aussi introduit la notion de développement durable dans les documents d'urbanisme. Un des objectifs du développement durable interpelle directement le cadre de vie bâti et surtout le secteur de la construction⁸.

L'intégration des objectifs qualitatifs définis à travers le rappel de ces enjeux participe au renouvellement et à l'enrichissement des projets de bâtiments et des méthodes qui président à leurs réalisations. De nombreux secteurs européens intègrent désormais ces préoccupations dans leurs démarches; de l'agriculture raisonnée à l'industrie, des certifications environnementales ont vu le jour, parfois complétées par des systèmes de management (type ISO 14001 pour les entreprises), tout ceci dans un même but : essayer de réduire l'impact négatif des activités humaines sur l'environnement.

FLEURY.S, 2005⁹, affirme que les trois fondements sus-cités doivent coexister afin d'obtenir un ensemble viable, équitable et surtout viable. La sensibilisation grandissante des citoyens et des élus aux démarches de qualité et le développement de la démocratie

⁸ GAUZIN-MÜLLER Dominique: « *L'architecture écologique. 29 exemples européens* » éd LeMoniteur, 2001.

⁹ FLEURY Stéphane : « *Aménagements Urbains et Haute Qualité Environnementale* » Mémoire de fin d'études, Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes. 2005, p66.

participative font des usagers des acteurs de l'aménagement. Un nombre croissant de collectivités territoriales s'engage dans des démarches visant à contribuer à réaliser un cadre de vie et des équipements répondant à ces objectifs de développement durable.

Dans ce contexte, les besoins en formation des professionnels de l'aménagement de l'espace portent notamment sur les connaissances du concept de **haute qualité environnementale** considéré comme une contribution du **secteur de la construction** et de l'aménagement et l'application à l'architecture et à l'urbanisme des principes du développement durable.

1.4. La haute qualité environnementale :

La démarche dite « Haute Qualité Environnementale » n'est pas une simple mode, elle prend racine dans le concept plus vaste du développement durable et surtout, elle s'insère dans une démarche de projet prenant en compte l'ensemble des valeurs devant être portées par l'architecture.

En effet, dans une optique de développement durable, la démarche HQE, est une recherche de la qualité : qualité architecturale, qualité fonctionnelle, qualité technique, pérennité, maîtrise des coûts....

Initiée au début des années 90 et appliquée au secteur du bâtiment, l'HQE est une réponse à de nouvelles attentes correspondant à la fois à la lutte contre le gaspillage des ressources énergétiques de plus en plus rares et contre la brutale accélération des changements climatiques de la planète.

Pour cela, elle permet d'élargir le champ de recherche des solutions les plus performantes en considérant toutes les étapes de vie et tous les impacts du bâtiment. De même qu'elle projette d'assurer un meilleur contrôle de l'acte de bâtir et se fixe comme objectif la réalisation de bâtiments neufs et l'amélioration de ceux déjà existants afin qu'ils aient dans leur ensemble des impacts limités sur l'environnement, quelles que soient leurs destinations tout en assurant à l'intérieur du bâtiment des conditions de vie saines et confortables. Pour toutes ces raisons, les spécialistes de la HQE ont cherché à intégrer davantage la notion de développement durable dans le secteur du bâtiment afin de contribuer à répondre aux nouveaux défis du XXI^{ème} siècle dont la préservation des ressources naturelles en optimisant leur usage.

Les spécialistes ont donné à cette notion une définition formelle: « la haute qualité environnementale des bâtiments correspond aux caractéristiques du bâtiment, de ses équipements (en produits et services) et du reste de la parcelle de l'opération de construction ou d'adaptation du bâtiment qui lui confère l'aptitude à satisfaire les besoins de maîtrise des impacts sur l'environnement extérieur et de la création d'un environnement intérieur confortable et sain »¹⁰.

Pour être plus opérationnelle, la Haute Qualité Environnementale d'un bâtiment a été décomposée en quatorze exigences particulières, appelées « cibles » (fig I-4) et chaque cible a été décomposée à son tour en cibles « élémentaires ». On en dénombre actuellement cinquante deux, dont l'ensemble est organisé suivant deux domaines et quatre familles qui sont :

- 1- Le domaine N° 1 vise à maîtriser les impacts sur l'environnement extérieur et regroupe les cibles d'éco-construction et les cibles d'éco-gestion.
- 2- Le domaine N° 2 vise à produire un environnement intérieur satisfaisant et regroupe les cibles de santé et les cibles de **confort**, à savoir le confort acoustique, le confort olfactif, le confort visuel et le **confort hygrothermique**.

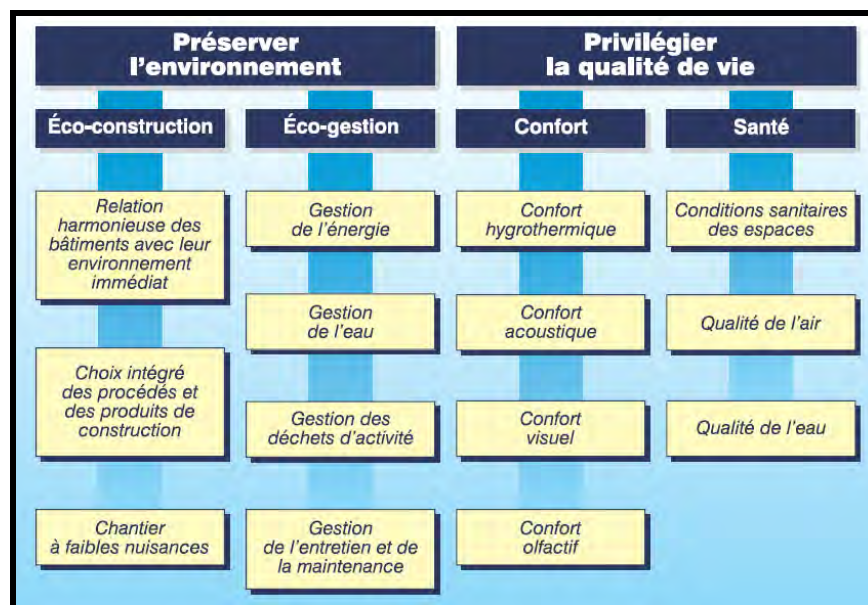


Figure I-4: Les quatorze cibles de la Haute Qualité Environnementale des bâtiments
(Source : Association HQE)

Même si des pays comme l'Algérie mènent actuellement une réflexion sur ce sujet dans la continuité de la HQE, rares sont les initiatives concrètes dans ce domaine.

¹⁰ Association HQE : « *Bâtiment et démarche HQE* » Valbonne : ADEME. Réédition Avril 2007, p3.

1.4.1. Objectifs de la HQE:

La démarche HQE est une dynamique entraînant tous les acteurs du cadre de vie bâti à la recherche à la fois d'une meilleure qualité de vie et de la préservation de la planète. Elle répond aux deux grands défis de ce début du XXI^{ème} siècle : une aspiration croissante de chacun à plus de confort et de sécurité d'une part, et la maîtrise de nos prélèvements de ressources naturelles et d'énergie d'autre part¹¹.

Garantir le confort et la sécurité des occupants est également au coeur de la démarche HQE. Cette dernière vise, en effet, à maîtriser au mieux les impacts (visuel, acoustique, olfactif, sanitaire) des bâtiments sur la qualité de vie des habitants. Il s'agit par exemple de ne pas sacrifier l'esthétique des habitations à leur dimension fonctionnelle et écologique, de construire des logements tirant au mieux parti de la lumière naturelle, de réduire les nuisances acoustiques et olfactives grâce aux matériaux isolants.

En effet, l'objectif premier de la démarche HQE est de lutter contre le gaspillage des ressources naturelles. Selon l'association HQE, cette démarche peut permettre :

- 30 à 50 % d'économie d'énergie : grâce aux équipements de chauffage et d'isolation choisis par exemple,
- 20 à 50 % d'économie d'eau : grâce à des économiseurs d'eau sur les robinets, la récupération des eaux de pluie.

1.4.2. Relation : architecture/climat :

De tous temps, l'homme a essayé de tirer parti du climat pour gagner du confort et économiser l'énergie dans son habitation. Aujourd'hui, des règles d'adaptation à l'environnement, à l'architecture et aux climats permettent d'allier une tradition millénaire et des techniques de pointe.

De nos jours, les exigences du confort augmentent et se multiplient de plus en plus et les concepteurs semblent avoir négligé la fonction d'adapter le bâtiment au climat et la maîtrise de l'environnement intérieur et extérieur. Ils ont confié le soin à la technologie de créer un environnement artificiel.

¹¹ [En ligne] www.assolhqe.org/association_objectifs.php (page consultée le 15-01-2008)

En considérant l'architecture dans une recherche d'intelligence, celle-ci doit créer elle-même, par son enveloppe (forme, matériaux, répartition des ouvertures) et ses structures intérieures, un microclimat confortable. L'architecture doit être étudiée en fonction du climat¹².

Aujourd'hui, il faut réorganiser la relation entre l'architecture et son milieu, sous l'angle de la double responsabilité : par rapport au milieu actuel et par rapport à celui des générations futures. En d'autre terme, on doit adapter le bâtiment au climat et au mode de vie des futurs habitants ; Car un mauvais choix peut coûter très cher à long terme sur le plan énergétique.

Dans les pays à climat chaud, aujourd'hui encore, le constat des conditions d'inconfort extrême que l'on rencontre dans les bâtiments est sévère : les conséquences néfastes pour les occupants sont nombreuses.

Pour cela, des concepts nouveaux dans le vocabulaire architectural tel que : « Architecture bioclimatique », « solaire passive » ou « architecture climatique » ou une conception consciente de l'énergie ont pris en considération les mécanismes du confort et l'économie d'énergie. Alexandroff.G et J.M, 1982¹³ insistent sur la relation de l'habitation au climat en vue de créer des ambiances « confortables » par des moyens spécifiquement architecturaux.

1.5. La démarche bioclimatique :

Redécouverte au début des années 70, l'architecture bioclimatique recherche une synthèse harmonieuse entre la destination du bâtiment, le confort de l'occupant et le respect de l'environnement, en faisant largement appel aux principes de l'architecture. L'architecture bioclimatique permet de réduire les besoins énergétiques et de créer un climat de bien être dans les locaux avec des températures agréables, une humidité contrôlée et un éclairage naturel abondant.

Le concept « bioclimatique » fait référence à la bioclimatologie qui est une partie de l'écologie. Elle étudie plus particulièrement les relations entre les êtres vivants et le climat

¹² LAVIGNE Pierre : « *Architecture climatique une contribution au développement durable Tome1 : bases physiques* » EDISUD 1994 p 13.

¹³ ALEXANDROFF.G et J .M : « *Architecture et climat soleil et énergies naturelles dans l'habitat* » ; édition architectures, Berger- Levrault, Paris1982 p216

d'où une définition générale de l'architecture bioclimatique se résumant à ceci : « Cette expression vise principalement l'amélioration du confort qu'un espace bâti peut induire de manière « naturelle » c'est à dire en minimisant le recours aux énergies non renouvelables, les effets pervers sur le milieu naturel et les coûts d'investissement et de fonctionnement. L'intérêt du Bioclimatique va donc du plaisir d'habiter ou d'utiliser un espace à l'économie de la construction, ce qui fait un élément fondamental de l'art de construire»¹⁴.

En effet, une architecture bioclimatique tire le meilleur parti du rayonnement solaire et de la circulation naturelle de l'air. Il s'agit de trouver l'équilibre idéal entre l'habitat, le mode de vie des occupants et le climat local, en ajustant l'orientation de la maison, la disposition des ouvertures et la répartition des pièces. Même la végétation a son rôle à jouer : un simple écran végétal peut protéger efficacement contre le vent et le rayonnement solaire.

En 1999, ces objectifs environnementaux étaient plutôt avant-gardistes. Aujourd'hui, « bâtir durable » est une tendance forte, tant auprès des particuliers que des entreprises. La conception architecturale bioclimatique s'inscrit dans la problématique contemporaine liée à l'aménagement harmonieux du territoire et à la préservation du milieu naturel. Cette démarche, partie prenante du développement durable, optimise le confort des habitants, réduit les risques pour leur santé et minimise l'impact du bâti sur l'environnement.¹⁵ Elle constitue par conséquent un mode de conception architecturale qui recherche la meilleure adéquation possible entre le climat, le bâtiment et le confort de l'occupant.

1.5.1. Principes de base de l'architecture bioclimatique :

S'inscrivant dans une démarche de développement durable, l'architecture bioclimatique se base sur les principes suivants :

- Minimisation des **pertes énergétiques** en s'adaptant au climat environnant.
 1. Compacité du volume
 2. Isolation performante pour conserver la chaleur
 3. Réduction des ouvrants et surfaces vitrées sur les façades exposées au froid ou aux intempéries.

¹⁴ **LAVIGNE Pierre** : « *Architecture climatique une contribution au développement durable Tome2 : concepts et dispositifs* » EDISUD Aix en Provence France 1998 p 10.

¹⁵ **LIEBARD.A et DE HERDE.A** : « *Guide de l'architecture bioclimatique ; Tome4 ; Cours fondamental : Construire avec le développement durable* » .2002.

- Privilégier les **apports thermiques naturels** et gratuits en hiver
 1. Ouvertures et vitrages sur les façades exposées au soleil
 2. Stockage de la chaleur dans la maçonnerie lourde
 3. Installations solaires pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire
- Privilégier les **apports de lumière naturelle**
 1. Intégration d'éléments transparents bien positionnés
 2. Choix des couleurs
- Privilégier le **rafraîchissement naturel** en été
 1. Protections solaires fixes, mobiles ou naturels (avancées de toiture, **végétation**,...)
 2. Ventilation
 3. Inertie appropriée¹⁶

1.5.2. Végétalisation, démarche bioclimatique durable et HQE :

Notre paysage urbain, essentiellement minéral et métallique, ne peut plus négliger l'apport du végétal, élément primordial pour la qualité du climat de nos villes.

Le fait de recourir à des systèmes de végétalisation, contribue généralement à instaurer une relation harmonieuse entre un bâtiment et son environnement immédiat. Par ailleurs, selon Leroux.F, 2005¹⁷, l'utilisation d'essences locales et des procédés de construction doux, générant peu de nuisances et de déchets, participe d'un respect des cibles de l'éco-construction édictées par la démarche HQE.

Les performances remarquables en terme de protection thermique, de durée dans le temps, et de rétention des eaux pluviales des techniques de végétalisation, contribuent à respecter un grand nombre des cibles abordées dans le volet éco-gestion de la démarche HQE, notamment pour ce qui concerne la gestion économe de l'énergie, la gestion raisonnée de l'eau de pluie et les coûts de maintenance.

Pour ce qui concerne le confort ressenti à l'intérieur de bâtiments pourvus de tels systèmes, on constate généralement une amélioration sensible en terme de performances acoustiques et hygrothermiques. Par ailleurs, la présence de végétaux contribue aussi à

¹⁶ [En ligne] <http://www.maison-solaire.fr/Bioclimatique.htm> (page consultée le 23-12-2007)

¹⁷ **LEROUX. François**, Animateur technique éco-construction Oikos : « *Intégration végétale des bâtiments. contributions environnementales sur une maison individuelle* » Mémoire de formation continue architecture HQE, Ecole d'Architecture de Lyon, Session 2005

procurer aux occupants des lieux un confort visuel et un bien-être que n'apportent pas des solutions conventionnelles, ce qui vient appuyer le volet confort de la démarche HQE.

Enfin, l'utilisation de végétaux en toitures ou en façades, permet aussi d'atteindre certaines des cibles préconisées par le volet santé, et notamment pour ce qui concerne la qualité de l'air et celle de l'eau.

De plus, Liébard.A et De Herde.A, 2005¹⁸ affirment que la démarche bioclimatique intègre le traitement de la végétation dans la conception de l'habitat. En effet, l'usage de la végétation pour modifier un climat est une caractéristique-clé dans la conception des bâtiments « durables »¹⁹. Elle procure de l'ombrage et réduit donc l'insolation sur les bâtiments. Aux valeurs esthétiques, s'ajoute le confort thermique qu'elle procure par l'évaporation. Par ce biais, les températures ambiantes sont abaissées, et le niveau d'humidité est amplifié.

Grâce à plusieurs qualités intrinsèques, la végétation a un rôle déterminant à jouer dans la lutte aux changements climatiques, la diminution de la pollution atmosphérique, la modération de l'effet d'îlot de chaleur, la qualité de l'air et par conséquent sur la santé des populations urbaines. La végétation, par la réflexion du rayonnement solaire, l'ombrage qu'elle dispense et l'évapotranspiration, permet en effet de réduire la température en ville²⁰. La plantation de végétaux en plus d'être perçue comme une action très positive représente un geste accessible à tous et chacun.

La végétalisation des murs et des abords de la maison participe à la création d'un microclimat frais. Elle valorise l'évaporation par les plantes et diminue le rayonnement par rapport à une surface sombre. Les plantes vertes dans la maison contribuent aussi au rafraîchissement de l'air intérieur. La protection ou encore l'ombrage par des arbres à feuilles caduques réduisent la pénétration du soleil²¹. Intégrer la dimension végétale, ce qui

¹⁸ **LIEBARD.A et DE HERDE.A** : « *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques ; Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable* » Presses de l'imprimerie Moderne de l'Est, Baume-les-Dames-décembre.2005. p77

¹⁹ **LAM.M et al** : « *Résumé d'une étude de cas- Végétation sur la façade des constructions : « Bioshader »* Centre for Sustainability of the Built Environment university of Brighton, 2004. www.durabuild.org

²⁰ **Conseil régional de l'environnement de Montréal (CRE-Montréal)** : « *Projet de lutte aux îlots de chaleur urbains : Le verdissement montréalais pour lutter contre les îlots de chaleur urbains, le réchauffement climatique et la pollution atmosphérique* ».2007.

²¹ **SALOMON Thierry & AUBERT Claude** : « *Fraîcheur sans clim, le guide des alternatives écologiques* », Ed : Terre vivante, 2004.

peut présenter un des aspects déterminants du contrôle du microclimat et par conséquent une meilleure qualité environnementale s'inscrivant dans une démarche durable de nos espaces.

2. Notion d'économie d'énergie :

Dans les pays en développement, l'énergie est un des facteurs déterminants pour la survie des populations : elle est nécessaire à toute activité humaine et indispensable à la satisfaction des besoins quotidiens (eau, nourriture, santé,...) mais également pour assurer un minimum de développement économique et social.

La crise de l'énergie, à un certain temps, a fait passer au premier plan la réduction des coûts énergétiques. Mais de nos jours, l'assurance du confort visuel, olfactif, acoustique et hygrothermique est devenue l'instinct prépondérant pour tous les décideurs de la conception de l'habitat.

Une exigence de confort d'été plus stricte peut impliquer le recours à la climatisation, et donc induire une augmentation de la consommation d'énergie et des impacts qui en découlent.

Selon Peuportier.B,2003²², la gravité des problèmes environnementaux est maintenant patente et il n'est plus raisonnable d'ignorer les conséquences environnementales des décisions que nous prenons. Le secteur du bâtiment contribue de manière importante à ces problèmes. Il est donc nécessaire de recourir, autant que possible, aux outils d'aide à la décision et aux technologies qui permettent de réduire les impacts environnementaux des bâtiments.

2.1. Consommation énergétique en Algérie:

L'énergie est au cœur de nombreuses problématiques mondiales et locales en termes d'approvisionnement, d'efficacité et de pollution. Les bâtiments ne font pas exception à la règle puisque ce secteur est le plus gros consommateur d'énergie en Algérie avec 45.5% du total, suivi du secteur des transports de 27.7% et ensuite le secteur industriel avec 26.8% (fig I-5).

²² PEUPORTIER. Bruno : « *Eco-conception des bâtiments. Bâtir en préservant l'environnement* » Sciences de la terre et de l'environnement. Les presses de l'école des mines. Paris 2003. p57

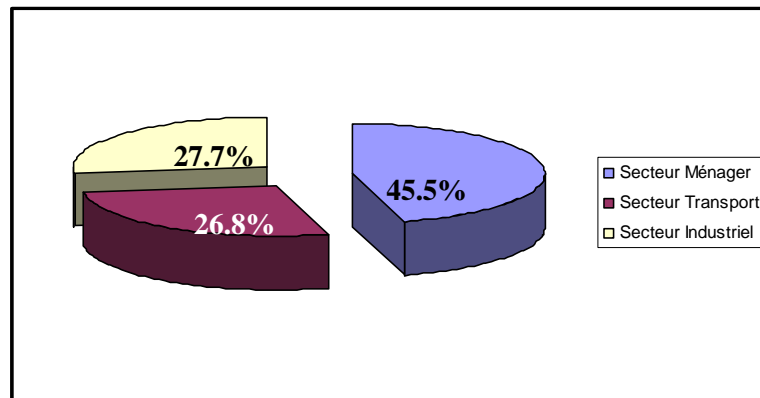


Figure I-5 : Consommation d'énergie par secteur (période 1980-2000)
(Source : D.G.E, 2000)

2.2. Consommations dans le secteur ménager en Algérie :

La consommation globale d'énergie en Algérie, a été probablement multipliée par quatre entre les années 1980 et 2000²³. L'électricité, le gaz naturel (en conduites ou en bouteilles), fuel, charbon, bois et même piles électriques sont les vecteurs d'énergie du secteur domestique. Les différents types d'énergie nous servent globalement à quatre différents usages²⁴ :

- Le chauffage qui représente la plus forte dépense environ 60% de l'énergie domestique ;
- L'éclairage, l'électroménager, l'audio visuel et la climatisation représentent près de 20% de l'énergie.
- L'eau chaude sanitaire nécessaire, représente près de 15%.
- La cuisson représente près de 5%.

Sachant que, la consommation d'énergie finale par habitant est de 0.48 TEP en 1990, son évolution passera de 0.71 TEP²⁵ en 2000 à 1.35 TEP en 2010 et 1.88 TEP en 2020²⁶

D'ailleurs, la lecture du graphique ci dessous (fig I-6) fait ressortir que la consommation du gaz et de l'électricité pour le chauffage et pour l'éclairage représente le taux le plus élevé

²³ **MINISTERE DE L'ENERGIE** : « *Bilan énergétique national de l'année 1999* »/ DGE, 2000. EPE novembre,2000.

²⁴ **CHITOUR.C.H.E** : « *L'énergie : Les enjeux de l'an 2000* » Vol/1 Office des Publications Universitaires ALGER, 1994. p. 41.

²⁵ **TEP** : l'énergie contenue dans une tonne de pétrole.

²⁶ **CHITOUR.C.H.E** : « *L'énergie : Les enjeux de l'an 2000* » Vol/1 Office des Publications Universitaires ALGER, 1994. p.91.

par rapport à d'autres consommations ménagères, ce qui explique la forte demande pour le secteur habitat dont le premier besoin est le chauffage en hiver et la climatisation en été.

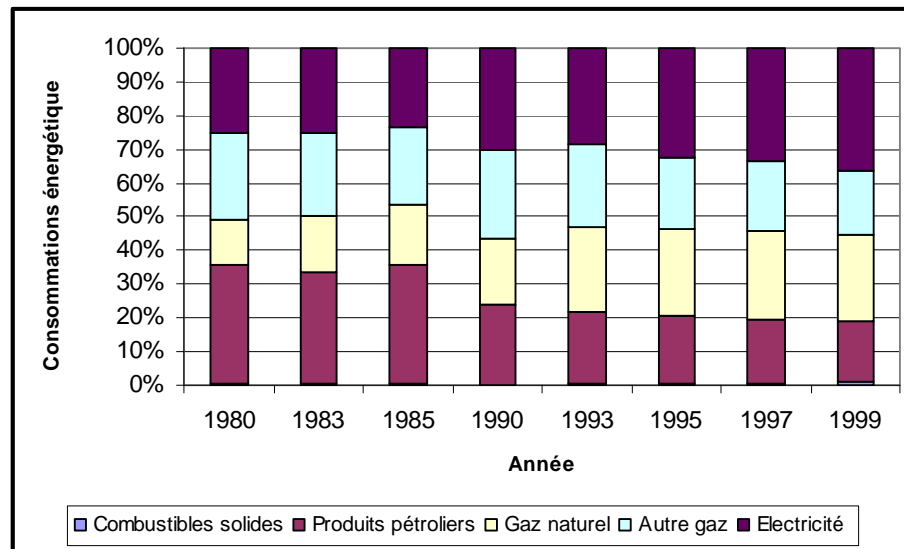


Figure I-6 : Consommation énergétique dans le secteur ménager en Algérie.
(Source : DGE, 2000, réadapté par auteur)

2.3. Consommation du gaz naturel et d'électricité:

La consommation intérieure du gaz naturel a démarré en 1961 au rythme de 156 millions de m³, et elle atteint 1.4 milliards de m³ en l'an 2000.

D'après les données statistiques relevées auprès des services SONELGAZ (fig I-7), on enregistre une évolution de la consommation de gaz où le recours à l'utilisation du gaz naturel a multiplié par 30 en l'an 2000 avec un rythme annuel de 4.6% d'évolution prévisible de la consommation.

Quant à la consommation et à la production d'électricité, elles enregistrent une augmentation de 41,5% et 61,5% durant la période de 1980 à 1990. Selon la DGE²⁷, la consommation d'électricité en Algérie a augmenté durant les dernières années de 4% par an et la demande d'électricité devait à long terme croître de 7% par année.

En outre, la distribution de l'électricité connaît depuis quelques années de fortes perturbations du fait d'une augmentation croissante de la demande intérieure due essentiellement à l'usage multiplié des climatiseurs surtout dans le secteur d'habitat et

²⁷ DGE : « *Missions économiques : Fiche de synthèse « le secteur de l'électricité en Algérie »* actualisation au 9 août 2006.

tertiaire. Ceci conduit l'entreprise Sonelgaz à opérer des délestages pour rééquilibrer un appel de consommation devenu trop important.

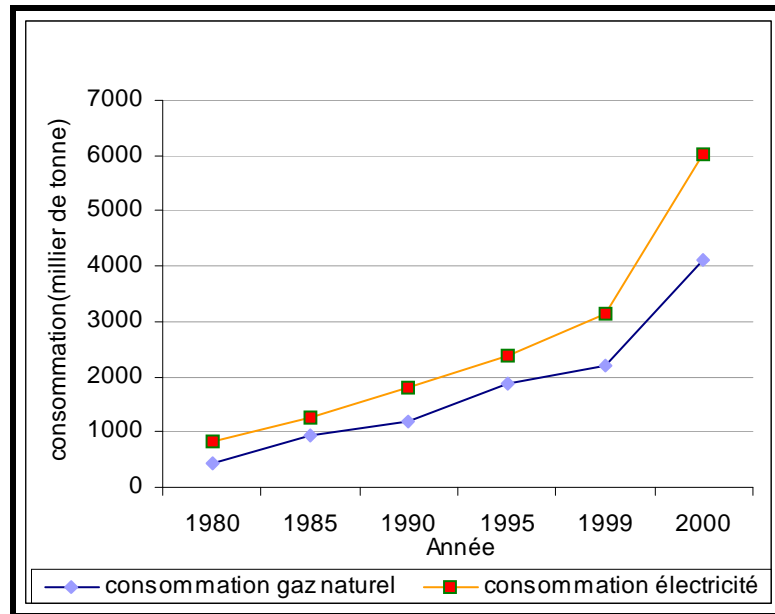


Figure I-7 : Consommation de gaz et électricité (en milliers de tonne) dans le secteur ménager en Algérie.

(Source : DGE/EPE, 2000)

D'après le tableau ci-dessous, il apparaît que la consommation d'électricité domestique par rapport à la consommation nationale finale s'est élevée de 19.2 % à 30.17 % durant la période 1996 à 2002 (qui est considéré comme un taux très important) et on peut constater que :

- 1- L'évolution de la consommation avec des taux élevés contrairement au taux moyen connu son pic durant la première crise pétrolière de 1970-1973, soit 15.05% et puis, elle sera de 5.79% durant les années 1996 à 2000 et enfin de 5.2% de 2000 à 2002.
- 2- L'évolution de la consommation d'électricité s'est accompagnée par l'augmentation de la consommation / habitant de 126.26 kWh en 1970 à 702 kWh en 2002 comme le montre le (tableau I-1) ci-dessous :

Année	1970	1980	1990	1995	1996	2000	2002
Consommation/habitant	126.2	327.03	539.51	568.4	577.26	658	702

Tableau I-1 : consommation d'électricité par habitant (en kWh)

(Source : SONELGAZ, bulletin statistique 1970-2002, ONS, 2002²⁸)

²⁸ ONS : « *Projection de la population* » collections statistiques n° 66-0994 p.32,35,38

La consommation d'électricité et de gaz des ménages par rapport aux autres secteurs a connu une augmentation de 36.75 % due essentiellement à l'expansion en surface (plus de constructions).

2.4. Consommation énergétique du gaz et d'électricité au niveau de la ville de Constantine :

D'après les statistiques de la SONELGAZ, la consommation énergétique annuelle à Constantine est en perpétuelle croissance. La figure I-8 indique qu'entre 1999 et 2001, la consommation électrique a enregistré une augmentation accélérée. Cependant, entre 2001 et 2002, le rythme de croissance de la consommation électrique a connu un léger fléchissement, dû probablement, à la hausse des prix des énergies, incitant les ménages à réduire l'usage des climatiseurs. A partir de 2002, la consommation électrique augmente à nouveau pour atteindre 363.1 GWh.

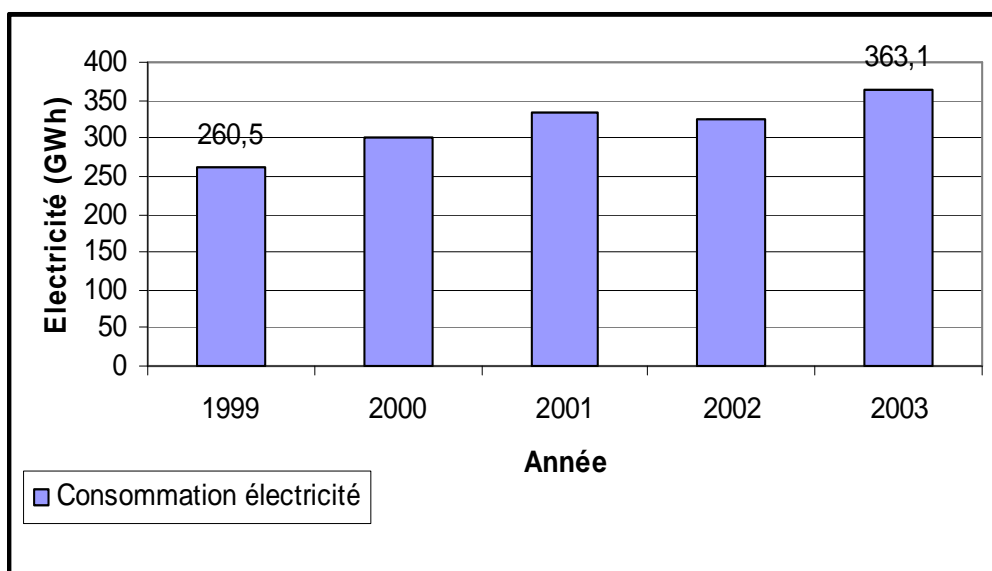


Figure I-8 : Consommation électrique de la ville de Constantine en (GWh)

(Source : Données SONELGAZ, bulletin statistique 1980-2004)

En outre, le même phénomène se produit pour la consommation gazière. Les données statistiques dans la figure ci contre, montrent que la consommation annuelle du gaz n'a cessé d'évoluer, passant de 1988.99 MThermie en 1999, arrivant à 2282.16 MThermie en 2003 (Fig I-9).

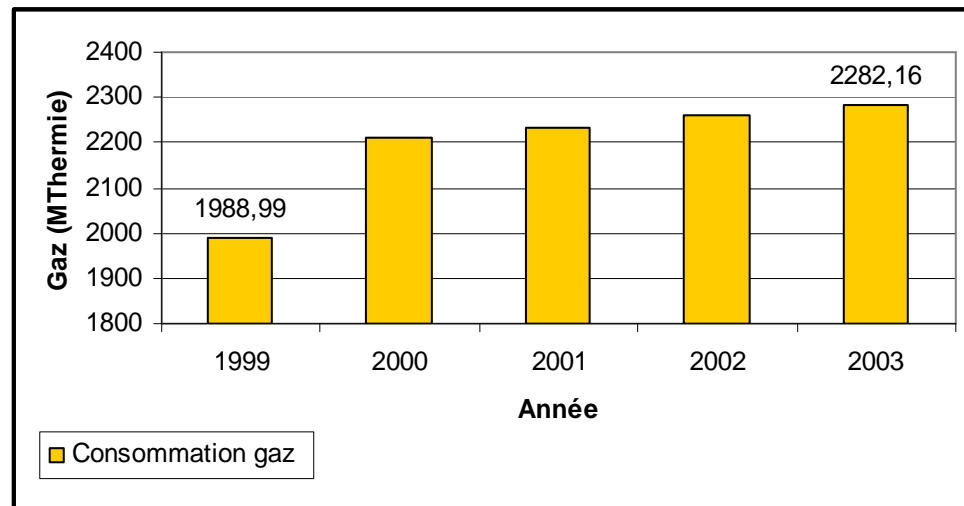


Figure I-9 : Consommation gazière de la ville de Constantine (en Mth).

Source: données (*SONELGAZ, 2002²⁹, *ONS, 1996³⁰)

Conclusion :

Architecture écologique, architecture bioclimatique, architecture durable, haute qualité environnementale : toutes ces appellations répondent à la même préoccupation : concevoir une architecture plus respectueuse de l'environnement. Mais chacune relève d'une période, parfois d'un pays donné et répond souvent à des logiques différentes. Certaines s'intéressent surtout à la technologie et à la gestion, d'autres privilégient la santé de l'homme, d'autres encore placent le respect de la nature au centre de leurs préoccupations.

Toutefois, ces différents vocabulaires convergent tous dans le même but avec la même vision: réaliser et assurer un confort maximum en toutes saisons et minimiser la consommation d'énergie qui pèsera très lourd, à travers le temps, sur les revenus des ménages et l'économie des pays. Sachant que l'énergie utilisée pour climatiser les bâtiments représente la majorité de l'énergie consommée par ce secteur, un secteur qui à lui seul, utilise 45 % de la consommation d'énergie finale en Algérie, et responsable du quart des émissions de CO₂, principal gaz à effet de serre.

A travers ces réflexions, il est possible d'employer différentes **énergies naturelles** plus étendues en exploitant les effets bénéfiques du climat pour éviter le recours abusif à des

²⁹ SONELGAZ : « *bulletin statistique* », Direction de la planification -Annuaire statistique 62-86, p38. Divers bulletins annuels statistiques 87-2002

³⁰ ONS : rétrospectives 62-90, « *bulletin statistique* », n° 31, p.31-33 N°163/décembre 96 p.20-46 (juin 96)

systemes de conditionnement d'air « énergivores ». L'usage de la végétation pour modifier le climat et le confort est une caractéristique-clé dans la conception des bâtiments « durables ».

Dans cette optique, la présente recherche consiste donc à tester ce procédé passif, en l'occurrence ; la végétation comme élément acteur dans le confort estival des bâtiments.

La définition du confort hygrothermique et les paramètres influant sur ce dernier dans les bâtiments est donc importante non seulement pour la qualité des ambiances intérieures, mais aussi pour la quantité d'énergie à fournir, ce qui fera l'objet du prochain chapitre.

Introduction :

Avec les préoccupations grandissantes du développement durable, le secteur du bâtiment doit répondre à deux exigences primordiales: maîtriser les impacts de la consommation des énergies fossiles sur l'environnement extérieur, et assurer des ambiances intérieures saines et confortables. Ainsi, une vision globale du confort thermique qui tient compte de sa pluridisciplinarité est indispensable¹.

En fait, l'ambiance thermique dans les bâtiments est un facteur important pour le confort des occupants car les températures extrêmes, qu'elles soient chaudes ou froides, peuvent provoquer des effets gênants et parfois mortels chez l'homme. Donc il y a lieu de définir tous les éléments et paramètres qui influent sur le confort thermique des occupants du bâtiment, ce qui fera l'objet du présent chapitre.

1. Notion de confort :

Etymologiquement, le terme confort, tiré du mot anglais « comfort », est défini comme « un sentiment de bien-être et de satisfaction » ou comme un ensemble des éléments qui contribuent à la commodité matérielle et au bien-être². Ce qui donne à ce concept difficilement mesurable, un caractère subjectif dépendant des appréciations personnelles de chaque individu.

En effet, la compréhension et l'évaluation du confort dans l'environnement de l'homme sont nécessaires, car ce dernier représente un élément majeur dans le développement et la conception des bâtiments. La zone de confort reste très personnelle puisqu'elle dépend des individus, de leur accoutumance et de leur état physiologique. Cependant l'influence des facteurs age, sexe et appartenance à un groupe ethnique sur la sensation de confort reste faible³.

Il existe plusieurs types de confort à savoir: le confort visuel, le confort acoustique, le confort olfactif et le confort hygrothermique, ce dernier est l'un des facteurs intervenant dans notre recherche.

¹ CANTIN.R, Moujalled.B, Guarracino.G : « *Complexité du confort thermique dans les bâtiments* » 6^{ème} congrès Européen de Science des Systèmes Paris 19-22 septembre 2005, p2. Laboratoire des Sciences de l'Habitat, CNRS. France richard.cantin@entpe.fr bassam.moujalled@entpe.fr

² Microsoft® Encarta® 2007. © 1993-2006 Microsoft Corporation. Tous droits réservés

³ PENICAUD, 1978 In LEHTIHET MOHAMED CHERIF : « *Modification des microclimats urbains par la couverture végétale avec référence à la ville de Jijel* » Mémoire de Magister, université de Jijel, 2007.

1.1. Le confort dans l'habitat :

La recherche du confort dans les logements était dès lors considérée comme superflue, les exigences se focalisant en toute logique sur la rapidité d'exécution et l'accès à des installations sanitaires de base pour l'ensemble de la population. Le plaisir et le confort étaient alors recherchés dans des activités connexes dites de « loisir ».

Les attentes liées au « logement » dépassent donc aujourd'hui très largement les frontières sémantiques usuelles : « habiter » c'est beaucoup plus que se « loger ». Ce déplacement des exigences allié à la recherche d'économies d'énergie amène les concepteurs à penser différemment l'habitat pour plus de bien-être et moins de gaspillage. L'inconfort lié à une chaleur excessive peut même mener à des situations dramatiques. Concevoir des bâtiments respectueux du confort et du bien-être de chacun tout en diminuant sérieusement l'énergie utilisée est le défi lancé à tous les acteurs de la filière construction. L'un des rôles de l'habitat est de minimiser ces échanges, c'est-à-dire de protéger le corps humain contre les agressions du climat.

1.2. Le confort thermique :

Le confort thermique est abordé par sa propre définition et par celle des différents paramètres qui interviennent dans son évaluation à savoir les facteurs liés à l'individu et ceux liés à son environnement. Bien que la notion de confort thermique présente incontestablement un aspect physique, elle relève aussi de la psychologie et la sociologie. Il est en effet le trait d'union entre le monde physique et l'individu, parce que ses lois traduisent les sensations du biologique (le corps) par rapport au non biologique (l'ambiance thermique)⁴.

Le confort thermique est souvent défini par la satisfaction exprimée quant à l'ambiance thermique [ISO 7730: 1994]. L'homme étant homéotherme⁵, il doit assurer en continu son équilibre thermique. Pour cela, il dispose d'un système de thermorégulation qui lui permet de régler les échanges de chaleur avec son environnement, en exerçant des réactions conscientes (adaptation comportementale) et inconscientes (vasomotricité, frisson et sudation).

⁴ **DEPECKER.P** : « *Constitution et modes de transfert d'un savoir scientifique dans le champs de l'architecture : le cas de la thermique* » Thèse de doctorat, INSA, Lyon, 1985

⁵ **Homéotherme** : dont la température centrale est constante et reste indépendante de celle du milieu extérieur.

A.S.H.R.A.E⁶ en 1992 définit le confort thermique comme étant « l'état d'esprit qui exprime la satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique ». Ce dernier est conditionné par plusieurs paramètres à savoir : la température de l'air, l'humidité de l'air, les précipitations, la pression atmosphérique et la nébulosité. La combinaison de ces paramètres climatiques influe sur le confort thermique de l'individu et donc sur l'usage de l'espace.

En outre, le confort thermique a été le sujet de nombreux travaux de recherche, qui ne concernent pas uniquement les bâtiments, mais aussi les moyens de transport ou les lieux de travail, etc. En ce qui concerne les bâtiments, le domaine de recherche sur le confort thermique est partagé entre deux approches. La première étudie le confort thermique d'une façon analytique. Elle n'est pas restreinte aux bâtiments. La deuxième approche, basée sur l'incapacité de l'approche analytique à représenter la réalité du confort thermique dans les bâtiments, est l'approche adaptative.

1.2.1. L'approche analytique :

L'approche analytique du confort thermique est basée sur le calcul du bilan thermique du corps humain, par des modèles physiques et physiologiques essentiellement dans un objectif de prédire la sensation thermique des occupants et d'identifier les conditions de confort thermique. Ces modèles utilisent comme variables d'entrée les grandeurs physiques de l'ambiance thermique (température d'air, température de rayonnement, humidité d'air et vitesse d'air), ainsi que les caractéristiques de l'individu (taille et poids de l'individu, production de chaleur métabolique, caractéristiques des vêtements...). En sortie sont proposés des nombreux indices qui prévoient la sensation thermique ou le niveau de confort pour les conditions étudiées.

En effet, les différents modèles développés se différencient au niveau de la modélisation physiologique de la thermorégulation. Sous des conditions homogènes et stationnaires, ces modèles ont été déterminés expérimentalement dans des chambres climatiques avec des individus. Par contre, l'hétérogénéité des conditions dans l'espace est plus ou moins prise en compte selon le nombre de compartiments considérés dans le modèle.

Cependant, les chercheurs se sont vite rendus compte des lacunes de l'approche analytique en multipliant leurs investigations dans les bâtiments. En développant l'approche

⁶ A.S.H.R.A.E : American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers

adaptative, ils ont proposé un alternatif aux méthodes reprises par les normes, afin de prendre en compte la capacité d'adaptation des occupants.

1.2.2. L'approche adaptative :

L'approche adaptative est basée sur les constatations des investigations menées dans des bâtiments in situ en construisant une large base de données sur les conditions thermiques qui règnent dans différents types de bâtiment, pour différents climats et régions, par la mesure des grandeurs physiques de l'ambiance thermique. Ces mesures sont accompagnées simultanément par les réponses subjectives des occupants sur la qualité de leurs ambiances thermiques. Les occupants indiquent, au moment de la mesure, leurs sensations thermiques sur l'échelle de l'ASHRAE (tableau II.1). Cette base de données est ensuite analysée par les méthodes de la statistique afin de déterminer la température ou une combinaison de variables (température, humidité et vitesse d'air) jugée neutre ou confortable par les occupants, ce qui permet de déterminer, par la suite, les conditions de confort thermique dans d'autres bâtiments dans des circonstances similaires⁷.

-3	-2	-1	0	1	2	3
Très froid	froid	légèrement froid	Neutre	légèrement chaud	chaud	très chaud

Tableau II-1 : Echelle de sensation thermique de l'ASHRAE

(Source : H. Mayer, 1993)

1.3. Le confort hygrothermique :

Selon Lavigne, 1994, le confort ne dépend pas seulement du paramètre température mais aussi de l'hygrométrie de l'air ambiant ». Reconnu comme une cible de la haute qualité environnementale, le confort hygrothermique est défini comme étant la sensation que ressent une personne par rapport à la température et à l'humidité ambiante du local où elle se trouve.

Les tentatives d'objectivation du confort hygrothermique se sont appuyées sur des approches statistiques. Il en ressort des critères physiques supposés satisfaire une majorité d'individus. Ces critères sont principalement les températures de l'air et des parois, les variations spatiales de ces températures, l'hygrométrie de l'air, les vitesses de l'air.

⁷ CANTIN.R et al: « *Complexité du confort thermique dans les bâtiments* » 6^{ème} congrès Européen de Science des Systèmes Paris 19-22 septembre 2005

Certains spécialistes dans le domaine donnent des valeurs précises pour chaque facteur :

- Température des murs : 22 +2°C ;
- Humidité relative entre 40 et 60% ;
- Température du sol : 19 à 24°C ;
- Vitesse de l'air : inférieure à 0.15 m/s ;
- Différence de température entre deux murs d'une même pièce doit être inférieure à 10°C ;
- Différence de température entre le sol et le plafond doit être inférieure à 5°C.⁸

1.4. Les paramètres influençant le bilan thermique :

Les ambiances thermiques des locaux ont des effets physiologiques et des impacts différents et plus ou moins gênants selon les températures. Par exemple, en ambiances chaudes, l'augmentation de la température dans les locaux provoque, chez l'individu, des contraintes physiologiques importantes et de ce fait, différents effets en découlent. Telles que les réactions physiologiques, thermostatiques (liées aux variations de température des différentes parties de l'organisme afin de maintenir ses températures interne et cutanée constantes), circulatoires (le réchauffement de l'organisme oblige l'augmentation du débit sanguin) et sudorale (grâce au processus d'évaporation, l'organisme va éliminer de la sueur proportionnellement à la quantité de chaleur excédentaire). Le principe de la conservation d'énergie aboutit à l'équation du bilan thermique suivante⁹:

$$\mathbf{H - Ed - Esw - Ere - L = R + C \dots\dots\dots[1]}$$

Avec:

H = métabolisme (M)

Ed = pertes de chaleur par diffusion de vapeur à travers la peau

Esw = pertes de chaleur dues à la transpiration

Ere = pertes de chaleur latentes dues à la respiration

L = pertes de chaleur sèches dues à la respiration

R = pertes de chaleur par échange radiatif du corps habillé

C = pertes de chaleur par échange convectif du corps habillé

⁸ DEOUX. Suzane et Pierre : « *Le guide de l'habitat sain* ». Andorra, Edition MEDIECO, Avril 2002, p211.

⁹ [En ligne] <http://www-energie.arch.ucl.ac.be/Climatisation/theorie/confortthermique.htm>

Chaque terme de l'équation peut être substitué par une fonction issue de la physique de base. Toutes les fonctions ont des valeurs mesurables à l'exception de la température de surface des habits et du coefficient de transfert thermique convectif qui dépendent l'un de l'autre.

D'autres aspects physiques interviennent tels que : la turbulence et la vitesse de l'air, la température ambiante et radiante, l'humidité, la dissymétrie de rayonnement et le gradient de température vertical.

La diffusion de chaleur entre l'individu et l'ambiance s'effectue selon divers mécanismes (fig II-1):

- Plus de 50 % des pertes de chaleur du corps humain se font par convection avec l'air ambiant (convection et évaporation par la respiration ou à la surface de la peau).
- Les échanges par rayonnement à la surface de la peau représentent jusqu'à 35 % du bilan alors que les pertes par contact (conduction) sont négligeables (< 1 %).
- Le corps perd également 6 % de sa chaleur à réchauffer la nourriture ingérée.

Cette importance de nos échanges par rayonnement explique que nous sommes très sensibles à la température des parois qui nous environnent,... ASHRAE précise que le confort thermique dépend de six paramètres à savoir : le taux métabolique, l'habillement, la température ambiante de l'air (T_a), la température des parois (T_p), l'humidité relative de l'air (HR) et la vitesse de l'air¹⁰.

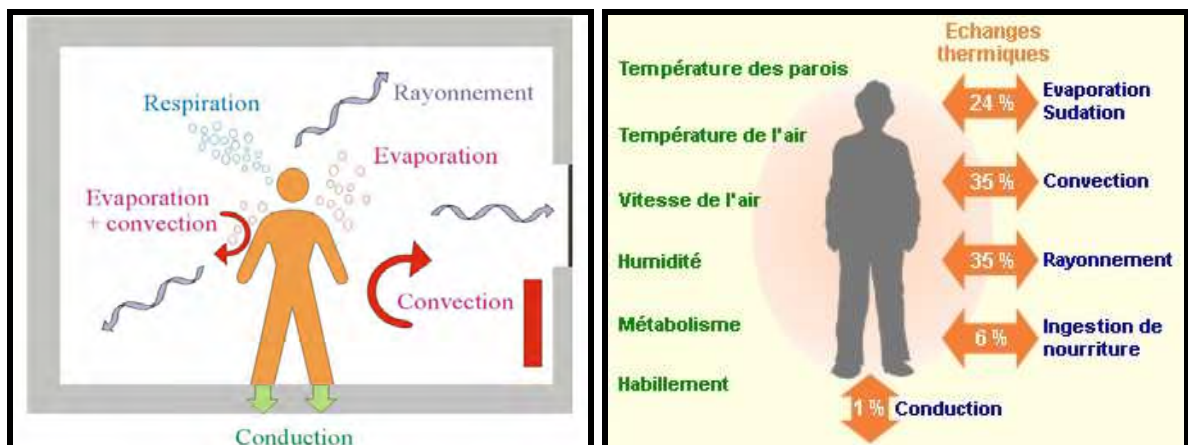


Figure II-1 : Les échanges thermiques du corps humain

(Source : [En ligne] <http://www-energie.arch.ucl.ac.be/cdrom>)

¹⁰ **IBGE**- Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement : « *Guide pratique pour la construction et la rénovation durables de petits bâtiments : redéfinir la notion de confort thermique* » février 2007.

1.5. Outils d'évaluation du confort thermique :

L'utilisation de tableaux et d'abaques permet soit d'évaluer le niveau de confort thermique atteint dans un local soit, pour une situation donnée, de fixer la température de confort thermique optimale. A cet effet, de nombreuses tentatives ont été effectuées pour développer les indices thermiques en référence aux différentes réponses physiologiques et sensorielles.

Après l'établissement de la température effective (ET index) par Houghton.F.C et Yaglou.C.P, 1923 au laboratoire de recherche (A.S.H.A.C.E¹¹), une zone de confort d'été et d'hiver a été définie par ASHVE¹².

L'un des indices thermiques les plus connus est l'équation de confort de Fanger spécifique aux espaces intérieurs. **Fanger, 1970**, a déterminé expérimentalement les conditions physiologiques (température cutanée et sudation) nécessaires pour le confort thermique sous des conditions thermiques homogènes et stationnaires. En écrivant le bilan thermique, il a exprimé, à l'aide de l'indice PMV*, la sensation thermique en fonction de l'écart du flux de chaleur cédé par le corps à l'environnement par rapport à celui qui correspond aux conditions de confort. Cet indice exprime la sensation thermique moyenne éprouvée par un large groupe d'individus sur l'échelle de sensation thermique de l'ASHRAE (tableau II-1).

La sensation thermique n'étant pas suffisante pour exprimer le confort, Fanger a proposé un autre indice qui complète le PMV, le PPD* permettant de prévoir le pourcentage des insatisfaits à une sensation donnée (Fig II-2).

¹¹ **A.S.H.A.C.E** : American Society of Heating and Air Conditioning Engineers

¹² **A.S.H.V.E** : American Society of Heating and Ventilation Engineers

* **PMV** : Predicted Mean Vote ou vote moyen prévisible.

* **PPD** : Predicted Percentage of Dissatisfied ou pourcentage prévu d'insatisfaits.

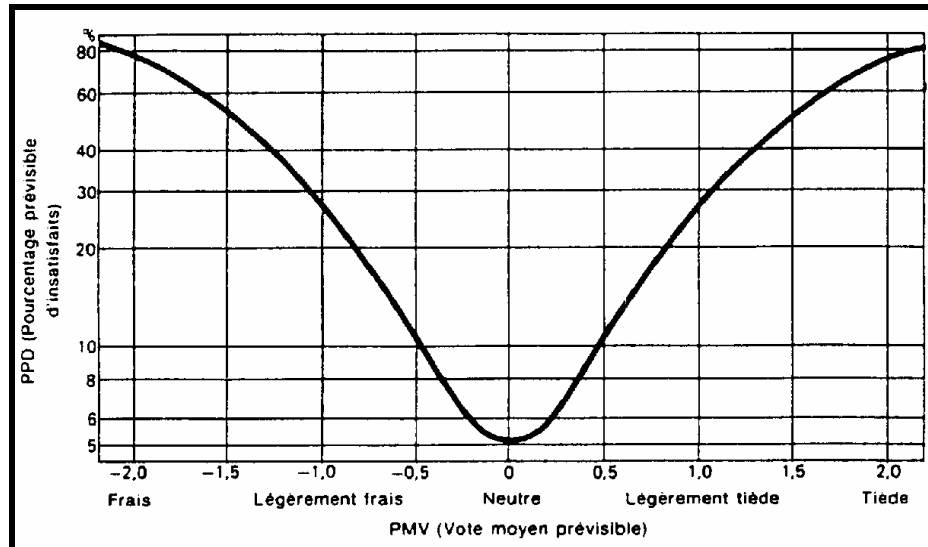


Figure II-2 : Indice PMV-PPD
(Source : Norme ISO 7730)

Contrairement au modèle statique de Fanger, Gagge a établi un modèle dynamique qui permet de prévoir les variables physiologiques sous des conditions instationnaires à travers le calcul d'un indice « SET¹³ » représentant la température équivalente d'une enceinte isotherme à 50 % d'humidité relative.

En 1970, **Humphrey**, est arrivé à déterminer une expression mathématique de la température neutre basée sur la température extérieure moyenne mensuelle dont la formule est:

$$T_n = 11.09 + 0.534 T_0 \dots\dots\dots [2]$$

Où T_n = la température neutre (°C)

T_0 = la température extérieure moyenne pour un mois en question °C

Le modèle de Fanger a servi de base pour la norme internationale ISO 7730 qui porte sur les conditions de confort dans les ambiances thermiques modérées, et celui de **Gagge** pour la norme américaine ASHRAE standard 55 qui, lui aussi, précise les conditions de confort thermique dans les bâtiments.

En 1981, **Auliciems** a essayé de réviser les données de **Humphrey** en proposant une différente expression qu'est la suivante:

$$T_n = 17.6 + 0.31T_0 \dots\dots\dots [3]$$

¹³ SET : Température Effective Standard

Avec un bilan thermique global nul, le corps humain assure son équilibre thermique. La neutralité thermique résulte d'un équilibre thermique obtenu par peu (ou aucune) de réactions physiologiques¹⁴. Toutefois, cette neutralité thermique ne correspond pas nécessairement au confort thermique. Au delà des facteurs physiques et physiologiques qui régissent la sensation thermique, d'autres facteurs d'ordre psychosociologiques influencent le confort thermique. En effet, la satisfaction perçue par un occupant dans une ambiance donnée, s'exprime en fonction de l'accord entre les conditions thermiques actuelles dans le bâtiment (satisfaction obtenue) et celles qui correspondent aux attentes de l'occupant (satisfaction anticipée)¹⁵.

2. Les outils d'aide à la conception bioclimatique:

En plus des indices thermiques, il y a des tentatives qui ont été effectuées pour combiner les facteurs environnementaux sous forme d'outils graphiques qui permettent de ramener les conditions intérieures dans la zone de confort ou le plus proche possible de cette zone.

En 1953, le premier « diagramme bioclimatique » a été proposé par V. Olgyay mettant en évidence une zone de confort avec des plages d'été et d'hiver pour systématiser l'intégration des conditions climatiques dans la conception des bâtiments (voir Annexe 2). En 1973, Koenigsberger et al¹⁶, ont élaboré la méthode dite « Forward Analysis » basée sur les tableaux de Mahoney dans un but d'établir les principes de conception avec une analyse climatique préalable. Ces derniers ont perdu quelque peu de leur utilité à cause des nouveaux développements, cependant, ils restent encore fiables.

Toutefois, B. Givoni, 1978 a remis en cause les diagrammes d'Olgyay arguant que l'application de cette méthode est limitée aux climats chauds et humides et aux constructions légères seulement. Il a établi un diagramme psychrométrique où il évalue les exigences physiologiques du confort. Pour cela, il préconise deux approches de refroidissement passif (soit par ventilation, soit par réduction des températures intérieures par rapport à l'extérieur).

¹⁴ **BRUANT Marc** : « *Développement et paramétrage de contrôleurs flous multicritères du confort d'ambiance* » Thèse de doctorat : INSA de Lyon. Lyon. 1997

¹⁵ **BRAGER Gail.S, de DEAR Richard.J** : « *Thermal adaptation in the built environment : a literature review* » Energy and Buildings 27 (1). 1998.

¹⁶ **KOENIGSBERGER et al** : « *Climatic design* » . Edition : Longman, London & New York 1973.

En 1980, M. Evans et S. V. Szocolay ont critiqué les outils précédemment proposés à cause de l'incohérence entre les résultats du confort thermique calculé et le confort réel perçu par les sujets. A cet effet, une zone de confort propre à chaque région, et qui tient compte des caractéristiques du climat local a été définie.

3. Rappel des grandeurs physiques fondamentales en thermique :

3.1. Concepts de température et de chaleur :

L'énergie qui intéresse l'architecture est la chaleur qui entre ou sort d'un édifice sous l'action de différence de températures.

3.1.1. La chaleur:

C'est une forme d'énergie créée par l'agitation moléculaire intense d'un milieu¹⁷. Dans l'échelle internationale, la chaleur s'exprime en Joule. Dans le domaine de la construction, on utilise souvent la kilocalorie ou la thermie. Lorsqu'on introduit une quantité de chaleur dans un corps, la température de ce dernier augmente, on dit qu'il y a échange de **chaleur sensible**. Dans le cas d'un changement de phase, une partie de cette chaleur est utilisée pour satisfaire les besoins thermiques liés à ce phénomène (fusion, évaporation, etc...), on dit alors qu'il y a échange de **chaleur latente**.

3.1.1.1. La chaleur sensible : concerne l'élévation ou la baisse de température d'un corps. Pour exprimer la capacité d'absorption de chaleur par un matériau, on définit sa chaleur massique C, qui est la quantité de chaleur absorbée ou fournie par une unité de masse qui s'élève ou s'abaisse de 1°C¹⁸ ;

$$C = \frac{Q}{\Delta T} = \frac{\text{quantité de chaleur}}{\text{accroissement de température}} \text{ pour une masse 1 exprimé en kJ/kg°C} \dots\dots\dots[4]$$

3.1.1.2. La chaleur latente : concerne les changements d'état de la matière sans variation de température. La chaleur latente d'évaporation est la quantité de chaleur requise pour transformer un gramme de liquide en vapeur, sans changement de température. Le flux de chaleur latente est plus communément appelé évapotranspiration car il résulte de

¹⁷ PALHEIRE.J.Y : « *Confort thermique* » [En ligne] <http://www.ac-amiens.fr>. Page consultée le 10-09-2007 e-mail : Jean-Yves. Palheire@ac-amiens.fr.

¹⁸ LAVIGNE.P et al: « *Architecture climatique Une contribution au développement durable Tome 1 : Bases physiques* » EDISUD.1994. p16.

l'évaporation de l'eau présente sur les espaces physiques (sol, feuilles, eau libre) mais aussi de la transpiration foliaire¹⁹. (Chaleur totale = Chaleur sensible + Chaleur latente).

3.1.2. La température:

La température se définit comme la manifestation mesurable de la chaleur stockée. Elle est liée à la moyenne d'énergie cinétique due au mouvement des atomes et molécules du corps. C'est par une différence de température qu'un transfert de quantité de chaleur a lieu de la température la plus haute vers la température la plus basse²⁰. Elle s'exprime en degrés Celsius « °C » ou degrés Kelvin « °K ».

4. Facteurs influant sur le confort thermique :

Il existe plusieurs facteurs variables qui interviennent dans la notion de confort. Il y a ceux qui sont relatifs à l'individu et d'autres qui sont relatifs à l'ambiance climatique environnementale :

4.1. Facteurs liés aux conditions climatiques :

4.1.1. La température de l'air :

C'est le facteur le plus influent sur le confort humain. En effet, la température de l'air contrôle directement les échanges par convection qui est l'un des termes principaux du bilan thermique. La température de l'air extérieur présente une variation quotidienne, les températures maximales ont lieu en milieu d'après-midi et les températures minimales en fin de nuit. Cette variation dépend des apports solaires et du rayonnement en grande longueur d'onde vers la voûte céleste.

Dans un local, la température de l'air n'est pas uniforme, des différences de températures d'air se présentent également en plan à proximité des surfaces froides et des corps de chauffe.²¹

¹⁹ LUQUET.D : « *Suivi de l'état hydrique des plantes par infrarouge thermique : analyse expérimentale et modélisation 3D de la variabilité thermique au sein d'une culture en rang de cotonnier* » Thèse de doctorat. Institut National Agronomique. Paris, 2002

²⁰ LAVIGNE.P et al : « *Architecture climatique Une contribution au développement durable Tome 1 : Bases physiques* » EDISUD.1994. p15.

²¹ NEUF : « *Climat intérieur/ confort, Santé, confort visuel* » Revue européenne d'architecture N° 77, novembre - décembre 1978. p 12.

4.1.2. L'humidité de l'air :

L'humidité de l'air peut être exprimée comme la pression de vapeur d'eau, l'humidité de l'air à l'intérieur des bâtiments influence le corps humain de façon directe et indirecte, pouvant provoquer l'inconfort, et la sensation de chaleur et de sécheresse des muqueuses des voies respiratoires.

L'humidité de l'air n'a pas un grand effet sur la sensation de confort thermique, si les températures d'air sont confortables ; elle n'a d'effet significatif que lorsque elle est extrêmement haute ou extrêmement basse. Il est admis des variations de l'humidité relative entre 19 à 65 % ²²

4.1.3. Le vent :

La vitesse de l'air influence les échanges par convection et par évaporation. En effet, les échanges convectifs entre la surface extérieure des parois et l'air extérieur sont fonction de la vitesse de l'air au voisinage des parois. Le taux de renouvellement de l'air dans un local dépend lui aussi de la vitesse du vent en particulier quand une ventilation transversale est possible. Cependant, dans ce cas, les occupants tentent de régler les ouvertures de façon à éviter les courants d'air.

4.1.4. Rayonnement vers la voûte céleste :

L'atmosphère terrestre a une certaine transparence vis-à-vis des rayonnements de grande longueur d'onde, le rayonnement froid vers le ciel est d'autant plus grand que l'air est pur et le ciel est dégagé.

Le rayonnement influence le confort thermique, dépend de la position de la paroi par rapport au soleil, de l'albédo des objets environnants et de la vitesse du vent.

4.1.5. L'ensoleillement :

La température de l'air extérieur atteint sa valeur maximale en milieu d'après midi, soit au moment de maximum d'ensoleillement pour l'orientation Ouest qui est ainsi la plus défavorable.

Parmi les parois verticales, ce sont les parois Est et Ouest qui reçoivent les ensoleillements les plus importants en été ;

²² MINISTERE DE L'HABITAT. ENAG : « *Recommandations Architecturale* » édition Alger, 1993 page18.

- Exprimés en énergie, 4,3 kWh/m² jour en juillet à l'ouest contre 3,1 au sud.
- Exprimés en puissance instantanée, 700W à 16 h solaire à l'ouest contre seulement 450 W au sud à midi²³.

En hiver, la paroi sud reçoit le plus fort ensoleillement, le rayonnement reçu en été reste important ; cependant, il faudra concilier entre la radiation désirée en hiver et la protection contre les apports solaires en été.

4.1.5.1. Composition du rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est le déplacement de l'énergie sous forme de radiations solaires, transmettant de la chaleur sous forme d'ondes électromagnétiques constituant le spectre solaire²⁴.

4.1.5.1.1. Intensité du rayonnement solaire sur une paroi :

Le transfert de chaleur par rayonnement s'effectue sans aucun support matériel. Mais, une fois émis par le soleil, le rayonnement atteint la surface des corps et subit suivant leurs caractéristiques certaines transformations. Le rayonnement en provenance du soleil et atteignant un plan présente trois composantes :

Le rayonnement direct : qui correspond au flux solaire atteignant directement la paroi quand celle-ci est exposée au soleil (fig II-3). Il dépend de la hauteur du soleil (réduction atmosphérique) et de l'angle d'exposition de la paroi au soleil à l'instant considéré. L'inclinaison, l'orientation de la paroi et la direction du rayon solaire permettent d'évaluer l'angle d'incidence²⁵ qui caractérise l'incidence avec lequel le rayon solaire frappe la paroi. Plus le flux est normal à la paroi, plus il est important, plus il est rasant, plus il est faible.

Le rayonnement direct peut être nul par temps couvert ; il est calculable en fonction de la transmittance τ de l'atmosphère²⁶.

²³ AFME : Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie : « *Conception thermique de l'habitat guide pour la région Provence-Alpes- Côte d'Azur -* » Edition EDISUD, Décembre, 1988. p 40.

²⁴ CERMA : *Le rayonnement solaire*. [En ligne] http://audience.cerma.archi.fr/cerma/pageweb/theorie/solaire/rayon_solaire.html (page consultée le 12-06-2007)

²⁵ c'est l'angle entre la normale à la paroi et le rayon solaire à l'instant considéré

²⁶ LAVIGNE.P et al : « *Architecture climatique : une contribution au développement durable, tome1. Bases physiques* » EDISUD, 1994.p74.

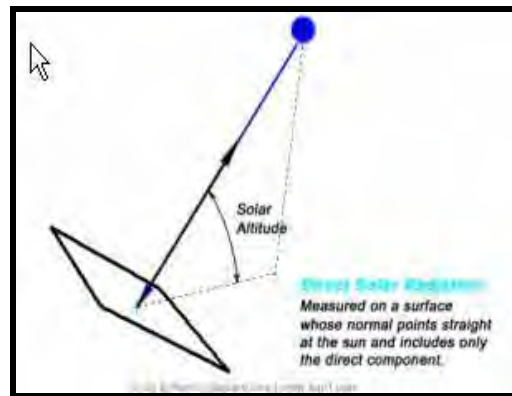


Figure II-3: Rayonnement solaire direct sur une surface.

(Source : MARSH.A, 2003 : en ligne : www.squ1.com)

Le rayonnement diffus : représente le flux, en provenance du ciel (fig II-4). Il est souvent évalué en considérant qu'il est isotrope (toutes les parties du ciel émettant le même rayonnement). Dans ce cas, seule l'inclinaison de la paroi pondère le flux diffus incident. Faible par ciel très pur, ce rayonnement n'est jamais nul

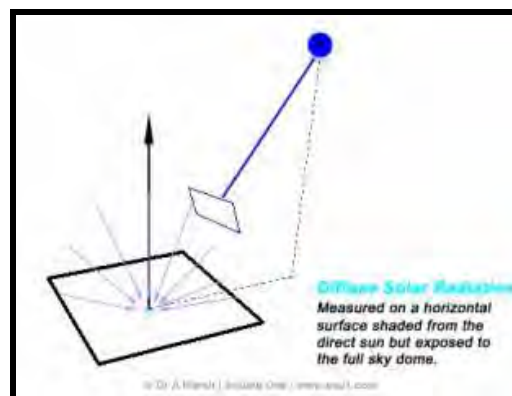


Figure II-4 : Rayonnement solaire diffus sur une surface

(Source : MARSH.A, 2003. en ligne : www.squ1.com)

Le rayonnement réfléchi ou albédo: représente la partie du flux interceptée par la paroi suite aux réflexions solaires produites par l'environnement proche. En première approximation, cet environnement proche est représenté par un plan horizontal renvoyant une part du flux global incident (direct et diffus); la part réfléchi dépend de l'albédo, coefficient de réflexion solaire du plan récepteur considéré. Le flux intercepté par la paroi dépend alors seulement de son inclinaison²⁷.

²⁷ CERMA : *Le rayonnement solaire*. [En ligne] http://audience.cerma.archi.fr/cerma/pageweb/theorie/solaire/rayon_solaire.html (page consultée le 12-06-2007)

Le rayonnement Global qui atteint un plan est la somme des trois rayonnements précédemment définis (figure II-5).

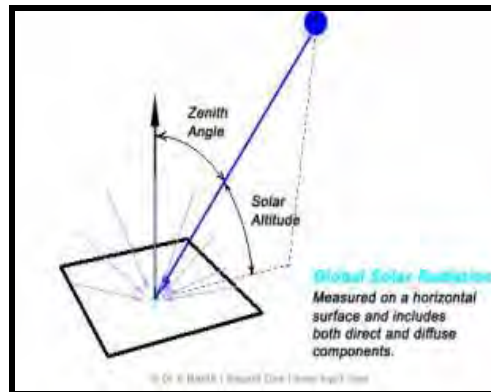


Figure II-5 : Radiations solaires globales

(Source : MARSH, A, 2003).

4.1.5.1.2. Le flux solaire intercepté par une paroi :

Le flux solaire incident sur une paroi est, à son tour, réfléchi, absorbé et transmis, suivant les caractéristiques de surface de la paroi.

Le **flux solaire réfléchi** : dépend du facteur de réflexion solaire de la surface ou du matériau de la paroi, et de son albédo. Il est essentiellement lié à la couleur ; le noir ne réfléchit pas les rayons solaires, le blanc réfléchit tout. Les valeurs de réflexion solaire sont résumées dans le tableau (Annexe I).

La texture du matériau ou de la surface de la paroi conditionne le type de réflexion. Si la surface est mate, la réflexion est diffuse, identique dans toutes les directions. Si la surface est polie, la réflexion est spéculaire, dans une direction symétrique à la direction incidente²⁸.

Le **flux solaire absorbé** : dépend du facteur d'absorption solaire de la surface. Dans le cas d'une paroi opaque, le coefficient d'absorption vaut 1- albédo.

Le **rayonnement** solaire absorbé par la paroi se transforme en chaleur et élève la température de surface de la paroi. La paroi échange la chaleur alors avec son environnement suivant les trois modes fondamentaux d'échanges :

- Par conduction à l'intérieur de la paroi,
- Par convection avec l'air environnant,
- Par rayonnement vers les parois voisines.

²⁸ MAZRIA, Edouard : « *Le guide de l'énergie solaire passive* » Editions Parenthèses, 1980, p20.

Le **flux solaire transmis** ne se produit qu'avec des parois transparentes. Dans le cas des vitrages, la part du flux transmis suit alors sa course sans changement de direction vers les parois intérieures des bâtiments. A la différence des parois opaques, pour le flux direct, les coefficients de transmission, d'absorption et de réflexion des vitrages (dont la somme est 1) varient avec l'angle d'incidence du rayon solaire sur la vitre. Le facteur de transmission au direct décroît rapidement dès lors que l'angle d'incidence devient important.

Tous les objets émettent, d'une façon continue, un rayonnement et absorbent une partie des rayonnements émis par d'autres corps. L'émission et l'absorption des rayonnements jouent un rôle très important dans les échanges énergétiques qui se produisent à la surface extérieure des bâtiments. Les longueurs d'onde du rayonnement thermique dépendent de la température de la surface d'émission: plus la température est élevée, plus courte est la longueur d'onde pour laquelle se produit un maximum d'énergie. La température absolue des couches extérieures de l'atmosphère solaire est environ vingt fois plus grande que la température de la surface de la terre et des bâtiments. L'énergie accompagnant le rayonnement solaire se trouve par conséquent concentrée et dans des longueurs d'onde beaucoup plus courtes que celle liée aux rayonnements émis par des corps dont la température est plus basse. Le rayonnement solaire est donc généralement défini comme un rayonnement du type "onde courte" alors que celui des objets terrestres est du type "onde longue".

À tout instant, la chaleur totale émanant d'une surface doit être égale à la chaleur totale qui s'en approche. La figure II-6 montre les diverses composantes accompagnant le flux calorifique dirigé vers une surface opaque ou s'éloignant de celle-ci. Dans le cas de la surface d'un bâtiment exposé au rayonnement solaire, les divers flux calorifiques se produiront suivant les directions indiquées sur la figure. La température de la surface est toujours celle où les gains et pertes de chaleur sont en équilibre. Si le rayonnement solaire incident augmente, la température de la surface s'élève, d'où un accroissement de la conduction, de la convection et du rayonnement "onde longue", juste suffisant pour compenser l'augmentation du taux d'absorption.

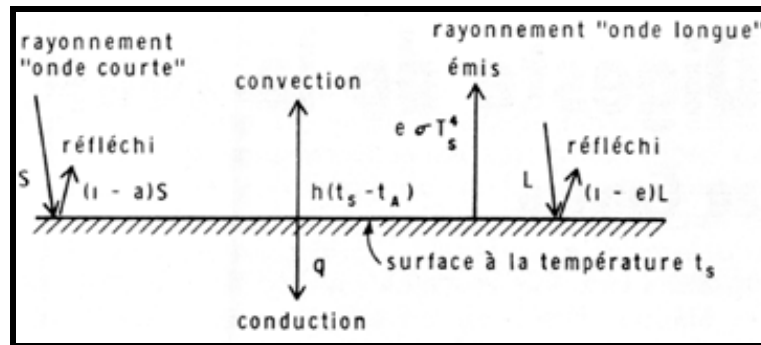


Figure II-6 : Composantes de l'équilibre thermique sur une surface opaque.
(Source : D.G.STEPHENSON, 1966)

4.1.5.2. Les différents modes de transfert de chaleur dans le bâtiment:

Le transfert de chaleur se produit entre deux corps dont les températures sont différentes, la chaleur se déplaçant du corps le plus chaud vers le corps le moins chaud jusqu'à ce que les températures des deux corps soient équilibrées²⁹. L'énergie calorifique se déplace alors de trois manières différentes, qui sont généralement simultanées. Il s'agit de la conduction, de la convection et du rayonnement:

4.1.5.2.1. Transfert de chaleur par conduction :

En physique, la conduction est définie comme la transmission d'énergie calorifique (chaleur) à travers un corps sans déplacement de matière. Ce type d'échange ne se produit que dans les objets solides.

La conduction s'effectue donc par contact direct et la chaleur s'écoule naturellement de l'endroit le plus chaud vers l'endroit le plus froid. Le flux de chaleur traversant une paroi est proportionnel à la différence de température entre les deux faces, à la conductivité thermique du matériau et inversement proportionnel à l'épaisseur du matériau traversé (figure II-7).

²⁹ HOFMANN.H : « *Phénomènes de transfert de chaleur et de masse* » Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne LTP, IMX, EPFL. p4.

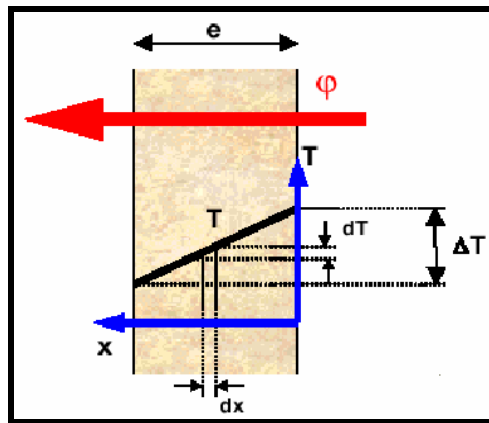


Figure II-7: Transfert de chaleur par conduction
(Source : Lavigne, 1994)

La quantité de chaleur transmise par conduction est exprimée par la loi de Fourier :

$$\Phi = \lambda / e \cdot \Delta t \dots\dots\dots [5]$$

Où :

Φ : Flux de chaleur (W)

Δt : Différence de température entre les deux faces de la paroi (°C).

λ : Coefficient de conductivité thermique du matériau (W/m°C).

e : Epaisseur de la paroi (m).

4.1.5.2.2. Transfert de chaleur par convection :

La convection est un phénomène se produisant dans un fluide en mouvement, ou entre un fluide en mouvement et une surface rigide. L'échange de chaleur entre une surface et l'air en contact avec celle-ci est d'autant plus important

- que la différence de température entre l'air et cette surface est importante,
- que la vitesse de l'air en contact avec la surface est élevée.

Les échanges convectifs correspondent à des transferts d'énergie. Ces transferts d'énergie peuvent résulter du mouvement naturel de l'air généré par une différence de température ou de densité (convection naturelle), ou du mouvement forcé de l'air provoqué

par une puissance extérieure (convection forcée) comme un ventilateur ou un vent assez fort³⁰. Les mouvements verticaux de l'air s'effectuent du plus chaud vers le plus froid.

A l'intérieur d'un local, si l'air est plus chaud que les parois, alors c'est l'air qui va se refroidir au contact des parois. Dans ce cas, l'air s'alourdit en perdant sa chaleur et coule vers le bas de la pièce. La quantité de chaleur transmise par convection peut être exprimée par la loi de NEWTON :

$$\Phi = h (t_s - t_r) \dots \dots \dots [6]$$

Où :

h : Coefficient de convection (dépend de la nature de la surface) (W.m⁻².°C)

T_s : Température de la surface de la paroi (°C)

T_r : Température du fluide (°C)

4.1.5.2.3. Transfert de chaleur par rayonnement :

Les échanges radiatifs dépendent des caractéristiques de la surface de la paroi et celle de l'environnement qui lui fait face. Le rayonnement absorbé par une surface correspond au rayonnement net. Ce dernier est la quantité d'énergie radiative disponible à la surface et pouvant être transformée en d'autres formes d'énergie par les divers mécanismes physiques de la surface (Bonn et Rochon, 1992).

Tout corps émet un rayonnement électromagnétique se caractérisant par leur longueur d'onde. L'énergie transportée par rayonnement se propage dans toutes les directions, et se transfère à un corps solide lorsqu'elle entre en contact avec lui. Ce corps l'absorbe, se réchauffe, et réémet des rayonnements à son tour. Le rayonnement ne se convertit en chaleur que dans les matériaux solides qui lui sont opaques.

Ce phénomène dépend de l'émissivité de la paroi et de la température de la surface considérée et de celles qui l'entourent. Le flux de chaleur transmise par rayonnement est défini par la formule suivante :

$$Q_{ir} = h_{ir} (t_{ir} - t_{is}) \dots \dots \dots [7]$$

³⁰ UTC : Université de Technologie Compiègne : *Transfert de chaleur : Généralités sur le transport et le transfert de l'énergie thermique*. [En ligne] <http://www.utc.fr/~houde//ch3a.html>

Où :

h_{ir} : Coefficient de rayonnement de la surface de la paroi ($W.m^{-2}.^{\circ}C$)

T_{ir} : Température radiante moyenne des surfaces environnantes ($^{\circ}C$)

T_{is} : Température de surface de la paroi considérée ($^{\circ}C$)

4.1.5.3. Comportement thermique des parois :

Le confort thermique dans un bâtiment dépend principalement du comportement thermique de son enveloppe soumise aux contraintes climatiques. L'enveloppe échange perpétuellement des flux avec l'environnement extérieur et les ambiances intérieures et filtre et transforme les sollicitations.

En été, les flux thermiques sont essentiellement variables, deux types de flux peuvent être distingués³¹ :

- les flux externes, dûs à l'amplitude de la température extérieure et à l'absorption des flux solaires pour **les parois extérieures opaques**.
- Les flux internes dûs à la pénétration solaire par **les baies** et aux fluctuations du régime des apports internes.

Il convient alors d'examiner les deux types de parois ; opaque et vitrée :

4.1.5.3.1. Les parois opaques :

Aux effets climatiques, on oppose une paroi qui permet la création d'une ambiance favorable. Lorsqu'une paroi sépare deux ambiances extérieure et intérieure de températures différentes, il se produit un flux de chaleur depuis l'ambiance la plus chaude à la plus froide.

Si la quantité d'énergie qui entre à travers un mètre carré de vitrage est importante, l'énergie reçue par les parois opaques est aussi très importante du fait même de leur surface. Il y a donc lieu de traiter ces surfaces à la fois en termes de déperditions (en hiver) et de protection solaire (en été). En effet, les parois opaques transmettent la chaleur résultant de leur exposition au rayonnement solaire. Le processus est le suivant : le rayonnement solaire est d'abord absorbé, puis la chaleur résultant de cette absorption est transmise vers l'intérieur par conduction (fig II-8). La quantité d'énergie transmise par une paroi externe est proportionnelle à sa conductance (ou coefficient k).

³¹ **IZARD.J.L** : « *Architectures d'été/Construire pour le confort d'été* » Editions : Edisud, 1993. p 68.

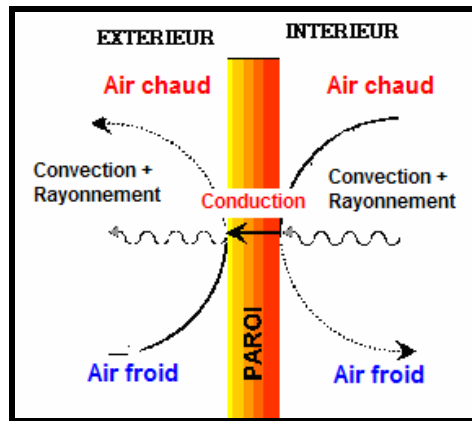


Figure II-8: Mode de transfert de chaleur à travers une paroi opaque
(Source : [En ligne] www.bilan-thermique.com)

Les surfaces internes et externes de la paroi s'opposent au flux de chaleur, pour traverser la paroi, les flux de chaleur doivent passer du milieu gazeux au milieu solide, puis du milieu solide au milieu gazeux, ce qui se produit par le mécanisme de convection (défini précédemment).

Lorsque le flux R d'énergie solaire (dont les valeurs de base en fonction de l'orientation des façades), frappe une paroi opaque pleine, une partie seulement de cette énergie est absorbée par l'épiderme puis transmise, mais seulement pour partie, dans l'intérieur de la paroi (fig II-9). L'autre partie est rendue au milieu extérieur sous forme de flux thermique. La composition interne de la paroi, traduite par son coefficient K , et la succession de ses résistances thermiques partielles, influe sur la manière avec laquelle se partage le flux R .³²

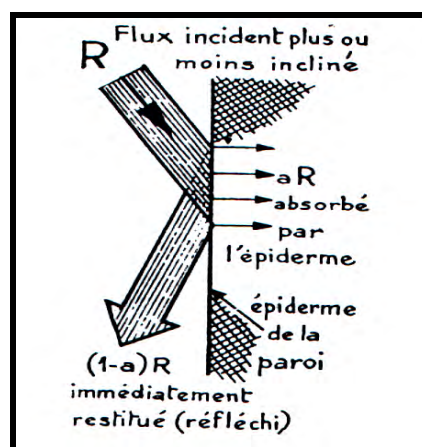


Figure II-9: Flux énergétique incident sur une paroi opaque.
(Source : BONHOMME ANDRE, 1986)

³² BONHOMME ANDRE : « *L'isolation thermique des bâtiments- conceptions des projets, ventilation, apports solaires, besoin de chaleur, économies d'énergie* ». Edition Le moniteur. Paris, 1986. p129.

En outre, le flux de chaleur qui traverse la paroi opaque s'exprime comme suit :

$$\Phi_{sp} = A \cdot U (t_{so} - t_i) \dots \dots \dots [8]$$

Où :

Φ_{sp} : gain solaire à travers la paroi.

A : surface (m²).

U : Coefficient de transmission (W/m² K)

T_i : Température intérieure (°C)

T_{so} : Température air sol (°C) où $T_{so} = t_0 + \alpha I R_{so}$

t_0 : Température intérieure (°C)

I : radiation solaire globale (W/m²).
Incidence sur la surface de la paroi concernée.

R_{so} = résistance de surface externe (m²K/W).

α : Coefficient d'absorption de surface.

4.1.5.3.2. Les parois transparentes :

Caractérisées par une résistance thermique faible, les surfaces vitrées ont des propriétés de transmettre totalement le rayonnement visible, ce qui conduit à des surchauffes en été et des refroidissements en hiver.

L'énergie radiante, en tombant sur une surface transparente est divisée comme suit :

1. Une partie est réfléchiée immédiatement par le vitrage, n'ayant aucun effet thermique sur le matériau.
2. Une deuxième partie est directement transmise vers l'intérieur à travers le matériau. Ces deux proportions d'énergie, à savoir le pouvoir de réflexion et de transmittance, dépendent de l'angle d'incidence du rayonnement solaire. Ainsi, la transmittance décroît lorsque cet angle est supérieur à 45° tandis que la réflexion s'accroît lorsque l'angle est supérieur à 60° et inversement³³.
3. Une troisième partie est absorbée par le matériau qui s'échauffe et par conséquent, elle est dissipée vers l'intérieur par convection et par rayonnement de grande longueur d'onde. Elle sera alors absorbée par les surfaces et les objets se trouvant à l'intérieur, ce qui a pour effet d'élever leur température et c'est « l'effet de serre » : Tout le rayonnement solaire transmis par les vitrages est piégé dans la pièce contribuant ainsi à l'échauffement général de l'air et des parois.

En effet, la figure II-10 montre la variation de la réflexion, de l'absorption et de la transmission de la radiation solaire par une simple paroi de verre ordinaire. Elles montrent

³³ GIVONLB : « *L'homme, l'architecture et le climat* » Edition Le Moniteur-Paris, 1978, p 250

que la transmission aura une valeur maximale quotidienne de 70% de la radiation incidente au milieu de l'été et que cette radiation augmentera jusqu'à 85% à l'équinoxe et atteindra un maximum de 87% à midi, au milieu de l'hiver³⁴.

La capacité d'un matériau à émettre de la chaleur de manière radiative est appelée son émissivité. Ce coefficient d'émissivité varie en fonction de la longueur d'onde du signal émis. Les fenêtres, ainsi que les matériaux que l'on trouve à l'intérieur d'un bâtiment, émettent typiquement des radiations sous forme d'infrarouges de très grande longueur d'onde. A savoir enfin que pour une longueur d'onde donnée, le coefficient d'absorption d'un matériau est égal au coefficient d'émissivité.

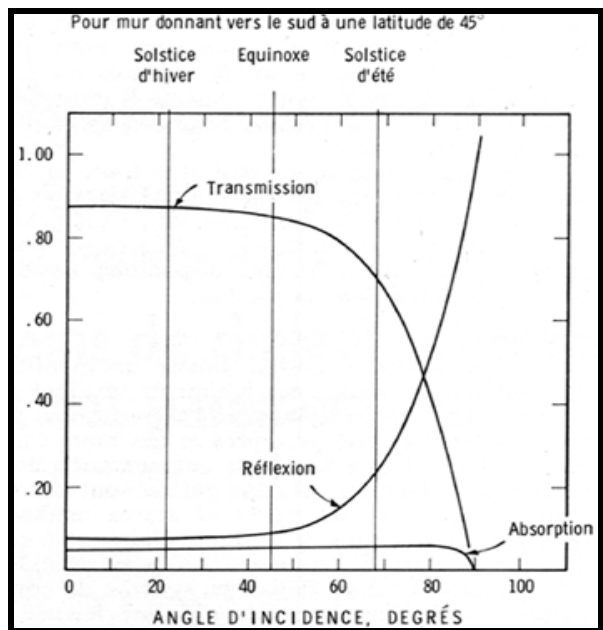


Figure II-10 : Absorption, réflexion et transmission de la radiation solaire par une simple paroi de verre ordinaire.

(Source : STEPHENSON. D. G, 1964)

Le transfert de chaleur à travers le vitrage dépend de la présence ou l'absence des protections solaires ainsi que les propriétés et la qualité thermique du type de vitrage (simple, double, absorbant ou réfléchissant). Le taux de chaleur qui peut traverser une paroi vitrée est exprimé par l'équation suivante :

$$\Phi_{sv} = A_v (I_d - I_{df}) HGF \dots\dots\dots[9]$$

³⁴ STEPHENSON. D. G : « Gains de chaleur solaire au travers des fenêtres et des parements vitré ». Publié à l'origine en novembre 1964.

Où :

Φ_{sp} : gain solaire à travers la paroi.

A_v : surface du vitrage (m^2).

I_d : Intensité d'énergie provenant de la radiation solaire directe (W/m^2)

I_{df} : Intensité d'énergie provenant de la radiation solaire diffuse et des surfaces environnantes (W/m^2)

HGF : Facteur solaire exprimé par la formule suivante :

$$HGF = T + \alpha \frac{c_0}{c_0 + c_i} \dots\dots\dots[10]$$

Où : **T** : coefficient de transmission de vitrage (sans dimension).

α : Coefficient d'absorption de surface.

c_0 et c_i : coefficient de convection des surfaces internes et externe (W/m^2K).

En effet, selon des expériences menées en Afrique du Sud par Van STRAATEN³⁵, le flux de chaleur maximal derrière un vitrage Ouest était de $65W/m^2$, tandis que pour un mur léger faiblement isolé le flux était de $8W/m^2$, pour un mur mieux isolé il était de $4,6W/m^2$ et pour un mur en brique de 23cm il était de $4,3W/m^2$.

Les quantités d'irradiation solaire les plus élevées se produisent les jours chauds quand toutes les surfaces environnantes externes au bâtiment sont aussi chauffées par le Soleil. Selon la configuration géométrique du bâtiment et l'emplacement de la fenêtre, il se peut que le vitrage reçoive plus d'énergie radiante sur grande longueur d'onde provenant de ces surfaces externes que celles émises dans sa direction. Le problème solaire s'intègre ainsi dans les problèmes thermiques de confort et nous incite à faire appel à des systèmes de contrôle solaire pour y palier.

D'après GIVONI.B, l'effet thermique des matériaux de constructions transparents peut être considéré de deux points de vue ; le gain de chaleur effectué à l'intérieur, et l'estimation des charges de refroidissement dans le bâtiment climatisé.

L'occultation du vitrage affecte la quantité du rayonnement incident et modifie le flux de chaleur pénétrant à l'intérieur et les températures intérieures. Et qui dépend de la position de l'occultation par rapport au vitrage (extérieure ou intérieure). De son côté,

³⁵ In GIVONI.B : « *L'homme, l'architecture et le climat* » Édition Le Moniteur, Paris,1978, page253

IZARD. J.L, 1993 affirme que l'augmentation de la surface vitrée a toujours pour effet une augmentation de la température interne diurne.

MAZRIA, 1980, rajoute que les fenêtres sont des sources du déficit thermique important, et que l'exposition optimale pour le captage solaire est le plein sud. De plus, la meilleure orientation requise par les fenêtres d'un bâtiment est celle qui reçoit la quantité maximale de rayonnement solaire en hiver et la quantité minimale en été.

4.2. Facteurs liés à la conception :

4.2.1. Effet de l'orientation :

L'orientation d'une façade est le paramètre clé des interactions visuelles, thermiques et acoustiques. Cependant au niveau thermique, cela se traduit par l'ensoleillement disponible, la pression du vent et l'humidité de l'air ; tout cela gère simultanément le rôle que joue la façade³⁶. Le niveau du rayonnement sur un mur est sensiblement plus élevé dans une direction et moindre dans l'autre, ce qui signifie que les conditions de protection sont importantes, et en particulier la ou il y a des fenêtres « il n'en reste pas moins qu'une bonne orientation des baies vitrées est un choix essentiel pour faire des économies d'énergie »³⁷.

Selon EVANS.M, 1980, Il est important de protéger les parois verticales opaques ou transparentes, l'efficacité de leur protection dépend de leur orientation. Ainsi, les résultats de recherche au CSTB, ont déterminé les valeurs de rapport existant entre les apports calorifiques dus aux rayonnements et ceux dus à la température sous abri. Ces apports s'établissent comme suit (tableau II-2):

N	NE	E	SE	S	SO	O	NO	Toiture
13%	31%	44%	36%	21%	36%	44%	37%	96%

Tableau II-2: Apports calorifiques sur une paroi selon son orientation

(Source : ONRS, 1983 In Abdou.S,2004)

³⁶ LAVIGNE.P et al : « *l'architecture climatique : une contribution au développement durable. tome 2 : concepts et dispositifs* » EDISUD Aix en Provence France, 1998. p16

³⁷ BLOCH -LAINE. J. M : « *Construire avec le Climat* » ministère de l'environnement et du cadre de vie Paris 1979, p.23

- L'irradiation solaire d'une paroi :

La lecture du diagramme ci-dessous (fig II-11) démontre les quantités de radiations solaires directes pour une surface verticale et horizontale pour différentes orientations durant un mois chaud de l'année correspondant au mois de Juillet pour la ville de Constantine.

En effet, la surface verticale Sud reçoit le minimum de radiations solaires au mois de juillet comparé aux autres orientations avec un rayonnement global égal à 2436 wh/m^2 .

Les orientations Est et Ouest, sont considérées les plus défavorables, avec un rayonnement global de 4272 wh/m^2 car elles reçoivent le maximum de radiations solaires en été et le minimum durant les mois d'hiver.

L'orientation EST reçoit la même quantité d'énergie que celle ouest, mais pendant la matinée, lorsque la température d'air est plus basse.

Quant aux orientations Sud-est et Sud-ouest, elles reçoivent une quantité de radiations solaires de 3649 wh/m^2 . En ce qui concerne la surface horizontale, elle reçoit le maximum d'énergie solaire de 7480 wh/m^2 en été.

Toutes ces données, nous permettent de conclure que l'orientation sud reçoit le maximum de radiation en hiver et le minimum en été par rapport aux autres orientations.

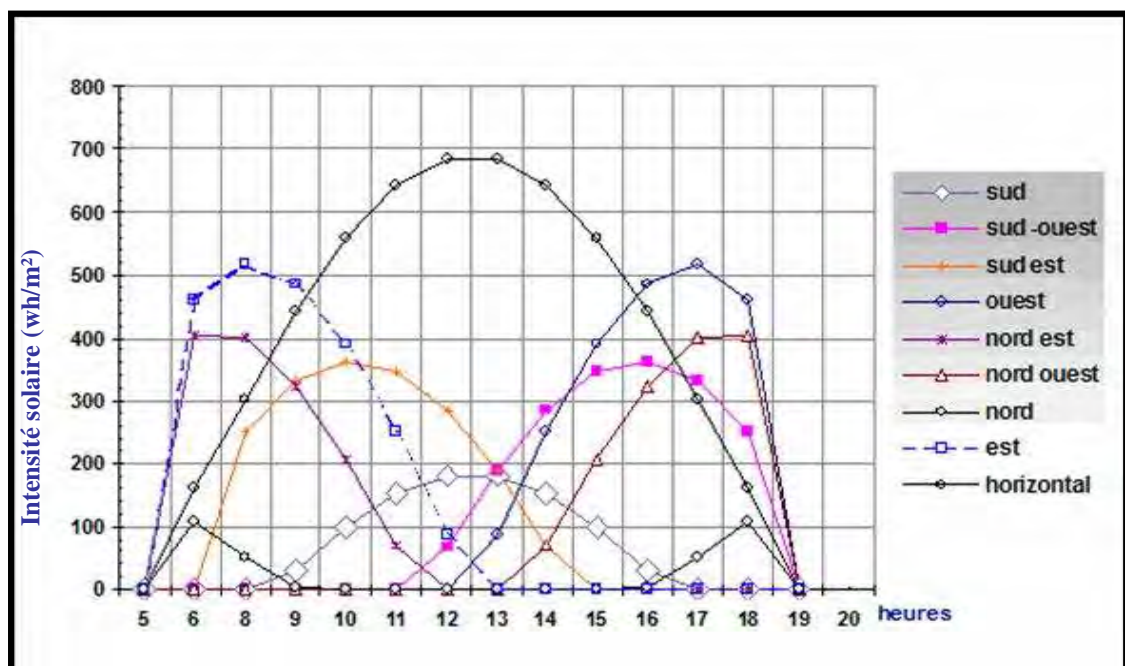


Figure II-11 : Radiations directes pour une surface verticale pour différentes orientations durant un mois chaud de l'année – Juillet- pour la ville de Constantine.

(Source : CAPDEROU.1988)

4.2.2. L'albédo :

Les surfaces de la paroi présentent des résistances superficielles en fonction des propriétés de convection. Outre la qualité intrinsèque de ses surfaces, les couleurs externes jouent un rôle significatif dans la modification du climat intérieur. Etant donné qu'il y a un effet sur la température externe de la surface, le choix de la couleur est très important pour la conception thermique.

La réduction des températures surfaciques contribue directement à l'adoucissement des effets négatifs de l'îlot de chaleur. En effet, Rosenfeld³⁸ a démontré qu'en augmentant l'albédo des surfaces urbaines et en plantant des arbres, le phénomène de l'îlot de chaleur urbain est atténué. Une grande augmentation de l'albédo, combinée avec l'ombrage des arbres peut réduire de 40% l'usage de l'énergie pour la climatisation.

En effet, la couleur extérieure a une influence sur la partie du rayonnement solaire incident absorbée par la paroi. La grandeur agissante est le facteur d'absorption (noté α). La valeur de α , qui varie de 0 à 1, dépend de la couleur, selon une règle simple : plus la couleur est « sombre », plus α est proche de 0,9. Une couleur claire correspond à un α égal au mieux à 0,20 (fig II-12). Lorsque par exemple, la surface extérieure est peinte en blanc, l'absorption est basse et la réflexion est élevée. Givoni.B, Hoffman, 1991 reconnaissent que l'effet de l'absorption est plus ressenti dans la construction légère.

De plus, la transmission de la chaleur solaire à travers le mur croit proportionnellement au coefficient d'absorption de sa face externe. Lorsque par exemple, la surface extérieure est peinte en blanc, l'absorption est basse et la réflexion est élevée. Pour cela, les facteurs d'absorption pour quelques types de surfaces rencontrées dans les villes sont donnés dans la figure ci-dessous.

³⁸ ROSENFELD.A.H et al : « *Mitigation of urban heat island : materials unity programs, and updates* » Energy and Buildings 1995. vol22,pp :255-265.

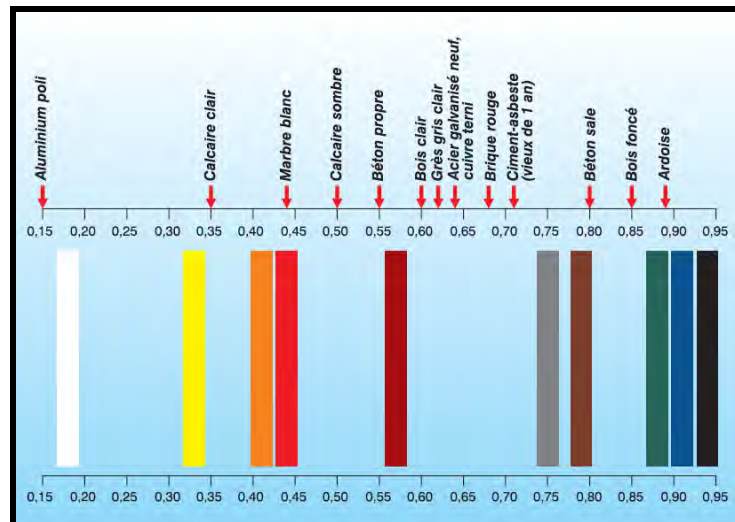


Figure II-12: Coefficients d'absorption pour différents matériaux et différentes couleurs
(Source : LIEBARD.A & DE HERDE.A, 2005)

Cheng.V³⁹ affirme que l'application de couleur de surface claire sur une façade est un moyen très efficace pour réduire la température intérieure et participe donc à la protection solaire du bâti en climat chaud et humide. Bansal NK et al, 1992 ont pu démontrer une différence de 1°C à 6°C de la température intérieure entre les couleurs claires et les couleurs sombres.

La relation entre les températures intérieure et extérieure pendant la journée dépend de la conception du bâtiment et en particulier de la couleur externe des parois, de la grandeur et de la protection des fenêtres. En général, d'après Bouchahm.Y, 2004⁴⁰, les bâtiments d'une couleur externe blanche et une capacité calorifique moyenne, et avec des ouvertures relativement petites et protégées connaissent, pendant la journée, des températures plus basses qu'à l'extérieur. Par contre, les bâtiments peints en sombre, ont des températures supérieures à celle de l'extérieur.

En plus de l'effet de la couleur externe, Givoni⁴¹, 1979, affirme que les effets quantitatifs du rayonnement incident dépendent dans une certaine mesure, de la vitesse de l'air en contact avec la surface. L'effet thermique de n'importe quelle intensité de rayonnement varie inversement avec la clarté de la couleur et la vitesse de l'air.

³⁹ CHENG.V, NG.E & GIVONI.B : « *Effect of envelope color and thermal mass on indoor temperatures in hot humid climate* » Solar Energy 2005. 78 p528-534.

⁴⁰ BOUCHAHM.Y : « *Une investigation sur la performance thermique du capteur a vent pour un rafraîchissement passif dans les régions chaudes et arides Cas de Ouargla* ». Thèse de doctorat d'état. Université de Constantine, 2004, page 79.

⁴¹ GIVONI .B : « *L'homme, l'architecture et le climat* » Edition le moniteur, paris 1978, p233

4.2.3. Systèmes d'occultation des parois:

Les apports thermiques par les murs représentent généralement de 20 à 30 % des apports thermiques⁴² par les parois d'un logement et leur protection solaire est donc essentielle. Cette protection doit être d'autant plus efficace que les murs reçoivent plus d'énergie. C'est le cas en particulier des murs Ouest ou proches de l'Ouest qui contribuent à des apports importants dans les logements en fin de journée. Il y a lieu alors d'opter pour des systèmes d'ombrage contre la radiation solaire et par conséquent la diminution des températures.

Szocolay, 1979, donne plusieurs possibilités d'occultations fixes, avec leurs géométries solaires spécifiques⁴³. Il existe ainsi des systèmes d'occultation naturels:

4.2.5.1. Auvents et écrans végétaux:

Selon le Groupe A.B.C⁴⁴, 1999, les angles requis restent les mêmes, mais il est plus facile d'obtenir des grandes profondeurs avec des végétaux grimpants sur des treilles ou des pergolas. Le problème qui reste en suspens est celui de l'éclairage naturel des locaux, qui peut être fortement réduit par l'ombrage du végétal si celui-ci est dense.

Les rayons du soleil étant peu inclinés par rapport à l'horizon, les écrans verticaux, qu'ils soient architecturaux ou végétaux, sont très efficaces pour stopper le rayonnement solaire. Ils suppriment le risque d'ensoleillement partiel de la paroi pour les hauteurs du soleil inférieures à 30°. Par contre, mis en oeuvre seuls, ils autorisent l'irradiation de la paroi pour des hauteurs du soleil supérieures à 30°.

La figure II-13 ci-après présente quelques solutions-types pour protéger une façade Ouest.

⁴² **Comité Territorial pour la Maîtrise de l'Énergie** Nouvelle Calédonie : « *Opération de qualification de la qualité thermique et des performances énergétiques des logements neufs* » Cahier de prescriptions techniques et de recommandations Avril 2006, p9.

⁴³ **SZOCOLAY.SV** : « *Environmental science handbook for architects and builders* » London, New York, Lacastre : the Construction Press, 1979, p318.

⁴⁴ **Groupe ABC** : « *ProtecSolWeb* », [En ligne] <http://www.marseille.archi.fr/~abc/Textes/ProtecSolWeb.PDF>

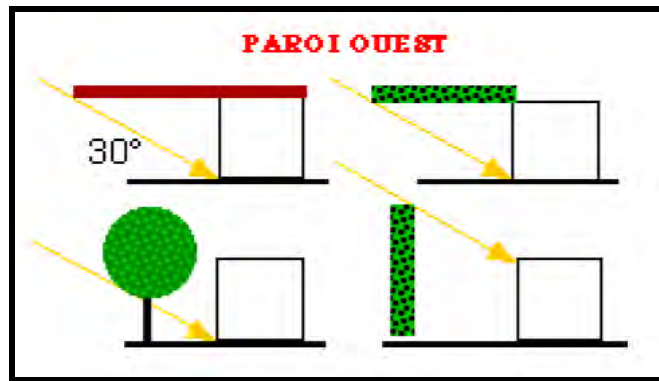


Figure II-13 : Solutions de protection solaire pour une paroi Ouest
(Source : Groupe A.B.C, 1999)

Comme dans l'orientation Sud, la forme tridimensionnelle du feuillage des arbres permet en général d'ombrer non seulement la paroi elle-même, mais aussi le sol au pied de la paroi (Fig II-14).

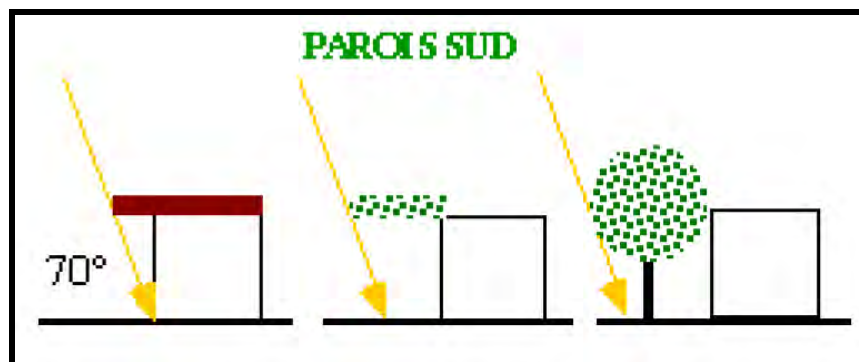


Figure II-14 : Protections solaires pour une paroi verticale Sud
(Source : Groupe A.B.C, 1999)

4.2.4. Effet de l'inertie thermique :

Lorsque les rayons du soleil frappent une paroi opaque, une partie de l'énergie rayonnée est absorbée, le reste est réfléchi. Un flux de chaleur s'établit alors entre la face externe et la face interne de la paroi. La chaleur, qui se transmet par onde de l'extérieur à l'intérieur, se propage avec un certain déphasage et subit un amortissement. Le maximum de température atteint sur la face extérieure n'est pas immédiatement senti sur la face intérieure de la paroi.

D'après Liebard et De Herde⁴⁵, l'inertie thermique est une notion qui recouvre à la fois l'accumulation de chaleur et sa restitution, avec un déphasage dépendant des

⁴⁵ **LIEBARD.A & DE HERDE.A** : « *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques ; Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable* » Editions du moniteur- décembre.2005. p 91.

caractéristiques physiques, dimensionnelles et d'environnement de la paroi de stockage. La vitesse de stockage ou déstockage de la chaleur est déterminée par deux autres grandeurs qui sont la diffusivité et l'effusivité (définies en annexe I).

Pour réduire l'amplitude d'un flux thermique, les parois de l'enveloppe doivent présenter une faible diffusivité et une forte effusivité. Cet objectif peut être atteint par un choix judicieux de matériaux en parois homogènes.

Les parois extérieures permettent le contrôle de l'amplitude entre la température interne et externe. C'est grâce à l'inertie du matériau que la durée du transfert de chaleur est retardée, et elle agit donc sur l'amplitude et le déphasage. L'inertie thermique de la paroi est proportionnelle à l'épaisseur de la paroi et inversement proportionnelle au coefficient de conductibilité thermique du matériau (fig II-15). Le temps de déphasage est fonction de l'épaisseur ainsi que de la conductivité thermique des matériaux.

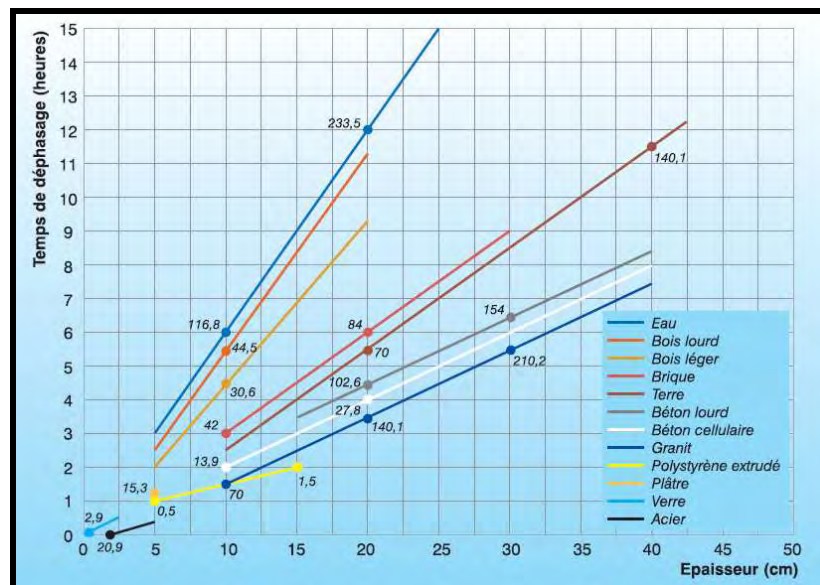


Figure II-15 : Temps de déphasage de différents matériaux de construction en fonction des épaisseurs types

(Source : LIEBARD.A & DE HERDE.A, 2005)

M.A.EBEN. Saleh, 1989⁴⁶ et Ben Habib⁴⁷, 1995 ont démontré à travers des investigations se rapportant à l'habitat du nord saharien et traitant le comportement thermique de deux maisons l'une traditionnelle, et l'autre contemporaine, l'effet très positif

⁴⁶ EBEN SALAH. M.A : « *Impact of thermal insulation location on building in hot dry climates* » Rapport de recherche Saudi Arabia : King Saudi University, Department of Architecture and Building sciences, 5 juin 1989.

⁴⁷ BEN HABIB et al : « *Analyse bioclimatique de l'habitat traditionnel des régions désertiques nord sahariennes* ». Rapport d'étude, Université de la Rochelle et l'institut USTO d'Oran, 1995.

de l'inertie thermique, pendant les saisons froide et chaude. Où la maison traditionnelle arrive à réduire considérablement les besoins de refroidissement et de chauffage.

L'inertie thermique peut aussi avoir un effet positif sur les conditions intérieures en période hivernale. BALARAS⁴⁸ affirme que l'énergie disponible des gains solaires et les gains internes durant le jour, est stockée dans la masse et lentement restituée dans l'environnement intérieur plus tard lorsqu'on en a besoin.

SIDLER.O⁴⁹, 2003 a prouvé par sa recherche menée dans la bande méditerranéenne, que l'inertie est incontestablement un atout pour mieux gérer les apports de chaleur. Elle permet, de plus, la bonne gestion de la chaleur en mi-saison.

Les parois minces peuvent avoir des effets désastreux sur le confort. Très fines et non isolantes, leur échauffement ou leur refroidissement est quasi instantané.

Cependant, une grande inertie thermique permet la récupération de la chaleur du jour afin de la restituer la nuit. Ceci est particulièrement intéressant dans les climats où la différence de température diurne et nocturne est importante. Cheng⁵⁰, affirme que la haute masse thermique retarde le maximum de température pendant le jour, ce qui minimise considérablement les systèmes de rafraîchissement.

4.2.5. Effet de la ventilation sur l'ambiance intérieure :

La ventilation naturelle est principalement utilisée pour le contrôle de la qualité de l'air intérieur et pour fournir le confort thermique en été également. Elle s'effectue par les ouvertures, c'est en fonction de ces dernières, que son efficacité est évaluée.

Une étude de Givoni.B, a révélé que l'ouverture des fenêtres et des volets provoque une élévation de près de 3°C de température interne et cela, surtout, lorsque la fenêtre est orientée Ouest (côté exposé au vent). Quand la fenêtre est orientée à l'abri du vent, on enregistre une augmentation de 1°C.

⁴⁸ BALARAS.C.A : « *The role of thermal mass on the cooling load of buildings. An overview of computational methods* ». Energy and Buildings. 1996, vol 24 pp1-10.

⁴⁹ SIDLER.O, directeur de la Ste ENERTECH : « *L'inertie thermique en climat méditerranéen. Confort et consommations d'énergie* ». Montpellier, Colloque le 15-05-2003. e-mail : sidler@club-internet.fr

⁵⁰ CHENG.V, NG.E & GIVONI.B : « *Effect of envelope color and thermal mass on indoor temperatures in hot humid climate* » Solar Energy 2005, vol178 p528-534.

La ventilation dépend aussi du matériau et de l'épaisseur des murs, surtout lorsque ceux-ci sont peints en gris. Lorsque le bâtiment est ventilé, l'air pénétrant dans l'espace intérieur est à la température extérieure d'origine. Mais en traversant cet espace, il se mélange avec l'air intérieur, et il échange de la chaleur avec les surfaces intérieures en fonction du gradient de températures entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment.⁵¹

4.2.5.1. Effet de la ventilation transversale sur la température interne :

La prise en compte de la position de l'espace par rapport au vent est importante dans la création du déplacement d'air, et grâce à certaines différences de pression d'air sur la largeur et la hauteur des ouvertures, qui sont en mesure de fournir une ventilation transversale convenable.

La ventilation transversale à l'intérieur du bâtiment est la meilleure stratégie. Même dans les pièces n'ayant qu'une seule paroi extérieure, la ventilation transversale peut être provoquée grâce à la distribution des pressions sur le mur exposé au vent⁵². Quand l'angle d'incidence du vent sur une construction est 90°, sa vitesse est référée à zéro au point d'application souvent connu de point de stagnation, toute l'énergie cinétique du vent sera transformée en pression (HARRIS, 1981)

GIVONI, 1978, précise que lorsque l'espace n'est pas ventilé transversalement, la vitesse moyenne intérieure est faible, et spécialement avec un vent perpendiculaire à l'entrée.

Le même auteur estime que la meilleure condition de ventilation transversale est obtenue lorsque le flux d'air change de direction à l'intérieur de l'espace en se déplaçant de l'entrée vers la sortie. On peut apporter une grande amélioration dans la ventilation des bâtiments pour les pièces qui n'ont qu'une seule exposition à l'extérieur, par l'exposition au vent dominant de telle sorte que le vent se présente obliquement sur le mur. L'angle entre le mur et la direction du vent doit être compris entre 20° à 70°.

La mise en place de cloisons internes et la position des fenêtres permettent à l'air de s'écouler directement des ouvertures d'entrée vers celles de la sortie. IZARD, 1993 ; estime qu'une ventilation transversale sera efficace ; les ouvertures sur des façades adjacentes ou

⁵¹ GIVONI .B : « *L'homme, l'architecture et le climat* » Edition Le Moniteur, Paris 1978 p 285.

⁵² BOUCHAHM.Y : « *Une investigation sur la performance thermique du capteur a vent pour un rafraîchissement passif dans les régions chaudes et arides* » cas de ouargla » Thèse de doctorat d'état. Université de Constantine, 2004. p85.

opposées, sur lesquelles les pressions d'air sont toujours différentes sous l'effet d'un vent de direction donnée (fig II-16), les locaux doivent être disposés en plan de telle manière que l'air puisse les traverser de part et d'autre.

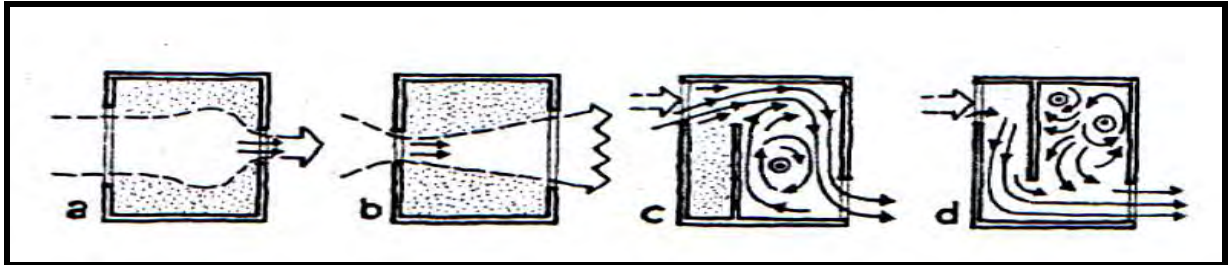


Figure II-16 : Régime des flux d'air subdivisés intérieurement d'une manière différente.
(Source : KONYA.A, 1980)

4.2.5.2. Effet de la ventilation nocturne :

Givoni⁵³ divise le refroidissement par ventilation en deux types de stratégies : la ventilation du confort et le refroidissement nocturne convectif. La distinction entre eux est envisagée puisque quelques éléments du bâtiment, tels que les matériaux structurants et les propriétés thermiques du bâtiment exigent différentes conceptions pour l'efficacité de ces stratégies de ventilation. Durant la journée, la ventilation naturelle fournit le confort humain direct par la recherche de l'augmentation du refroidissement convectif des occupants en augmentant la vitesse de l'air interne.

D'après IZARD, 1993⁵⁴, le principe de la ventilation nocturne est intéressant dès lors que la température d'air extérieur s'abaisse. Il y a un effet d'abaissement de la température de l'air intérieur.

Le graphe (fig II-17) montre cet effet pour une construction à inertie moyenne où les températures intérieures sont diminuées de 3 à 4°C.

⁵³ GIVONI.B : « *Performance and applicability of passive and low energy cooling systems* » Energy and building vol.17, 1991, pp177-199.

⁵⁴ IZARD.J.L : « *Architectures d'été/Construire pour le confort d'été* ». Editions : Edisud, 1993. p 63

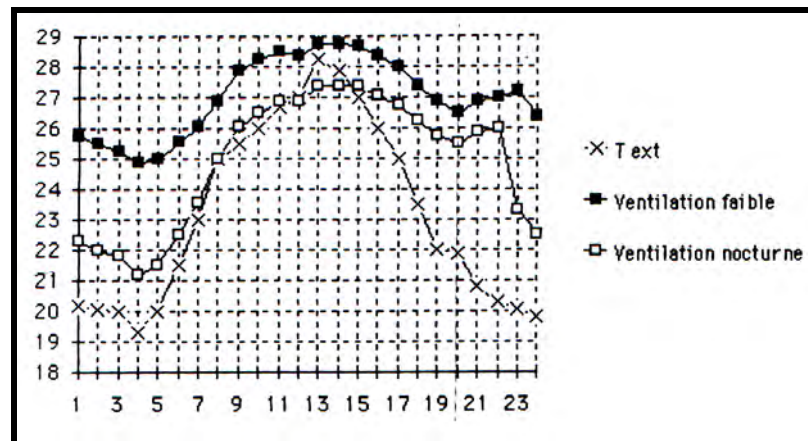


Figure II-17: Effet de la ventilation nocturne sur la température d'air intérieure.

(Source : IZARD.J.L, 1993)

Pour augmenter l'effet de refroidissement nocturne, le bâtiment doit être fermé pendant la journée pour éviter d'amener l'air extérieur chaud dans les pièces. Il est clair aussi que cette ventilation naturelle doit pouvoir également être gérée par les occupants pour que le logement demeure confortable en saison fraîche et / ou en période de vent fort.

Dans les climats chauds, la ventilation nocturne est une solution adéquate, elle contribue à la réduction des charges de refroidissement. La masse thermique largement utilisée pour l'enveloppe peut maintenir relativement la température à un niveau modéré tout le long de la journée.

4.2.6. Occupation et gains internes :

Les gains de chaleur internes produits dans un espace dépendent du type du bâtiment et de son usage. Ils concernent l'apport de chaleur dégagée sous forme latente ou sensible à l'intérieur d'un local. D'après Santamouris et Asimakopoulos, 1996, ces gains ont pour origine les occupants, l'éclairage et les appareils électriques (tout matériel mécanique ou électrique qui opère dans l'espace). Le calcul des gains de chaleur dus aux occupants doit tenir compte des personnes susceptibles de fréquenter les locaux. Les utilisateurs représentent donc le facteur déterminant définitif de l'efficacité de tout le système du bâtiment.

Conclusion :

L'ambiance thermique dans les bâtiments est un facteur important pour le confort des occupants. Actuellement, la prise en compte du confort thermique dans les bâtiments se fait avec des méthodes et des outils élaborés à partir d'approches statiques, simplifiant la complexité des phénomènes interactifs.

Ainsi, les exigences constructives favorisent le surdimensionnement des équipements de contrôle et de régulation des ambiances thermiques (systèmes de chauffage, de rafraîchissement et de climatisation), principales sources de consommation d'énergie et d'émission de gaz à effet de serre, dans le bâtiment.

L'enveloppe est, naturellement, le lieu privilégié des relations entre espaces intérieurs et extérieurs. Il s'agit, alors, de gérer simultanément le rôle que joue la paroi du bâtiment, et celui qu'elle assure comme élément de contrôle des échanges intérieurs/extérieurs. Par conséquent, ce qui est à retenir de ce chapitre, est que beaucoup de facteurs peuvent affecter l'environnement intérieur, tels que les sources de chaleur et d'humidité intérieures et extérieures, la conception thermique de la structure, l'effet d'autres bâtiments, l'élément végétal, etc. dont il faut prendre en considération. De ce fait, pour une conservation d'énergie, une protection optimale de l'environnement et un confort maximum, il est essentiel de bien maîtriser ces paramètres.

Introduction :

L'intégration de la végétation dans l'architecture contemporaine représente une occasion de conception pour les concepteurs et les architectes. Par ailleurs, dans une perspective de végétalisation de l'espace urbain, plusieurs procédés offrent maintenant la possibilité de verdir les surfaces urbaines tels que les toitures et les parois verticales des constructions. La conception de ces dernières peut être plus intéressante et plus bénéfique, si elle est conçue et réalisée correctement. En incorporant les plantes aux bâtiments, le choix des types appropriés est très important.

Les végétaux doivent être choisis en fonction des critères d'adaptation au terrain du point de vue climatique (exposition au vent, au soleil, au gel et humidité du terrain), géologique (structure et qualité nutritive du sol) et notamment le rythme d'évolution de la plante (feuillage) en phase avec les saisons¹.

Ce chapitre vise donc l'identification des avantages possibles de la végétation et de la manière dont elle pourrait être employée dans l'environnement urbain (toits verts, murs verts, etc.) afin d'améliorer les conditions de confort. Pour ce faire, et pour mieux maîtriser les performances des plantes, il est impératif d'évoquer les typologies de ces dernières afin de bien choisir les essences adaptées suivant la saison et le climat.

1. Typologie végétale :

Les différents types de végétaux peuvent se distinguer grâce à la morphologie de leurs feuilles (forme, types et disposition des feuilles).

1.1. Structure des feuilles :

Les feuilles sont des organes constitués de cellules qui contiennent des chloroplastes (dans lesquels se réalise la photosynthèse), dont la position est ajustée de façon que la plus grande surface possible soit exposée au soleil². Des vaisseaux conducteurs de sève apportent l'eau et les sels minéraux ou emportent les produits de la photosynthèse. Les ouvertures, appelées **stomates**, pores grâce auxquels la plante réalise les échanges gazeux sont nécessaires à la respiration et à la photosynthèse.

¹ AFME Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie : « *Conception thermique de l'habitat guide pour la région Provence-Alpes- Côte d'Azur ->* » Edition EDISUD, Décembre 1988. p 44.

² Microsoft Encarta 2007. 1993-2006 Microsoft Corporation.

La plupart des feuilles sont vertes, couleur due à un pigment, la chlorophylle. Cependant, toutes les feuilles ne sont pas vertes. La coloration automnale des feuilles est le résultat de la décomposition de la chlorophylle.

1.2. Morphologie : types et formes de feuilles :

Les diverses morphologies et dispositions des feuilles sont généralement utilisées aux fins d'identification et de classification des plantes. On distingue deux grands types de feuille : les feuilles simples, au limbe unique, non divisé, par exemple la feuille de chêne, de l'érable ou du houx; et les feuilles composées, au limbe constitué de folioles telles que celles de trèfle, du marronnier ou du frêne.

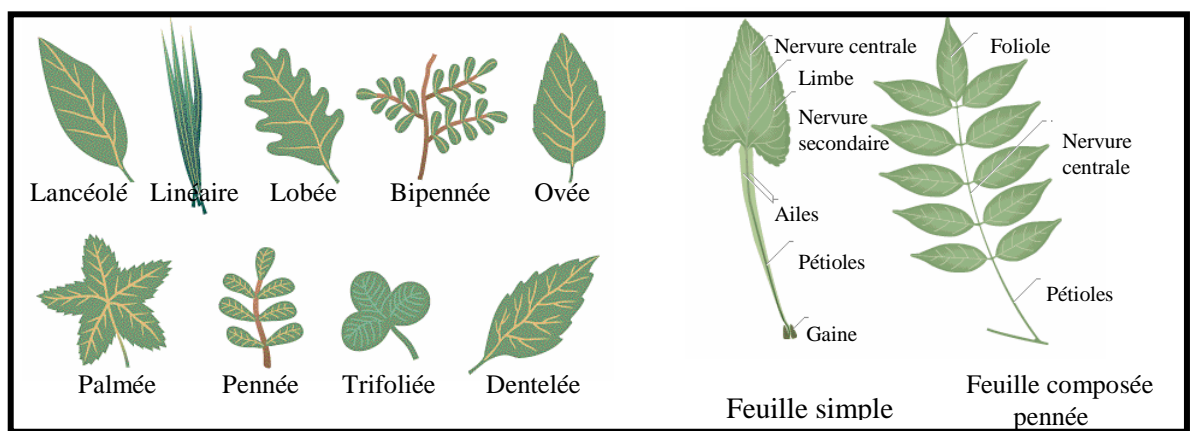


Figure III-1: Forme et type de feuilles

(Source : Microsoft Encarta 2007)

Le limbe des feuilles simples peut présenter multiples formes : oblong (dans le cas du cerisier, plus large vers l'extrémité de la feuille que du côté du pétiole), en forme de cœur comme c'est le cas de la violette, sagitté, c'est-à-dire en forme de pointe de flèche, lancéolé (en fer de lance), lobé (portant des échancrures), à bord lisse ou denté, etc. Les principales formes et morphologies de feuilles sont représentées dans la figure III-1.

1.3. Adaptation des plantes :

La forme et la structure des feuilles sont adaptées aux conditions dans lesquelles vit la plante. Les feuilles typiques des plantes des régions tempérées à humidité modérée sont très différentes de celles des régions tropicales humides ou des régions froides et sèches.

Tandis que la plupart des feuilles ont des limbes plats qui exposent le maximum de surface au soleil, les conifères, adaptés aux régions froides et venteuses, ont des feuilles

réduites à des aiguilles qui offrent le minimum de surface aux vents d'hiver desséchants. Chez les plantes des régions arides telles que l'aloès, les feuilles, souvent beaucoup plus spongieuses et pouvant emmagasiner l'eau sont appelées feuilles succulentes³.

1.4. Différents types de végétaux :

La végétation peut se trouver sous différentes formes : pelouses, prairies, haies, arbres, et plantes grimpantes :

La pelouse ; est un tapis étendu plus ou moins régulier.

La prairie ; est un écosystème en grande partie dépourvue d'arbre, couverte de végétation basse continue.

Les haies ; correspondent à des écrans de verdure destinés à protéger, à limiter ou à séparer qui peuvent être taillées ou libres.

Les arbres ; sont des plantes à fleurs ligneuses, qui peuvent être utilisée pour l'alignement c'est à dire des plantations sur voie, ou limites diverses, ils se développent ainsi sur tous types de sol et peuvent être classifiés selon trois critères : la dimension, la densité et la forme.

Par ailleurs, les arbres adaptés à l'alignement (fig III-2) concernent les arbres et petits arbres permettant le captage solaire d'hiver et la protection solaire d'été: Acacia de Constantinople, Catalpa commun, Arbre de judée, Micocoulier, Murier platane, Murier de chine, Platane, Sophora du japon, Tilleul argenté...



Figure III-2: Arbres d'alignement

(Source : www.arbreurbain.com)

³ Microsoft Encarta 2007. 1993-2006 Microsoft Corporation.

En effet, selon leur dimension, les arbres peuvent présenter trois étages :

- Dans le premier niveau, on trouve les buissons dont la taille ne dépasse pas 1,5m, utilisés pour couvrir un sol non minéral ou non enherbé.
- Au deuxième niveau, se trouve les arbustes qui peuvent s'élever jusqu'à 4m, une hauteur qui leur permet d'être utilisée comme mur de clôture ou marquage de limites.
- Le troisième niveau englobe les arbres dont la hauteur peut atteindre 15m et plus en milieu urbain.

Pour la densité du feuillage, celle-ci détermine la perméabilité à la lumière, au bruit, au vent..., ainsi, elle varie selon l'espèce considérée, la configuration de son développement et la saison. Alors, tenant compte de ces caractéristiques, les arbres en milieu urbain peuvent constituer trois types d'écran : Opaque, semi transparent et transparent. Les Conifères constituent les écrans opaques, les arbres à feuilles caduques constituent les écrans semi-transparents, et les arbres fruitiers et certains types de pin qui ne procurent pas d'ombre dense et créent une lumière changeante constituent les écrans transparents⁴.

Quand au troisième critère concernant la forme, elle est constituée à la fois par la silhouette de l'arbre et par la configuration des branches variant selon différentes formes : étalée, en boule, ovoïde, érigée en colonne, pyramidale et pleureuse.

1.5. La végétation caduque et persistante:

Selon leurs typologies, les végétaux peuvent être de type caduc ou persistant. En effet, les végétaux à feuilles persistantes ou sempervirentes maintiennent leurs feuilles tout au long de l'année, ce qui permet une protection annuelle. Ce type est recommandé dans les régions chaudes et sèches.

Tandis que ceux à feuilles caduques, ils perdent leurs feuilles en automne et sont nus pendant les mois les plus froids de l'année, ce qui permet au soleil de traverser et de chauffer l'enveloppe des bâtiments à partir de novembre à mars. En été, ils retiennent largement le rayonnement, ce qui procure un ombrage saisonnier. Donc, c'est une végétation qui pousse au printemps, protège en été et perd ses feuilles à l'automne et en hiver.

⁴ MURET.J.P, ALLAIN.Y.M, MARIE-LISE : « *les espaces urbains, concevoir, réaliser, gérer* » Edition Le Moniteur, Paris 1987

Ces plantes sont plutôt favorables pour les climats semi-arides où la radiation solaire est très prisée en hiver⁵.

1.6. Ambiances saisonnières des plantes :

En matière d'ambiances et selon son mode d'implantation, dans les espaces extérieurs de proximité ou attenants aux habitations et ses effets sur le comportement thermique des bâtiments, la végétation agit sur trois facteurs du climat: Le rayonnement solaire, le vent et l'humidité de l'air. Le contrôle de ces facteurs d'ambiances doit être obtenu quelque soit la période de l'année (fig III-3).



Figure III-3: Le cycle saisonnier des plantes grimpantes à feuillage caduc
(Source : www.arbreurbain.com)

1.6.1. Les ambiances d'hiver:

La végétation ne doit pas porter ombre sur les espaces extérieurs de repos et les surfaces de captage, c'est donc une végétation à feuillage caduc et/ou de faible dimension permettant le captage solaire.

1.6.2. Les ambiances d'été :

En été, la climatisation est réduite par l'ombrage des fenêtres et par l'évapotranspiration des plantes. Il s'agit au contraire de réduire les risques d'échauffement intempestifs. On y parvient par la création d'ombres, l'humidification de l'air et la ventilation. L'échauffement des matériaux est défavorable, c'est pourquoi on doit assurer l'ombrage au sol ou sur les parois. Le port du feuillage donnera l'**effet d'ombre** recherché. On demande

⁵ **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, p30.

une fonction d'enveloppe thermique identique à celle de l'hiver, en limitant les échauffements sur paroi dûs au rayonnement solaire. Les végétaux grimpants jouent ce rôle.

1.6.3. Les ambiances de mi-saison:

Au printemps et en automne, les exigences de confort oscillent entre celles d'hiver et celles d'été. Ceci exige de trouver des végétaux qui épousent un rythme d'évolution du feuillage en phase avec le captage du soleil d'hiver et la protection du soleil d'été. Une certaine souplesse d'adaptation est alors nécessaire pour ces deux périodes de transition; de ce fait, les qualités requises concernent une foliation tardive au printemps et une chute précoce des feuilles en automne⁶.

1.7. Les plantes grimpantes :

Les plantes grimpantes constituent tous les végétaux capables de s'élever verticalement en s'appuyant, en s'accrochant ou en s'enroulant sur ou autour d'un support. Elles peuvent pousser le long des murs, des clôtures et autres structures ou, dans certains cas, sur d'autres plantes.

Le plus souvent utilisées pour masquer la vue ou favoriser l'intimité ou pour leur valeur ornementale, Les plantes grimpantes peuvent notamment donner vie à une pergola, un espalier ou à une paroi. En effet, elles peuvent être employées pour leur capacité à protéger les façades de bâtiments en leur procurant des ambiances intérieures confortables (réduction de bruit, de pollution, de température, de vélocité du vent, etc).

Les plantes grimpantes doivent être choisies selon : le taux de croissance, la taille des feuilles, la hauteur, le type de sol, les conditions de croissance, etc. elles se trouvent sous trois formes : Tapissage d'une paroi minérale verticale, grimpantes sur des pergolas ou des treilles et comme couverture au sol⁷ et il en existe plusieurs types :

- **Plantes grimpantes à vrilles :** dont les tiges s'accrochent à un support au moyen de vrilles⁸ tels que les clématites, les rosiers, la vigne vierge vraie ou la vigne (*vitis vinifera*)

⁶ AUDURIER-CROSA, GUYOT.A : " *La palette végétale méditerranéenne et les ambiances bioclimatiques dans le projet d'architecture* ", Mapped Monde 88/1, 1988.

⁷ MURET.J.P, ALLAIN.Y.M, MARIE-LISE : « *les espaces urbains, concevoir, réaliser, gérer* » Edition Le Moniteur, Paris 1987

⁸ **Vrille** : Organe spécialisé permettant aux plantes grimpantes de s'accrocher à des supports divers. [En Ligne] www.wikipedia.org (page consultée le 23-10-2006)

- **Plantes grimpantes à palisser** : à l'état libre, sans support, elles se développent en de larges buissons, alors que sur un espalier elles peuvent se déployer et pousser en hauteur tels que : les rosiers et les jasmins d'hiver.
- **Plantes grimpantes à crampons** : elles ne nécessitent pas de support pour se développer en hauteur, comme par exemple le lierre, le fusain, le jasmin de Virginie (*Campsis radicans*) ainsi que l'hortensia grimpant (*Hydrangea petiolaris*).
- **Plantes grimpantes volubiles** : tels que le bourreau des arbres (*Celastrus orbiculatus*), la glycine, Aristoloche siphon, Bignone à grandes fleurs, Jasmin de virginie, Vigne, Vigne vierge à 5 feuilles, Volubilis. Elles s'enroulent autour des supports et conviennent particulièrement aux pergolas (fig III-4).



Figure III-4: Plantes grimpantes sur terrasse et pergola

(Source : www.arbreurbain.com)

Par conséquent, étant donné que la partie pratique de ce travail va porter sur le type de vigne vierge de Virginie et de vigne, on s'attellera, dès lors à détailler uniquement ces plantes, en plus de la glycine et le lierre qui sont très répandues dans la couverture des murs.

1.7.1. Exemples de Plantes grimpantes à feuillage persistant :

Les espèces de lierre demeurent les plantes grimpantes à feuilles persistantes les plus répandues. Il n'existe que peu d'espèces de lierre, mais un très grand nombre de variétés différentes par la couleur de leurs feuilles, unies ou marbrées, on citera : **lierre commun**, lierre de Chicago, *Elegantissima*, *Goldheart* ou *Oro di Bogliasco*, *Sagittifolia*, *Canariensis*.

1.7.1.1. Le lierre (*Hedera Helix*) :

Le Lierre reste la principale plante grimpante à feuillage persistant. Il présente donc un grand intérêt partout où l'on désire de la verdure en permanence, hiver comme été. De la

famille des araliacées et grâce à ses petites racines adventives formant des crampons, le lierre peut s'accrocher à différents supports comme la pierre, la brique, etc. Il est fréquent dans les jardins, les façades et les clôtures. En outre, il a une croissance rapide en haut et ne nécessite pas un arrosage régulier (fig III-5).

La plupart des Lierres préfèrent une situation ombragée. Mais pour certaines espèces et variétés à feuillage coloré, ils se comportent mieux au soleil. Tous les types de sol leur conviennent, mais ils préfèrent les sols frais et se développent bien dans beaucoup de climats tempérés.⁹



Figure III-5: la plante du lierre
(Source : Microsoft Encarta 2007)

1.7.2. Exemples de Plantes grimpantes à feuillage caduc :

Parmi les espèces à feuillage caduc convenues aux utilisations sur les façades de bâtiments, on citera les variétés de vignes :

1.7.2.1. La vigne (*vitis*):

Les vignes sont autoporteuses ou tortillantes. Elles s'accrochent au moyen de tiges ou de vrilles (exp, plante grimpante de Virginie) ou racines aériennes (par exemple, vigne de trompette, *Campsis radicans*). En fournissant un treillis ou un support d'appui, les vignes tortillantes peuvent être employées pour ombrager des murs, des fenêtres, et des espaces extérieurs.

De plus, elles constituent un dispositif de contrôle de chaleur en modulant le refroidissement, l'évaporation et en fournissant l'ombre. Cette combinaison les rend bien adaptées pour les murs ensoleillés par temps chaud. Sur les blocs de béton et de brique des

⁹ [EN LIGNE] www.plantyfolia.com (page consultée le 15 août 2007).

maisons, une vigne à croissance rapide peut efficacement empêcher le soleil de chauffer un mur¹⁰.

De la famille des vitacées, la vigne, est un arbrisseau grimpant qui ne se colle pas aux murs, elle a besoin d'un support (grillage, fil, treillage, etc) pour s'élever de 10 à 20m. Son feuillage vert foncé apparaît à la fin mai et devient jaune verdâtre en automne¹¹. Les fleurs, sont portées en grappes de raisin (*vitis vinifera*). Toutefois, il existe une variété de vigne d'ornement produisant des grappes sauvages tels que la vigne *Coignetiae* et la vigne *californica* (figIII-6). Elles sont utilisées pour couvrir les rocailles, murets, treillage et pergola¹².



Figure III-6: La vigne californica

Cependant, Bass¹³ affirme que les vignes sont recommandées pour des murs, mais évidemment pas pour des fenêtres car elles bloqueraient la majeure partie de la lumière naturelle, augmentant de ce fait le besoin d'éclairage intérieur tous les jours.

Voici quelques vignes recommandées : Clematis, scandens celastrus (aigres-doux), riparia Vitis (raisin de gel), Parthenocissus, petiolaris Hydrangea, Glycine, vigne argentée de lacet, vigne de Chine, paniculata de Clematis, la pipe du Néerlandais, forsythia, Ipomoea¹⁴.

1.7.2.2. La vigne vierge :

Parmi les plantes grimpantes tapissantes caduques, les vignes vierges font figure d'originales avec leurs vrilles dotées de ventouses. Elles font partie de la famille des vitacées

¹⁰ **PARKER. J.H** : « *A comparative analysis of the role of various landscape elements in passive cooling in warm, humid environments* ». Passive and Hybrid Cooling Conf, Miami, 1981. pp. 365-368.

¹¹ [En ligne] [http:// fr.wikipedia.org/ vigne](http://fr.wikipedia.org/vigne)

¹² [En ligne] <http://www.truffaut.com/conseils/encyclopedie-plantes/fivhe-plantes-grimpantes-vignedornement>.

¹³ **BASS.B et BASKARAN.B**: “*Evaluating Rooftop and Vertical Gardens as an Adaptation Strategy for Urban Areas*” Canada, 2001.

¹⁴ **OLGYAY &OLGYAY**: “*Solar control & shading devices*” Princeton university press, USA, 1976. p52.

qui ne produisent pas de fruits. Plus ou moins découpées, vertes, les feuilles des vignes vierges se parent de couleurs rose, orange à rouge en automne. Elles peuvent ainsi s'accrocher aux parois les plus lisses et coloniser des façades entières depuis la base.

En effet, les vignes vierges sont en particulier convenues aux utilisations autour des bâtiments. Elles ont besoin de peu d'espace, se développent très rapidement et peuvent couvrir de grandes surfaces de bâtiment.

1.7.2.3. La vigne vierge de Virginie (Parthenocissus Quinquefolia):

Originnaire d'Amérique du Nord, la vigne vierge de Virginie appelée aussi la vigne vierge à cinq folioles ou vigne vierge vraie est un arbuste sarmenteux, cultivé très largement comme plante grimpante ornementale pour son feuillage décoratif qui prend une belle teinte rouge écarlate en automne.

La vigne vierge de Virginie se reconnaît à ses petites feuilles en cinq (folioles) elliptiques de 5 à 10 cm de long, réunies en un même point (comme celles du marronnier ou du chanvre) dont chaque foliole est dentée en scie (fig III-7). D'une croissance grande et rapide, son caractère unique de « 5 feuillettes ovales » lui fait un bon dispositif de bio ombrage¹⁵.



Figure III-7 : La vigne vierge de Virginie
(Source : www.ac-clermont.fr)

1.7.2.4. La glycine (Wisteria) :

De la famille des légumineuses, les glycines sont des plantes grimpantes ligneuses aux fleurs violettes ou bleues très décoratives et odorantes (fig III-8). Elles sont couramment

¹⁵ LAM.M et al: "Experimental modelling of deciduous climbing plants as shading devices" Institute for tropical architecture august 2006.

plantées pour les magnifiques inflorescences dont elles se couvrent au début du printemps pour revêtir les façades, les treilles ou les murs de clôture.

La glycine peut produire des branches assez longues et épaisses pour parcourir toute la façade d'une grande maison pouvant s'élever jusqu'à plus de 30m. Les feuilles sont composées, présentant de sept à dix-neuf folioles. Il en existe plusieurs variétés, qui diffèrent par la couleur de leurs fleurs ou de leur feuillage.

Les glycines les plus connues sont la glycine de Chine (*Wisteria sinensis*), celle du Japon (*Wisteria floribunda*) et celle d'Amérique (*Wisteria frutescens*).



Figure III-8 : Plante de Glycine
(Source : Somon Ernest)

Le tableau III-1 représente quelques variétés de plantes et leur mode de croissance. L'annexe III présente une gamme plus variée.

Espèces Nom latin (en majuscules) Nom français (en minuscules)	Feuillage	Méthode de croissance	Taille (m)	Taux de croissance	Feuille/fleur
PARTHENOCISSUS QUINQUEFOLIA Vigne vierge de Virginie	Ca duc	Tortillant	6 à 20	Rapide, grand	5 feuilletts ovales très larges
POLYGONUM BALDSCHUANICUM Vigne russe	C	Tortillant	5 m/ an	Très lent	Petite fleur de chaînes
PARTHENOCISSUS TRICUSPIDATA Vigne vierge ou Lierre de Boston	C	Tortillant	6 à 15	Rapide, grand	3 feuilles lobées
WISTERIA SINENSIS Glycine	C	Tortillant	Jusqu'à 30m	Effréné	Fleurs bleu accrochantes
VITIS COIGNETIAE Vigne	C		Jusqu'à 20m	Rapide	Grandes Feuilles

Tableau III-1: plantes grimpantes utilisées et leurs critères de sélection
(Source : Lam et al 2006)

Ainsi, les plantes grimpantes qui s'adaptent au mieux dans un climat semi aride sont: Le lierre, la misère, le bougainvillier, le chèvrefeuille, Convolvulacée, le liseron, belle du jour, la patate douce, les clématites, la vigne, la vigne vierge vraie.

1.8. Choix des végétaux selon l'orientation :

- **Exposition nord**, Les plantes persistantes, en particulier : Arbres et haies assurant un effet brise-vent, Peupliers, Cyprès de Provence, Filao, Pittosporum, lierre ...
- **Exposition Sud**, Les plantes à feuilles caduques sont les plus appropriées pour des expositions sud et proche du sud, pour permettre au soleil d'hiver de chauffer passivement la maison; grimpants offrant une protection solaire d'été: Aristoloche siphon, Bignone à grandes fleurs, Bougainvillée, Glycine de chine, Jasmin de virginie, Vigne, Vigne vierge à 5 feuilles, Volubilis, Roses grimpantes, Vigne de trompette, Vigne russe, les clématites, et la Glycine.
- **Façades orientées Est**, peuvent être traitées en tant que mur sud ou ouest sinon il est préférable d'employer des plantes persistantes.
- **Façades ouest**, les plantes qui peuvent convenir à cette orientation incluent : grimpants offrant une isolation thermique en hiver et en été: Figuier grimpant, Fusain grimpant, Lierre commun des bois, Lierre des canaries, chèvrefeuille ... (fig III-9)¹⁶



Figure III-9: Traitement de la façade OUEST
(Source : www.arbreurbain.com)

¹⁶ GUYOT.A/ : « *L'arbre urbain, un composant de confort pour l'architecture et l'espace urbain public* » extrait d'intervention du cours in site Internet [EN LIGNE] www.arbreurbain.com (page consultée le 12 janvier 2005)

2. Effets particuliers de la végétation :

La végétation sous ses diverses formes présente plusieurs effets :

2.1. Effet d'oxygénation :

Grâce à la fonction chlorophyllienne, le gaz produit par les activités urbaines est en partie absorbé et l'oxygène en est rejeté. Dans certains cas et pour les régions ventées, la vitesse de l'air empêche l'oxygène de descendre à un niveau qu'on peut respirer. A ce moment là, il en revient aux arbres, la pelouse et le gazon de produire une quantité d'oxygène qui peut se substituer à ce manque. D'ailleurs, d'après (Bernatzky, 1997)¹⁷, un seul arbre peut subvenir à la demande d'oxygène pour un groupe de 10 personnes.

2.2. Effet d'évapotranspiration :

Les plantes libèrent l'eau par les stomates de leurs feuilles et la perte évaporative de cette eau s'appelle la transpiration qui consomme 40% de l'énergie solaire captée par la plante. En effet, pendant que l'air chaud passe au-dessus de la surface des feuilles, l'humidité absorbe une partie de la chaleur et s'évapore. L'air entourant la surface de feuille est ainsi refroidi par ce processus. Cette interaction s'appelle l'**évapotranspiration** qui est responsable du transfert de l'humidité à partir du sol et des surfaces végétalisées vers l'atmosphère. Donc l'évapotranspiration est définie par la perte d'eau vers l'atmosphère par évaporation et transpiration.

Les surfaces minéralisées absorbent le rayonnement solaire entrant et l'irradient comme chaleur, ce qui élève les températures urbaines, participant à l'apparition d'un phénomène connu sous le nom d'îlot de chaleur urbain (ICU). Toutefois, la végétation peut palier à ce problème : avec de plus grandes surfaces végétalisées, plus d'énergie solaire entrante est consommée par évapotranspiration, et moins est absorbée et irradiée comme chaleur. Ainsi, plus la surface de feuille est grande, plus les effets de refroidissement par transpiration sont grands, ce qui extrait la chaleur de l'air environnant.

Par ailleurs, des études ont montré qu'en milieu urbain, la consommation de chaleur latente par évaporation d'eau peut établir un microclimat urbain plus frais ce qui fait baisser les températures dans l'ensemble d'un bâtiment et rend le refroidissement moins nécessaire

¹⁷ **BERNATZKY.A** : « *The contribution of trees and green spaces to a town climate* » Energy and Buildings, vol 25 (1982), pp 139 – 148.

en été. Des mesures comparatives de températures ont montré qu'il peut exister une différence 3,5°C entre un centre ville et des quartiers longeant une bande de végétation d'une profondeur variable entre 50 et 100m. De ce fait, l'humidité relative s'est trouvée augmentée de 5%¹⁸.

Des jours chauds d'été, un arbre peut agir en tant que « refroidisseur évaporatif naturel » abaissant de ce fait la température ambiante. L'effet de l'évapotranspiration diffère selon le climat et la saison, il est minimal en hiver en raison de l'absence des feuilles sur des arbres à feuilles caduques et les températures ambiantes inférieures. Cet effet est également conditionné par les caractéristiques liées au sol.

Un jour d'été, il est estimé qu'un arbre moyen peut évaporer ainsi jusqu'à 1460kg d'eau et puise aussi 860MJ à l'environnement pour effectuer cette évaporation¹⁹.

Si la végétation est employée afin de couvrir les surfaces de bâtiment, le refroidissement par évaporation peut alors réduire le besoin de climatisation en réduisant la température de l'air immédiatement à côté du bâtiment. L'évapotranspiration des plantes grimpantes contribue aussi à la réduction de la température de l'air intérieur. L'énergie calorifique est absorbée pendant l'évaporation d'eau des plantes, ce qui extrait l'excédent de chaleur du microclimat²⁰. L'énergie utilisée pour l'évapotranspiration est incorporée dans la vapeur d'eau, ce qui l'empêche d'être convertie en chaleur sur la surface.

2.3. Effet d'ombre :

D'après (Hoffman et Shashua, 2000), 80% des effets de refroidissement dans les sites urbains sont provoqués par l'ombrage des arbres d'alignement²¹. Pendant le jour, l'ombre d'arbre réduit le gain de chaleur dans les bâtiments en réduisant les températures de surface des environnements. La nuit, les arbres bloquent l'écoulement de la chaleur du bâtiment au ciel et aux environnements plus frais.

¹⁸ IZARD,J.L et GUYOT.A : «*Archi bio*» Ed Parenthèses 1979, p 34.

¹⁹ WONG Nyuk Hien: «*The use of Urban Greenery to mitigate Urban Heat Island in Singapore*» School of Design and Environment Department of Building, National University of Singapore, 2007

²⁰ LAM.M et al : «*Résumé d'une étude de cas- Végétation sur la façade des constructions : -Bioshader-* » Centre for Sustainability of the Built Environment university of Brighton 2004 [EN LIGNE] www.durabuild.org

²¹ HOFFMAN,M.E et SHASHUA,L : «*Geometry and orientation aspects in passive cooling of canyon streets with trees* » PLEA Cambridge, UK. 2000.

Les arbres offrent une ombre sans émission de la chaleur (effet de plafond réfrigérant)²², leur forme, leur taille et la densité du feuillage constituent des éléments déterminants pour fournir un ombrage maximum. Les conditions climatiques, le type d'arbre, la proximité des arbres à la façade et le type de sol y jouent également un rôle important. D'ailleurs, une ombre efficace peut être obtenue par des silhouettes horizontales. Les autres formes peuvent être efficaces si des plantations multiples sont employées (fig III-10)²³.

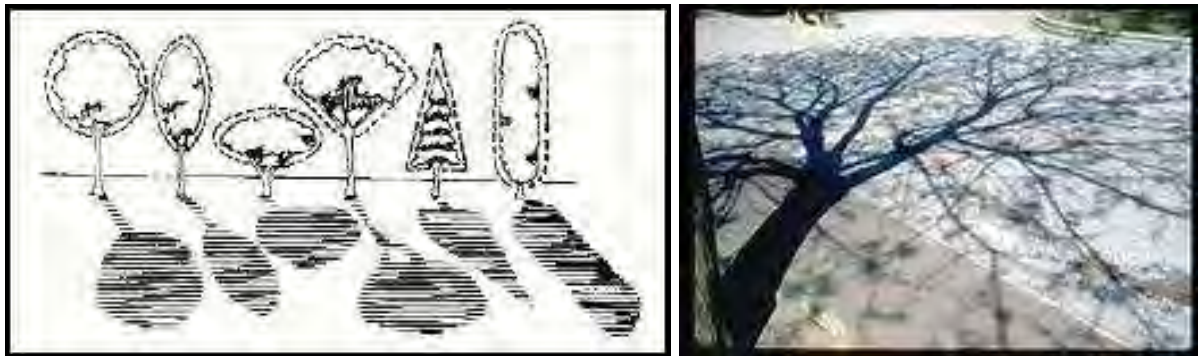


Figure III-10 : Influence de la forme d'arbre par rapport à l'ombre

(Source : à gauche : Parker, 1987 et à droite : Guyot.A, 2005)

Pour cela, les arbres doivent être placés stratégiquement autour d'un bâtiment. Pendant que le soleil passe le matin et l'après-midi à un angle de faible altitude, les arbres donnent leur meilleure performance pour les orientations : Est, Sud-est, Sud-ouest et Ouest. Les rayons solaires bas donnent de longues ombres, qui peuvent être utilisées efficacement de ces côtés difficiles à protéger contre la chaleur du soleil. Toutefois, à midi le soleil est haut et les rayons peuvent être interceptés facilement avec un brise soleil; à cette heure de la journée, les arbres du côté sud projettent l'ombre sur eux-mêmes²⁴.

Parmi les arbres recommandés pour une intensité maximale d'ombre on note : le peuplier, *Acer saccharinum* (érable argenté), *Acer saccharum* (érable à sucre), *Betula papyrifera* Marsh (bouleau blanc), *Sorbus* (sorbier), tilleul américain, le chêne, *angustifolia* d'*Elaeagnus* (olive russe), *Fagus grandifolia* (hêtre à grande feuille), *Salix babylonica* (saule).

²² IZARD. J.L et DeSTOBELEIRE,G : « *Rôle de la végétation dans le microclimat urbain : utilisation de la thermographie* ». Lyon 1998.

²³ PARKER. J.H : « *The use of shrubs in energy conservation plantings* » Landscape journal 6, 132-139, 1987

²⁴ OLGAY & OLGAY: « *Solar control & shading devices* » Princeton university press, USA, 1976. p53.

Pendant l'été, les arbres à feuilles caduques peuvent ombrager les bâtiments du rayonnement solaire direct non désiré et réduire son utilisation d'énergie de refroidissement tout en permettant ses gains solaires en hiver. De ce fait, la portée d'ombre par des arbres dépend des espèces. Ceux avec des couches minces et claires interceptent entre 60% et 80% de lumière du soleil ; ceux avec des couches denses épaisses arrêtent jusqu'à 98%. Une grande partie du rayonnement intercepté de cette façon est absorbée par l'arbre dans la transpiration et la photosynthèse, bien qu'un faible taux de 10% à 25% soit réfléchi de nouveau dans l'espace.

De plus, la végétation a un effet sur les îlots de chaleur. Cet effet se fait de façon directe par la réflexion dans l'atmosphère d'une portion du rayonnement solaire. La réflexion et les radiations émises par les rues et les édifices sont, elles aussi, partiellement interceptées par les arbres, ce qui renforce leur rôle s'ils sont plantés proches des bâtiments. La valeur d'albédo d'une surface indique le pourcentage de lumière solaire réfléchi par celle-ci. L'albédo d'une surface couverte d'arbres est de 0,15 à 0,18 et celui d'une surface gazonnée est de 0,25 à 0,30.

2.4. Effet de brise vent :

Pendant la saison hivernale, suivant la taille et la densité de feuillage, les arbres peuvent être utilisés comme coupe-vent réduisant ainsi la perte de chaleur des bâtiments. Une étude menée au Nevada, a estimé que deux à cinq rangées d'arbres ou d'arbustes assurent une isolation efficace. Même une simple rangée arrive à fournir une certaine action de coupe-vent. Ce dernier, réduit de manière significative la vitesse de vent pour une distance égale à 10 fois la taille des arbres. La plus grande quantité de protection se produit sur une distance de 5 fois la taille du coupe-vent. Dans certains climats, les arbres sont employés pour bloquer les vents chauds et chargés de poussières. Les espèces à feuillage caduc peuvent ainsi être utilisées pour canaliser les brises d'été.

Le végétal doit être persistant et doit avoir un bon comportement de résistance mécanique vis à vis des vents dominants, comme les haies de feuillus persistantes ou de conifères²⁵. De plus, un brise vent devrait être perpendiculaire aux vents dominants du côté

²⁵ GUINAUDEAU.C : « *Planter aujourd'hui, bâtir demain le préverdissement* » Institut pour le développement Forestier, Paris 1987. p58.

nord ou nord-ouest de la maison. Un vent de 12 m/h réduit à 3 m/h par un coupe vent, peut réduire de moitié la quantité du combustible à consommer dans un secteur résidentiel²⁶.

2.5. Effet de Séquestration des polluants:

La forte utilisation de la climatisation génère un grand risque d'atténuer les chlorofluorocarbones additionnels dans l'atmosphère ; des composés chimiques qui sont responsables de la réduction de l'ozone stratosphérique nécessaire pour nous protéger contre des quantités nocives de rayonnement ultraviolet. Ainsi, la brûlure des combustibles fossiles mène aux émissions accrues du gaz à effet de serre (GES).

Toutefois, la végétation diminue les émissions d'énergie par des réductions d'îlot de chaleur urbain. Celles-ci infléchiront les émissions de beaucoup de polluants dans l'atmosphère, mais l'effet indirect de réduire l'îlot de chaleur urbain aura également un impact sur la qualité d'air urbain.

En outre, les plantes séquestrent les polluants atmosphériques gazeux principalement le dioxyde de Carbone par l'intermédiaire des stomates de feuille. C'est à travers les surfaces visqueuses des feuilles que la poussière est fixée et l'air filtré. À Chicago, les arbres fourniraient près de 5,6 millions de tonnes de stockage de carbone (E. G. McPherson et coll., 1995)

De plus, les jeunes arbres captent plus efficacement le carbone et favorisent son stockage. En effet, plusieurs facteurs influencent le captage et le stockage du carbone. Mentionnons, entre autres pour le captage du CO₂ : l'espèce, le climat, l'intensité et la qualité de la lumière, la disponibilité en eau, en CO₂ et en minéraux, l'état de l'arbre, son âge, son adaptabilité au milieu, ainsi que sa tolérance à la composition du sol et à son acidité. Des facteurs influencent aussi le stockage du carbone comme, entre autres, la taille de l'arbre, son diamètre, la densité de son bois.

Les espèces de grande taille, et de croissance plutôt rapide (exp chêne rouge), séquestrent davantage de CO₂ que les espèces de petite taille, et de croissance plutôt lente, (aubépines). Si l'on tient également compte de la résistance aux conditions régnant dans les villes, le frêne, l'érable argenté, l'orme et le tilleul devraient être privilégiés lors du choix

²⁶ ROBINSON.M.L. et EDDINGTON.C: "*Shade Factors in Southern Nevada Using Trees and Shrubs for Shading Outdoor Spaces*" University of Nevada, 1996.

des arbres qu'il convient d'y planter²⁷. Le choix du site de plantation joue également un rôle prépondérant

D'autre part, les feuilles des plantes grimpantes sur des murs fournissent une grande superficie capable de filtrer la poussière et d'autres polluants en humidifiant l'ambiance. D'après Labouze²⁸, le lierre et la Sanseveria par exemple absorbent le benzène (10µg/cm² de feuille), ainsi que la formaldéhyde (2 à 3 µg/cm² de feuille).

Les arbres réduisent aussi la concentration de polluants gazeux, comme l'ozone troposphérique, et l'anhydride sulfureux, parce qu'ils échangent des gaz avec l'atmosphère (J. F. Dwyer et coll, 1992). Les feuilles tiennent la plupart des particules capturées, avec des arbres de conifère ; un ficus par exemple peut émettre de 10 à 20g d'eau par heure. Une recherche a prouvé que les arbres situés à Parkland peuvent filtrer jusqu'à 85% de particules suspendues. Le pourcentage est réduit approximativement à 40% en l'absence du feuillage sur des arbres à feuilles caduques en hiver²⁹.

2.6. Effet d'isolation acoustique :

En plus de leur effet dans la protection des murs contre le soleil, la pluie, etc ; diverses études ont démontré l'effet des plantes comme amortisseurs de bruit et des différentes nuisances sonores.

D'ailleurs, les arbres sont les plus efficaces à réduire les fréquences auxquelles l'oreille humaine est la plus sensible, l'atténuation peut varier de 1.5 à 30 décibel par 100 m selon le type de végétation (densité et forme du feuillage)³⁰. D'autre part, une autre étude a estimé qu'une bande de terrain boisé peut abaisser les niveaux de bruit de 6 à 8 DB par 30m. En effet, cette baisse est importante si on retient qu'une diminution de 12 DB correspond à un fléchissement de la sensation sonore de l'ordre de 50%, une réduction qui peut être obtenue grâce aux arbres avec de larges feuilles (tableau III-2). De même, l'atténuation des bruits aériens et d'impact est fortement améliorée par la présence de ces végétaux, ce qui peut présenter un intérêt certain pour des bâtiments à proximité d'activités bruyantes.

²⁷ Conseil régional de l'environnement de Montréal : « *Le verdissement montréalais pour lutter contre les îlots de chaleur urbains, le réchauffement climatique et la pollution atmosphérique* » 2007

²⁸ LABOUZE, E: « *Bâtir avec l'environnement, enjeux écologiques et initiatives industrielles* », Ed de l'entrepreneur, Paris, 1993.

²⁹ LOHMANN, G: « *The Effect of Trees on Air Pollution* ». Urban Forests, Issue 33, 1990. p 11

³⁰ COPPIN, M.J, et RICHARDS, I.G : « *Use of Vegetation in Civil Engineering* ». Construction Industry research and Information Association, Butterworths, London, 1990.

Groupe de réduction de bruit de 4 à 6 dB	Groupe de réduction de bruit de 6 à 8 dB	Groupe de réduction de bruit de 8 à 10 dB	Groupe de réduction de bruit de 10 à 12dB
Aubépine Aulne rugueux Bouleau verruqueux Chèvre feuille de Maack Cornouiller Genévrier Mimosa Noisetier Peuplier Tilleul à feuille en cœur	Charmille Chêne pédonculé Hêtre Houx Lilas vulgaire	Peuplier de Berlin Tilleul à grande feuille Viorne	Erable

Tableau III-2 : Performances des arbres face au bruit
(Source: BERNATZKY.A 1982)

2.7. Effet esthétique et valeur économique:

Pour les citadins, la fonction esthétique et récréative est ce qui confère le plus de valeur aux arbres. Les arbres fournissent une diversité de couleurs, de formes et de textures dans le paysage. Ils adoucissent les lignes architecturales et brisent la monotonie des structures minérales. Ils permettent également de créer des espaces privés en formant des écrans visuels.

Les arbres ont aussi un impact sur la valeur économique dans la mesure où ils permettent de réduire certains coûts (climatisation, chauffage).

La partie qui suit présente un rapide tour d'horizon des techniques existantes en terme d'intégration végétale au niveau des toitures, des cours et des façades des bâtiments.

3. Les toitures végétalisées :

Historiquement, la végétalisation des toitures a été jadis utilisée dans plusieurs pays scandinaves et européens pour assurer une isolation thermique. Le mélange de terre et de végétaux enracinés sur les toits permettait de réaliser des toitures relativement bien isolées, étanches à l'air et à l'eau, résistantes au vent et au feu. Le tout se faisant avec des matériaux facilement disponibles.

Alors qu'elle reste encore trop méconnue dans notre pays, cette technique est aujourd'hui très en vogue chez les occidentaux : la toiture végétalisée est largement utilisée dans la plupart des pays d'Europe, et même en Amérique du Nord. En Allemagne, plus de 40% des villes proposent des incitations financières pour le développement des toitures

végétalisées. À 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 pluie³¹. Au Japon, cette technique est encouragée par une réduction de taxes. Tandis qu'en France, alors que 150 000 m² de toitures végétalisées ont été recensées en 2002, 22 millions de m² de toitures étanchées sont potentiellement transformables en toitures vertes, selon le **CSTB** (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment). Une ville comme STUTTGART l'impose même dans son règlement d'urbanisme.

3.1. Définition :

Dans le milieu urbain, il y a souvent un espace limité pour des jardins au niveau du sol. Toutefois les plantes peuvent être cultivées sur les toits des bâtiments. De ce fait, la toiture végétalisée consiste en un système d'étanchéité recouvert d'un complexe drainant, composé de matière organique et volcanique, qui accueille un tapis de plantes pré-cultivées (sédum, vivaces, graminées...). S'installant aussi bien sur une structure en béton, en acier ou en bois, elle offre une surface vivante qui change d'aspect en fonction des saisons et de la floraison des végétaux³².

3.2. Type de toiture végétalisée :

Selon l'épaisseur du substrat et le type de végétaux, les toits verts sont classifiés comme intensifs ou extensifs :

- **Type extensif** : est une technique adaptée particulièrement aux bâtiments de grandes superficies, toits inclinés ou habitations déjà existantes, pour leur faible épaisseur de substrat (10 à 15 cm environ), leur faible poids de surcharge de l'ordre de 90 kg/m² au max (poids humide), et leur entretien restreint (arrosage uniquement en cas de sécheresse prolongée). Cette plantation est limitée aux variétés comprenant du gazon, des sedums et des herbes : des plantes rustiques, capables de supporter des sécheresses et qui prennent rapidement de l'expansion pour ombrager le sol et le stabiliser par leurs racines. Son substrat de culture contiendra jusqu'à 70% d'agrégats poreux, en volume, afin de conserver le plus d'eau possible.

³¹ [EN LIGNE] <http://www.wikipedia.org/wiki/Greenroof> (page consultée le 30-01-2007)

³² **FACER.J** : *"The role of 'greening' in commercial property development"* Fourth-year undergraduate project, UK 2004/2005

- **Type intensif** : appelé aussi jardin suspendu, préconisé pour les petites et moyennes surfaces. L'épaisseur du substrat est plus importante (15 à 30 cm environ) pour un poids de surcharge compris entre 120 et 350 kg/m² (poids humide) permettant d'accueillir une végétation plus variée à fort développement racinaire et aérien du fait de sa charge importante. En effet, cette technique devrait utiliser un arrosage automatique régulier pour assurer la survie des arbres. Le volume d'agrégats est souvent réduit à 40% pour faire place à plus d'éléments nutritifs. En raison de leur importante charge structurale, les toitures jardins à végétation intensive sont habituellement prises en compte dans la conception architecturale d'origine³³.

3.3. Les éléments d'un toit vert :

En partant du support de toit, la toiture végétalisée est constituée essentiellement de cinq composantes qui sont résumées dans le tableau III-3:

Composants	Fonction et composition
Structure portante	<ul style="list-style-type: none"> - Elle peut-être plate ou inclinée, en béton, en acier ou en bois, à condition qu'elle soit capable de supporter le poids de l'installation prévue. - Il est recommandé de construire des terrasses avec une pente de 1 à 2%, ce qui permet de diminuer l'épaisseur de la couche drainante et donc de diminuer le poids de la structure.
Membrane d'étanchéité	<ul style="list-style-type: none"> - Doit résister à la compression en fonction de l'installation prévue, contenant des agents anti-racines qui empêchent la pénétration des racines. - Peut être un agent chimique incorporé à la membrane ou un écran physique : élastomérique, PVC, polyoléfine bicouches ou monocouches. - Les membranes multicouches à l'asphalte sont déconseillées pour des raisons de durabilité.
Couche de drainage et de filtration	<ul style="list-style-type: none"> - Choisie en fonction de la pente de la toiture, elle sert à créer un espace de drainage d'environ 10 mm de hauteur qui dirige l'eau de pluie vers le drain du toit ou vers les gouttières extérieures. Elle peut être en granulats d'argile expansé, cailloux, graviers, plaques de polystyrène alvéolées et nervurées, etc. - La couche filtrante recouverte d'un filtre géotextile retient les fines particules de terre et de végétaux qui risqueraient de colmater la couche drainante et d'un substrat composé de mousse de sphaigne, terreau, terre noire, compost, etc.,
Substrat de croissance	<ul style="list-style-type: none"> - Supporter la croissance des plantes, il doit être léger et résistant tout en retenant l'eau. - Sa composition et sa profondeur dépendent de la végétation choisie.

³³ [EN LIGNE] <http://www.changimmo.com> page consultée le 31-01-2007

	- Généralement composé de compost végétal de feuilles ou d'écorces mélangé à des agrégats de pierres légères et absorbante. Comme matériau, on utilise des minéraux à pores ouverts, à savoir de la pierre volcanique, de l'argile expansée, et parfois des débris de briques.
Couche végétale	- Choisie en fonction du climat de la région, de l'ensoleillement, de la pente du toit, etc. - Privilégier des plantes vivaces et indigènes très résistantes aux températures extrêmes et qui s'implanteront rapidement pour couvrir les surfaces de sol afin de réduire son assèchement par le soleil et le vent.

Tableau III-3: Eléments composants des toits verts

La figure III-11 montre la constitution du toit en comparant les différents types cités plus haut.

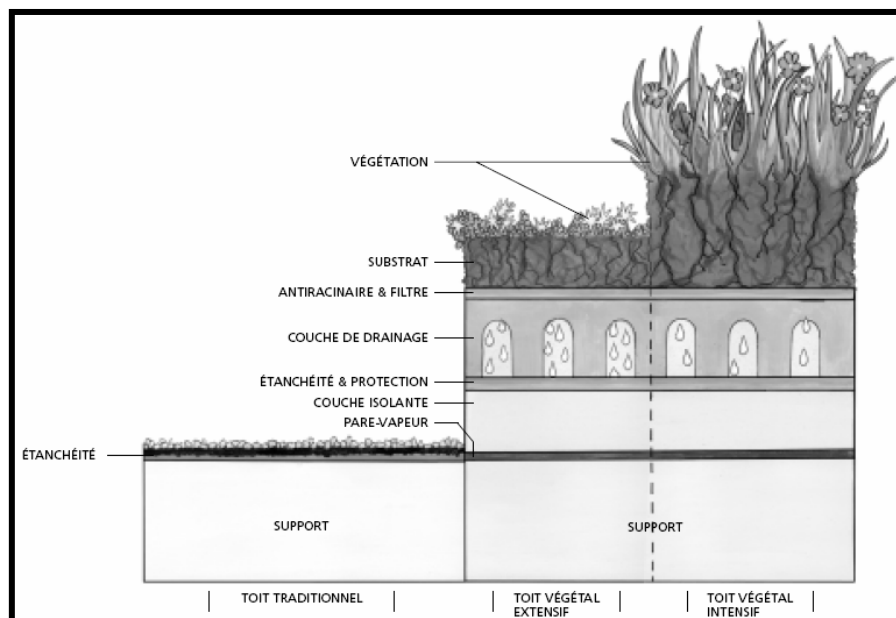


Figure III-11 : Coupe d'un toit végétalisé
(Source : <http://www.vivreenville.org> 02-12-2006)

3.4. Les plantes à privilégier pour les toits verts:

- **Plantes fleuries** : Origan lisse (*Origanum laevigatum* "Herrenhausen") ; la ciboulette, qui offre aussi l'avantage d'être un condiment ; un mélange de fleurs des champs pour créer un pré fleuri ; le gazon d'Espagne (*Armeria maritima*) ; les iris (*Pumila*) ; campanule agglomérée, etc.
- **Couvre-sols** : œillet couché (*Dianthus deltoides*) ; gypsophile rampante (*Gypsophila repens*) ; orpin blanc (*Sedum album*) ; thym serpolet, etc.

- **Graminés** : fétuque bleue (*Festuca glauca*) ; fétuque améthyste (*Festuca amethystina*).
- **Plantes vertes** : corbeille d'argent (*Iberis sempervirens* "Schneeflocke") ; armoise de Schmidt (*Artemisia schmidtiana*) ; centaurée scabieuse (*Centaurea scabiosa*), etc.

3.5. Les avantages des toits verts:

Les toitures végétales offrent un grand nombre d'avantages :

3.5.1. Prolongement de la durée de vie des toitures :

En servant d'écran contre les rayons ultra-violet qui sont responsables d'environ 5% du vieillissement des membranes et en la protégeant contre les agressions des intempéries, la couche de végétation atténue les écarts de température entre le jour et la nuit et entre les différentes saisons.

3.5.2. Rétenion des eaux de ruissellement :

A l'image d'une éponge, la toiture végétalisée accumule l'eau dont une partie est utilisée par les plantes, une autre est évaporée et une autre évacuée par les canalisations contribuant à lutter contre les effets néfastes de l'imperméabilisation. Un toit végétal absorbe en moyenne 75% des précipitations reçues et relâche graduellement les 25% restantes³⁴.

3.5.3. Assainissement de l'air extérieur en milieu urbain :

Selon les experts, le réchauffement climatique dû au rejet de CO₂ et autres gaz à effet de serre, devrait correspondre à une hausse de 1,4 à 5,8°C entre 1990 et 2100. Plusieurs pays utilisent à grande échelle "Les toits verts" pour lutter efficacement contre la pollution. En effet, en augmentant la production d'oxygène et en diminuant le taux de CO et CO₂ par photosynthèse, les végétaux réduisent la pollution atmosphérique. De plus, l'évapotranspiration engendrée par les terrasses plantées élève l'humidité de l'air et favorise donc la formation de rosée, indispensable à la fixation des poussières et des pollens en suspension dans l'air. De plus, la réduction des besoins énergétiques signifierait toutefois la réduction des gaz à effet de serre (GES) qui accompagnent la production de cette énergie, ce qui apporte un gain important dans la lutte contre le changement climatique et la protection de l'environnement.

³⁴ LIU. K.Y et BASKARAN.A : « *Des toitures jardins pour une meilleure durabilité des enveloppes des bâtiments* » solution constructive n° 65, sept. 2005.

3.5.4. Efficacité énergétique et performance thermique :

En règle générale, les économies d'énergie permises par les toitures jardins dépendent du climat, du type et de l'efficacité du système de chauffage ou de refroidissement utilisé dans le bâtiment et des sources d'énergie, lesquelles sont spécifiques aux sites. Ainsi, la température de la toiture influence la température intérieure d'un logement et donc les besoins de climatisation. Une toiture couverte de végétaux réduit aussi sensiblement les pertes de chaleur en hiver, mais cet impact est moindre que celui de la climatisation.

Pour étudier la performance des toitures végétalisées, les chercheurs de l'institut de recherche canadien (IRC) ont aménagé et comparé un système de toiture-jardin et un système de toiture sans plantation sur le campus d'Ottawa. Une toiture de type industriel, de faible inclinaison, a été divisée en deux parties égales. La première moitié est une toiture jardin à végétation extensive reposant sur substrat léger de 150 mm de gazon ; la seconde, une toiture en bitume (fig III-12). Des mesures d'écoulement des eaux pluviales, de température, du flux de chaleur, la réflexion solaire, la teneur en eau du sol ont été effectuées.



Figure III-12 : Séparation des deux toits : le toit vert (à gauche) et le toit de référence (à droite)
(Source : Liu. K.Y et Baskaran.A , 2005)

Les résultats ont indiqué que la toiture nue a subi des températures plus élevées que celle de la toiture jardin, notamment pendant les mois chauds. Pendant un jour type d'été, la membrane exposée de la toiture nue a atteint 70°C l'après-midi, tandis que celle de la toiture jardin est restée à environ 25°C (fig III-13). Pendant l'hiver, les profils de température des deux toitures étaient identiques, en raison de l'effet isolant de la neige.

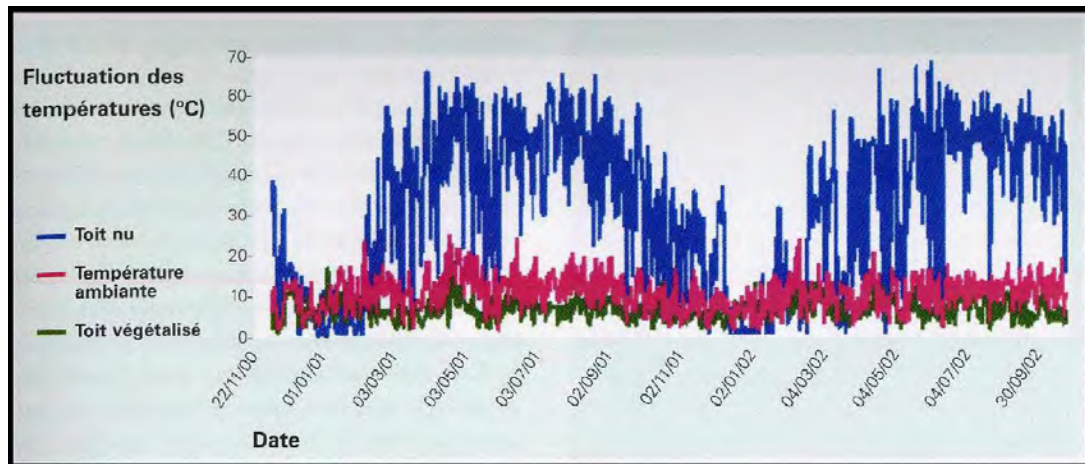


Figure III-13: Fluctuations journalières des températures sur un toit végétalisé et un toit nu à Toronto
(Source : Liu. K.Y et Baskaran.A , 2005)

De plus, la toiture jardin a permis de mieux contrôler les gains de chaleur au printemps et en été qu'elle n'a permis de réduire les pertes de chaleur en automne et en hiver. La raison revient aux différents mécanismes thermiques en jeu : ombrage, isolation, évapotranspiration et masse thermique. Pendant la période d'étude, la toiture jardin a réduit les gains de chaleur de 95% et les pertes de chaleur de 26%, avec une réduction totale du flux de chaleur de 47% par rapport à la toiture nue. Ce qui a conduit à une réduction de plus de 75% du besoin énergétique en climatisation³⁵.

Toujours à Ottawa, **Bass (2001)**³⁶, a testé le même modèle de toit (un toit vert d'un côté et un toit conventionnel de l'autre côté comme toit de référence) (fig III-14). Dans un but de comparer la performance thermique des deux systèmes de toits, une simulation basée sur le logiciel « DAINÉ VISUAL » a été alors développée en plus des mesures in situ de température, d'écoulement de chaleur, de réflectivité solaire, d'humidité du sol et d'écoulement de précipitation.

³⁵ **LIU. K.Y et BASKARAN.A** : « *Des toitures jardins pour une meilleure durabilité des enveloppes des bâtiments* » solution constructive n° 65, sept. 2005.

³⁶ **BASS.B, BASKARAN.B**: « *Evaluating Rooftop and Vertical Gardens as an Adaptation Strategy for Urban Areas* », Canada, 2001.

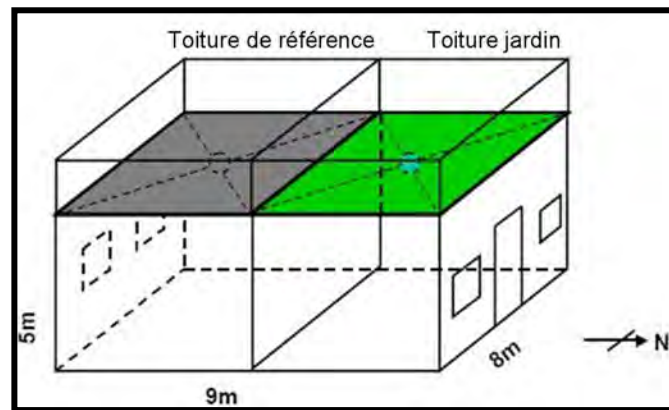


Figure III-14: Modèle des deux toitures simulées

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

Les résultats de cette expérience ont révélé que la membrane de la toiture jardin a subi des variations de température sensiblement plus faibles pendant les mois chauds que celle de la toiture conventionnelle. En été, la variation de température moyenne quotidienne de la toiture jardin était de 6,5°C, contre 46°C, pour la toiture conventionnelle. Par ailleurs, cette variation de température est restée constamment plus faible que la variation de température moyenne quotidienne de l'air ambiant (fig III-15).

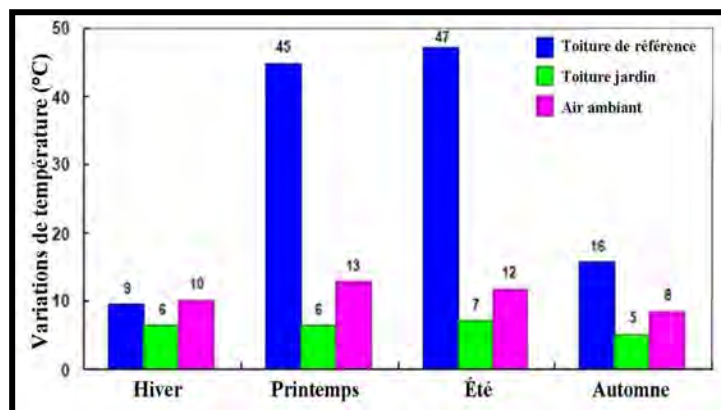


Figure III-15: Variations de températures journalières du toit de référence, toit vert et l'air ambiant, par saison (Nov 2000 à sept 2001)

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

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

Selon une étude du ministère canadien de l'environnement, la présence de toitures vertes sur seulement 6% des toits des villes canadiennes ferait descendre la température

d'environ 1 à 2°C, ce qui ferait ainsi économiser près de 5% des coûts de climatisation dans tous les immeubles climatisés des villes.

En outre, les toits verts pourraient améliorer la performance thermique d'un bâtiment en bloquant le rayonnement solaire et en réduisant le flux de chaleur. Cette résistance thermique supplémentaire mène à plus de 37% d'économies d'énergie, par année pour un bâtiment non-isolé³⁷

Hoyano a examiné une plantation de gazon sur toit où des températures surfaciques de modèles de toit gazonné (*Zoysia sauvage*) ont été comparées à la température d'une couverture de toit nu. L'étude a été entreprise pendant un an, afin d'observer l'effet du gazon en été et en hiver. En été, les températures surfaciques moyennes des deux types de toit, étaient au-dessus de la température moyenne de l'air ambiant. La température maximale du sol nu était sensiblement plus haute que celle du gazon. Avec un rayonnement d'environ 700 kcal/m²h, la température surfacique des feuilles vertes était environ 8°C au-dessus de la température de l'air³⁸.

De plus, une membrane de toiture exposée au soleil peut atteindre une température de surface de 65°C alors que la même membrane recouverte de végétaux demeure à une température de 15 à 20°C.

Wong, de son côté, a exploré un toit vert en mesurant la température et le flux de chaleur avant et après couverture de végétation. Il a été observé une différence de température maximale de 18°C. De plus, le flux de chaleur était considérablement réduit par l'installation du toit végétalisé (fig III-16). D'ailleurs, plus de 60% de gain de chaleur a été arrêté par ce système. Cependant, quand le substrat est très sec, sa température peut excéder la température de surface du toit exposé.³⁹

³⁷ **NIACHOU. A** : « *Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance* ». Energy and Buildings, vol 33, 2001. pp.719-729.

³⁸ In **GIVONLB**: « *Climate considerations in building and urban design* » Van Nostrand Reinhold, New-York, 1998. p316-317.

³⁹ **WONG. N.H, TAN. P.Y et CHEN. Y** : « *Study of thermal performance of extensive rooftop greenery systems in the tropical climate* » Building and Environment, Volume 42, Issue 1, 2006. p 25-54.

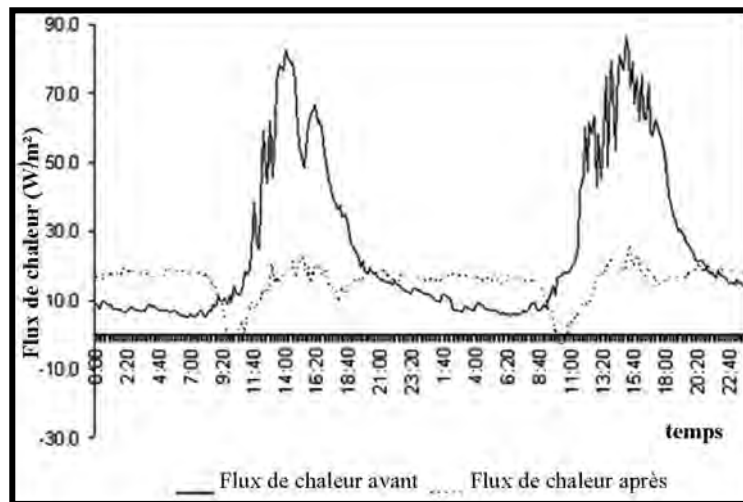


Figure III-16: Comparaison du flux de chaleur avant et après végétalisation du toit
(Source : Wong, 2006)

Les mesures de température sur un toit vert à l'institut de Philadelphie ont prouvé que tandis que le toit nu atteignait 32°C, la température sous les plantations du toit vert était moins élevée de 16°C. Un toit vert, particulièrement humide, a la capacité de stocker de grandes quantités de chaleur. Il agira en tant qu'amortisseur entre les fluctuations des températures externes et l'environnement interne, réduisant considérablement la variation quotidienne des températures et réduisant les conditions maximales de chauffage et de refroidissement. Un jour chaud et ensoleillé, l'évapotranspiration d'un toit végétalisé peut réduire la température du toit. Ceci réduirait la quantité d'écoulement de chaleur dans le bâtiment par le toit et la température d'air externe qui est échangé avec de l'air du bâtiment. Ces températures inférieures de toit pourraient réduire l'énergie utilisée pour la climatisation de 10%⁴⁰.

3.5.5. Isolation acoustique:

Les toits verts peuvent être utilisés en tant qu'isolant au bruit grâce à la masse significative du sol. Des expériences ont prouvé qu'un toit sec réduit le bruit de 41dB et peut atteindre jusqu'à 51dB avec un toit vert humide comparé à une réduction de 33dB pour un toit semblable sans végétation⁴¹. En effet, la réduction du bruit dépend de la teneur en humidité du toit et de la profondeur du substrat également. Une expérience a révélé que

⁴⁰ PECK.S, CALLAGHAN.C : « *Greenbacks from Green Roofs: forging a new industry in Canada* ». Prepared for Canada Mortgage and Housing Corporation. Canada. 1999.

⁴¹ GRANT.G, ENGLEBACK.L, NICHOLSON.B : « *Green roofs: their existing status and potential for conserving biodiversity in urban area* » English Nature Report no. 498, 2003.

12cm de substrat a réduit le bruit de 40dB et 20cm de substrat a donné une réduction de 46dB⁴².

4. Verdissage des cours :

Les cours ont été également employées en tant que jardins muraux, en combinant les plantes et l'eau pour créer un microclimat agréable dans le bâtiment, qui est dicté par plusieurs facteurs: lumière, vent, température et humidité. La plantation de ces cours aide à abaisser la température de l'air extérieur et par conséquent la température de l'air intérieur à travers la transpiration, l'évaporation et l'ombre, rendant le climat intérieur des bâtiments plus confortable en été⁴³.

5. Les murs végétalisés :

A travers l'histoire, le mur végétalisé, appelé aussi jardin vertical ou mur vert, a été longtemps employé autant que les toits végétalisés pour l'esthétique ou pour contrôler les climats extérieurs et intérieurs. Autrefois, les romains ont introduit, les arbres aux mausolées et les Vikings ont revêtu leurs murs et toits avec du gazon. Au 16 et 17ème siècle les jardins verticaux ont été employés en Inde, en Mexique et dans les maisons espagnoles. Au 18ème siècle, cette technique s'est développée en Russie, en France, notamment dans d'autres pays d'Europe⁴⁴.

Le concept de mur végétalisé se rapporte aux plantes grimpantes accroissant sur une paroi verticale. Cette végétation peut être colée directement sur des murs qui doivent être rugueux, ou placé à une certaine distance à l'aide d'une structure.

Pour pouvoir bien implanter un mur végétal, favoriser son plein potentiel et sa longue durée de vie, il faut considérer plusieurs facteurs, soit : la surface à couvrir, le mécanisme de préhension des plantes, leur développement et leur taille à l'âge adulte, et les variables climatiques. On peut ainsi les faire grimper sur différentes structures : murs de bâtiments, arches, pergolas, et autres constructions architecturales.

⁴² **PECK,S, CALLAGHAN,C** : « *Greenbacks from Green Roofs: forging a new industry in Canada* ». Prepared for Canada Mortgage and Housing Corporation. Canada. 1999.

⁴³ **JOHNSTON Jacklyn & NEWTON John**: « *Building Green A guide to using plants on roofs, walls and pavements* » Published by Greater London Authority, Mai 2004. www.london.gov.uk

⁴⁴ **DE LORME, E** : « *Garden Pavilions and the 18th Century French Court* ». Suffolk: Antique Collectors Club, 1996.

5.1. Composition du mur végétalisé :

De l'extérieur vers l'intérieur, le mur végétalisé est généralement constitué de (fig III-17):

- **La couche de végétation** : généralement de type grimpant caduc ou persistant.
- **La structure de soutènement** : peut être des lattes de bois, de treillis, des câbles en acier ou des cordes en plastique afin de supporter les racines, éviter d'endommager le mur et stabiliser la plante grimpante sur le mur.
- **La couche d'air** : Indépendamment de l'ombrage d'irradiation solaire par rapport aux conditions atmosphériques saisonnières, l'espace entre la couche de plantes et la fenêtre de bâtiment agit également en tant que zone tampon. Les propriétés d'air seront modifiées en passant par la couche de plantes, fournissant de ce fait une meilleure qualité d'air et abaissant la température de l'air en été⁴⁵.
- **Le mur externe** : peut être en brique, béton, etc.

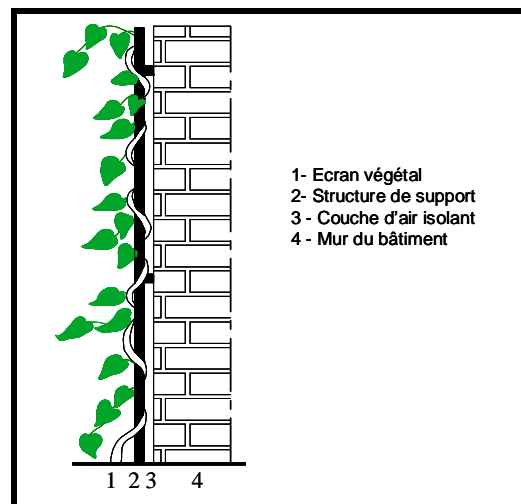


Figure III-17: Coupe d'un mur végétal

(Source : Auteur)

5.2. Avantages des murs verts:

L'utilisation des plantes accroissant directement sur des façades de bâtiment fournit plusieurs avantages. Elle peut offrir un plus grand impact potentiel que le toit vert, sans soucis concernant le poids. Elle peut être appliquée à la plupart des façades de bâtiment et permet un accès facile pour l'entretien des plantes.

⁴⁵ LAM. M et al: "Experimental modelling of deciduous climbing plants as shading devices" Institute for tropical architecture, 2006

En effet, étant donné la majorité des surfaces de murs disponibles dans le milieu urbain comparées aux surfaces du toit (surtout lorsqu'on a affaire à un édifice de plusieurs étages), l'utilisation des jardins verticaux est non seulement une stratégie efficace pour réduire l'îlot de chaleur urbain mais elle régule également l'ambiance intérieure des bâtiments faisant face à des étés chauds et à des vagues de chaleur très fréquentes.

Par ailleurs, la réduction de l'îlot de chaleur urbain réduirait également les émissions de gaz à effet de serre « GES » et améliorerait de ce fait la qualité d'air en réduisant la dispersion des polluants par la capacité des feuilles à filtrer quelques polluants dans l'atmosphère.

Les jardins verticaux peuvent être employés pour leur effet d'évapotranspiration, de refroidissement par évaporation et d'ombre directe. Aussi, végétaliser de façon verticale permet de gagner de l'espace, et d'augmenter facilement les surfaces vertes de la ville.

De plus, la végétation placée directement sur les murs des bâtiments protège l'enveloppe de bâtiment en absorbant le vent, les eaux pluviales et le rayonnement ultraviolet et peut également avoir comme conséquence l'économie d'énergie. Ainsi, le mur vert réduit localement le mouvement d'air et réduit le transfert thermique par convection⁴⁶.

D'après **Le Lun 2006**, lorsque le mur végétalisé est implanté à un bâtiment, il lui est bénéfique. Il agit comme thermorégulateur en l'isolant l'hiver et en le climatisant l'été et il le protège des polluants, des intempéries, de l'humidité et des rayons directs du soleil⁴⁷.

On prétend souvent que les murs végétalisés s'imprègnent d'humidité parce que la lumière et le soleil n'ont pas d'accès libre. **Patrick Blanc** (2005)⁴⁸ affirme le contraire : les constructions recouvertes de plantes sont plus sèches. En effet, le coussin de feuilles protège surtout, tel un imperméable, la surface du bâtiment contre les pluies battantes et conduit l'eau vers le sol par l'intermédiaire des feuilles lisses qui se chevauchent comme des écailles, et le mur reste sec. Si la couche végétale est assez épaisse, même de fortes pluies battantes n'arrivent pas jusqu'à la façade.

⁴⁶ **FACER.J** : *“The role of ‘greening’ in commercial property development”* Fourth-year undergraduate project, UK 2004/2005

⁴⁷ **LE LUN. C** : « *Le mur végétal; la Jungle Verticale: Une Solution Écologique* » 25- 12-2006.

⁴⁸ **PATRICK. BLANC** : « *quand la nature fait le mur* » Article publié dans LE MONDE le 15 Janvier 2005

En plus, grâce à la variation saisonnière des végétaux caduques, la présence des feuilles, en été, permet de se protéger des rayons du soleil et donc des surchauffes alors qu'en hiver les rayons solaires frappent directement le mur car il n'y a plus de feuilles. De plus, les plantes murales favorisent la ventilation du bâtiment, offrent un effet de rafraîchissement et diminuent les pertes par conduction en laissant le mur au sec.

La figure III-18 montre la variation saisonnière du mur végétalisé en été et en hiver.



Figure III-18: Usage des plantes grimpantes à feuilles caduques
(Source : Guyot.A www.arbreurbain.com)

La végétation dense plantée à l'est et à l'ouest du bâtiment peut résoudre le problème «d'éblouissement». Néanmoins, pour permettre une certaine lumière naturelle dans le bâtiment, le jardin vertical pourrait être installé sur un auvent mobile, de sorte qu'il peut être manoeuvré pour arrêter seulement la lumière du soleil directe.

Grâce à ses recherches scientifiques sur les plantes capables de croître en milieu précaire, comme la mousse sur les rochers, le botaniste français Patrick Blanc a développé un mur végétal breveté pouvant accueillir des plantes non grimpantes, cela sur plusieurs mètres de hauteur et sans substrat.

Le musée du quai Branly (fig III-19), ou musée des arts et civilisations non occidentales, de Paris est un projet ayant eu recours au nouveau concept de Patrick Blanc. C'est sur la façade du musée que le mur végétal a été installé et se déploie sur une surface de 800 m² ⁴⁹.

⁴⁹ [EN LIGNE] <http://www.murvegetalpatrickblanc.com> (page consultée le 13-06-2006)



*Figure III-19 : Mur végétal du musée Quai Branly réalisé par Patrick Blanc
(Source : www.murvegetalpatrickblanc.com)*

Conclusion :

Indépendamment des avantages esthétiques significatifs, il y a lieu de retenir les nombreux avantages que peut avoir la végétation sous ses diverses formes dans le milieu urbain. En effet, les plantes régulent les excès climatiques grâce à plusieurs facteurs : l'ombre, l'évapotranspiration, l'humidification, etc.

D'autre part, la végétation contribue de manière significative à la réduction des charges de climatisation des bâtiments urbains et peut participer à la réduction des températures d'air.

Toutefois, elle peut aussi limiter les échanges radiatifs avec le ciel et réduire ainsi le refroidissement nocturne de l'enveloppe des bâtiments.

Les plantes contribuent à la réduction de l'effet de serre, filtrent certains polluants, participent à la réduction des bruits urbains et améliorent la qualité d'air. L'efficacité de ces plantes dépend de la morphologie des feuilles. Ces propriétés doivent être choisies suivant plusieurs critères d'adaptation à savoir : la densité, l'épaisseur, la forme, la position, le type, l'âge, la saison et le climat. Ainsi, les changements saisonniers sont naturellement plus grands, dans le cas des plantes à feuilles caduques. Pour cela, le choix des essences des plantes doit être fait avec beaucoup de soin.

En outre, la stratégie la plus commune pour augmenter la végétation urbaine est de planter des arbres au niveau du sol. Cependant, là où l'espace n'est pas disponible pour des arbres, la végétation peut être développée sur des toits ou des murs de bâtiment.

La végétation joue donc un rôle d'enveloppe thermique complémentaire lorsqu'elle est implantée sur une paroi horizontale (terrasse plantée) ou verticale (**façade verte**). Pour de meilleurs résultats, leur application doit être adéquate pour offrir un intérêt significatif dans la régulation des ambiances en hiver comme en été.

Pour cela, nous allons évoquer dans le chapitre qui suit l'impact des plantes sur le confort des bâtiments en comparant les résultats des différentes expériences menées à travers le monde.

Introduction:

L'émergence des préoccupations environnementales en ces dernières années a suscité des études plus approfondies sur la demande énergétique des bâtiments, liée principalement aux systèmes de conditionnement des ambiances. En effet, la plantation adéquate d'arbres, ou de plantes grimpantes autour d'un bâtiment et sur les structures telles que des pergolas, est nécessaire pour une stratégie de refroidissement ou de chauffage passive efficace. Quand cette stratégie est correctement appliquée, le recours aux procédés conventionnels peut être grandement réduit.

En plus de leur rôle modérateur de l'îlot de chaleur urbain et de modification locale du microclimat urbain, les surfaces végétalisées affectent également le climat intérieur des bâtiments. Par ailleurs, quand la température de l'air à proximité des bâtiments est abaissée, l'intérieur des bâtiments sera plus facile à climatiser ceci d'une part ; d'autre part, le végétal peut également offrir une isolation thermique en hiver en choisissant la typologie adéquate toujours dans un souci d'économie d'énergie et du confort des occupants.

Par conséquent, Cette partie du mémoire constitue un état de l'art sur les performances thermiques de la végétation dans le contrôle solaire des bâtiments. Il s'agit d'une synthèse bibliographique se basant sur les résultats des différentes études réalisées à travers le monde ainsi que les méthodologies suivies pour démontrer l'effet des plantes sur l'ambiance hygrothermique des bâtiments. En effet, ces études ont été effectuées par des techniques modelées sur ordinateur et/ou des expériences menées sur terrain sous différents climats dont plusieurs paramètres ont été mesurés. Ce chapitre constitue ainsi une base de données qui, par la suite, va nous aider à élaborer la partie pratique de cette étude.

1. Performances de refroidissement des plantes grimpantes :

Maintes études ont été menées à travers le monde concernant l'effet d'une variété de plantes grimpantes sur le confort hygrothermique des bâtiments. Elles se résument comme suit :

1.1. Effets thermiques des murs couverts de lierre :

1.1.1. Expérience à Hong Kong:

Les écrans de lierre sur les bâtiments, comme dispositif architectural agréable, est répandu dans l'ensemble de la Chine, particulièrement dans les régions subtropicales¹. Dans le but de définir comment ces techniques de plantation affectent l'environnement thermique du bâtiment ou de la façon dont elles produisent des économies d'énergie dans les bâtiments, une méthode numérique a été, alors, simplifiée par **Zaiyi et Niu** en 2000².

Une série d'analyse de paramètres a été effectuée pour identifier les facteurs principaux affectant le potentiel des écrans de lierre afin d'optimiser les effets climatologiques de ces derniers dans les bâtiments. Cette étude vise à obtenir les variables influençant la fonction du mur végétalisé qui est constitué essentiellement de trois composantes clés (fig IV-1):



Figure IV-1: Model du mur couvert de lierre
(Source : L. ZAIYI et T. JINYEU 2000)

La couche de lierre est caractérisée par :

- Le rapport de couverture (**r**) : qui représente le pourcentage de la surface couverte du mur ;

¹ **ZAIYI.L et JINYEU.T** : "*Impacts of Greenbelts on the Thermal Environment of Residential Communities*". The First Conference on Architectural Design and Technology for Sub-Tropical Climates., Chine, 1998.

² **ZAIYI. L et NIU. J.L.** : "*Study on thermal function of ivy-covered walls*" Dept of building services engineering, Hong Kong, 2000.

- La densité verte (**d**) : qui représente la superficie des feuilles et les principaux processus contribuant à déterminer l'état thermique de cette couche:
- Le rayonnement solaire absorbé par les feuilles ;
- L'échange radiatif de grande longueur d'onde entre les feuilles, le ciel et l'environnement ;
- Le transfert de chaleur convectif entre l'air libre (en dehors de la couche) et l'air dans la couche,
- La transpiration dans les feuilles ;
- La photosynthèse qui convertit l'énergie solaire absorbée en une bioénergie.

La grille de support: qui représente une grille en métal supportant le lierre grimpant sur le mur, caractérisé par la hauteur de la grille (**H**).

Le mur externe: qui est considéré comme couche homogène d'un matériau massif.

Afin de calculer le flux de chaleur (**HF**) provenant du mur externe, différentes combinaisons des données de (*r*, *d*, *H*) ont été établies pour analyser l'impact d'une variable sur la performance thermique du mur, et les conclusions furent les suivantes :

- Le flux de chaleur dépend considérablement de *H*, *d*, et *r* ;
- Pour un certain niveau de densité verte, le flux de chaleur (**HF**) dépend considérablement de *H* : Plus la hauteur de la grille de racine est grande, plus le flux de chaleur est élevé, ce qui augmente alternativement la convection thermique de l'air au mur³ (fig IV-2).

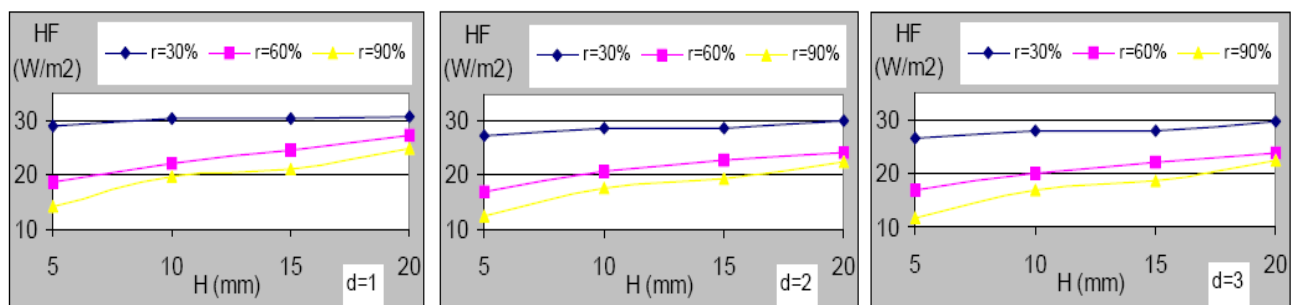


Figure IV-2: Rapport entre HF et H
(Source : L. ZAIYI et T. JINYEU 2000)

- Le rapport de couverture (*r*) a un effet significatif sur la fonction thermique du mur couvert de lierre (fig IV-3). Cela peut être expliqué par l'augmentation de (*r*) qui a pour conséquence qu'une plus grande partie de surface de mur qui peut tirer bénéfice de l'ombre du lierre.

³ ZAIYI. L et NIU.J.L: "Study on thermal function of ivy-covered walls" Dept of building services engineering, Hong Kong, 2000.

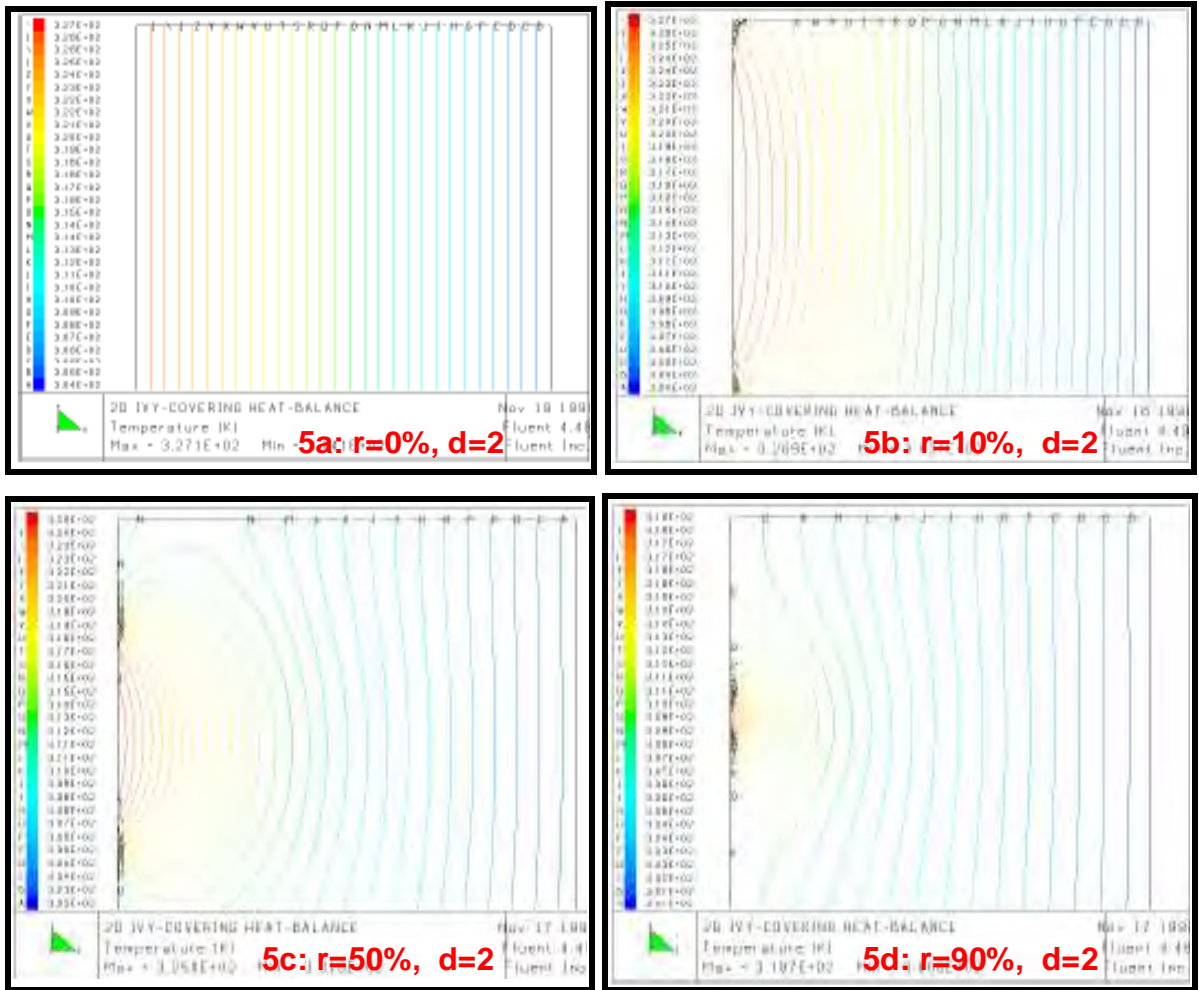


Figure IV-3: Modèle de température dans un mur couvert de lierre
(Source : L. ZAIYI et T. JINYEU 2000)

Pour un mur en brique, quand (r) est moins de 30%, HF est très proche à la situation d'un mur nu c'est-à-dire que plus le rapport de couverture est élevé, plus grande sera sa performance (fig IV-4). Par conséquent, comparé à ce dernier, un mur couvert à 100% a pu réduire les gains solaires jusqu'à 37%.

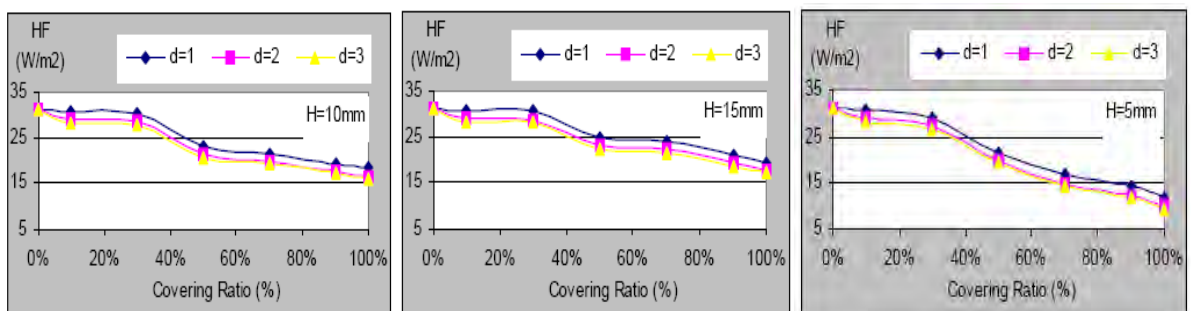


Figure IV-4: Relation entre HF et rapport de couverture (r)
(Source : L. ZAIYI et T. JINYEU 2000)

Cette analyse indique que le lierre comme revêtement sur des bâtiments, peut protéger les murs externes contre le rayonnement solaire direct et pourrait le refroidir par évaporation. Le lierre transforme plus de **70%** de l'énergie solaire absorbée dans la bioénergie via la photosynthèse, sans augmenter considérablement sa température⁴. Ceci a pour conséquence un bas rayonnement de grande longueur d'onde entre le feuillage et les surfaces des murs externes ombragés sous le lierre.

1.1.2. Expérience à Pékin :

L'effet de refroidissement du lierre et les mécanismes de transfert thermique entre les plantes et le mur ont également été étudiés par **Di et Wang 1999**⁵ qui ont choisi la bibliothèque de Tsinghua à Pékin pour effectuer leur expérience (fig IV-5) : un bâtiment à deux étages dont les murs externes orientés ouest et sud sont couverts de lierre épais. L'expérience a été répétée au même emplacement pendant deux étés successifs, en 1996 et 1997.



Figure IV-5: Vue Ouest de la bibliothèque d'université de Tsinghua

(Source : DI et WANG 1999)

A cet effet, plusieurs instruments ont été employés pour effectuer des mesures de température, de rayonnement solaire, de flux de chaleur, de vitesse du vent à plusieurs points à la même hauteur et à différentes distances du mur. Les points mesurés étaient sur la surface du mur, 5 cm loin du mur, sur la feuille, 5 cm de la feuille, et 10 cm de la feuille. La

⁴ **ZAIYI. L** et **NIU. J.L.**: "Study on thermal function of ivy-covered walls" Dept of building services engineering, Hong Kong, 2000.

⁵ **DI.H.F** et **WANG.D.N.**: "Cooling effect of ivy on a wall" Experimental Heat Transfer. Vol. 12, no.3, pp235-345. Tsinghua University, Chine, 1999.

température intérieure et extérieure a été également mesurée. Une comparaison avec un mur nu exposé directement au soleil a été utilisée comme témoin avec un système semblable de mesure (fig IV-6).

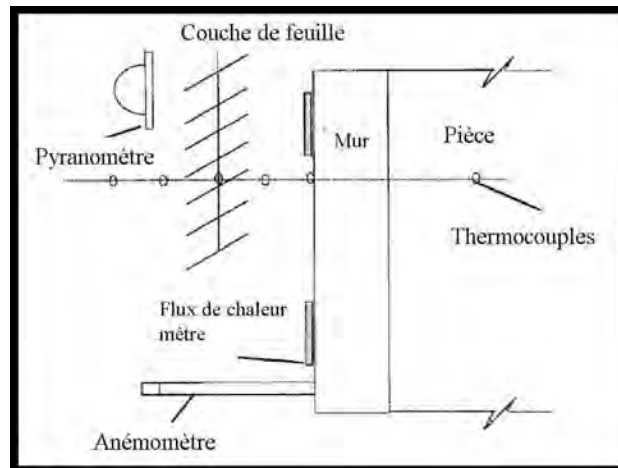


Figure IV-6: Installation expérimentale
(Source : DI et WANG 1999 et réadapté par auteur)

En outre, les effets des procédés de transfert thermique du jour et de la nuit ont été considérés pour évaluer l'effet du mur vert sur l'environnement intérieur. Pour cela, plusieurs formules relatives à la couche de lierre, le mur de lierre, et le mur nu ont été employées afin de calculer les transferts d'énergie dans le système à savoir : le rayonnement de grande longueur d'onde, la chaleur latente, et le transfert de chaleur de convection.

Par conséquent, il a été constaté que la température moyenne des feuilles était 4.5°C inférieure à celle du mur nu exposé directement au soleil⁶ (fig IV-7). Pour la couche de feuille, l'évaporation et la convection thermique des deux côtés ont réduit la température des feuilles, la rendant inférieure à celle du mur exposé. Ainsi, le flux de chaleur au mur vert représentait la moitié de celui du mur nu.

⁶ **DI.H.F** et **WANG.D.N**: *Cooling effect of ivy on a wall* Experimental Heat Transfer. Vol. 12, no.3, pp235-345. Tsinghua University, Chine, 1999.

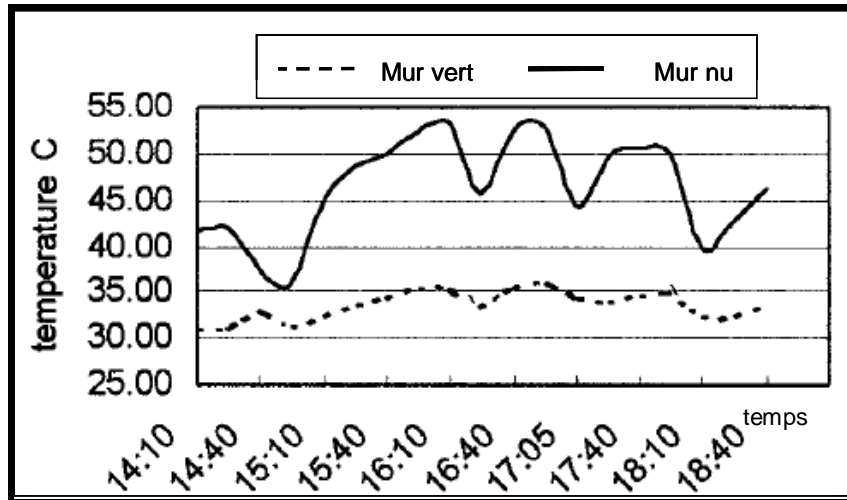


Figure IV-7: Variation des températures pendant le jour
(Source : DI et WANG 1999 et réadapté par auteur)

Di et Wang rajoutent que les plantes vertes réduisent la charge de refroidissement transférée par le mur ouest par 28%, un jour clair d'été. Puisque le mur ouest reçoit plus de chaleur que d'autres surfaces en été, la charge de climatisation serait réduite sensiblement par l'écran de lierre. En plus, le mur vert réduit le gain de la chaleur en absorbant et en reflétant le rayonnement solaire : 40% de l'énergie absorbée par les feuilles sont perdues par convection, 42% par transpiration, et le reste par rayonnement de grande longueur d'onde à l'environnement (fig IV- 8).

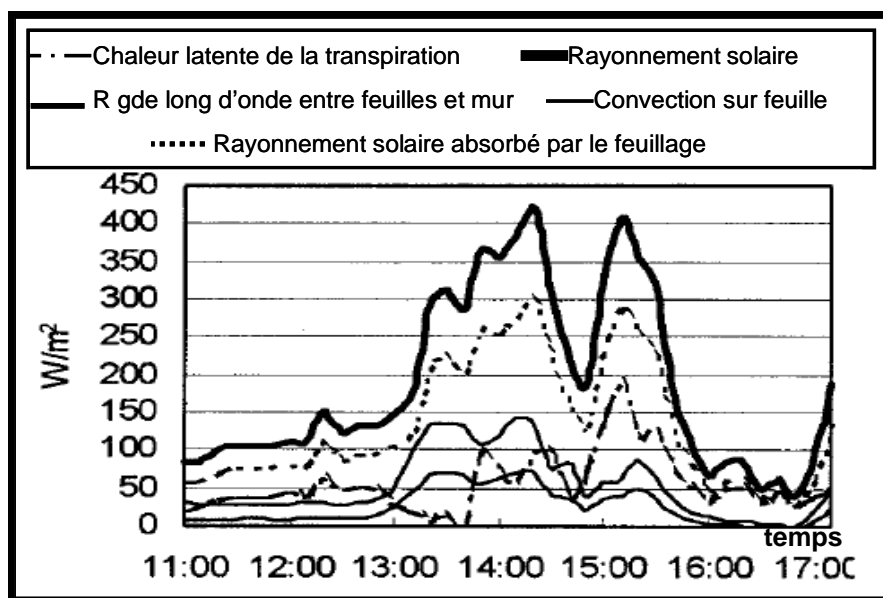


Figure IV-8: Transfert d'énergie à la couche de feuilles le 24-07-1996
(Source: DI et WANG, 1999 et réadapté par auteur)

1.1.3. Expérience au Japon :

Dans les années 1980, **Akira Hoyano** a conduit une étude expérimentale sur les effets d'une protection solaire de lierre japonais couvrant un mur ouest en béton, en comparant les températures à travers le mur avant et après couverture en lierre durant la saison estivale. Les températures des feuilles de lierre, les températures de l'air, et les températures à travers le mur, ont été mesurées dans cette étude.

La figure IV-9 montre que bien que sans lierre, un flux de chaleur maximal de **200kcal/m²h** a été transféré, alors qu'avec l'écran de lierre, celui-ci est réduit d'un quart⁷. D'ailleurs, la transmission solaire à travers l'écran végétal est inversement proportionnelle au ratio de couverture de lierre par rapport à la surface du mur.

Watson et Camous, 1986⁸, rajoutent qu'une couche de lierre montée sur treillis permet de réduire de 50% le rayonnement solaire qui frapperait le mur avec une réduction du gain de chaleur d'environ 550 kilojoules par m² (0.15 kWh/m²) pour un mur ouest au cours d'une journée d'été.

⁷ **HOYANO.A** : "Climatological uses of plants for solar control and the effects on the thermal environment of a building" Japon Energy and Buildings, 11:181-199, 1988.

⁸ **WATSON. D & CAMOUS. R** : « L'habitat bioclimatique de la conception à la construction » Ed l'étincelle Canada 1986,p37.

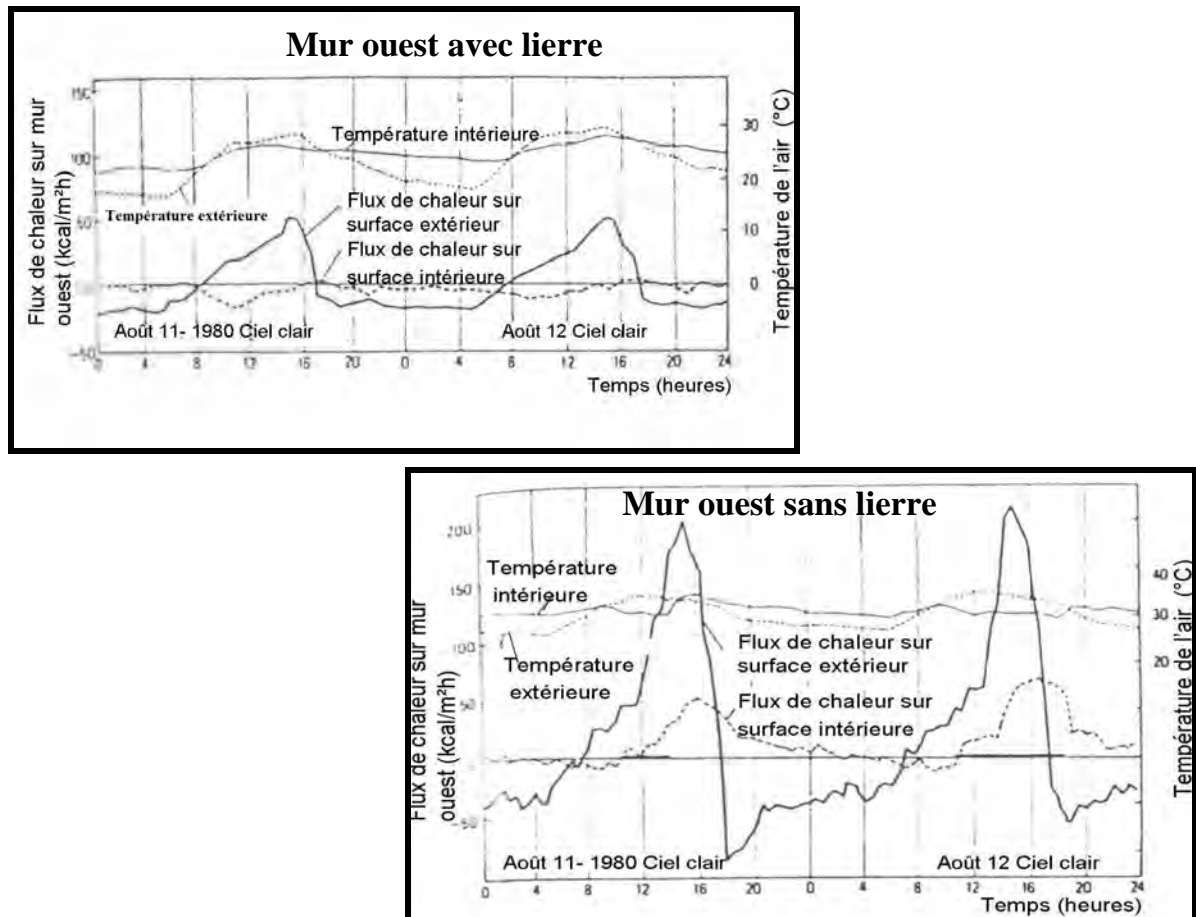


Figure IV-9: Variations journalières du flux de chaleur aux surfaces du mur ouest
(Source : Hoyano, 1988 et réadapté par auteur)

Hoyano précise que sans lierre, la température surfacique extérieure maximale était environ 10°C (à 15h00) au-dessus de l'air ambiant, alors qu'avec la couverture de lierre elle était environ 1°C au-dessous de cette dernière. Pour ce qui est de la ventilation, de légères fluctuations de transfert convectif ont été enregistrées entre l'air extérieur et la surface externe du mur.

Dans une expérience en Allemagne, aucun mouvement d'air n'a été détecté dans l'espace derrière une croissance épaisse de 50 cm de lierre⁹. De plus, Watson et Camous confirment que la végétation présente un certain inconvénient en été car l'air est en quelque sorte stabilisé contre l'enveloppe. Cela diminue fortement l'effet de refroidissement des brises d'été. Cependant, dans le cas de brises assez fortes, la couche d'air contre la surface de l'enveloppe sera tout de même mise en mouvement à travers les feuilles et l'effet positif du refroidissement par évaporation de l'eau à la surface de feuilles contrebalancera la surchauffe plus importante de la couche d'air.

⁹ BAUMANN. I.R: *"The Constructural importance of climbing plants"*. Athènes 1, pp. 22-281986.

1.2. Effets thermiques d'une variété de vignes sur les températures des murs :

1.2.1. Expérience aux états unis :

Dans leur expérience à Los Angeles, **Givoni** et **Sandifer**,¹⁰ ont récapitulé les résultats d'une série d'expériences sur les effets de la végétation sur le microclimat et les températures de surface du bâtiment. Pendant plusieurs années, ils ont entrepris des expériences sur les effets thermiques des vignes sur des surfaces de mur au laboratoire d'énergie.

L'installation expérimentale, se compose d'une série de plaques verticales en aluminium peintes en marron et en blanc dont cinq modules placés au Sud et quatre à l'ouest avec une variété de culture de vignes (jasmin, chèvrefeuille, vigne de trompette, Glycine, lierre de Boston), où un thermocouple a été placé derrière au centre de chaque plaque. Un module pour chaque orientation est laissé sans plantation comme témoin. Par conséquent, les données liées aux modules d'essai ont été comparées à celles collectées des vignes accroissant contre les murs en stuc et en brique (fig IV-10).

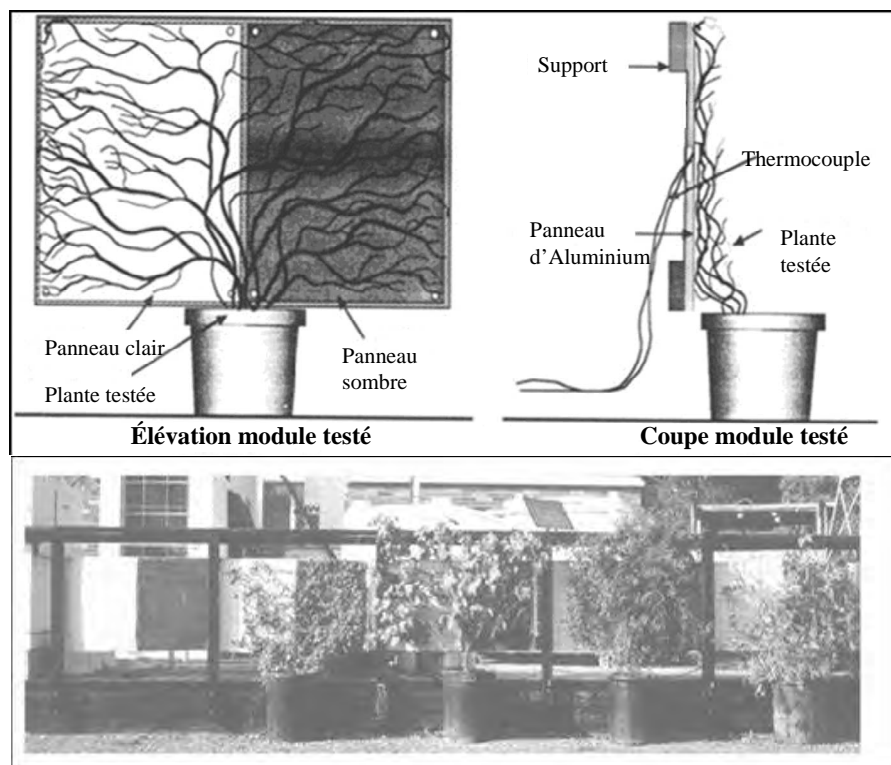


Figure IV-10: Installation de l'expérience

(Source : SANDIFER et GIVONI 2002 et réadapté par auteur)

¹⁰ SANDIFER, S., GIVONI, B. : *“Thermal effects of vines on wall temperatures- comparing laboratory and field collected data”* UCLA -University of California at Los Angeles, 2002.

1.2.1.1. Essai d'une couverture de Glycine sur une pergola ouest :

Au même endroit, Givoni et Sandifer ont effectué un essai des conditions thermiques autour d'une pergola couverte de vigne de Glycine devant un mur en stuc de couleur gris clair orienté ouest.

Cette dernière a l'avantage de pouvoir ombrer aussi bien les surfaces vitrées que les surfaces opaques du bâtiment. Plusieurs paramètres ont été mesurés à plusieurs endroits (fig IV-11) en juillet 2001, afin de déterminer les effets de la pergola couverte de Glycine sur l'enveloppe du bâtiment et sur l'espace extérieur adjacent au bâtiment sous un climat de la Californie marqué par des étés chauds avec des températures moyennes atteignant 37 à 40°C.

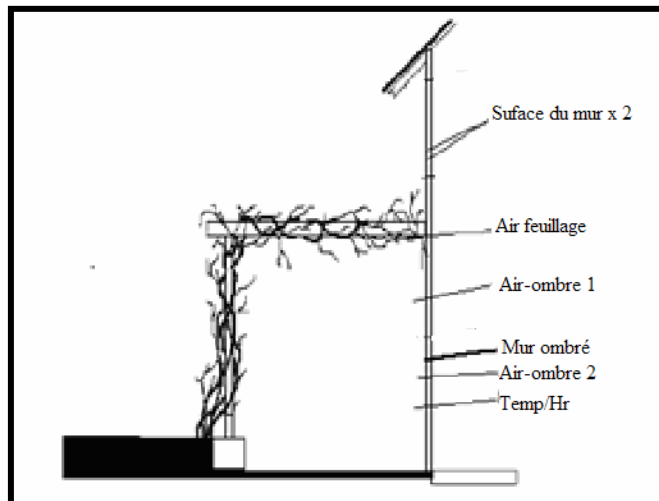


Figure IV-11 : Section de la Pergola montrant les endroits de mesures
(Source : SANDIFER et GIVONI 2002 et réadapté par auteur)

Cette expérience a évoqué clairement le problème des murs ouest exposés. En effet, les températures d'air dans le feuillage ont été réduites de 7 à 10°C. De plus, la température de l'air au-dessus de la pergola était de 5 à 7°C plus élevée que la température de l'air à l'intérieur et au-dessous des vignes.

Une autre étude fut menée par **Hoyano**¹¹ concernant une pergola d'une hauteur de 2.5m couverte de Glycine au cours de laquelle, des mesures de transmission solaire, de températures surfaciques des feuilles, et des températures de l'air en haut et en bas de l'écran ont été effectuées. Par conséquent, la transmission solaire à travers la pergola était environ 0.1 à 0.2 du rayonnement horizontal. La température des feuilles à midi était plus ou moins

¹¹ **HOYANO.A** : "*Climatological uses of plants for solar control and the effects on the thermal environment of a building*" Japon Energy and Buildings, 11:181-189, 1988.

la même que l'air ambiant avec un rayonnement solaire jusqu'à 400 kcal/m²h, et environ 2°C au-dessus de l'air ambiant avec un rayonnement solaire de 800 kcal/m²h.

1.2.1.2. Essai des vignes grimpant contre un mur de brique orienté sud :

Des vignes rouges de trompette (de même densité et même épaisseur de 30-35 cm sauf pour le jasmin étant moins dense) ont été placées sur une armature devant un mur en brique orienté Sud (fig IV-12). D'ailleurs, la température de surface a été mesurée dans plusieurs endroits à l'ombre de la vigne et sur surfaces exposées du mur à l'aide de thermocouples avec des trous percés au centre et à l'intérieur de la surface de brique afin d'enregistrer le transfert thermique dans le matériau.



Figure IV-12: Vigne de Campsis sur un mur sud de brique
(Source : SANDIFER et GIVONI 2002)

Notons par ailleurs, que la couleur de la brique exposée et celle des panneaux expérimentaux foncés présentaient de fortes ressemblances. La figure IV-13 montre que les valeurs maximales journalières, la performance des vignes sur les panneaux expérimentaux et sur le mur de brique étaient presque identiques. Ainsi, la vigne de jasmin, qui était moins dense que les autres plantes, enregistrait des températures plus élevées de 2 à 5°C par rapport à la température de l'air ambiant (DBT) et aux autres plantes. Le panneau témoin foncé et la surface exposée de brique ont eu également des performances très semblables. En outre, la vigne de trompette et le chèvrefeuille ont généré une diminution de la température de surface maximale journalière de 12 à 20°C. Quant au jasmin, la diminution était de 8 à 15°C. Ce qui permet de conclure que la plante de vigne de trompette et le chèvrefeuille sont plus performants que le jasmin. Par ailleurs, Watson et Camous, 1986, affirment que l'efficacité

de la végétation dans le contrôle l'ensoleillement des façades est évidemment fonction de la densité du feuillage.

La différence entre la température des surfaces exposées et ombragées était approximativement 20°C pour les deux matériaux¹². Toutefois, puisque les températures de surface des plantes étaient inférieures à la température de l'air ambiant, il est évident qu'une partie de la réduction de température de surface est due à l'évapotranspiration des plantes.

En outre, **Cantuaría en 2000**¹³ a obtenu une différence allant jusqu'à 10°C entre un mur couvert de vigne vierge ordinaire et un mur nu.

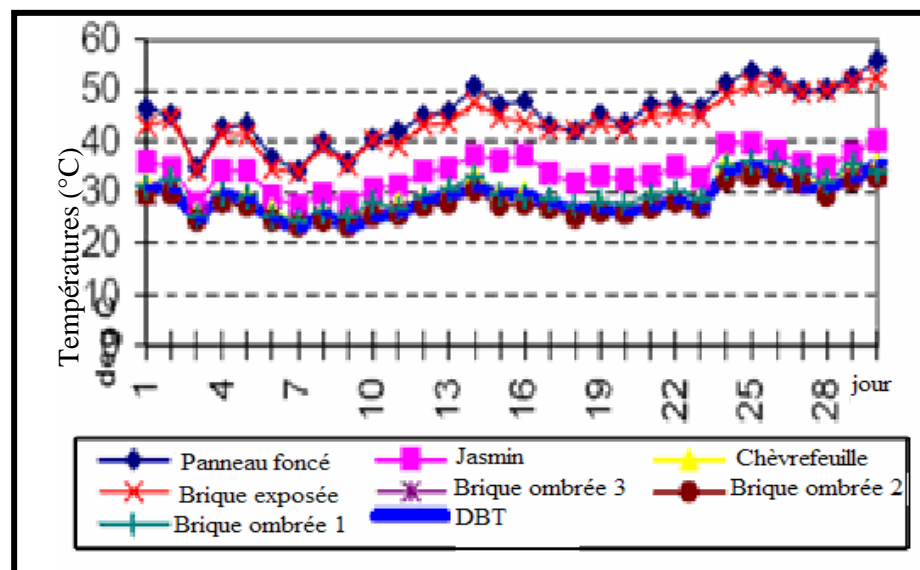


Figure IV-13: Températures maximales journalières en septembre 2001

(Source : SANDIFER et GIVONI 2002 et réadapté par auteur)

1.2.1.3. Essai des Espaliers accroissant sur un mur ouest en stuc :

Au même emplacement de la pergola, un mur de stuc orienté ouest ayant été partiellement couvert par une combinaison de deux plantes (Caffra de Grewia et kawakami de Pyrus) cultivées en espalier et d'une épaisseur de feuillage de 20 à 35 cm, fut également examiné. Un thermocouple a été alors placé sur la surface du mur ombragé et exposé (fig IV-14).

¹² SANDIFER,S, GIVONI,B: "Thermal effects of vines on wall temperatures- comparing laboratory and field collected data" UCLA -University of California at Los Angeles, 2002.

¹³ CANTUARIA,G : "A comparative study of the thermal performance of vegetation on building surfaces". PLEA: Architecture, City, Environment, Cambridge, UK, pp312-313. 2000.



Figure IV-14: Mur en stuc couvert d'espaliers.
(Source : SANDIFER et GIVONI 2002)

Sur la figure IV-15, les données de la pergola couverte de vigne sont montrées avec les outputs du mur ombragé de stuc avec un feuillage moins dense que la vigne de Glycine. Les résultats ont révélé que les moyennes maximales atteignent 54 à 58°C ; la surface ombragée par l'espalier avait une température maximale de 29°C inférieure à celle de la surface exposée.

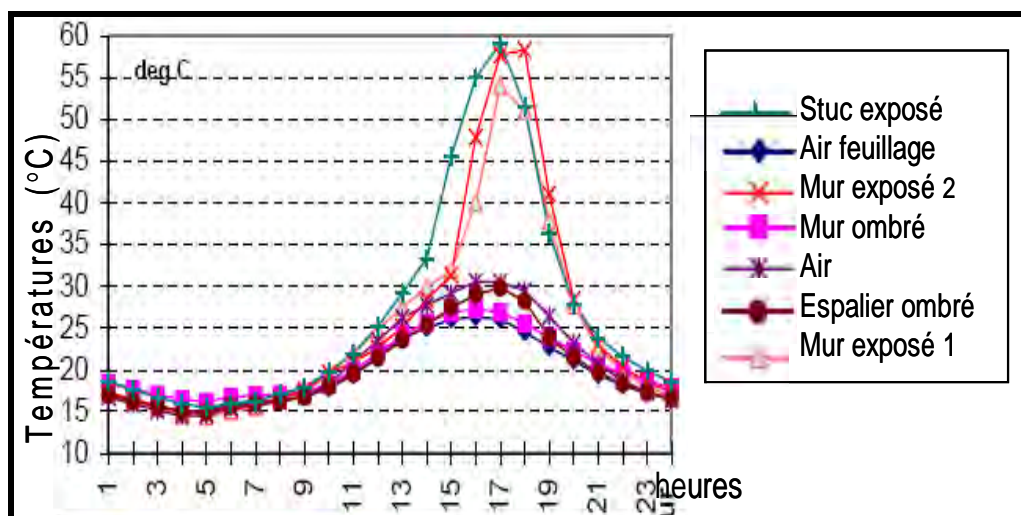


Figure IV-15: Diagramme des données de pergola et d'espalier
(Source : SANDIFER et GIVONI 2002 et réadapté par auteur)

Tous ces essais prouvent que pendant les jours chauds d'été, les vignes s'accroissant directement sur des murs ou sur des pergolas à une épaisseur de 30-35cm peuvent être un moyen efficace pour réduire le problème du gain de chaleur du mur ouest en réduisant les

températures surfaciques. Elles peuvent éliminer l'effet de la couleur extérieure et fournir un espace extérieur plus confortable à côté des bâtiments.

1.2.2. Expérience au Japon :

Hoyano (1988) ¹⁴ a entrepris plusieurs études expérimentales au Japon, traitant l'utilisation des plantes dans la réduction des gains de chaleur des bâtiments, l'une d'elle concerne un écran solaire vertical de vigne devant une véranda. En effet, une vigne (Dishcloth de courge) a été installée devant une véranda sud-ouest d'une maison puis comparée à une véranda non abritée avec la même orientation. La figure IV-16 indique que l'écran était efficace en fournissant l'ombre car l'insolation à l'intérieur de la véranda examinée était sensiblement inférieure que dans la véranda non abritée (sans écran: 40%, Avec écran: 25%). De plus, la température dans la véranda sans écran de vigne était plus chaude de 1-3°C.

Bien que l'auteur a prévu que l'humidité de la véranda avec écran soit plus haute que celle sans écran, dû à la transpiration des feuilles, aucune différence significative n'a été enregistrée lors des mesures.

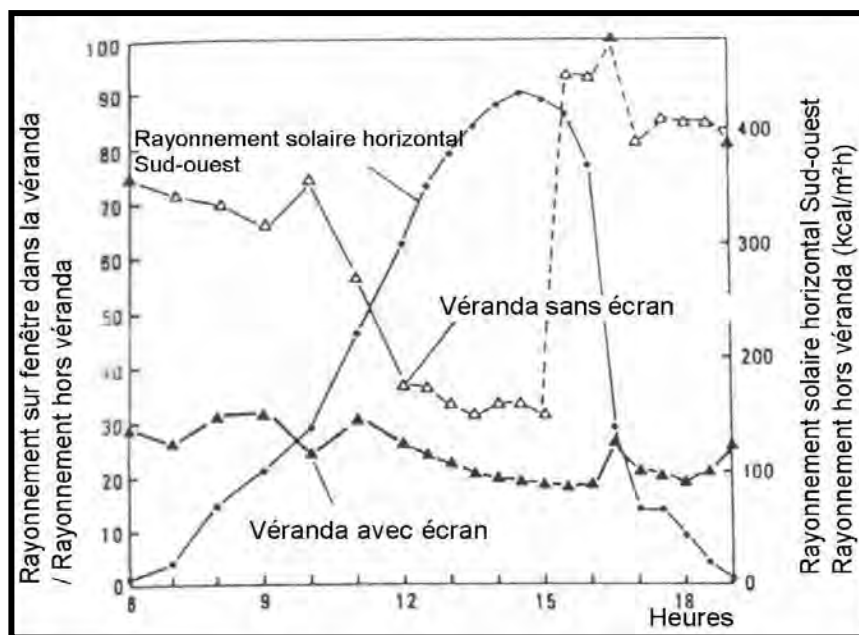


Figure IV-16: Variations journalières du rayonnement solaire incident sur la véranda avec et sans écran de vigne

(Source : Hoyano, 1988 et réadapté par auteur)

¹⁴ In **GIVONI. B.** "*Climate considerations in building and urban design*" Van Nostrand Reinhold, New-York, 1998.

De plus, l'écran vertical de vigne a réduit sensiblement la vitesse de vent à travers la fenêtre dans la véranda abritée par rapport à la véranda non abritée. Sans écran, la vitesse d'air au centre de la fenêtre était, en moyenne 46% du vent extérieur, alors qu'avec l'écran de vigne, elle était environ 17%.

D'autre part, il a été démontré qu'une couche de 4 cm d'air, emprisonnée entre un mur isolé et une couverture de 16 cm de plantes pourrait améliorer la valeur U^{15} de ce mur d'au moins 30%. Si le mur est bien-isolé, cette réduction est moins significative¹⁶.

Toutefois, l'effet global d'un écran vertical sur le confort, dans un climat chaud humide, peut être négatif, dû à la réduction de la vitesse d'air intérieur¹⁷. La distance entre le mur et la végétation, présente ainsi une grande importance.

1.3. Effets thermiques des vignes sur l'environnement thermique interne d'une façade vitrée :

1.3.1. Expérience en Angleterre:

Lam et al (2004) ont effectué une étude de cas sur l'utilisation de la végétation comme protection solaire sur les constructions. Cette expérience a été réalisée à l'école de l'environnement, de l'université de Brighton, dont le but principal est de mesurer l'efficacité du bioshader comme dispositif d'ombrage. Elle s'applique aux bâtiments naturellement ventilés dans lesquels l'air sera filtré à l'aide de la couche de plante avant d'entrer à l'intérieur du bâtiment (fig IV-17). La plante choisie dans cette expérience est la vigne vierge de Virginie.

Le terme « Bioshader » désigne un prototype de couche verticale de plante grimpante à feuilles caduques qui s'étend sur un cadre métallique installé à l'extérieur contre la façade vitrée d'un bâtiment¹⁸.

¹⁵ **La valeur U** : est le coefficient de transmission calorifique du mur. C'est l'inverse de la somme des résistances thermiques des composants de mur. $U = 1/R$ ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)

¹⁶ **FACER.J** : "*The role of 'greening' in commercial property development*" Fourth-year undergraduate project, UK, 2004/2005

¹⁷ **GIVONI.B**: "*Climate considerations in building and urban design*" Van Nostrand Reinhold, New-York, 1998. p308

¹⁸ **LAM.M et al** : « *Résumé d'une étude de cas- Végétation sur la façade des constructions : -Bioshader-* »- Centre for Sustainability of the Built Environment university of Brighton, 2004. www.durabuild.org



Figure IV-17: Le Bioshader
(Source : Lam et al, 2004)

A cet effet, plusieurs paramètres ont été mesurés : la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse du vent et le rayonnement solaire à plusieurs endroits. Les résultats ont été comparés à ceux d'un bureau identique sans écran végétal, qui a servi comme salle témoin.

L'analyse de ces données a révélé que le bioshader proposé régule non seulement les gains solaires, mais améliore également la qualité d'air aussi bien qu'il fournisse des environnements esthétiquement satisfaisants¹⁹. Une baisse de la température ambiante a été constatée dans le bureau d'essai durant la plupart des après-midi d'été où il a fait chaud (avec un écart de température entre la salle d'essai et la salle témoin variant de 4,3 à 5,6°C) (fig IV-18), avec une légère augmentation constante de l'humidité relative de 6 à 10%. D'autres études ont également prouvé que les bâtiments avec un aménagement végétal approprié ont de plus basses températures que les bâtiments ordinaires en été²⁰. En outre, les vignes ou les lierres épais peuvent augmenter l'humidité de l'air de 10 à 20%²¹.

¹⁹ LAM. M et al: "*Experimental modelling of deciduous climbing plants as shading devices*" Institute for tropical architecture, 2006.

²⁰ MEIER.A. K: "*Strategic Landscaping and Air Conditioning Savings: A Literature Review*", Energy and Buildings, vol. 15-16, 1990-1991. pp. 479- 486

²¹ QIAN.Z.M: "*An Investigation to the Cooling and Moisturizing Effects of Creepers on the Surrounding Area*", Researches on the Green Effects, Chinese Environmental Science Press, Bekin, 1995.

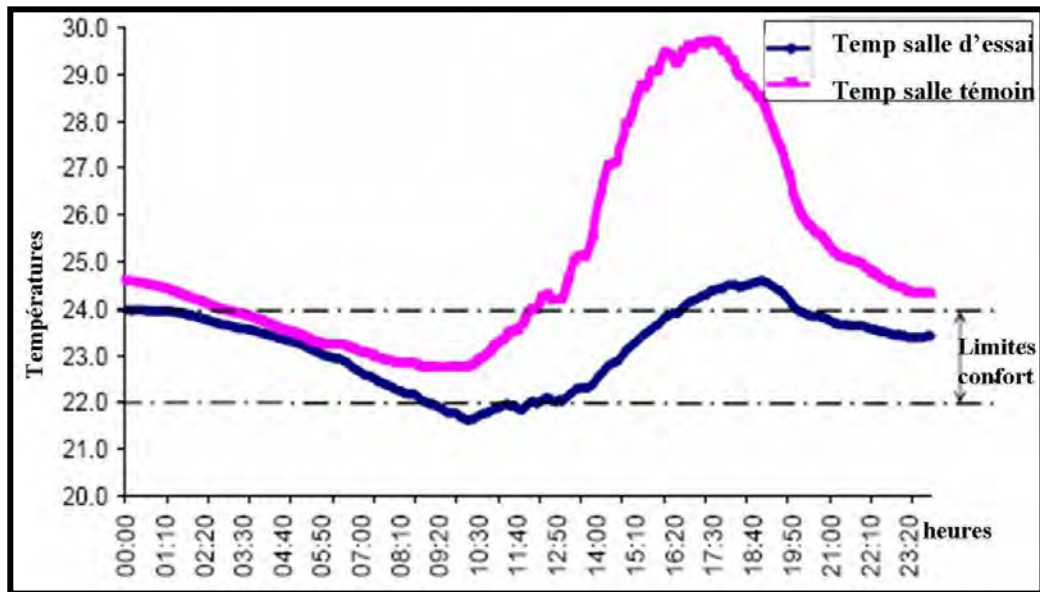


Figure IV-18: Ecart de température entre la salle d'essai et la salle témoin
(Source : Lam et al., 2004 et réadapté par auteur)

Les résultats de l'expérience ont ainsi démontré que la transmission des rayons solaires par le feuillage varie de 0,43 pour une feuille simple à 0,14 pour cinq couches de feuilles (une réduction de 37% de rayonnement solaire par une seule couche de feuillage comparé à 86% obtenue par cinq couches de feuilles).

1.3.2. Expérience à Toronto :

Une investigation basée sur des observations et des modélisations a été conduite par **Bass et al** sur les températures de surface d'un jardin vertical dans différents endroits à l'université de Toronto (fig IV-19). Le jardin vertical a été comparé à une surface de couleur claire en métal et à une surface foncée. D'ailleurs, l'installation a été employée non seulement pour comparer la température des deux surfaces (métal et feuille) mais pour évaluer également le potentiel d'ombrage des fenêtres par la végétation.



Figure IV-19: Jardin vertical testé à l'université de Toronto
(Source : Bass et al 2001)

Les essais ont été effectués à l'université de Toronto entre 1996 et 1998 durant plusieurs mois. Pour cela, trois emplacements et différents types de jardins verticaux ont été évalués. Le jardin vertical est composé de 4 plantes et un jardin témoin sans aucune plante. De plus, les mesures ont été prises avec un thermomètre infrarouge sur plusieurs endroits sur le mur ainsi que les surfaces environnantes.

Les premières données ont été rassemblées in situ, en août 1996. En effet, trois plantes différentes * Gloires de matin (morning glories), haricots d'Espagne d'écarlate (scarlet runner beans) et tournesols (sunflowers) * ont été installées sur des fenêtres orientées ouest. Les mesures ont été relevées pendant deux jours à 12.00h, 13.30h et 14.30 h au niveau du mur de brique et la surface noire dans le même endroit que le jardin.

Les jardins verticaux étaient efficaces à réduire la température de surface et à ombrer les fenêtres. Ils étaient plus frais que le mur en brique de couleur claire et nettement plus frais que la surface noire.

Un deuxième ensemble d'observations a été rassemblé à l'intérieur en février 1997, comparant trois jardins verticaux * le lierre, fleur de passion et l'oreille d'éléphant * à un mur blanc. Les données ont été relevées entre 14 h30 et 15h00, une fois par semaine pendant cinq semaines. Par conséquent, les températures moyennes des jardins verticaux étaient inférieures au mur blanc. En outre, l'analyse a indiqué que les différences de température entre le lierre et l'oreille d'éléphant et entre la fleur de passion et l'oreille d'éléphant étaient également significatives ; les niveaux des températures et d'humidité ont été bas pour l'oreille d'éléphant.

Par ailleurs, ces observations ont été comparées à un mur de couleur claire couvert de vigne de ficus et à une surface noire. Les données ont été rassemblées entre 2:30 et 3:00, pendant l'automne de 1998.

Par conséquent, l'analyse de ces données a indiqué des différences significatives entre toutes les surfaces. Les jardins verticaux étaient plus frais qu'une surface noire, mais ils étaient également plus frais que les murs de couleur claire à chaque emplacement. En effet, il a été confirmé que les températures moyennes du mur exposé, du mur ombragé et des surfaces de feuille étaient 43°C, 26.8°C et 26.1°C respectivement.

L'effet d'ombrage d'une fenêtre peut être estimé en calculant l'évitement mensuel de la charge de refroidissement par le biais de la formule suivante, n'inclut pas l'effet de l'évapotranspiration sur l'écoulement de chaleur:

$$\text{MCLA} = \text{A} \times \text{D} \times \text{G} \times \text{S} \dots\dots\dots [1]$$

MCLA = évitement mensuel de charge de refroidissement²²

où : **A** = Surface de la fenêtre (m²)

D = Coefficient d'ombrage (%)

S = Heures d'exposition directe au soleil par mois

G = Gain de chaleur horaire moyen pour le mois (W/m²)

* La valeur « S » devrait refléter les heures d'exposition directe au soleil. Par exemple, à Toronto, il peut y avoir 16 heures de soleil pendant les mois d'été, mais le côté ouest d'un bâtiment est exposé à la lumière du soleil directe pendant seulement six heures.

* Le calcul du gain de chaleur G, exige de l'information sur l'énergie solaire entrante. Une quantité type de rayonnement à Toronto serait 600 W/m². La variable « G » est la fraction estimée de l'énergie solaire entrante sur un mur multiplié par le pourcentage de transmission de l'énergie solaire par la fenêtre. Le pourcentage de l'énergie solaire entrante qui est transférée par la fenêtre varie de 76% pour une fenêtre de simple vitrage sans protection à 26% pour les fenêtres de verre réfléchissant. Pour les fenêtres de double vitrage réduisent la quantité d'énergie transmise qui varie de 25 à 64 %.

²² **BASS.B, HANSELL.R et POOLE.G:** "Adapting Urban Areas to Climate Change with Vertical Gardens" University of Toronto, 1999.

Pour les plantes, « D » est en général 80%. Ainsi, selon l'orientation, la taille des fenêtres, la hauteur du bâtiment, et le nombre de fenêtres, en ajoutant un jardin vertical, les réductions des charges de climatisation et de gaz à effet de serre ont pu être tout à fait significatifs avec un coefficient d'ombrage « D » de 80%.

Enfin, **Bass** affirme que le plus grand impact d'ombrage réside dans la réduction de l'énergie solaire transmise par les fenêtres pendant que celle-ci est absorbée dans la pièce et irradiée comme chaleur.

1.4. Effets thermiques d'une combinaison de végétation à feuilles caduques et persistantes sur les murs extérieurs:

Une série d'observations a été rassemblée en climat chaud et aride d'Afrique du Sud par (**Holm**, 1989)²³ sur le lierre anglais, le lierre de Boston, la vigne vierge de Virginie et la vigne ordinaire. Un modèle numérique, simulant les effets thermiques de ces plantes sur les murs extérieurs, a été formulé en utilisant le programme DEROB où ces simulations ont été validées contre des mesures sur terrain. En effet, les mesures in situ prises sur ces plantes ont produit des températures identiques à l'ombre à une épaisseur de couverture de 20 cm.

Ce modèle a estimé qu'en été, le jardin vertical a réduit les températures journalières de 5°C sur la surface d'un bâtiment orienté sud. Des améliorations de température de l'air intérieur ont été également atteintes pour des bâtiments orientés ouest. D'autres simulations sur des bâtiments de haute et de basse masse thermique de la même conception ont été exécutées pour les orientations Sud et ouest dans différents climats pour des jours d'été et d'hiver. Les meilleurs résultats de performance thermique ont été obtenus pour des bâtiments de faible masse dans des climats chauds-arides avec des murs orientés Sud.

2. Performances de refroidissement des arbres :

2.1. Refroidissement à travers l'ombre :

Une recherche expérimentale a été effectuée pour analyser l'effet d'usage de l'ombre des arbres pour le contrôle solaire des bâtiments. Plusieurs paramètres physiques ont été mesurés en deux surfaces, sur la même façade d'un bâtiment à l'université d'agriculture d'Athènes. Des comparaisons ont été faites pendant une période chaude d'été entre les

²³ **HOLM. D:** "*Thermal improvement by means of leaf cover on external walls - A simulation model*" Energy and Buildings Volume 14, Issue 1, 1989. pp 19-30

paramètres physiques mesurés en surfaces ombragées et non ombragées. Elles concernent les températures surfaciques du mur et de l'air, les échanges thermiques entre la surface du mur et l'environnement immédiat, la vitesse du vent et l'humidité de l'air.

Les résultats ont prouvé que les plantes, et en particulier les arbres constituent un excellent système passif pour le contrôle solaire des bâtiments offrant des avantages significatifs plus que les protections solaires artificielles conventionnelles, et que les surfaces non ombragées ont eu plus de deux fois de rayonnement net et des valeurs de flux thermique que la surface ombragée²⁴.

Givoni confirme que la couverture du sol par de la végétation autour d'un bâtiment réduit le rayonnement solaire réfléchi ainsi que les rayonnements de grande longueur d'onde émis par le sol vers les murs, abaissant de ce fait les gains solaires de grande longueur d'onde en été²⁵.

2.2. Refroidissement à travers l'ombre d'arbre à feuilles persistantes :

Dans une expérience de **Hoyano** (1988), des arbres ont été cultivés dans des pots mobiles et placés devant un mur ouest en béton de 12 cm d'épaisseur, dans différents espacements. Les variables expérimentales étaient les distances entre les arbres « L » (45 ou 65 cm) et la distance entre le mur et la rangée d'arbres « D » (20 ou 60 cm). Par conséquent, tous les arrangements d'arbre ont réduit le transfert de chaleur dans le bâtiment, par rapport à un mur non ombragé. L'effet d'ombrage solaire était plus grand quand la distance entre le mur et les arbres était plus étroite. Ainsi la température surfacique de la partie exposée était plus élevée que les autres parties d'environ 3°C ²⁶ avec un flux de chaleur de 100kcal/m²h tandis que le mur ombré était de 50kcal/m²h.

De son côté, Wong, 2007²⁷, a obtenu une différence de 12°C de températures surfaciques externes entre un bâtiment ombré par des arbres et un autre sans protection (fig IV-20).

²⁴ **PAPADAKIS.G et al** : *“An experimental investigation of the effect of shading with plants for solar control of buildings”* Energy and Buildings Volume 33, Issue 8 , Octobre 2001. pp 831-836

²⁵ **GIVONI. B** : *“Passive and low energy cooling of buildings”* John Wiley&Sons,Inc USA, 1994. p24.

²⁶ **HOYANO.A** : *“Climatological uses of plants for solar control and the effects on the thermal environment of a building”* Japon Energy and Buildings, vol:11.181-199, 1988.

²⁷ **WONG Nyuk Hien**: *“The use of Urban Greenery to mitigate Urban Heat Island in Singapore”* School of Design and Environment Department of Building, National University of Singapore, 2007

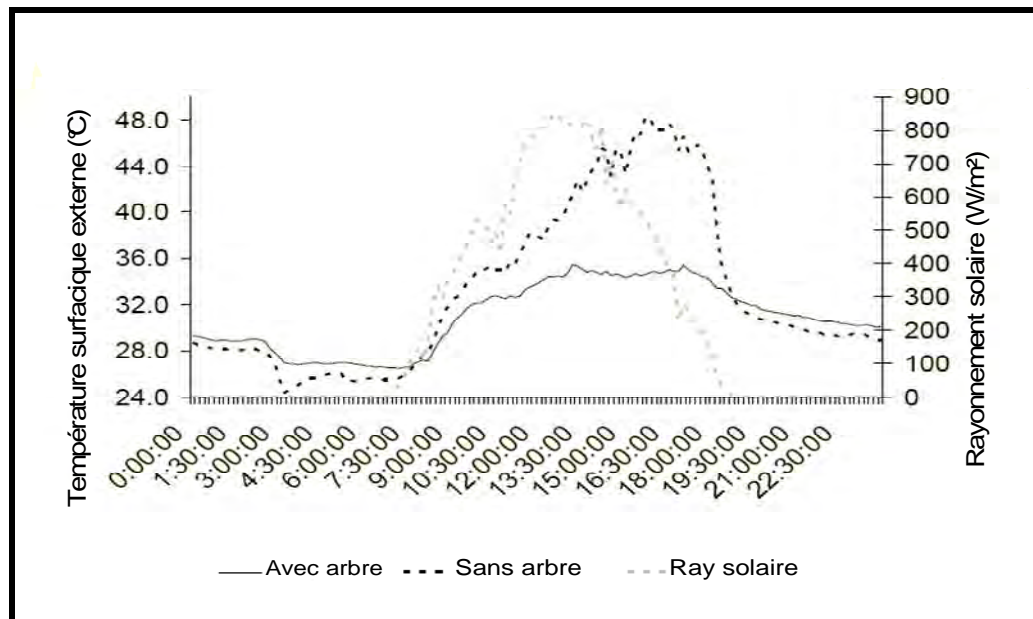


Figure IV-20 : Variation des températures surfaciques entre une protection avec arbre et sans arbre

(Source : Wong, 2007)

De plus, les arbres plantés assez près de la maison fournissent l'ombre plutôt que ceux plantés à de plus grandes distances²⁸ (fig IV-21). Les avantages d'ombre de nouveaux arbres devraient être obtenus dans un délai de 5-10 ans, selon la hauteur du bâtiment et les espèces d'arbre. Pour accomplir ce but, une distance de 2 à 6m entre l'arbre et le mur est recommandée pour la plupart des arbres moyens (3 à 9m de haut).

Les arbres plantés étroitement ombragent pendant une plus longue période du jour durant la plupart de la saison chaude. L'ombre d'un arbre planté à 3 m de la maison se déplace à travers la surface ciblée quatre fois plus lentement qu'un arbre planté à 6 m de distance.

²⁸ **ROBINSON M.L et EDDINGTON. C** : "*Shade Factors in Southern Nevada ; Using Trees and Shrubs for Shading Outdoor Spaces*" Cooperative extension -Univesité de Nevada 1996.

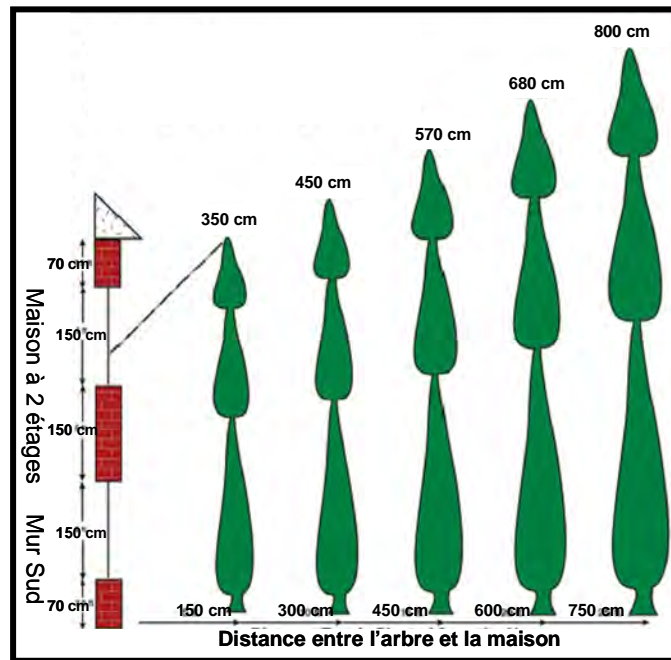


Figure IV-21: Rapport : distance/ hauteur d'arbre pour ombrager une maison à deux étages
(Source : ROBINSON et EDDINGTON, 1996 et réadapté par auteur)

2.3. Relation entre la quantité d'ombre d'arbre et la température intérieure des bâtiments dans un climat chaud et sec :

L'ombre d'arbres peut avoir un effet substantiel sur la température intérieure des bâtiments. De ce fait, une étude a été menée par **Irfan et al**²⁹ au Pakistan dans le but d'estimer l'impact sur la température interne des bâtiments en augmentant le pourcentage d'ombrage d'arbre, et de déterminer s'il existe une relation entre la quantité d'ombre et la température intérieure de bâtiments.

A cet effet, des techniques de modélisation basées sur un programme informatique ont été explorées pour estimer la réduction de la température à l'intérieur des bâtiments en réduisant la pénétration de l'irradiation solaire. Cette simulation a pour avantage de maîtriser les variables climatiques qui sont souvent incontrôlables sur terrain et qui changent constamment dans le temps et dans l'espace. Ainsi, elle permet d'augmenter l'arrangement des interactions entre le climat, le bâtiment et la végétation dans une courte période.

Sous le climat chaud et sec de Lahore, la simulation s'est déroulée dans différentes conditions (Tableau IV-1), en un jour type « le 15 juin », pour une orientation Est et aucune espèce particulière d'arbre n'a été choisie pour l'étude.

²⁹ **IRFAN.N, ZAHOOR.A et KHAN.N:** "*A study of co-relationship between internal temperature of buildings and tree shading in hot and dry climate*" Mehran university of engineering and technology, Pakistan 1996.

	Conditions d'ombrage
1	Quand le toit et les murs sont ombragés (plein ombrage)
2	Quand seulement des murs sont ombragés (mur ombragé)
3	Quand seulement le toit est ombragé (toit ombragé)

Tableau IV-1: Les conditions d'ombrage

(Source : IRFAN et al 1996)

Pour cela, afin de quantifier la réduction du rayonnement par l'ombre d'arbre, trois paramètres principaux ont été considérés :

- **Nature du rayonnement solaire entrant** : qui dépend en partie des quantités relatives au rayonnement direct et diffus entrant. Cependant, la réduction du rayonnement direct est la plus importante parce qu'elle compte la plupart de rayonnement.
- **Superficie ombragée** : Simplement indiqué, plus la surface ombragée est grande, plus la réduction d'irradiation est grande.
- **Le facteur d'ombre** : qui peut être décrit comme la réduction d'irradiation exprimé comme :

$$SF = \{SA_S\} \{SA1\}/SC \dots\dots\dots[2]$$

Où SF est le facteur d'ombrage

SA_S est la surface ombragée

SA1 est la surface totale

SC est le coefficient d'ombrage des plantes qui représente le pourcentage du rayonnement solaire disponible transmis par les plantes : Dans une feuille, ce coefficient s'étend de 0.07 à 0.38. Par conséquent le facteur d'ombrage est un nombre sans dimensions avec des valeurs s'étendant de 0 (aucune ombre) à 1 (ombre complète).

En plus, l'irradiation horaire sur les surfaces de maison a été calculée en prenant en considération le rayonnement horaire total sur le toit horizontal et les surfaces verticales du mur, le rayonnement diffus, le rayonnement réfléchi du bâtiment et le transfert de chaleur par les murs et le toit.

Par conséquent, la température interne la plus élevée est enregistrée dans un bâtiment sans aucune ombre. Il a été constaté que l'ombre d'arbre sur un bâtiment a réduit la température interne qui, alternativement, peut réduire le coût de refroidissement durant les mois chauds.

Aussi, l'ombrage des murs a plus d'impact sur les températures intérieures du bâtiment par rapport à l'ombre fournie sur le toit car les murs ont plus de surfaces exposées au soleil. L'ombrage de l'arbre a plus d'impact sur la température interne si les murs et le toit sont ombrés : avec une augmentation de 10% de l'ombre d'arbre, la température interne du bâtiment diminue de 2,4 °F³⁰ (fig IV-22).

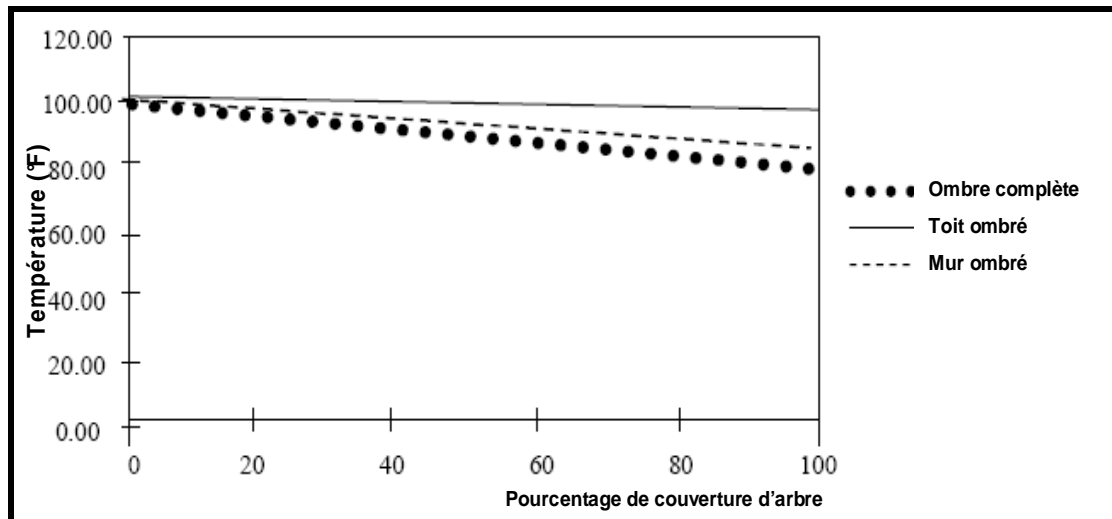


Figure IV-22: Diagramme de l'impact de l'augmentation de la couverture d'arbre en % sur la température intérieure d'un bâtiment dans des conditions atmosphériques claires
(Source : IRFAN et al 1996)

Une autre étude aux Etats-Unis a révélé qu'un arbre correctement placé peut réduire la température à l'intérieur de la maison de 10°C. Ce qui est équivalent à une augmentation de 30% d'isolation³¹.

3. Le rôle de la végétation dans la conservation d'énergie :

3.1. Incidence sur la consommation d'énergie de climatisation :

Akbari (1997), à travers sa recherche, a mesuré les économies d'énergie de refroidissement substantiel dans deux maisons à Sacramento en Californie à travers une simulation. En effet, Seize arbres à savoir : huit grands et huit petits ont été alignés le long des murs ouest et sud : Les grands arbres sont de type **hackberry chinois**, 1 **flametree chinois**, 2 **cendres de Raywood**, 4 **arbres de tulipe** ; et les arbres courts étaient 8 **redbud est**. Les données rassemblées incluent l'utilisation de l'électricité pour la climatisation, les

³⁰ **IRFAN.N, ZAHOOR.A et KHAN.N**: "A study of co-relationship between internal temperature of buildings and tree shading in hot and dry climate" Mehran university of engineering and technology, Pakistan, 1996.

³¹ **ROBINSON M.L et EDDINGTON. C** : "Shade Factors in Southern Nevada ; Using Trees and Shrubs for Shading Outdoor Spaces" Cooperative extension -Université de Nevada, 1996.

températures sèches et l'humidité intérieures et extérieures, les températures de surface du toit et du plafond, les températures surfaciques intérieures et extérieures du mur, l'insolation, la vitesse et la direction du vent.

Par conséquent, l'ombre des arbres sur les deux maisons mesurées a nettement réduit les températures de surface extérieures et la vitesse du vent et a généré des économies d'énergie de refroidissement saisonnier de 30%, correspondant à une économie quotidienne moyenne de 3.6 et 4.8 kWh/j. Les économies de la demande maximale pour les mêmes maisons étaient 0.6 et 0.8kW (environ une économie de 27% dans une maison et 42% dans l'autre)³².

En outre, le même auteur, dans son expérience à Los Angeles a traité l'effet d'ombre des arbres urbains et les avantages significatifs dans la réduction de la demande de climatisation du bâtiment, dans l'amélioration du confort et de la qualité d'air en abaissant la température ambiante et en réduisant la formation du smog³³ urbain. De ce fait, l'économie liée à ces avantages change par région climatique et peut être jusqu'à 200\$ par arbre.

En Floride, **Parker**³⁴ (1987) a mesuré les économies d'énergie de refroidissement à travers un aménagement bien projeté et a constaté que les arbres et les arbustes correctement localisés autour d'un bâtiment ont réduit l'utilisation quotidienne de l'électricité de climatisation de 50%.

A Chicago, plus de 75% des ménages consomment de l'électricité pour la climatisation en été. Selon de premières simulations sur ordinateur, trois arbres de 7,6 m autour d'une nouvelle habitation bien isolée permettraient de réduire les dépenses de chauffage et de refroidissement de 8% par an, par rapport au même édifice sans arbres. Les économies annuelles obtenues grâce aux arbres se répartiraient comme suit: réduction des besoins de refroidissement en été assignable à l'ombre (37%); diminution des besoins de refroidissement en été dû à la baisse de la température par évapotranspiration (42%); réduction des besoins de chauffage en hiver due à la diminution de la vitesse des vents (21%)³⁵.

³² **AKBARI.H et al:** "*Peak power and cooling energy savings of shade trees*" Energy and Buildings, vol 25, USA 1997. pp: 139-148

³³ **Smog :** mélange opaque de brouillard et de fumée des zones industrielles (Microsoft Encarta 2007).

³⁴ **PARKER.J.H :** "*The use of shrubs in energy conservation plantings*" Landscape journal 6, 1987. pp132-139

³⁵ **NOWAK.D.J et MCPHERSON.E.G :** « *Comment quantifier l'incidence arbres: le projet de Chicago concernant les effets des espaces boisés urbains sur le climat* » Etas-unis, 1993.

Huang et al (1987) ont simulé à l'aide du programme numérique DOE-2.1C les effets des plantes sur la réduction des charges de refroidissement dans des bâtiments résidentiels. Les résultats ont indiqué qu'en augmentant la couche générale des arbres dans diverses villes, les charges de refroidissement peuvent être sensiblement réduites créant des économies d'énergie de plus de 25%³⁶. La performance thermique du jardin vertical a été également examinée en utilisant le model « DOE visual » et évaluée quant à l'îlot de chaleur urbain et à la réduction des températures intérieures. La simulation a démontré que les jardins verticaux sont efficaces à réduire la consommation d'énergie pendant la saison de refroidissement³⁷. D'ailleurs, l'effet d'ombrage des jardins verticaux a réduit l'énergie utilisée pour la climatisation d'environ 23% et celle employée pour la ventilation de 20% ayant pour résultat une réduction de 8% de consommation énergétique annuelle. Le niveau élevé des réductions est très probablement dû à l'impact d'ombrage des fenêtres.

Bass rajoute que dans les bâtiments sans isolation, ces économies sont encore plus grandes. Cependant, les réductions significatives dans la climatisation sont possibles avec les jardins verticaux, seulement dues à l'ombrage des fenêtres.

3.2. Incidence sur la consommation d'énergie de chauffage dans un climat froid :

Dans les régions froides, l'avantage principal des plantes autour d'un bâtiment est d'avoir la capacité d'abaisser la vitesse du vent. En effet, dans un climat froid, le vent diminue l'efficacité énergétique de 50%. Une étude a démontré qu'en protégeant une maison contre le vent, la réduction du « facteur de vent froid » était de 75% et celle de la demande de chauffage était de 25%³⁸.

Heisler (1986) affirme que la quantité d'énergie nécessaire pour chauffer ou refroidir les édifices dépend des propriétés thermophysiques de ces derniers, du comportement des occupants et du climat local. En modifiant le climat local, la végétation peut accroître ou diminuer la consommation d'énergie des bâtiments. Pour cela, il a étudié l'impact de la localisation d'arbre autour d'une maison sur l'utilisation de l'énergie du chauffage et de refroidissement. La réduction d'énergie de chauffage mesurée et simulée que provoque la

³⁶ **HUANG, Y.J et al** : *“The potential of vegetation in deducing summer cooling loads in residential buildings,”* Climate and Applied Meteorology 26 (9). 1987. pp1103 – 1116

³⁷ **BASS.B, BASKARAN.B** : *“Evaluating Rooftop and Vertical Gardens as an Adaptation Strategy for Urban Areas”* Canada 2001.

³⁸ **PECK.S.W, CALLAGHAN.C** : *“Forging a new industry in Canada; Status report on benefits barriers and opportunities for green roof and vertical garden technology diffusion”* 1999.

végétation autour de la maison varie généralement entre 5 et 15 % par comparaison à une maison sans arbres³⁹.

Akbari et Taha (1992) ont utilisé les données d'Heisler et analysé l'impact de la réduction de vent sur l'utilisation de l'énergie du chauffage et de refroidissement des maisons des climats froids. Les simulations ont indiqué que dans les climats froids, une augmentation uniforme de 30% dans la couverture d'arbre urbain peut réduire les consommations de chauffage d'hiver dans les secteurs urbains d'environ 10% et dans les secteurs ruraux de 20%. Il a été estimé que l'économie dans les secteurs urbains peut presque être doublée si les arbres à feuilles persistantes sont plantés stratégiquement du côté nord des bâtiments de sorte que les bâtiments puissent mieux être protégés contre le vent nord froid d'hiver.

4. Impact de la végétation sur la pollution :

Akbari confirme que les arbres urbains jouent un rôle important dans la séquestration du CO₂ et retardent de ce fait la chaleur globale. En outre, le même auteur estime qu'un arbre planté à Los Angeles évite la combustion de 18 kg de Carbone annuellement, quoiqu'il séquestre seulement 4.5–11 kg. Dans le même sens, dans une étude récente pour Baton Rouge, Sacramento, et Salt Lake City, il a été estimé que la plantation d'une moyenne de quatre arbres par maison mènerait à une réduction annuelle des émissions de carbone de 16.000, 41.000, et 9000 t, respectivement (la réduction des émissions de carbone par arbre est d'environ 10 à 11 kg par an)⁴⁰.

Enfin, pour synthétiser ce chapitre, on a procédé à une récapitulation des recherches citées plus haut concernant les performances thermiques des plantes sur le confort des bâtiments (dont on a sélectionné les plus importantes), en comparant leurs résultats comme suit (tableau IV-2):

³⁹ **HEISLER. G.M** : "*Energy Saving With Trees*", Journal of Arboriculture 12(5). 1986. pp.113-125

⁴⁰ **AKBARI.H**: *Shade trees reduce building energy use and CO₂ emissions from power plants* Environmental Pollution, vol 116, pp: 119–126 USA 2002.

Auteur	Année/Lieu	Type de plantes	Paramètres mesurés	Résultats
Hoyano	Fukuoka City, Japon 1988	Glycine, écran solaire horizontal	Températures de surface en haut et en bas de l'écran	T° plus élevée de 2°C en haut de l'écran solaire
	Université de Kyushu, Japon 1988	Ecran solaire de vigne orienté Sud-Ouest (incliné à 35% vers le soleil) sur un balcon	Véranda avec et sans écran solaire de vigne Temp surfacique, Temp de l'air, temp du feuillage, Rayonnement solaire.	Véranda sans écran de vigne plus chaude de 1-3°C Variations journalières de l'insolation : avec écran: 25%. sans écran: 40%.
	Tokyo, quartier résidentiel Japon 1988	Lierre japonais couvrant un mur orienté Ouest	Mur avec et sans lierre durant la saison estivale Temp -Flux de chaleur	Avec lierre, temp surfacique moins chaude de 1°C Sans lierre: un flux de chaleur max de 200kcal/m²h est ransféré Avec lierre il est réduit de 1/4
Irfan, Zahoor, Khan	Kaizuka Japon 1988	Plantes à feuillage persistant près du mur ouest en béton	5 échantillons avec différentes distances de plantations entre l'écran et le mur Temp surfaciques int et ext Flux de chaleur	Temp surfacique de la partie exposée est plus élevée qu'aux autres parties d'environ 3°C Sans écran : flux de chaleur 100kcal/m²h Avec écran : 50kcal/m²h
	Lahore, Pakistan 1996	Aucune espèce particulière d'arbre	Facteur d'ombre Température	Réduction de temp interne de 2,4°F
Akbari et al	Sacramento, Californie 1997	16 Arbres sur la façade Sud et Ouest	Temp surfaciques int et ext, Hr int et ext , insolation, Vitesse et direction du vent	Economie d'énergie de 30%
Di et Wang	Chine 1999	Mur ouest couvert de lierre à l'université de Tsinghua	Températures du lierre et du mur. Mur avec et sans lierre.	Temp des feuilles plus basse que le mur nu de 4.5°C Réduction de 28% de la charge de refroidissement estivale. Flux de chaleur mur vert = 1/2 que celui du mur nu

Auteur	Année/Lieu	Type de plantes	Paramètres mesurés	Résultats
Brad et al	Totonto 1999	Variété de vignes	Temp surfacique sur le mur ouest	Temp du mur nu plus élevée de 16°C
Zaiyi et Niu	Hong Kong 2000	Lierre	Densité végétale Rapport de couverture Temp-Hr	Réduction du flux de chaleur jusqu'à 37% . Le lierre transforme plus de 70% d'énergie solaire absorbée.
Sandifer et Givoni	Los Angeles 2000	Variété de vignes	Panneau en aluminium, en stuc et en brique Temp surfacique	vignes cultivées contre une surface de bâtiment à une épaisseur de 30-35 cm peuvent ramener la temp de surface au niveau, ou légèrement en dessous, de la temp de l'air ambiant.
Cantuaria	Londres 2000	Vigne vierge recouvrant le mur	Mur avec et sans vigne	Temp du mur couvert de vigne plus basse que le mur nu de 10°C
Papadakis et al	Athènes, Grèce 2001	Arbres à feuilles caduques	Mur avec et sans ombre des arbres	la surface non ombragée a eu plus de deux fois de rayonnement net et de flux thermique que la surface ombragée.
Lam et al	Université de Brighton. 2004-2006	Vigne vierge de Virginie	Température et Humidité Relative	Transmission des rayons solaires par le Feuillage : 0,43 pour une feuille simple et 0,14 pour cinq couches de feuilles. une seule couche de feuillage peut réduire le rayonnement solaire de 37% . Ecart d'humidité = 10,4% Réduction de 4-6°C aux pics de temp d'été

Tableau IV-2 : Résumé des différentes expériences sur l'impact de la végétation sur le confort des bâtiments (Source : Auteur)

Conclusion :

Avec la crise énergétique, le recours aux procédés passifs a connu un essor de plus en plus amplifié. De ce fait, l'utilisation de la végétation comme dispositif de rafraîchissement ou de chauffage pour améliorer le microclimat des bâtiments a été étudiée par bon nombre de chercheurs partout dans le monde. Bien que leurs méthodes varient, presque tous les résultats ont confirmé que l'usage de la végétation autour des bâtiments présente un intérêt sûr dans l'économie d'énergie et procure des ambiances confortables pour les occupants.

Un arrangement approprié des écrans végétaux sur des bâtiments prouve non seulement des effets psychologiques mais améliore également les conditions microclimatiques défavorables. De plus, des plantations sélectives peuvent protéger non seulement les ouvertures, mais aussi les murs extérieurs et les toits en réduisant les transferts conductifs et les gains par rayonnement.

Quantitativement, l'effet des murs végétalisés sur le microclimat des bâtiments dépend de la densité et de l'épaisseur de la couche de feuillage et de la surface ombrée. Ces propriétés changent avec la typologie des plantes et avec les saisons. De plus, la couleur et le revêtement du mur et la distance entre le mur et la végétation sont ainsi des paramètres très importants.

Comme il a été démontré dans les études expérimentales récapitulées ci-dessus, les plantes grimpantes, les arbres et les arbustes autour des bâtiments peuvent en réalité abaisser la température de l'air, les températures surfaciques près des parois du bâtiment ainsi que la température d'intérieur et la charge de refroidissement durant les saisons chaudes grâce à l'ombrage et à l'évapotranspiration. En hiver, elles peuvent aussi être utilisées efficacement comme protection contre le vent, ce qui contribue à la réduction des charges du chauffage.

Enfin, pour pallier au besoin de refroidissement et à l'amélioration thermique de l'environnement intérieur des bâtiments, cette stratégie s'est avérée la plus prononcée dans des climats chaud-arides où les meilleurs résultats ont été obtenus. Toutefois, dans un climat chaud et humide, le potentiel d'isolation de la végétation peut anéantir l'effet de refroidissement passif dû à la réduction de la vitesse d'air intérieur.

Or dans un climat comme celui de Constantine, rares voire inexistantes sont les recherches traitant l'impact des plantes sur le confort intérieur des bâtiments. Alors, c'est ce que nous allons essayer d'aborder dans la partie pratique de notre recherche, en évaluant le confort des logements sous l'effet de l'écran végétal dans un tel climat.

Introduction :

Dans le chapitre précédent, nous avons souligné la convergence des différentes expériences sur les critères et méthodes d'évaluation de l'impact de l'écran végétal sur le confort hygrothermique des bâtiments tels que la comparaison entre le mur végétalisé et le mur nu, avec la mesure de certains paramètres à savoir : la température, l'humidité relative, etc.

A partir de ces éléments, et afin de concrétiser l'objectif de cette recherche qui rappelle le, consiste en l'évaluation de l'effet de la végétation sur le confort des bâtiments sous le climat de Constantine, une campagne de mesures a été effectuée sur site, pour laquelle des échantillons représentatifs ont servi de support à l'analyse du comportement thermique de ces derniers, sous l'effet de l'écran végétal.

Pour ce faire, les développements qui suivent abordent à la fois l'identification du climat de Constantine, le descriptif et la présentation du cas d'étude ainsi que la méthodologie de travail employée.

1. Rappel des hypothèses de l'étude :

Il y a lieu de rappeler d'abord les hypothèses de notre recherche.

- Hypothèse principale :

- La végétation attenante aux bâtiments constitue une protection saisonnière susceptible de remédier aux problèmes liés aux surchauffes, procure de l'ombrage et réduit donc l'insolation directe sur les bâtiments. Elle constitue, par conséquent, une stratégie efficace de rafraîchissement sous le climat de la ville de Constantine.

- Hypothèses secondaires :

- La vapeur d'eau émise par évapotranspiration des feuilles de la végétation grimpante permet de rafraîchir l'air ambiant à côté du bâtiment (joue un rôle d'enveloppe thermique complémentaire) et par conséquent, concourt à la régulation de l'ambiance hygrothermique intérieure.
- De part sa densité, la vigne vierge vraie constitue un dispositif performant d'ombrage saisonnier et de rafraîchissement en période estivale comparée aux autres plantes grimpantes. Plus le feuillage est dense, plus grande est sa performance thermique sur l'ambiance intérieure.

2. Objectif de l'étude:

Cette investigation vise l'évaluation d'impact de la végétation grimpante sur le confort hygrothermique estival des bâtiments et par conséquent sur le confort des individus et la démonstration qu'un simple écran végétal placé à proximité d'une façade d'un bâtiment peut réguler considérablement le confort intérieur et permet ainsi d'obtenir des économies d'énergie.

3. Technique et méthode d'investigation :

Pour ce qui est de l'outil d'investigation, (voir le chapitre IV), Il existe plusieurs techniques et méthodes d'évaluation du confort thermique des bâtiments sous l'effet de la végétation telles que :

- Les méthodes de calcul basées sur l'usage de formules et d'équations mathématiques.
- Les mesures in situ sur modèle réel.
- Les simulations informatiques à l'aide de différents logiciels tels que : DAINE VISUAL, DEROB,...

Pour notre cas, comme ces outils de simulation traitant l'élément végétal ne sont pas disponibles, nous avons eu recours au deuxième outil de recherche qu'est les mesures in situ en collectant plusieurs paramètres dans le but d'évaluer le confort hygrothermique des maisons sous l'effet de la végétation dans la ville de Constantine. D'ailleurs, concernant la technique de mesure, nous nous sommes inspirés de l'expérience de Wong en 1999 et Lam en 2004 (voir chapitre IV). De plus, une simulation à l'aide du logiciel TRNSYS a été entamée afin de valider les résultats de terrain.

Par conséquent, on s'est trouvé incités à l'élaboration d'une approche analytique du climat de la ville afin d'identifier les différents facteurs influents ce dernier, de le classer et d'aboutir également à des recommandations qui peuvent éventuellement dicter des principes de base de la conception bioclimatique. Cette approche a été basée sur des méthodes d'analyse climatiques et bioclimatiques universelles.

4. Présentation et situation de la ville :

La ville de Constantine se situe entre la latitude $36^{\circ}17'$ et la longitude $6^{\circ}37'$ ¹ en plein centre de l'est algérien. Chef lieu de wilaya, la ville est située en altitude (694 m) sur un étroit plateau rocheux (fig V-1).

La situation de Constantine, dans une zone limitée au sud par le Sahara avec son climat continental et au nord par la méditerranée avec son climat tempéré, lui permet d'avoir des caractéristiques spécifiques.



Figure V-1: Situation de la ville de Constantine
(Source : ENCARTA, 2007)

5. Analyse des éléments du climat :

D'après le zonage de la figure V-2 et V-3, la ville de Constantine fait partie de la zone climatique **E2** (zone d'été) et **H2a** (zone d'hiver) déterminée par deux saisons principales :

- Un été plus chaud et moins humide où l'écart de température diurne est important.
- Un hiver froid, avec un écart de température diurne important².

¹ CAPDEROU.M: "*Atlas solaire de l'Algérie*" Tome 2: Aspect énergétique. OPU Alger, 1985, p 39.

² Ministère de l'habitat : « *Recommandations Architecturales* » ENAG éditions, Alger 1993, p 9.

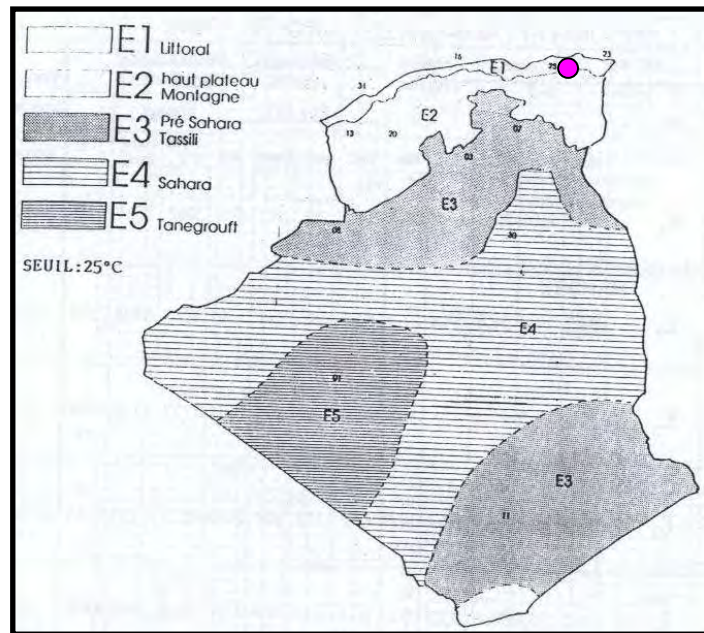


Figure V-2 : Zones climatiques d'été
(Source : ENAG, 1993)

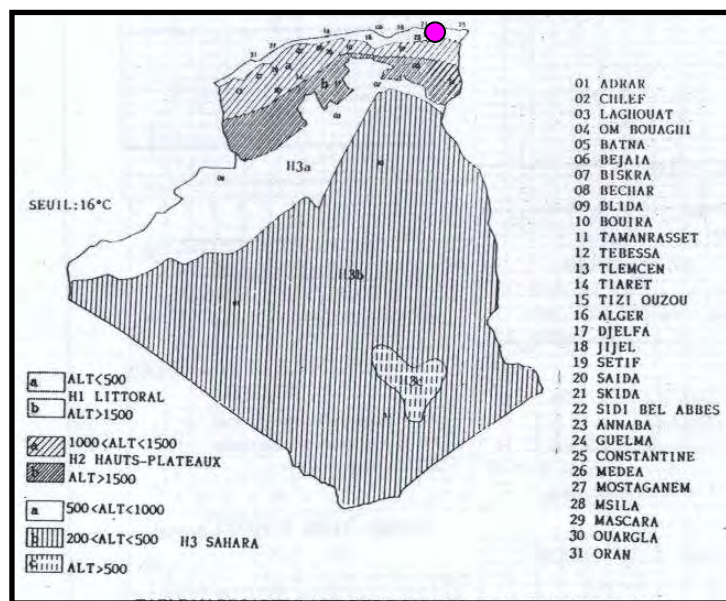


Figure V-3 : Zones climatiques d'hiver
(Source : ENAG, 1993)

De nombreux paramètres sont à prendre en compte si l'on veut faire une analyse très détaillée de l'influence du climat sur l'ambiance intérieure : la vitesse du vent, la température de l'air, l'humidité relative, le rayonnement solaire...

5.1. La température de l'air :

Définie comme étant une grandeur physique qui indique le taux d'échauffement et de refroidissement de la surface de la terre³. Selon la figure V-4, issue des données météorologiques de la ville de Constantine (période 1996-2005), on peut distinguer que l'évolution des températures moyennes mensuelles est régulière. La température moyenne annuelle est de **16,3°C** avec une minima de **7.5°C** en janvier (le mois le plus froid) et une maxima de **26.8°C** en août (le mois le plus chaud). Les amplitudes journalières ne sont pas trop contrastées, par contre l'amplitude annuelle entre le mois le plus chaud et le mois le plus froid est de **19.3°C**, d'où deux périodes sont distinctes.

- Une saison chaude et sèche s'étalant du mois de juin jusqu'au mois de septembre avec des températures moyennes comprises entre 22.3°C et 26.8°C. Les températures mensuelles diurnes sont importantes où la température la plus élevée (la max des maximales) de 34,5°C est enregistrée au mois de juillet. Les températures moyennes nocturnes restent très douces voire fraîches pendant cette période allant de 16°C au mois de juin et septembre jusqu'à 19,1°C pour le mois d'août.
- Une longue saison froide s'étalant d'octobre jusqu'au mois de mars avec des températures variant de 7.5°C à 13.4°C, où les températures mensuelles diurnes sont assez basses (la min des maximales est de 12.3°C) au mois de janvier, tandis que les températures mensuelles nocturnes sont assez basses voire fraîches, la min des minimales est de 2.6°C enregistrée au mois de février (le mois le plus froid).

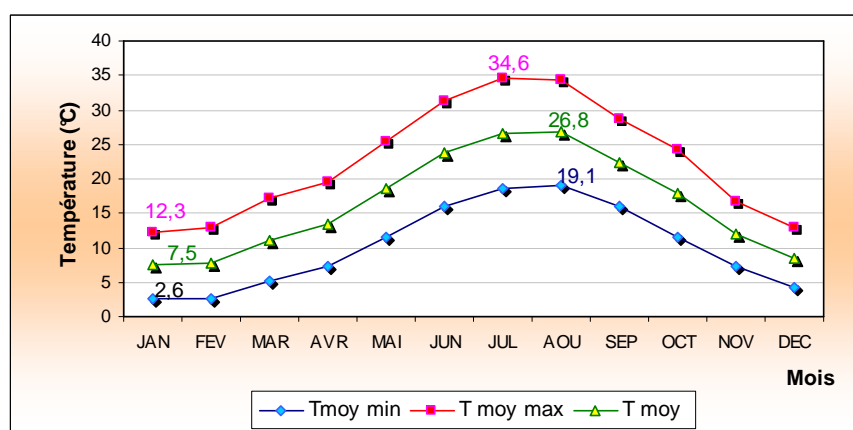


Figure V-4: Variation des Températures de l'air extérieur (Période : 1996-2005)
(Source : Office National Météo Constantine)

³ CRAU (Centre de recherche en architecture et en urbanisme El Harrach. En collaboration avec l'université des nations unies UNU) : « *Village solaire intégré* ». Edition OPU.1988.

5.2. Le rayonnement solaire :

A Constantine, la durée d'insolation est très importante durant toute l'année d'une moyenne de 234,5 h avec un minimum de 151h enregistré en décembre et un maximum de 332h enregistré au mois de juillet (fig V-5). Ces valeurs montrent que l'intensité des radiations globale augmente durant la période chaude et sèche et diminue pendant la période froide et humide. Ce qui incite l'intégration des procédés solaires passifs dans les bâtiments résidentiels et tertiaires.

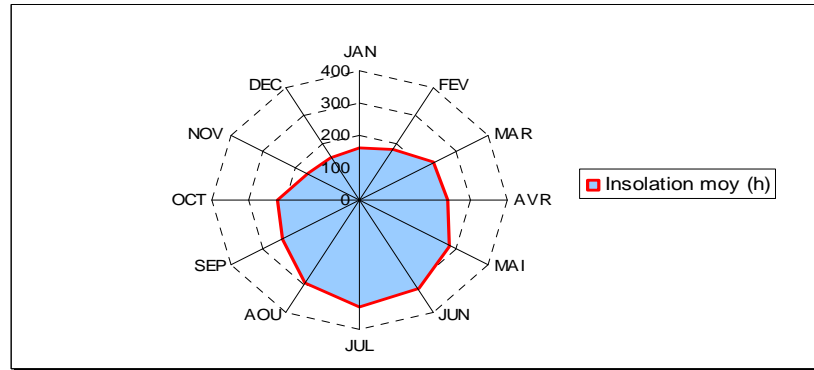


Figure V-5: Durées d'insolation de la ville de Constantine Période « 1996-2005 »
(Source : ONM Constantine)

5.3. L'humidité relative :

La courbe des humidités relatives croit dans le sens inverse de celle des températures et des radiations solaires. La moyenne annuelle des humidités relatives est de 65.05 % (figure V-6).

Les humidités les plus élevées correspondent aux mois les plus froids et vice versa; ce qui suggère que le climat de la ville de Constantine soit humide et froid en hiver avec une moyenne de 76,4% pour le mois de décembre et assez sec et chaud en été avec une moyenne de 49,65 % pour le mois de juillet.

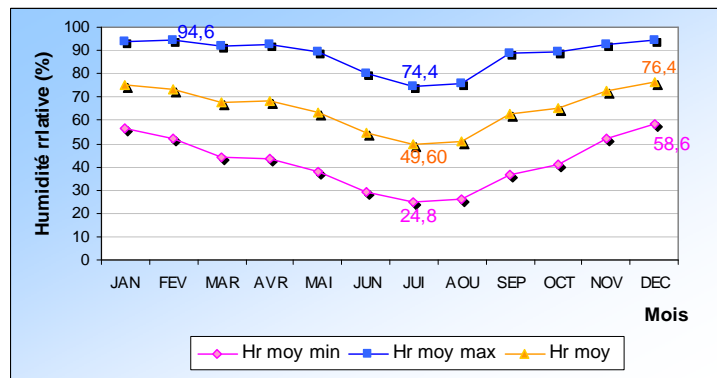


Figure V-6: Variation de l'Humidité relative (période : 1996-2005)
(Source : O.N.M Ain el bey Constantine)

La moyenne mensuelle atteint une valeur maximale de 76,4% au mois de décembre pour le mois le plus humide et une valeur minimale de 49,56 % au mois de juin pour le mois le plus sec.

5.4. Les précipitations :

Les précipitations sont considérées comme un élément déterminant dans la classification du climat. De ce fait, la lecture de l'histogramme des précipitations de la ville de Constantine (fig V-7) nous fait part d'une irrégularité des précipitations avec une pluviosité annuelle moyenne de 535,3mm.

La répartition annuelle de ces dernières est marquée par une courte période de sécheresse s'étalant du mois de juin jusqu'au mois d'août. Avec un minimum de 5,6mm, enregistré au mois de juillet (le mois le plus sec) durant lequel, les précipitations sont très faibles et tombent sous forme d'orage.⁴

Le reste paraît humide avec un maximum de 83,9 mm enregistré au mois de décembre (le mois le plus pluvieux).

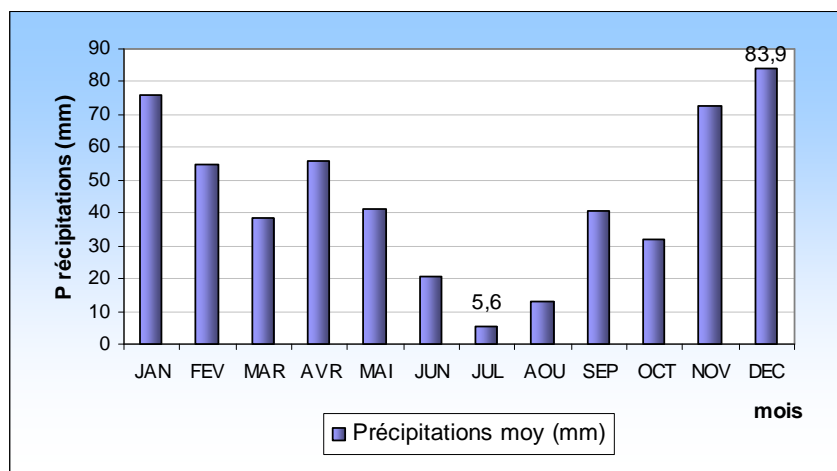


Figure V-7 : Précipitations de la ville de Constantine (période : 1996-2005)

(Source : ONM Constantine)

5.4* Détermination de la zone climatique de la ville de Constantine :

En appliquant la formule de De Martonne :

$$I_m = P / (T + 10) \dots\dots\dots [1]$$

⁴ 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. 43

Où : I_m est l'indice d'aridité, P : précipitation annuelle, T : température moyenne annuelle, on obtient un $I_m=20$, donc : $10 < I_m < 20$

De part cette valeur calculée de l'indice de ED Martonne, la ville de Constantine est classée comme région à climat **semi aride**.

5.5. Le vent :

Caractérisé par sa direction et sa vitesse, le vent est un paramètre important dans les échanges par convection et par évaporation. D'après la figure V-8, les vents qui prédominent à Constantine sont variables, assez faibles à moyens d'une vitesse moyenne de 2,6 m/s avec une valeur minimale correspondant au mois de septembre atteignant 2,1 m/s et une valeur maximale de 2,9 m/s enregistrée aux mois de février, avril et décembre ; cette période correspond à la période froide de l'année.

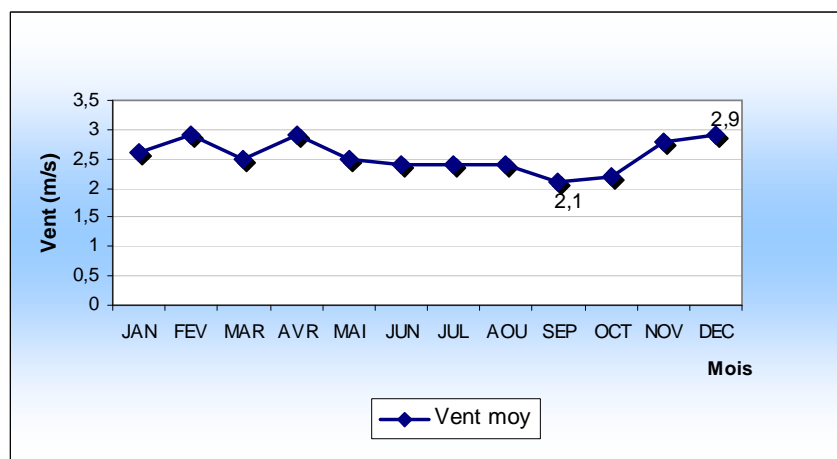


Figure V-8: Variation de la vitesse moyenne des vents (période : 1996-2005)
(Source : ONM Constantine)

Quant à la direction des vents, elle diffère selon la saison (Tableau V-1):

- les vents froids d'hiver proviennent du Nord et Nord-ouest
- les vents chauds et secs d'été proviennent du Nord et Nord-ouest

S-O	N-O	N-O	N-O	N-O	N	N	N	N	N-O	O	S-O
2.6	2.9	2.5	2.9	2.5	2.4	2.4	2.4	2.1	2.2	2.8	2.9
↗	↘	↘	↘	↘	↓	↓	↓	↓	↘	→	↗

Tableau V-1 : Vitesse et direction des vents à Constantine (période 1996-2005)
(Source : ONM Constantine)

5.6. Le diagramme ombrothermique:

D'après le diagramme ombrothermique de la ville de Constantine (fig V-9), il en ressort deux périodes distinctes :

- Une période froide et humide correspondant au mois d'hiver s'étalant du mois de novembre au mois d'avril.
- Une période chaude et sèche s'étalant du mois de mai jusqu'à octobre.

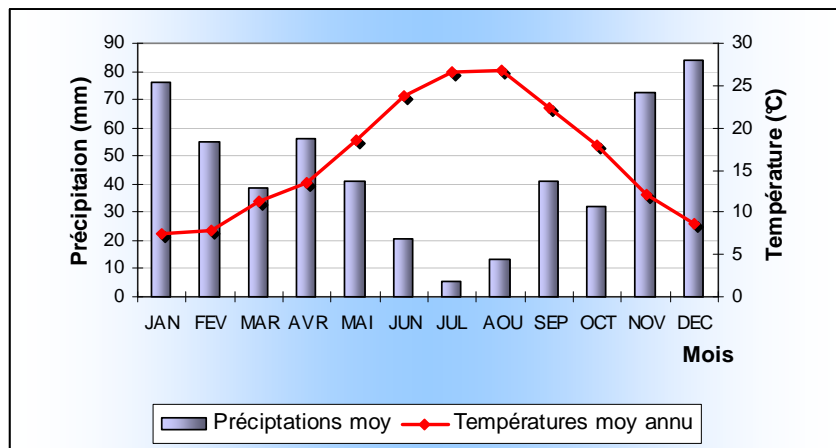


Figure V-9: Diagramme ombrothermique de la ville de Constantine

(Source : ONM Constantine)

6. Analyse bioclimatique de la ville de Constantine :

L'analyse bioclimatique repose essentiellement sur l'analyse des données climatiques de la ville de Constantine en exploitant les tableaux de Mahoney, les diagrammes psychrométriques de Givoni et notamment de Steeve Szokolay pour ressortir enfin des recommandations conformes au climat de la région.

6.1. Application de la méthode de Mahoney :

En appliquant la méthode de Mahoney sur la ville de Constantine (voir annexe II) sous la latitude 36°17 Nord, maintes recommandations sont déduites :

- Orientation Nord – Sud (Grand axe Est – Ouest).
- Plan de masse et volume compact.
- Ouvertures de petite taille 15-25%.
- Murs extérieurs et intérieurs épais et à forte inertie (matériaux à grande capacité thermique).
- Toits massifs et bien isolés avec un temps de déphasage dépassant 8 heures.

- Espaces extérieurs pour terrasse est demandés, pour dormir le soir.
- Drainage adéquat des eaux pluviales.

6.2. Application de la méthode de Szokolay :

La méthode de Szokolay consiste à établir la zone neutre de confort en plus des différentes zones de contrôle potentiel selon les données climatiques propres à la région d'étude⁵. La lecture du diagramme psychrométrique de la ville de Constantine (fig V-10), fait ressortir deux périodes distinctes :

- **Une période chaude** : où les températures sont très élevées et l'humidité relative basse qui correspond aux mois de juin, juillet, août, durant laquelle un contrôle de la radiation par effet de masse avec une ventilation nocturne sont nécessaires.

Durant les périodes caniculaires, particulièrement pour les mois de juillet et août, il est nécessaire de rajouter un système de rafraîchissement par évaporation.

- **Une période fraîche** caractérisée par des températures basses, où le chauffage solaire passif ressort comme recommandation. On remarque bien qu'une infime partie de la saison hivernale se situe dans la zone de chauffage solaire passif pour les mois de mai et octobre où une bonne orientation, un bon dimensionnement des ouvertures suffiraient à ramener l'ambiance près de la zone de confort. Tandis que la majeure partie des mois d'hiver correspondant aux mois les plus froids : décembre, janvier et février, le confort thermique ne peut être atteint sans le chauffage d'appoint.

⁵ SZOKOLAY.S.V : « *Environmental science handbook for architects and builder* » the CONSTRUCTION PRESS, LACASTRE, London, New York. 1979, p263.

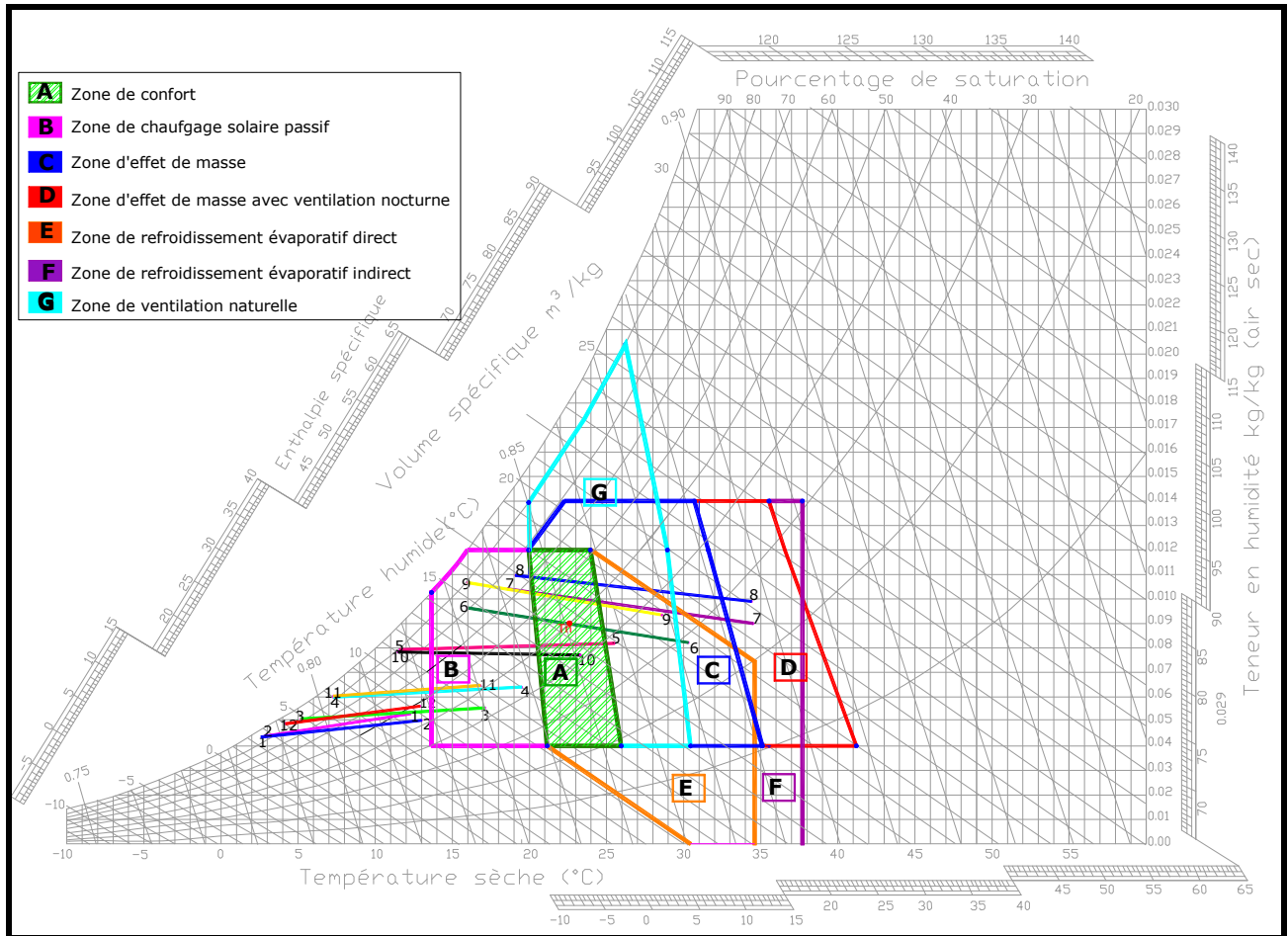


Figure V-10 : Diagramme psychrométrique de Szokolay appliqué à la ville de Constantine

(Source : Auteur)

6.3. Position du soleil à Constantine :

L'intensité des radiations solaires varie en fonction des durées d'insolation. Elle augmente durant la période estivale et diminue pendant la période hivernale. Ce qui montre que l'ensoleillement joue un rôle très important dans la variation de la température. Afin de connaître la trajectoire annuelle apparente du soleil dans la ville de Constantine (latitude $36^{\circ}17'$), nous avons procédé au calcul des hauteurs et des azimuts solaires pour le 21 de chaque mois indiqué dans le tableau V-2.

HEURE	ANGLE	21 JUIN	21 MAI	21 AVRIL	21 MARS	21 FEV	21 JAN	21 DEC
			21 JUILL	21 AOUT	21 SEPT	21 OCT	21 NOV	
12h	Hauteur	77° 16'	73° 91'	65° 38'	53° 23'	42° 49'	33° 69'	30° 38'
	Azimuth	00°	00°	00°	00°	00°	00°	00°
13h	Hauteur	71° 8'	69° 23'	62° 48'	50° 68'	40° 44'	30° 55'	28° 72'
	Azimuth	49° 46'	43° 25'	33° 16'	24°	19° 48'	16° 38'	15° 71'
14h	Hauteur	61° 16'	59° 24'	53° 7'	43° 88'	34° 71'	26° 94'	23° 99'
	Azimuth	71° 99'	66° 61'	55° 8'	43° 85'	36° 63'	31° 77'	30° 13'
15h	Hauteur	49° 37'	47° 63'	42° 66'	34° 41'	26° 35'	19° 43'	16° 79'
	Azimuth	84° 87'	80° 06'	71° 59'	56° 36'	50° 70'	44° 74'	42° 65'
16h	Hauteur	37° 23'	35° 58'	30° 90'	23° 48'	16° 27'	10° 12'	7° 79'
	Azimuth	94° 71'	88° 68'	83° 72'	70° 62'	62° 23'	55° 67'	53° 31'
17h	Hauteur.	25° 28'	23° 52'	18° 8'	11° 74'	5° 13'		
	Azimuth.	101° 48'	98° 89'	90° 0'	80° 27'	72° 61'		
18h	Hauteur.	13° 59'	11° 71'	6° 78'				
	Azimuth	109° 27'	106° 47'	99° 2'				
19h	Hauteur.	2° 46'	00° 39'					
	Azimuth.	117° 51'	114° 22'					
20h	Hauteur.							
	Azimuth.							
Angle horaire du soleil		70° 97'	73° 74'	90° 8'	90°	81° 89'	73° 74'	70° 1'
Levant & couchant		4h 71'	4h 91'	6h 06'	6h	5h 46'	4h 92'	4h 73'

Tableau V-2 : Hauteur et azimuth du soleil à Constantine (36°17')

(Source : Auteur)

La lecture du diagramme solaire de la latitude 36°17' Nord de la ville de Constantine (fig V-11), laisse apparaître que les trajectoires du soleil des mois de novembre, décembre et janvier, sont très rapprochées. Au solstice d'hiver (21 décembre), caractérisé par la journée la plus courte de l'année, le soleil se lève au Sud-est et plus exactement à l'azimut -60°, à 7h 15mn avec une hauteur de 0°. Jusqu'à 8h00 il n'est qu'à une hauteur de 8° où les rayonnements du soleil rasant l'horizon, et ce n'est qu'à partir de 8h30mn que le soleil atteint une hauteur de 15°, et peut constituer une incidence atteignant des façades d'immeubles.

Nous constatons également que l'altitude solaire à midi varie, entre 31° au solstice d'hiver et 77° au solstice d'été, c'est-à-dire avec un écart de 46° entre les deux solstices. Cet écart est en rapport direct avec les variations saisonnières de l'angle de déclinaison qui varie entre +23°27' et -23°27'. Le soleil passe près du zénith le 21 juin à midi lorsque les rayons solaires sont perpendiculaires au tropique du Cancer (latitude +23°27') car on se trouve dans

les basses latitudes ; et il est assez haut le 21 décembre à midi (hauteur 31°). Quant à l'écart saisonnier des azimuts du lever et du coucher du soleil, mesurés à partir de l'Est et de l'Ouest aux deux solstices, il est égal à $64^\circ,2$.

Aux équinoxes d'automne et de printemps, le soleil prend une position médiane entre les deux précédentes. Il se lève exactement à l'Est et se couche à l'Ouest (-90° et $+90^\circ$), la hauteur du soleil de l'Est est de 15° à 7h15 et à 16h 45. L'azimut atteint les $80^\circ 27'$ à 17h00.

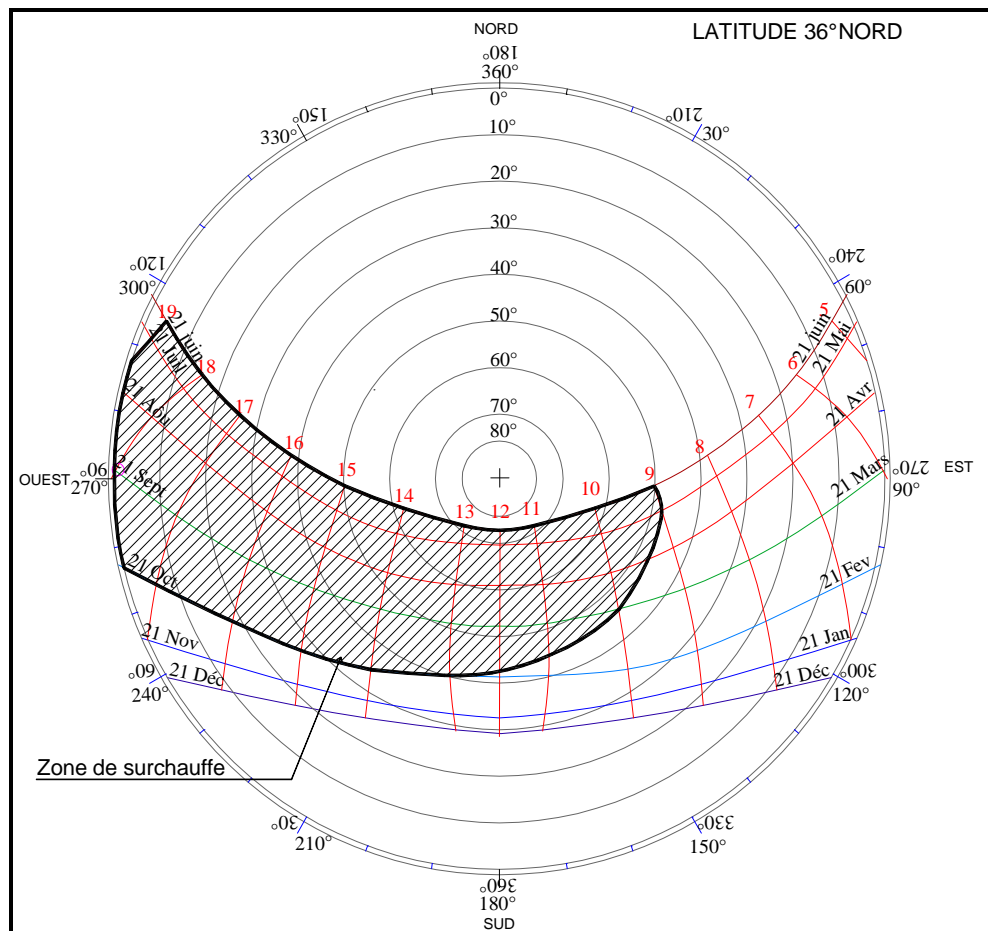


Figure V-11: Diagramme polaire de la ville de Constantine

(Source : Auteur)

6.4. Détermination des zones d'insolation et d'ombre :

Zone de surchauffe (isothermes de Constantine)

D'après le diagramme des isothermes de la ville de Constantine (fig V-12) cinq zones se distinguent :

- **Zone de sous chauffe très froide** : dans laquelle les températures sont inférieures à 10°C , elle englobe les mois de janvier, février, mars, novembre et décembre.

- **Zone de sous chauffe froide** : délimitée par les courbes 10° et 15°C, elle englobe principalement les mois d'hiver : mars, avril, mai, octobre et novembre où le chauffage passif pendant l'après midi est nécessaire.
- **Zone de confort** : comprise entre les courbes 15°C et 20°C, englobe les mois de mai, juin, septembre et octobre mais la tranche horaires diffère d'un mois à l'autre.
- **Zone chaude** : délimitée par les courbes 20°C et 25°C englobe le mois de mai, juin, et septembre.
- **Zone de surchauffe** : englobe les mois d'été (juin, juillet et août). De 10h jusqu'à 17h, les températures sont supérieures à 25°, à ce moment, le soleil est perpendiculaire, et son intensité est maximale, où on doit chercher le maximum d'ombre et de protection.

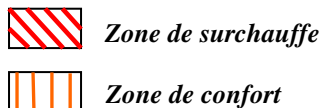
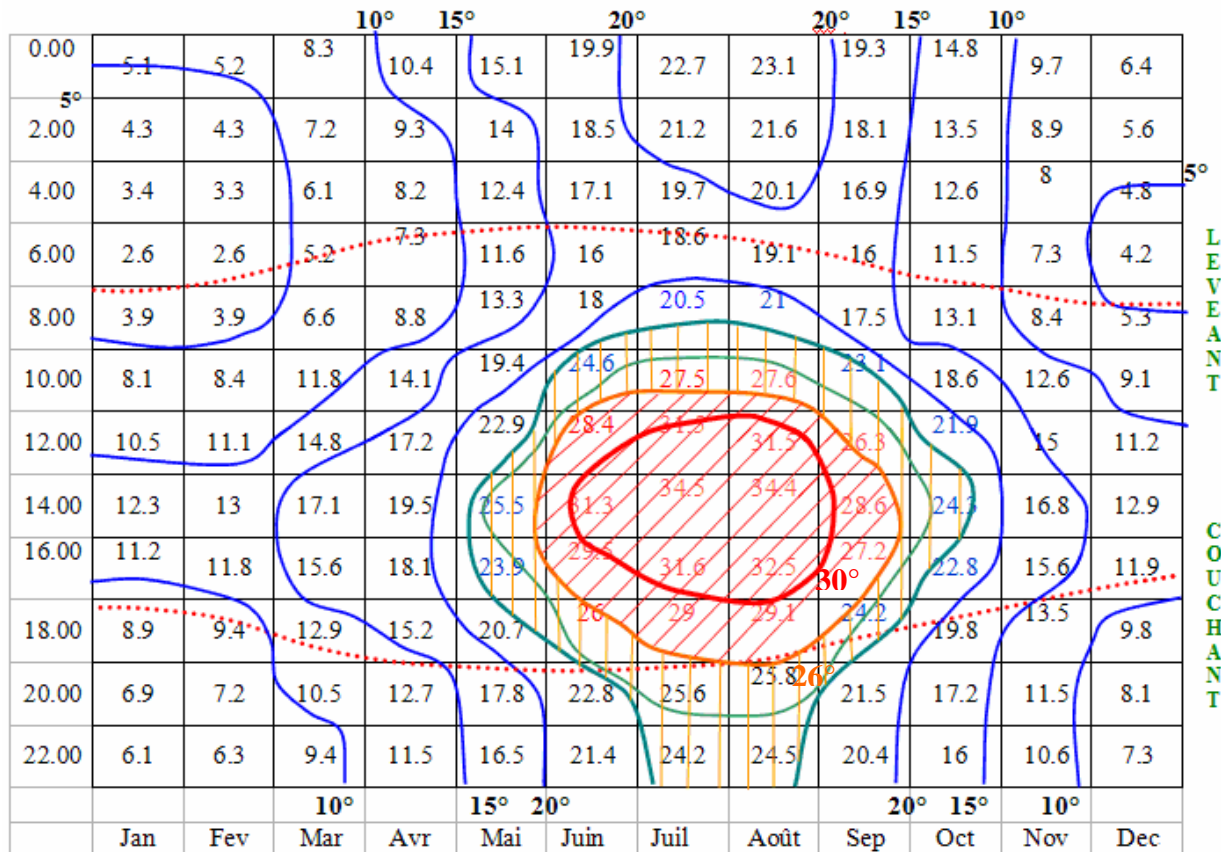


Figure V-12 : Isothermes de la ville de Constantine
(Source : Auteur)

7. Critères de choix du site :

Le choix du site de l'investigation s'est porté sur la cité El Bir, bourg situé dans la partie sud-ouest de la ville de Constantine (Photo V-1). Cette cité est constituée principalement de logements individuels positionnés dos à dos et desservis par des ruelles (un lotissement auto construit datant de l'époque coloniale). Aussi, la raison majeure du choix de ce site particulier réside dans le fait que celui-ci prédispose d'exemples concrets pouvant servir de modèle pour l'investigation, ainsi que dans la précieuse collaboration des propriétaires des maisons qui nous ont permis de mener à bien la campagne de mesure. Ce cas nous a paru, en fait, le plus représentatif de la ville de Constantine sachant la rareté des façades végétalisées où la plupart des plantes grimpantes sont généralement utilisées pour couvrir les murs de clôture.



Photo V-1: Vue aérienne du site d'étude
(Source : Google earth, 2007)

8. Critères de choix des échantillons :

Les échantillons objet de notre étude sont de type logements individuels. Ils ont été minutieusement sélectionnés et choisis dans un but de confirmer ou infirmer les hypothèses émises et par conséquent d'atteindre notre objectif. En effet, l'investigation s'est déroulée dans quatre (04) logements alignés situés sur le même pâté de maisons donnant sur la rue

Akabou (fig V-13 et photo V-2). En fait, on a cherché quatre types d'habitations répondant à des critères adaptés et fixés préalablement (mur couvert de vigne vierge vraie dense, mur couvert de vigne vierge vraie moyenne, mur nu et enfin mur couvert de vigne). Par ailleurs, le choix du nombre d'échantillons a été conditionné par le nombre d'appareils de mesure mis à notre disposition.



Figure V-13: Localisation des quatre échantillons testés
(Source : D.U.C)

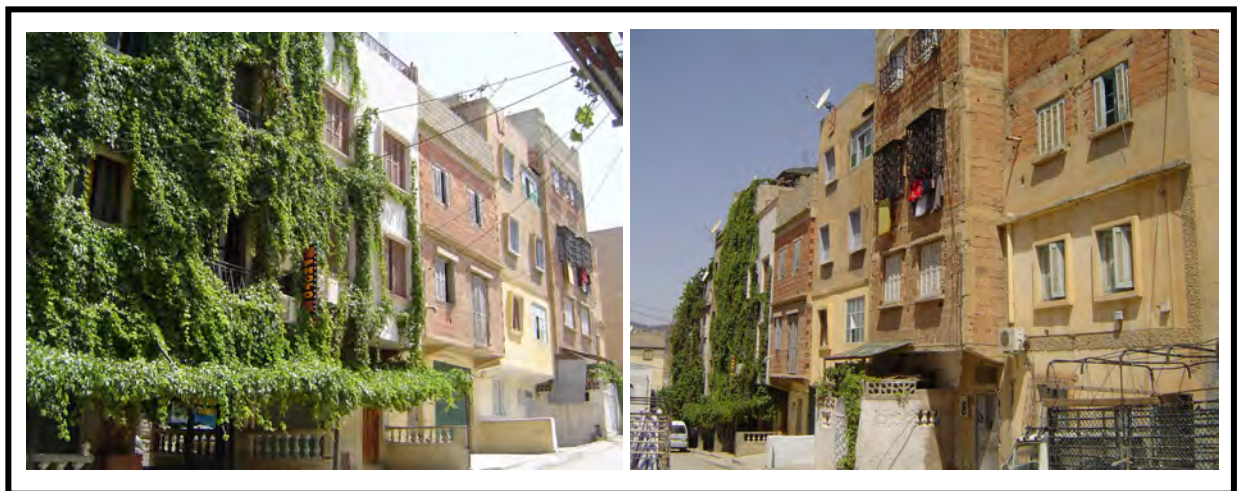


Photo V-2: Vues sur les différents échantillons testés
(Source : Auteur)

L'étude s'est fixée quelques paramètres communs entre les différents échantillons tels que : l'orientation et le matériau. En effet, tous les échantillons testés ont une seule façade orientée sud-sud-ouest donnant sur la rue d'un azimut égal à $+29^\circ$ (fig V-14), les autres sont complètement aveugles car mitoyennes. Ainsi, leur conception architecturale est identique à quelques différences près.

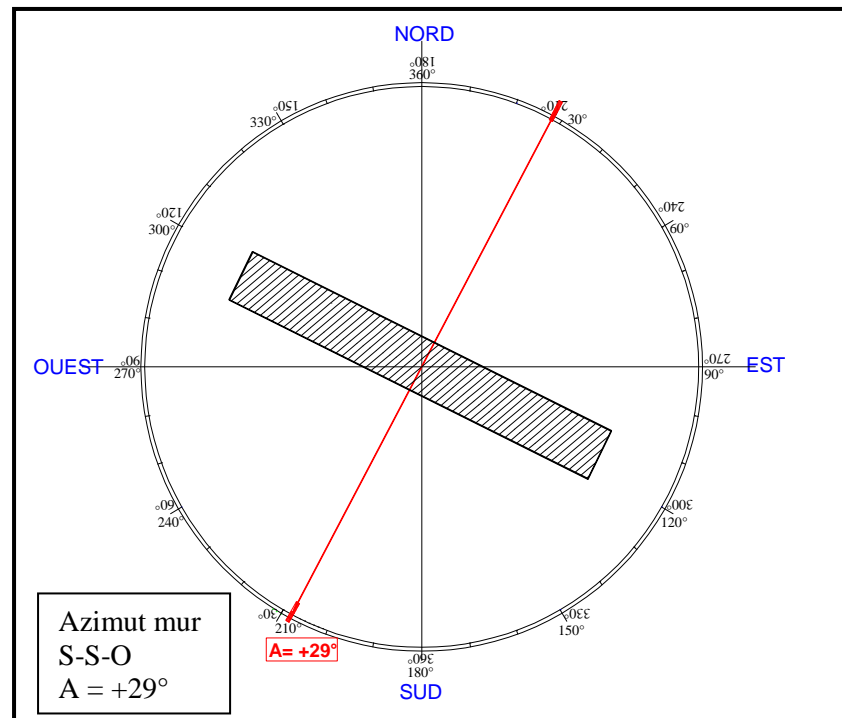


Figure V-14: Orientation des maisons testées et trajectoire solaire
(Source : Auteur)

- * L'irradiation solaire est maximale aux mois d'été et minimale durant les mois d'hiver.
- * Pour une paroi exposée Sud-ouest (fig V-15), symétriquement, l'irradiation maximale est atteinte à 14h30.
- * Au mois de juillet : l'irradiation solaire globale pour une paroi exposée Sud-ouest est de 3649 wh/m^2 . Elle atteint une valeur maximale égale à 535 wh/m^2 entre 14 et 15h, puis elle décroît pour atteindre une valeur minimale entre 6h et 7h égale à 49 wh/m^2 .

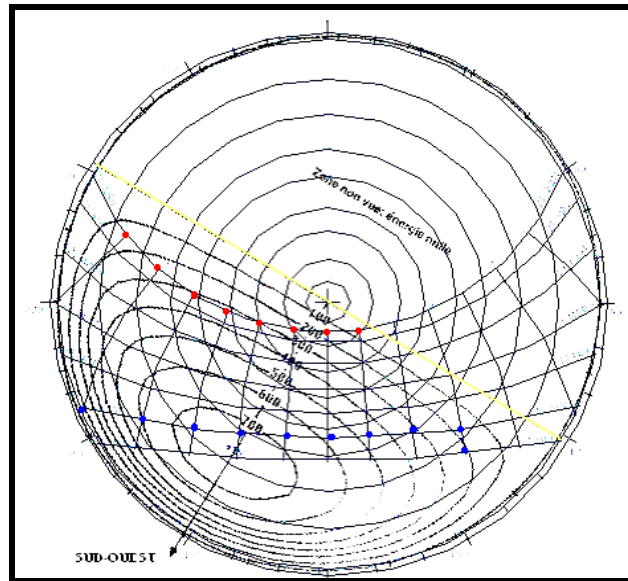


Figure V-15: Irradiations solaires sur une paroi verticale orientée Sud-ouest (azimut mur = 30)

Pour ce qui est du matériau, on a veillé à ce que les parois extérieures des quatre échantillons soient composées du même matériau en l'occurrence la brique creuse ayant une épaisseur de 22 à 24cm (fig V-16).

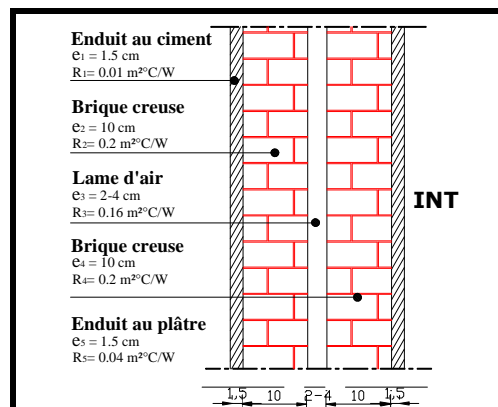


Figure V-16: Composition de la paroi extérieure
(Source : Auteur)

9. Conditions de déroulement des mesures:

Un étage intermédiaire est choisi pour les différents échantillons, dans un but d'avoir les mêmes conditions, de tester la paroi verticale et éliminer l'effet de la paroi horizontale. Les pièces testées ont les mêmes caractéristiques à des différences près (même orientation, matériaux, etc), En fait, le tableau ci-dessous résume les caractéristiques technologiques des différents échantillons.

Une tentative de mesures dans des échantillons orientés Nord-est avec végétation grimpante a été entamé, mais a été aussitôt interrompue et abandonnée car les résultats n'étaient pas significatifs.





	Récapitulation	Caractéristiques propres à chaque maison	Caractéristiques communes
Maison "A"		<p>Mur couvert de vigne vierge vraie</p> <ul style="list-style-type: none"> * Epaisseur feuillage = 20 à 30cm * Rapport de couverture = 100% - Epaisseur du mur ext = 22cm - Séjour testé d'une superficie de 15.41m² et un volume de 43.15m³ - Niveau : 2^{ème} étage. - Nombre d'occupants:5 - porte-fenêtre d'une surface de 2.64m² - Persiennes en bois de couleur vert foncé. 	<ul style="list-style-type: none"> - Une seule paroi exposée orientée sud-sud-ouest composée d'un doublage en brique creuse, d'une lame d'air, et enduit aux deux faces.
Maison "B"		<p>Mur nu</p> <ul style="list-style-type: none"> - Epaisseur du mur ext = 24cm - Chambre testée d'une superficie de 12,64m² - Niveau : 2^{ème} étage. - Nombre d'occupants: 3 - fenêtres moyennes d'une surface de 1.69 m². - Persiennes en bois de couleur gris clair. 	<ul style="list-style-type: none"> - Cloison en brique creuse de 10cm - Système constructif : Traditionnel (poteaux - poutres)
Maison "C"		<p>Mur couvert de vigne vierge vraie</p> <ul style="list-style-type: none"> * Epaisseur feuillage = 10 à 15 cm * Moins dense que l'écran « A » * Rapport de couverture = 80% - Epaisseur du mur ext = 24cm - Séjour testé d'une superficie de 12.07m² - Niveau : 2^{ème} étage. - Nombre d'occupants: 4 - Fenêtres moyennes d'une surface de 1.96 m². - Persiennes en bois de couleur gris clair. 	<ul style="list-style-type: none"> - Terrasse plate accessible - Plancher en corps creux (16+4cm) - Fenêtres avec ossature en bois et vitrage simple clair <p>R = 0,78 m²C/W</p>
Maison "D"		<p>Mur couvert de vigne d'ornement</p> <ul style="list-style-type: none"> - Epaisseur du mur ext = 23cm - Séjour testé d'une superficie de 14.74m² - Niveau : 1^{er} étage. - Nbre de personnes occupant l'espace:4 - Portes-fenêtres d'une surface de 2.53 m². - Persiennes en bois de couleur gris clair. 	<p>k = 1,28 W/m²C (voir détail calcul en annexe I)</p>

Tableau V-3: Récapitulatif des caractéristiques technologiques des différents échantillons

(Source : Auteur)

10. Descriptif des maisons testées :

La paroi extérieure (rugueuse) de la maison "A" peinte d'un gris foncé est totalement couverte d'un écran de vigne vierge vraie à l'exception des fenêtres afin de bénéficier de l'éclairage naturel (photo V-3 et V-4). L'épaisseur de la paroi extérieure est de 22cm et celle du feuillage étant d'environ 20 à 30 cm.



Photo V-3: Vues sur la maison "A"
(Source : Auteur)



Photo V-4: La vigne vierge vraie sur le mur de la maison "A"
(Source : Auteur)

Quant à la maison C, l'écran de vigne vierge vraie couvrant la façade est d'une épaisseur d'environ 10 à 15cm (tableau V-3). Contrairement à la maison "A", la paroi extérieure de la maison "C" est une surface lisse peinte en blanc crème, d'une épaisseur de 24cm. Pour l'étage testé, la paroi est partiellement couverte (rapport de couverture = 80%) avec une épaisseur de feuillage de 10 à 15 cm.

N'ayant aucun obstacle ou masque environnemental proche, la paroi extérieure de la maison "B" est totalement exposée (tableau V-3). Elle est peinte d'une couleur gris clair. La paroi extérieure a une épaisseur de 24cm.

Le type de plante constituant l'écran végétal de la maison "D" est la vigne d'ornement (voir chapitre 3 concernant les caractéristiques de la plante), couvrant une bonne partie des fenêtres et de la façade. La paroi extérieure a une épaisseur de 23 cm, d'une couleur gris clair du mortier de ciment (tableau V-3).

11. Choix des points de mesure et paramètres mesurés :

Il s'agit de mesurer simultanément les paramètres ayant une incidence sur le confort hygrothermique des maisons dans plusieurs endroits. D'ailleurs, le confort hygrothermique ne peut être estimé à partir du seul paramètre qu'est la température de l'air, mais fait intervenir plusieurs facteurs tels que l'humidité et la vitesse de l'air.

Comme le montre la figure ci-dessous, les mesures des différents paramètres ont été prises en six points, à la même hauteur. Ces points représentent le centre de l'espace testé (point1), la surface interne et externe du mur (points 2 et 3), le milieu de la couche des feuilles (point 4), 35 cm loin du mur (point 5), et 50 cm loin des feuilles (point 6). Le but de mesures des points 5 et 6 est de vérifier jusqu'à quelle distance s'étend l'effet de l'écran végétal.

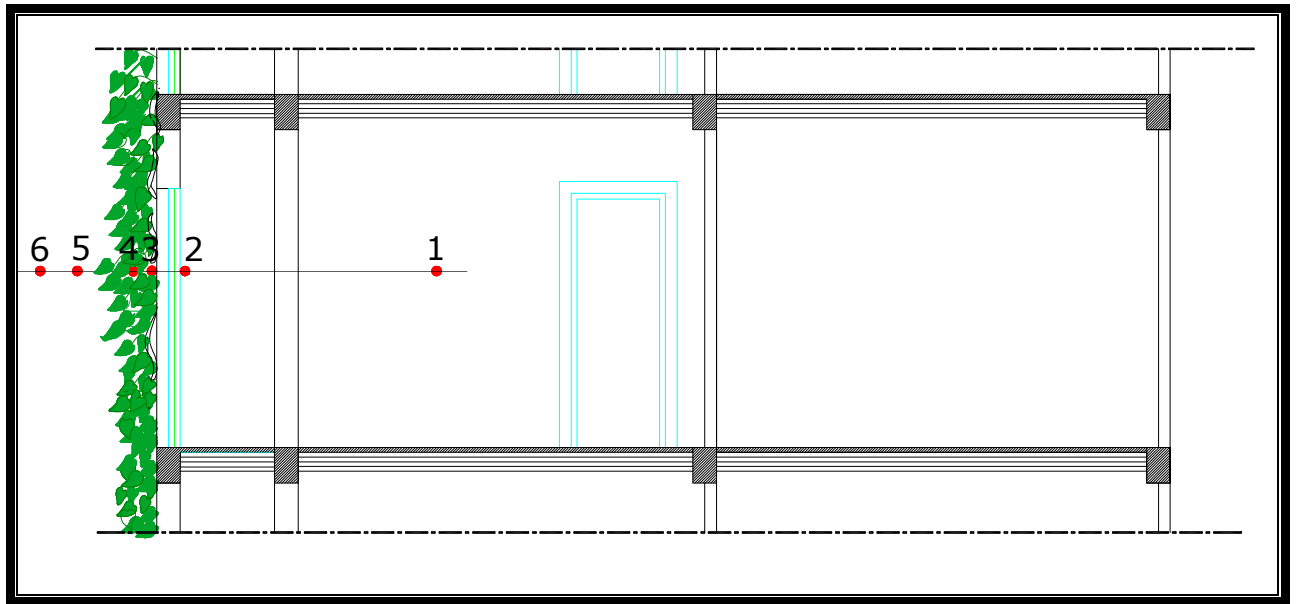


Figure V-17: Points de mesures dans la maison « A »

(Source : Auteur)

Ainsi, les points de mesures choisis et les mesures effectuées sont résumées dans le tableau V-4.

	Endroit	Paramètres mesurés
1	À l'intérieur de la maison	Température de l'air Humidité relative Vitesse de l'air
2	La surface interne du mur	Température surfacique
3	La surface externe du mur	Température surfacique
4	Ecran végétal (à l'intérieur de la masse foliaire)	Température de l'air Humidité relative
5	Espace près de l'écran végétal.	Température de l'air Humidité relative
6	Environnement externe	Température de l'air Humidité relative Vitesse de l'air

Tableau V-4 : Paramètres mesurés

(Source : Auteur)

12. Instrumentation utilisée :

Dans notre étude, les mesures de températures de l'air, les températures surfaciques, les humidités relatives et les vitesses de l'air internes et externes sont réalisées à l'aide de plusieurs appareils qui sont les suivants (photo V-5):

- **L'hygrographe** : appareil utilisé pour enregistrer l'humidité relative intérieure de la pièce testée, a été étalonné pendant 24 heures puis placé au centre de la pièce sur une table à 90 cm de hauteur afin de vérifier les relevés effectués par le thermocouple digital.
- **Les multimètres**, au nombre de deux placés au niveau de chaque maison pour mesurer les températures surfaciques intérieures et extérieures, à l'aide d'une sonde, sont placés au milieu du mur à une hauteur de 1.50 mètre.
- **La centrale Météo sans fil TERMOTECH-OTIO** : pour mesurer les paramètres météorologiques. Elle est constituée de baromètre, un indicateur d'orage, un hygromètre et un thermomètre intérieur et extérieur dont le degré de fiabilité du thermomètre est de ± 2 °C et celui de l'hygromètre est de $\pm 5\%$. Elle se compose de plusieurs émetteurs qui reçoivent les informations transmises par ondes radio par le thermomètre émetteur.
- **Le thermo-hygromètre** : un appareil digital du model TSE-1360 avec un degré de fiabilité de $\pm 3\%$ et ± 0.8 °C et dont les capacités sont représentés sur la photo V-8. Il permet à la fois de mesurer la température de l'air et l'humidité relative.
- **Un anémomètre** : un appareil de type compact testo 425 avec sonde fil chaud télescopique déportée pour mesurer la vitesse moyenne du vent à l'intérieur et à l'extérieur.

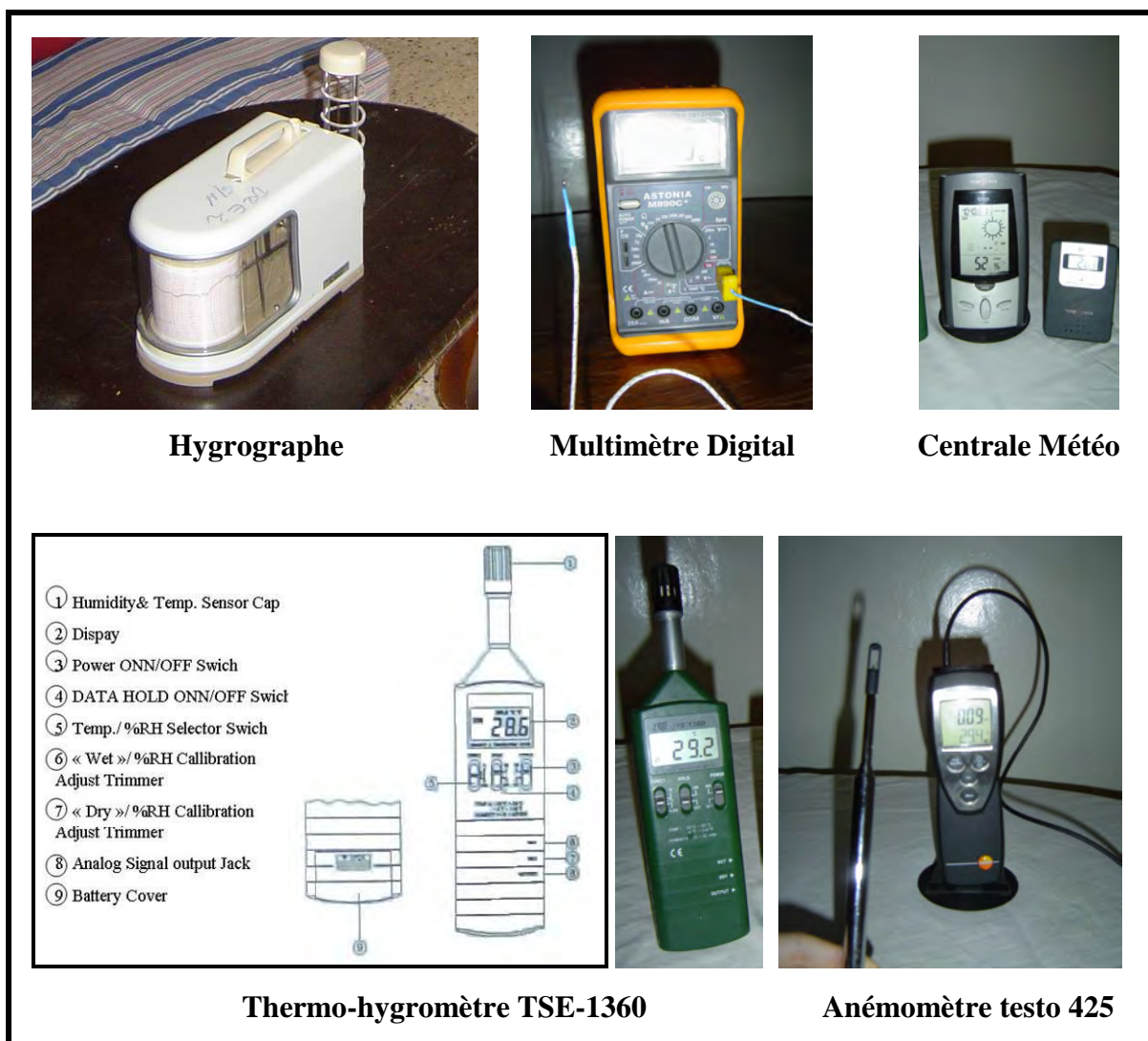


Photo V-5: Appareils de mesures utilisés

(Source : Auteur)

13. Choix de la période de mesure et son déroulement :

En fonction des résultats de l'analyse climatique et bioclimatique de la ville de Constantine, deux périodes critiques apparaissent ; une estivale et l'autre hivernale. Par ailleurs, la période de rafraîchissement représente les 2/3 de l'ensemble de l'année dans les conditions climatiques de Constantine⁶. Il est donc plus approprié de cibler la période de surchauffe pour déterminer les techniques de refroidissement passif qui aident à réduire les températures internes pour atteindre des ambiances confortables.

Les relevés de température, d'humidité et de la vitesse de l'air ont été, ainsi, effectués durant deux périodes des mois de juillet et août 2007 (période défavorable de l'été).

La campagne de mesure de température de l'air, des températures surfaciques, de l'humidité relative, et de la vitesse de l'air, a été effectuée in situ pendant quatre (04) jours successifs durant le mois de juillet (7-8-9-10) et trois (03) jours durant le mois d'août (14-15-16).

En période de juillet, les relevés de températures et de l'humidité des trois échantillons ont été pris dans les maisons "A", "B" et "C" simultanément jour et nuit sauf les mesures de nuit (température de surface et humidité relative) de la maison "C" qui n'ont pu être effectuées faute d'appareillage. Les données ont été notées et enregistrées sur un canevas préétabli par l'auteur.

Quant à la seconde campagne de mesure au mois d'août concernant les maisons "A" et "D", les relevés bi horaires ont été pris simultanément.

⁶ BOUCHAHM.Y: "investigation sur la performance thermique du capteur à vent pour un rafraîchissement passif dans les régions chaudes et arides: Cas de Ouargla" Thèse de doctorat d'état Université de Constantine. 2004 ,p33.

14. Scénarios spécifiques aux pièces testées:

14.1. Maison "A" :

Dans la maison "A", le séjour est retenu pour l'investigation. Il est de forme rectangulaire avec une superficie de 15.41m² (fig V-18). Le séjour possède une fenêtre de 2.64m² donnant sur la rue, une porte qui donne sur le couloir, et une lucarne donnant sur la chambre, utilisée pour des raisons de ventilation et d'éclairage. Les murs intérieurs sont peints en beige (facteur de réflexion = 0.30).

Quant à l'aménagement de la pièce, il est constitué d'un meuble et d'un appareil téléviseur, un vaisselier, une table basse et des banquettes avec matelas et représenté dans la photo V-6.

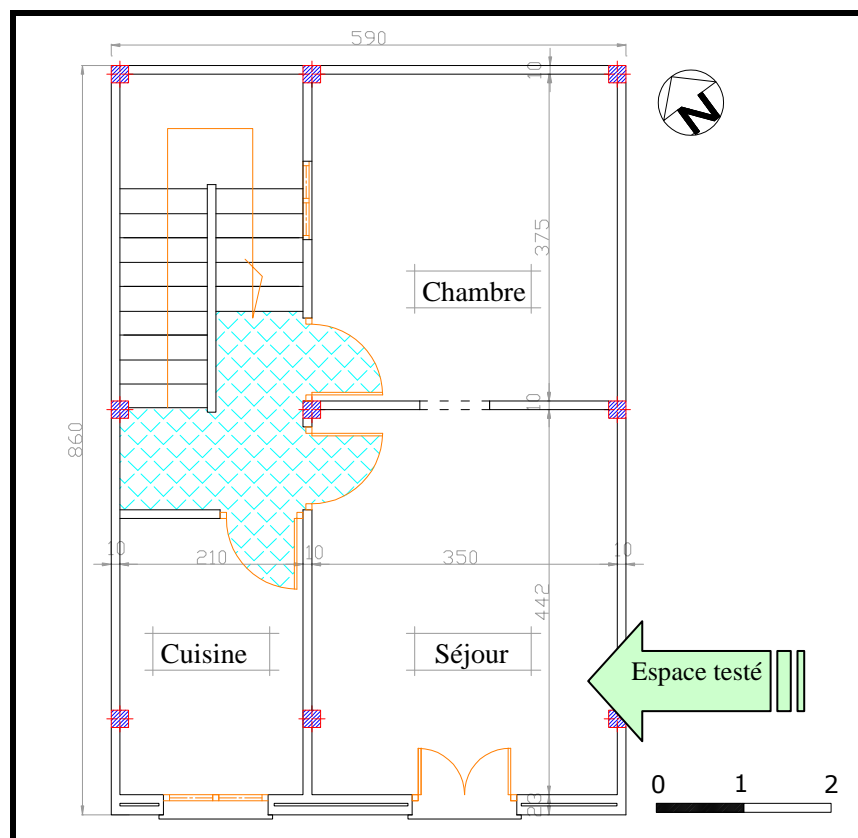


Figure V-18: Plan d'étage de la maison "A"

(Source : Auteur)

La famille occupant la maison "A" est constituée de quatre ménages occupant chacun un étage. Notons que les différents étages de la maison "A" sont identiques excepté le rez de chaussée qui est occupé par des commerces.

L'espace testé est situé au deuxième étage. Occupé par cinq personnes, le séjour demeure l'espace le plus occupé et le plus fréquenté dans la maison du fait qu'il possède une ouverture donnant sur l'extérieur, utilisé ainsi comme espace d'accueil, où la famille se regroupe, pour regarder la télévision et pour dormir.

La persienne et le vitrage reste ouverts durant toute la matinée jusqu'à 11h00 puis ils sont fermés pour occulter l'espace. A 18h00, quand les températures extérieures commencent à diminuer, ils sont ouverts à nouveau jusqu'à minuit. La porte du séjour est maintenue ouverte à longueur de journée. Par contre à partir de minuit, elle est refermée car l'espace est utilisé pour dormir.



Photo V-6: Aménagement de la pièce testée dans la maison "A"

(Source : Auteur)

14.2. Maison "B" :

Occupé par 3 personnes, l'espace testé dans la maison "B" est la chambre 1 située au 2^e étage (fig V-19). Le 1^{er} et le 3^{ème} étage sont aménagés en séjour et chambres, quant au rez de chaussée, il est aménagé en cuisine et sanitaires. La chambre testée a une forme rectangulaire d'une superficie de 12.64m², dont les murs sont peints en blanc. Elle possède une fenêtre et deux portes, une qui donne sur le couloir, l'autre sur une autre chambre. La fenêtre est d'une superficie de 1.69m² donnant sur la rue. L'aménagement de la pièce comporte : un meuble TV, et des banquettes avec matelas (photo V-7).

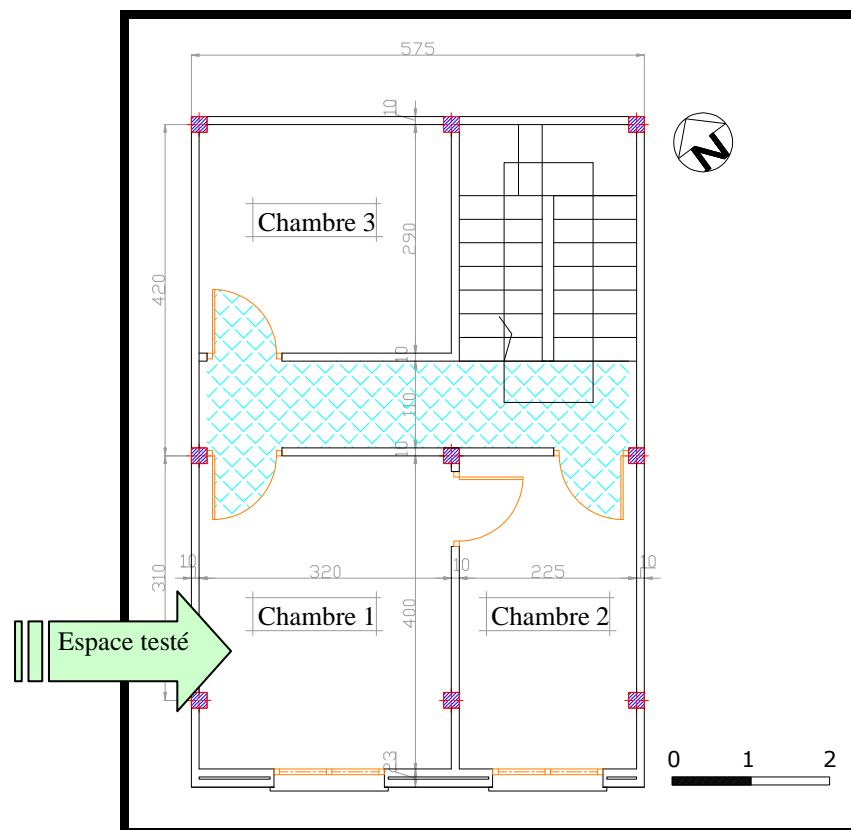


Figure V-19: Plan d'étage de la maison "B"

(Source : Auteur)

Le matin à partir de 9h00 ; moment des taches ménagères, le sol est aspergé d'eau ensuite essuyé, la porte et la fenêtre sont grandes ouvertes afin de permettre la ventilation matinale. Durant tout l'après midi, la persienne et les vitrages de la fenêtre sont maintenus fermés, afin de minimiser les apports solaires entrant dans la pièce. A partir de 18h00, ils sont ouverts à nouveau jusqu'au petit matin pour l'évacuation de la chaleur accumulée à l'intérieur.



Photo V-7: Aménagement de la pièce testée dans la maison "B"
(Source : Auteur)

14.3. Maison "C" :

Le séjour de la maison "C" retenu pour l'investigation est situé au 2^{ème} étage. D'une superficie de 12.07m², le séjour testé a une forme rectangulaire (fig V-20). Il possède une porte qui donne sur le couloir et une fenêtre de 1.96m² donnant sur la rue. Les murs intérieurs sont peints en jaune clair. L'aménagement de la pièce est représenté dans la photo V-8.

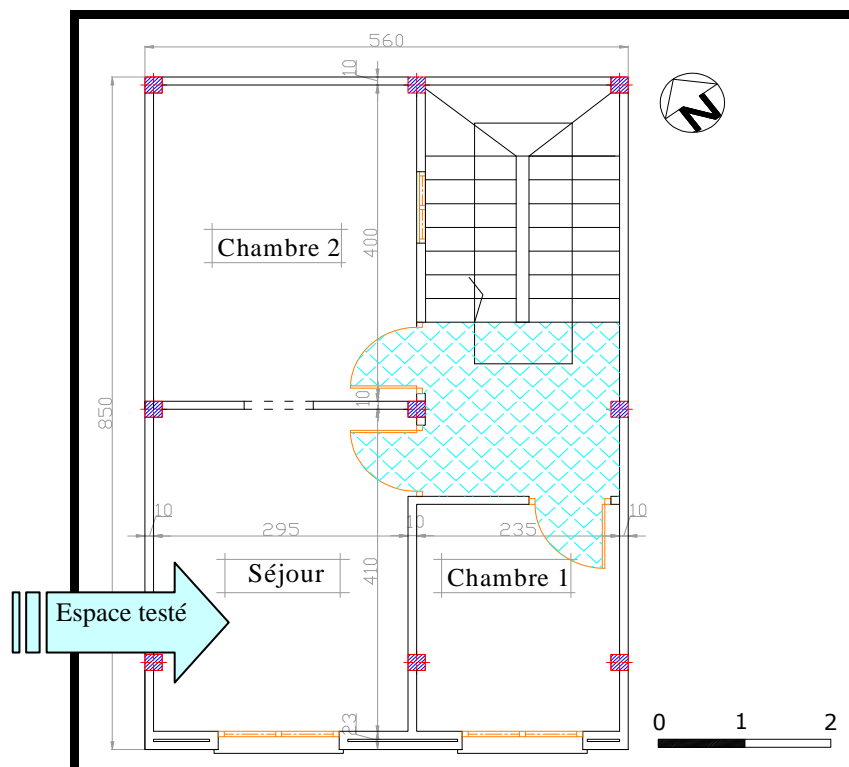


Figure V-20: Plan d'étage de la maison "C"
(Source : Auteur)



Photo V-8: Aménagement de la pièce testée dans la maison "C"

(Source : Auteur)

La pièce faisant l'objet d'étude dans la maison "C" est occupée par quatre personnes. A partir de 11h00, l'espace testé est utilisé pour regarder la télévision et faire la sieste. A ce moment là, le vitrage de la fenêtre et la persienne sont fermés afin d'éviter que la chaleur de l'extérieur ne pénètre à l'intérieur. A 17h00, quand les températures extérieures commencent à diminuer, ils sont ouverts à nouveau, restant ainsi toute la soirée. A partir de 23h00, le vitrage reste ouvert et la persienne est refermée car l'espace est utilisé pour dormir et la porte qui donne sur le couloir reste ouverte. Notons que les deux étages supérieurs et inférieurs à la pièce testée ont la même conception.

En outre, le comportement des utilisateurs vis-à-vis de l'espace se résume en la manœuvre des fenêtres et des portes en ouvrant quand l'air extérieur est plus frais que l'air intérieur et en fermant quand l'air extérieur est chaud.

14.4. Maison "D" :

Le séjour de la maison "D" retenu pour l'investigation est situé au 1^{er} étage. Le rez de chaussée est aménagé en cuisine et sanitaires et le 2^{ème} étage a la même conception que celle du 1^{er} étage. Le séjour est de forme rectangulaire d'une superficie de 14.74m² (fig V-21). N'ayant pas de porte, la pièce testée possède une fenêtre de 2.53m² donnant sur la rue. Les murs sont peints en blanc crème. L'aménagement de la pièce comporte : un meuble et un appareil TV, un vaisselier, des banquettes avec matelas (photo V-9).

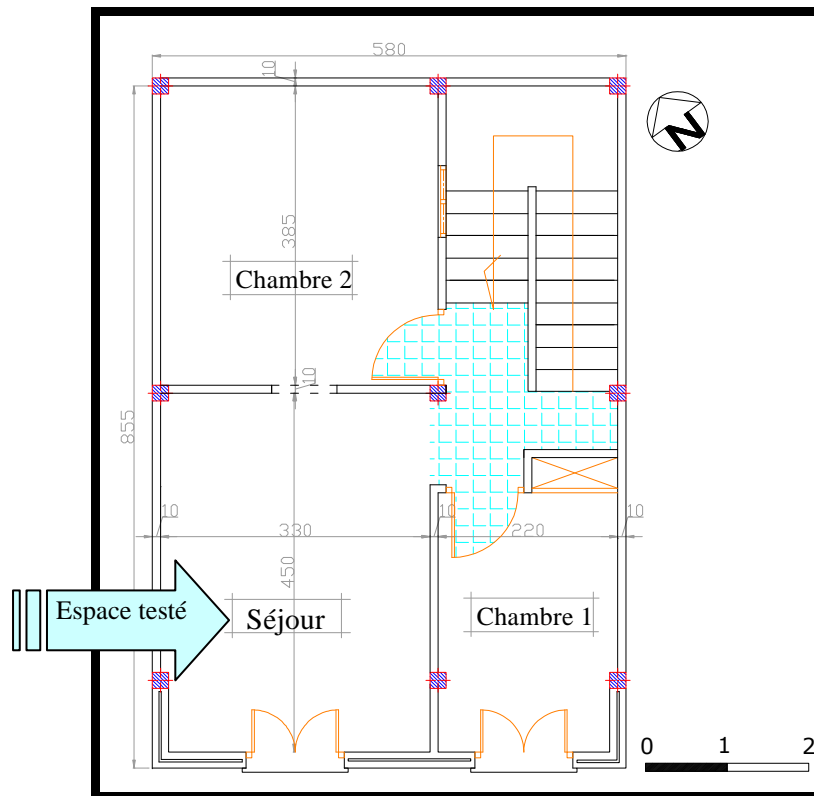


Figure V-21: Plan d'étage de la maison "D"
(Source : Auteur)

La pièce testée dans la maison "D" demeure occupée durant toute la journée par quatre personnes. D'ailleurs, la famille se regroupe essentiellement dans cette pièce qui remplit plusieurs fonctions : regarder la télé, réunion familiale, recevoir les invités... La fenêtre est maintenue ouverte de 8h00 jusqu'à 12h00, puis fermée de midi jusqu'à 17 heures, lorsque les températures extérieures baissent afin d'évacuer la chaleur accumulée vers l'extérieur. A partir de 18h00, la fenêtre est ouverte à nouveau toute la soirée, jusqu'à une heure tardive la nuit.



Photo V-9: Aménagement de la pièce testée dans la maison "D"
(Source : Auteur)

Conclusion :

La connaissance de la combinaison des facteurs climatiques permet de comprendre leur impact sur le confort humain et sur le comportement des éléments du bâtiment soumis à ces contraintes.

Le climat de la ville de Constantine apparaît à travers les chiffres comme un climat contrasté, caractérisé par un hiver froid et humide, et un été assez sec et chaud.

En effet, durant les mois d'été, où les températures sont très élevées et l'humidité relative basse, il est nécessaire de procurer un contrôle de la radiation solaire, et une inertie par absorption avec une ventilation nocturne. De plus, pour les périodes caniculaires correspondant au mois de juillet et août, (température max durant le mois le plus chaud est 34.5°C) un système de rafraîchissement par évaporation ressort comme recommandation. En fait, la végétation constitue l'un des systèmes passifs procurant un tel effet est. Par conséquent, dans l'objectif d'améliorer les conditions de confort des usagers en été, une étude comparative a été alors effectuée pour évaluer le comportement thermique des maisons sous l'effet de l'écran végétal et pour vérifier la qualité performantielle de ce dernier, ce qui fera l'objet du prochain chapitre.

Introduction :

Comme déjà mentionné dans le chapitre précédent, le travail de terrain consiste en une campagne de mesures en saison estivale durant deux périodes des mois de juillet et août. Les relevés de température de l'air et de surface, et d'humidité relative seront traités sous forme de graphes (à l'aide du logiciel informatique « Excel »). Ces données analysées et interprétées dans le but d'exposer les résultats pour l'évaluation du comportement des différents échantillons choisis et de comparer l'ambiance hygrothermique intérieure de chacun d'eux. Le deuxième volet de ce chapitre consiste en une modélisation à l'aide du logiciel TRNSYS version 14.1 afin de valider les résultats de terrain.

1. Etude du comportement thermique des maisons et de leur confort au mois de juillet:

Pendant la période de juillet (du 07 au 10), l'investigation s'est déroulée dans les maisons "A", "B" et "C".

1.1. Etude comparative des maisons "A" et "B" :

Pour rappel, voici les caractéristiques des parois extérieures des maisons A et B (tableau:VI-1) :

Récapitulation	
Maison " A "	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Mur couvert par un écran végétal. ➤ Epaisseur mur ext= 22cm ➤ Orientation : Sud sud ouest
Maison " B "	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Mur nu ➤ Epaisseur mur ext= 24cm ➤ Couleur paroi extérieure : Gris clair ➤ Orientation : Sud sud ouest

Tableau VI-1 : caractéristiques des maisons "A" et "B"

1.1.1. Variation des températures dans les maisons "A" et "B":

La température intérieure d'un local reste gouvernée par l'interaction de plusieurs facteurs dont l'orientation, le matériau, l'ouverture, la couleur extérieure, la ventilation et enfin la gestion de l'occupant¹. En fait, la lecture du graphe VI-1 montre que la courbe des températures intérieures de la maison "A" croit lentement et d'une manière uniforme

¹ **Al Douiri 1985** : 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. p170

contrairement à celle de la maison " B", qui évolue dans le même sens que les températures moyennes extérieures et celles relevées auprès des services météorologiques.

La maison " B" a enregistré les plus hautes valeurs de température par rapport à la maison "A" durant toute la journée. L'écart moyen enregistré entre les deux maisons est de 2.33°C avec un écart maximal de 4.4°C enregistré à 16h, et minimal de 1.05°C à 10h.

- Alors que la température moyenne de météo et celle extérieure atteignent leur valeur maximale de 37.2°C et 35,8°C à 14h00, la température de l'air intérieur dans le séjour "A" n'atteint son maximum de 29,3°C qu'après quatre heures c'est à dire à 18h00. En effet, la pièce commence à se réchauffer à la fin de la journée et une moindre quantité de chaleur atteint la maison.
- Quant à la courbe de la maison " B", elle évolue rapidement à partir de 12h00 pour atteindre sa valeur maximale de 33,3°C à 16h00 avec un retard de deux heures par rapport à la température extérieure maximale.

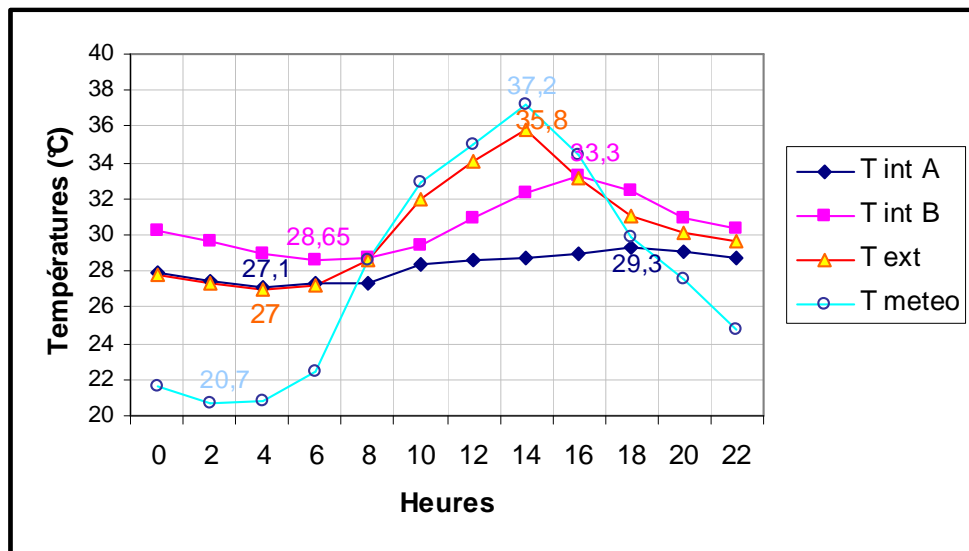


Figure VI-1: Variation des températures intérieures et extérieures dans les maisons "A" et "B"

Par ailleurs, dès que les températures externes commencent à augmenter, les températures intérieures de la pièce testée dans la maison "B" augmentent aussi malgré la fermeture de la fenêtre. Cette augmentation est occasionnée par un gain direct de chaleur par absorption à travers la paroi verticale opaque (fenêtre et persiennes fermées à ce moment là), sachant que la pièce testée est située dans un étage intermédiaire, donc le plafond est protégé des radiations solaires.

En outre, Bennadji 1999, affirme que la transmission de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur se fait essentiellement par conduction à travers les parois. Par conséquent, la hausse des températures de l'air intérieur dans la maison "B" pendant l'après-midi est expliquée par un transfert de chaleur par conduction puis par rayonnement à travers la paroi verticale d'une part. D'autre part, les apports internes des appareils (TV) et des occupants, car à ce moment là, la pièce est occupée pour regarder la télévision et faire la sieste.

Le soir, la chute de températures externes n'a pas une conséquence directe sur la température interne. Cela est dû au fait que cette baisse est d'une durée assez courte pendant les nuits d'été qui sont caractérisées par un ciel clair ; et l'absence de nuages favorise le rayonnement vers le ciel d'où une baisse de température qui se fait sentir. En effet, au delà de 18h00, les températures de l'air intérieur dans la maison "B" diminuent lentement pour atteindre une valeur minimale de 28.65°C et la paroi restitue la chaleur stockée durant le jour vers l'intérieur, ce qui engendre une augmentation de la température intérieure par rapport à celle extérieure.

Ainsi, malgré l'ouverture de la porte et de la fenêtre en début de soirée, il existe toujours un manque de ventilation transversale pour rafraîchir la structure, rappelons que c'est la seule façade exposée à l'extérieur, les autres étant mitoyennes. De ce fait, on peut déduire que la maison "A" est protégée par rapport à "B", ceci dit, que l'écran végétal a pu tempérer les fluctuations extérieures, la paroi présente alors moins de gains de chaleur.

1.1.2. Variation des températures surfaciques des maisons "A" et "B":

D'après la figure VI-2, la courbe représentative des températures de surfaces externes dans la maison "A" est nettement inférieure à celle des températures moyennes extérieures avec un écart maximal de 6.3°C et minimal de 1.2°C. Par rapport à la température de surface interne, elle enregistre un écart maximal de 2.4°C à 14H.

En effet, la température de surface interne dans la maison "A" évolue lentement en enregistrant un écart de 1.7°C entre sa valeur minimale de 25.83°C à minuit et sa valeur maximale de 27.53°C à 18h00 qui coïncide avec la température intérieure maximale. Après le coucher du soleil, la température de surface extérieure diminue alors que celle de surface interne continue d'augmenter, cela est dû à l'effet de l'inertie de la paroi.

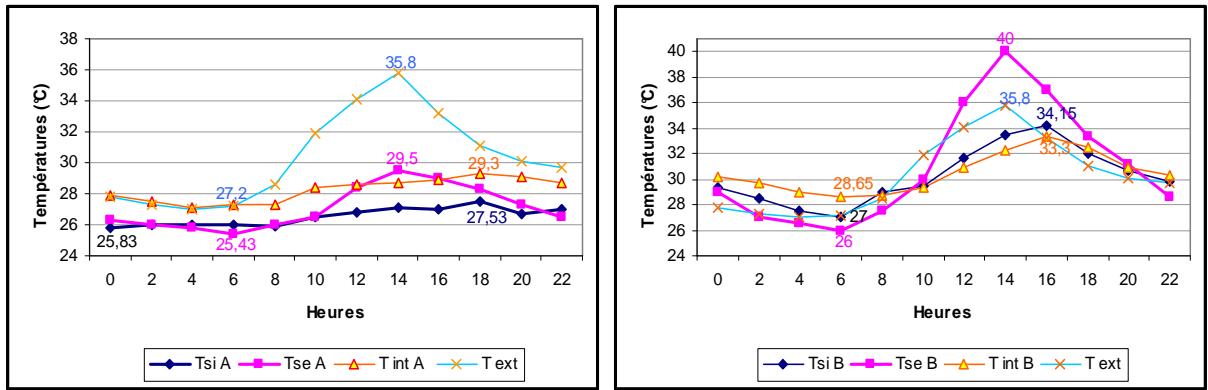


Figure VI-2: Variation des températures de surfaces moyennes intérieures et extérieures dans les maisons "A" et "B"

Quant au profil des températures surfaciques intérieures dans la maison "B", il suit celui des températures de surfaces extérieures de la même maison. D'ailleurs, ces dernières augmentent au fur et à mesure que la paroi s'expose aux radiations solaires. C'est à partir de 10h00, que la face externe de la paroi commence à s'échauffer pour atteindre son maximum de 40°C enregistré à 14h00, dépassant ainsi la température extérieure maximale qui est de 35.8°C enregistrée à la même heure.

A.Douri, 1976, confirme à travers ses recherches que la température de surface interne des parois reste très élevée par rapport à la température de l'air intérieur lorsque ces parois n'étaient pas protégées contre la radiation solaire. Il démontre par là que l'ombrage de la paroi contre la radiation solaire est essentiel dans la diminution de la température de surface interne des parois de l'enveloppe. Durant la journée, la température de surface interne dans la maison "B", dépasse légèrement celle de l'air intérieur de 0.7°C enregistré à 14h00 et 16h00. A cet effet, on peut déduire que la température de l'air et celle de la surface de la paroi sont liées par le processus de rayonnement. Le mécanisme de transfert de chaleur commence pendant le jour, quand la température du mur externe augmente. Avec le temps, une quantité de chaleur est absorbée par le mur et la température augmente selon les propriétés thermiques du matériau et les conditions de sa surface. La chaleur se déplace alors, à travers le mur, vers la surface intérieure.

Ainsi, le transfert de chaleur trouve son origine dans les écarts de température, qui est obtenu chaque fois qu'un gradient thermique existera au sein de la paroi. L'écoulement de l'onde thermique par conduction à travers le mur s'est affronté aux résistances thermiques. Celles-ci dépendent principalement de la conductivité et l'épaisseur de chaque composant. La

paroi extérieure de la maison "B" et celle de la maison "A" assurent une résistance totale de $0.78\text{m}^2\text{C}/\text{W}$ et un coefficient de transmission de $1.28\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ (voir annexe I).

Pour la maison "B", les apports de chaleur sont amortis d'un maximum de 6.5°C entre 40°C de T_{se} et 33.5°C de T_{si} à 14h00. Quant à la maison "A", ils sont amortis d'un maximum de 2.4°C entre 29.5°C de T_{se} et 27.1°C de T_{si} à 14h00 (fig VI-3).

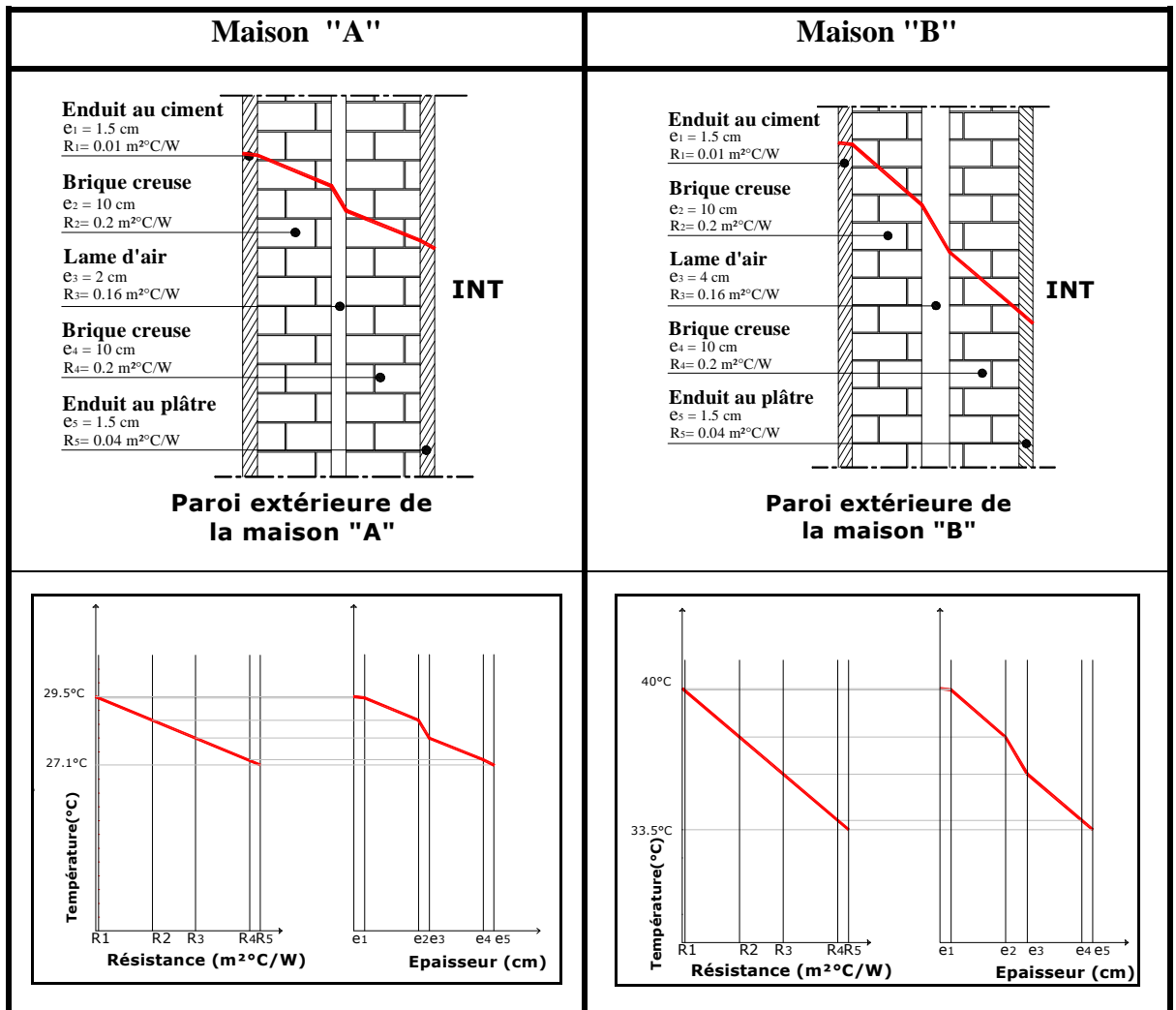


Figure VI-3 : Tracé du gradient thermique au niveau de la paroi extérieure des maisons "A" et "B"

La chaleur absorbée et stockée dans le matériau dépend de l'inertie du matériau. C'est grâce à l'inertie du matériau que la durée du transfert de chaleur est retardée ; elle agit donc sur l'amplitude et le déphasage. Medjelekh, 2006, affirme aussi que l'inertie contribue à atténuer les fluctuations de la température intérieure et évite les surchauffes. En outre, plus forte est l'inertie thermique du bâtiment, plus lent sera le mécanisme de transfert de chaleur à travers la structure. Les valeurs de températures enregistrées confirment que la paroi "B" a une

inertie supérieure à celle de la maison "A" d'autant plus que la paroi extérieure de cette dernière a une épaisseur plus faible que celle de la maison "B".

Or, la maison "A" a enregistré une durée de déphasage de quatre heures de temps, avec les plus faibles valeurs de températures par rapport à celles de la maison "B" qui a enregistré deux heures de temps seulement. Ainsi, bien qu'elles aient le même degré d'exposition, la maison "B" a enregistré des valeurs de températures surfaciques externes supérieures à celles de la maison "A" marquant un écart maximal de 10.5°C enregistré à 14h00. Rappelant que les deux maisons ne possèdent pas de masque environnemental proche, faisant obstacle au rayonnement solaire. Ainsi la paroi "B" est peinte d'une couleur gris clair, présentant un facteur d'absorption solaire moyen de 0.5, alors que la paroi "A" est couverte d'un écran végétal.

Par ailleurs, la maison "B" reste soumise aux effets de la radiation solaire, ce qui favorise l'absorption du rayonnement solaire vu que l'orientation elle-même (sud-ouest) bénéficie du rayonnement direct intense qui atteint une valeur de 535 w/m²² entre 14 et 16 heures au mois de juillet ainsi que l'incidence des rayons qui est de l'ordre de 37° à 61°.

Donc l'orientation de la paroi extérieure de la maison "B", sa couleur et l'absence de masques environnementaux favorisent l'absorption des apports solaires durant la journée; résultats confirmés par bon nombre de chercheurs (Givoni.B, 1980, Yakubu et Sharples, 1992 et Bellara.S, 2005) qui rappellent que l'augmentation de la température dépend étroitement de l'effet de l'orientation. STEPHENSON.D.G, 1966, rajoute que la couleur a un effet sensible sur les températures de la surface extérieure du bâtiment.

Au moment où la température de surface externe de la maison "B" atteint sa valeur maximale de 40°C, celle dans la maison "A" n'est que 29.5°C comme le montre la figure VI-4. Cette dernière exprime l'évolution des températures dans les maisons "A" et "B" à différents points de mesure aux moments extrêmes de températures extérieures (à 14H et 4H).

En outre, pendant que la température de l'air intérieur dans la maison "B" atteint 32.3°C, celle dans la maison "A" n'est que 28.75°C En effet, l'accroissement de la température de l'air intérieur et de surfaces dans la maison "B" est justifié par l'exposition de la paroi au rayonnement direct et intense de l'après midi qui pénètre à l'intérieur de la chambre testée par manque de protections solaires efficaces. Il s'agit essentiellement de

² CAPDEROU.M: « *Atlas solaire de l'Algérie* » Tome 2: Aspect énergétique. OPU Alger, 1985. p 63.

l'absorption du rayonnement de courte longueur d'onde issu du soleil et du rayonnement diffus provenant du ciel.

Nous constatons également que, l'écart considérable qu'a enregistré la température de surface extérieure de la paroi "A" par rapport à celle de l'air extérieur (écart maximum de 6.3°C à 14h00), est dû essentiellement à l'ombre de l'écran végétal projeté sur la paroi. D'après Akbari, 2002, les ombres des plantes réduisent l'apport de chaleur dans les bâtiments en réduisant les températures de surface pendant le jour. Il en découle de cette lecture, que l'espace le plus confortable reste celui de la maison « A » vu que cette dernière affiche les meilleurs résultats.

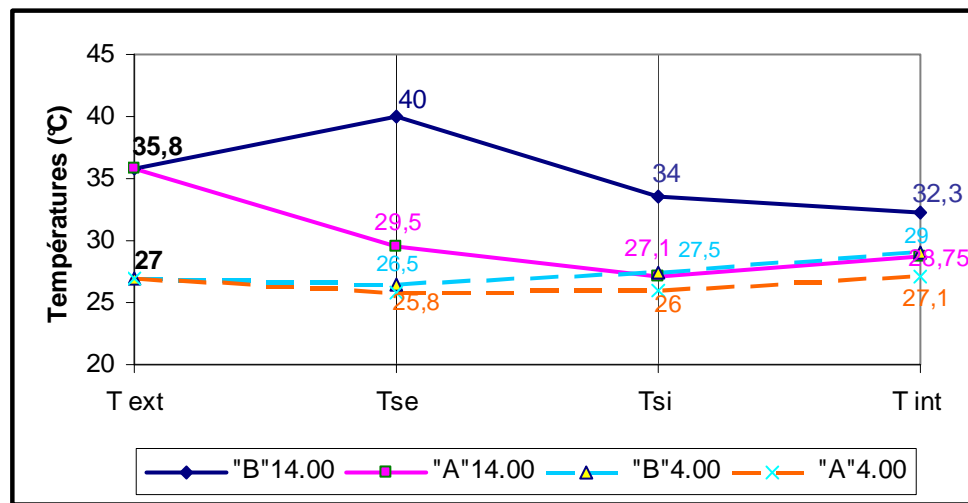


Figure VI-4: Evolution de la température dans les maisons "A" et "B" à différents points de mesure et à différentes heures.

Par conséquent, l'écran végétal a retardé l'effet de transfert de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur et participe donc à la réduction de la température de surfaces de la paroi et celle de l'air intérieur de la pièce. Les gains générés à l'intérieur de la maison "A" se limitent alors à la télévision, les meubles, les occupants et la transmission de chaleur à travers la fenêtre.

Pendant la nuit, le bâtiment libère la chaleur par rayonnement de grande longueur d'onde au ciel et par convection à l'air environnant (Wang et Di 1999). Alors que la température extérieure diminue et qu'il n'y a aucune radiation solaire, un processus inverse aura lieu. La chaleur accumulée par la paroi durant la journée étant réémise pendant la nuit sous forme de rayonnement infrarouge ce qui explique l'effet de l'inertie de la paroi qui stocke de la chaleur et la restitue lentement vers l'intérieur.

On constate qu'à 4h00, la température intérieure de la maison "A" est de 27,1°C dépassant celle de l'air extérieur (27°C) comparé à celle de la maison "B" qui est de 29°C. En effet, les valeurs de températures de l'air intérieur et de surface de la maison "A" reste assez élevées pendant la nuit, le phénomène de rayonnement vers l'extérieur est ralenti car l'échange de chaleur entre la maison, le ciel et l'environnement est bloqué par l'écran végétal.

1.1.3. Etude de la variation de la vitesse de l'air intérieur et extérieur dans la maison "A":

La vitesse de l'air est un paramètre important à prendre en considération car elle influence les échanges de chaleur par convection et augmente l'évaporation à la surface de la peau.

De ce fait, la figure VI-5 indique une différence perceptible entre les valeurs de vitesse de l'air relevées auprès des services météorologiques et celles mesurées près de la maison "A". On enregistre un écart maximum de 4.12m/s atteint à 16h00; d'où un amortissement justifié essentiellement par l'effet du microclimat (rugosité urbaine) et l'effet de l'écran végétal qui réduit localement la vitesse du vent auprès du bâtiment.

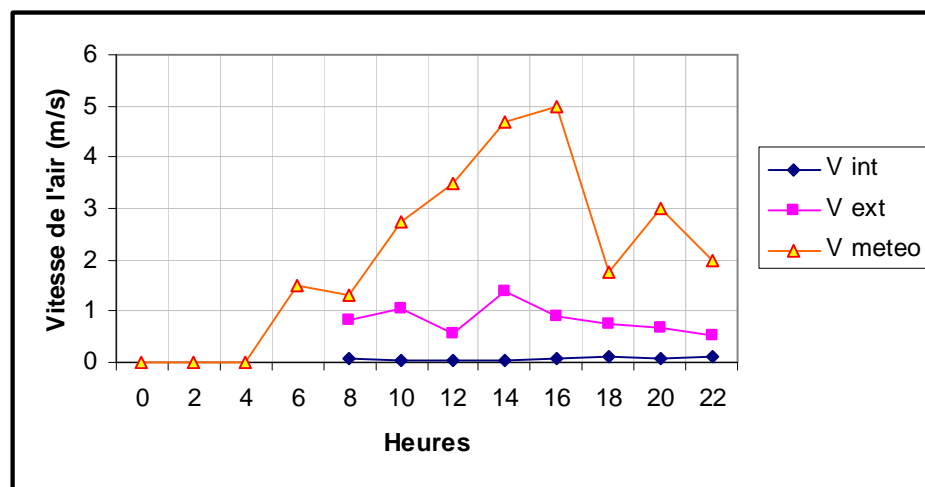


Figure VI-5: Variation de la vitesse de l'air intérieur et extérieur dans la maison "A"

Quant à la vitesse de l'air mesurée à l'intérieur de la pièce testée, elle ne dépasse pas 0,12 m/s expliqué par le manque de courant d'air généré par la ventilation transversale. Cependant, d'après, Liébard.A et De Herde.A³, la vitesse de l'air intervient dans la sensation de confort thermique de l'occupant dès qu'elle est supérieure à 0,2 m/s : c'est en effet à partir

³ Liébard.A et De Herde.A : « Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques ; Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable » Presses de l'imprimerie Moderne de l'Est, Baume-les-Dames-décembre.2005. p30

de cette vitesse qu'un courant d'air peut être ressenti par un individu moyen. Donc, il y a lieu d'éliminer l'effet de ce paramètre.

1.1.4. Etude de la variation de l'humidité relative moyenne intérieure et extérieure des maisons "A" et "B" :

D'après, Millet et Nicolas, 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 domestiques.

D'ailleurs, la lecture des histogrammes de la figure VI-6 laisse apparaître que l'humidité relative du séjour de la maison "A" évolue dans le même sens que celle relevée par les services météo marquant une amplitude de 14.67%. Comparée à l'humidité extérieure, elle enregistre un écart maximum de 28.42% à 12h00 et 21.33% à 14h00 par rapport à celle des services météo.

On note que durant la journée, les valeurs les plus élevées d'humidité relative à l'intérieur de la pièce "A" sont enregistrées entre midi et 14h00 ; expliqué par la présence des occupants dans le lieu pour regarder la télévision et faire la sieste. L'humidité relative maximale est enregistrée à 6h00 avec 61%, cette valeur d'humidité peut être admissible selon la norme (ASHRAE 55-1992 $30 \leq HR \leq 70$).

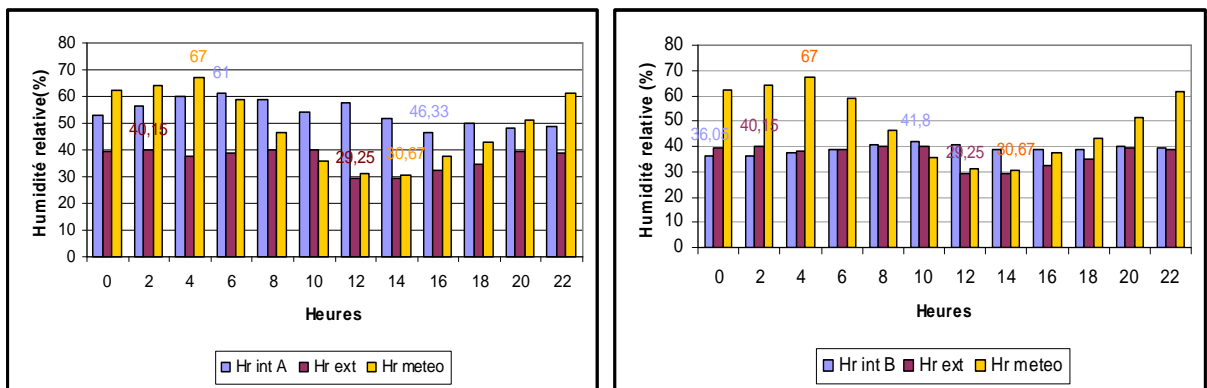


Figure VI-6: Variation de l'humidité relative moyenne intérieure et extérieure dans les maisons "A" et "B"

Quant au degré hygrométrique à l'intérieur de la pièce "B", il est relativement stable durant toute la journée représentant une amplitude de 5.75%. il évolue lentement le matin pour atteindre son maximum de 41.8% enregistré à 10h, c'est à ce moment là que la fenêtre est ouverte pour aérer la chambre et pour chasser l'air chaud stagné pendant la nuit et le sol est aspergé d'eau pour rafraîchir le sol.

Après le coucher du soleil, le taux hygrométrique augmente avec l'augmentation de l'humidité extérieure à cause de l'air humide pénétré à travers les fenêtres ouvertes. C'est-à-dire que l'humidité se condense la nuit et s'évapore pendant la journée.

Ainsi, le profil des humidités relatives est inversement proportionnel à celui des températures de l'air (fig VI-7). L'humidité relative mesurée dans la maison "B" augmente avec la diminution de la température de l'air et vice versa.

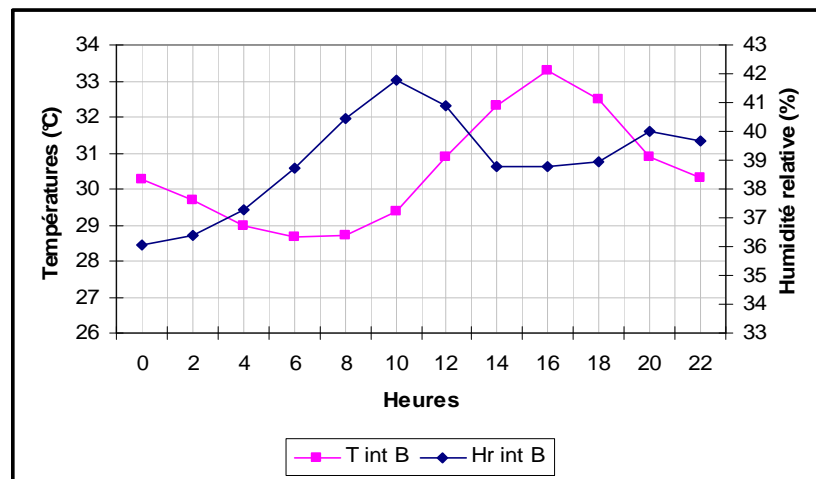


Figure VI-7 : Variation de l'humidité relative moyenne et de la température moyenne de l'air intérieur dans la maison "B"

La comparaison des deux graphes de la fig VI-6 révèle également que l'humidité relative interne dans la pièce "A" est nettement supérieure à celle de la maison "B", marquant un écart moyen de 14.87%. On enregistre un écart maximal de 22.7% atteint à 4h00 et un écart minimal de 7.53% enregistré à 16h00. Ce qui explique que l'écran de végétal a fournit un apport supplémentaire en humidité.

Par conséquent, l'augmentation du niveau d'humidité relative à l'intérieur de la pièce "A" revient au :

- Phénomène d'évaporation d'eau émise par la plante qui sera ensuite dissipée à travers la paroi pendant toute la journée,
- La réduction des déperditions par convection par la couche végétale.
- et enfin le manque de ventilation transversale.

De plus, le séjour testé est juxtaposé à la cuisine qui entraîne une production de vapeur d'eau supplémentaire et participe de ce fait à l'augmentation du degré hygrométrique dans la maison.

En conclusion, et en comparant avec le mur nu, le mur végétalisé a pu réduire les températures de surface et de l'air intérieur en augmentant l'humidité relative. L'écran végétal a amorti les fluctuations de température extérieure, grâce au phénomène d'évapotranspiration et l'effet d'ombre porté sur la paroi, cette dernière présente alors moins de gains de chaleur en été.

1.2. Etude comparative des maisons "A" et "C" :

Pour rappel, voici les caractéristiques des parois extérieures des maisons A et C (tableau:VI-2) :

Récapitulation	
Maison "A"	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Mur couvert par un écran végétal (vigne vierge vraie) ➤ Epaisseur = 20 à 30cm ➤ Forte densité ➤ Rapport de couverture = 100% ➤ Epaisseur mur = 22cm ➤ Couleur paroi extérieure : Gris foncé ➤ Orientation : Sud sud ouest
Maison "C"	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Mur couvert par un écran végétal (vigne vierge vraie) ➤ Epaisseur = 10 à 15 cm ➤ Moyenne densité ➤ Rapport de couverture = 80% ➤ Epaisseur mur = 23cm ➤ Couleur paroi extérieure : Blanc ➤ Orientation : Sud sud ouest

Tableau VI-2 : Caractéristiques des maisons "A" et "C"

1.2.1. Variation des températures dans les maisons "A" et "C" :

La figure VI-8 illustre que la courbe des températures de l'air intérieur dans la maison "A" est au dessous de celle de la maison "C" durant toute la journée, enregistrant un écart maximal de 2.3°C atteint à 16h00.

Ainsi, la lecture du même graphe fait ressortir que l'évolution de la courbe des températures moyennes de l'air intérieur dans la maison "C" suit celle des moyennes extérieures. Elle varie entre 27.7°C et 31,2°C avec une amplitude de 3.5°C pendant que la température de l'air intérieur maximale enregistrée dans la maison "A" est de 29.3°C et la minimale est de 27.1°C soit une amplitude de 2.2°C.

Par conséquent, l'écart enregistré entre les courbes des deux maisons atteste de la performance thermique de l'écran de vigne vierge de la maison "A" offrant une densité et une épaisseur supérieures à celles de la maison "C".

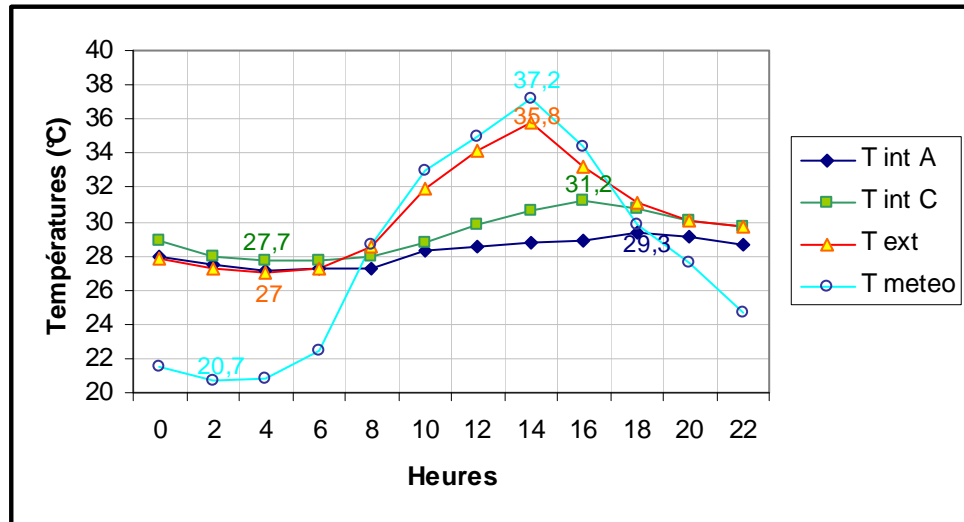


Figure VI-8: Variation des températures de l'air intérieur et extérieur dans les maisons "A" et "C"

En revanche, durant la nuit, quand les températures de l'air extérieur sont fraîches, la courbe des températures moyennes de l'air intérieur dans la maison "C" témoigne d'une légère hausse par rapport aux températures de l'air intérieur de la maison "A" et celles de l'air extérieur enregistrant un écart max de 1,1°C à 00h00. Mais par rapport à celle de la météo, cet écart est nettement plus grand de l'ordre de 7,33°C. Ceci peut être expliqué par l'effet de la chaleur dissipée par la paroi opaque. A cela, s'ajoute les apports internes dus à l'occupation permanente de l'espace ainsi que le manque de ventilation transversale qui participent à l'augmentation de la température interne.

1.2.2. Etude de la variation des températures surfaciques des maisons "A" et "C":

D'après la figure VI-9, la courbe des températures surfaciques de la maison "C" et celle de l'air extérieur prennent toutes la même allure. Plus la température extérieure augmente, plus les valeurs de températures surfaciques et celles de l'air intérieur augmentent.

En effet, à partir de 8h00, la température de surface interne dans la maison "C" commence à augmenter jusqu'à culminer à sa valeur maximale de 31°C enregistrée à 16H correspondant au maximum de la température de l'air intérieur atteint à la même heure qui, au-delà de cette dernière, diminue. Par rapport à la température de surface externe, elle enregistre un écart max de 1.74°C à 14H

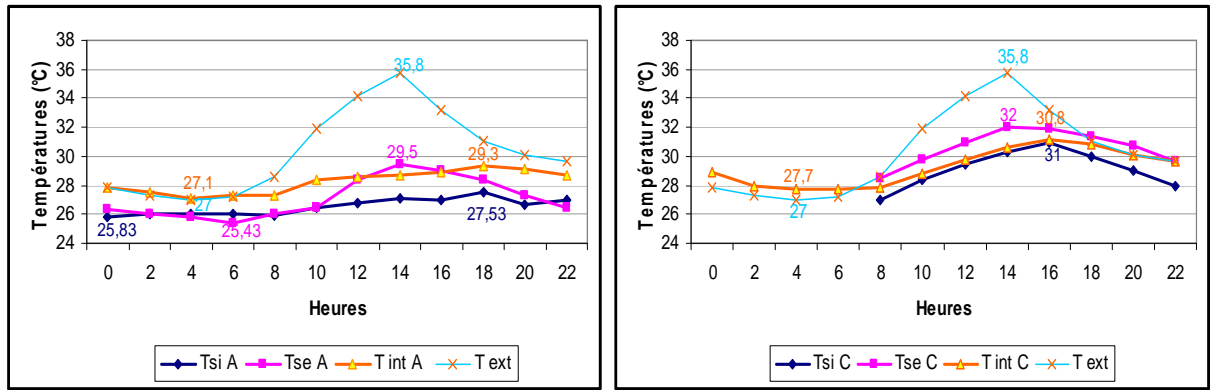


Figure VI-9: Variation des températures surfaciques moyennes intérieures et extérieures dans les maisons "A" et "C"

La température de surface interne, reste inférieure à la température de l'air intérieur durant toute cette période et les apports thermiques sont amortis d'un maximum de 1.7°C entre 32°C de Tse et 30,3°C de Tsi à 14h00 (fig VI-10). Cette paroi assure une résistance thermique totale de 0.78 m²C/W et un coefficient de transmission de 1.28W/m²C (similaire à celle de la paroi "A").

Quant au maximum de la température de surface extérieure, il est de 32°C enregistré à 14h00, qui coïncide avec celui de la température de l'air extérieur. Mais comparé aux températures surfaciques externes de la maison "A", la maison "C" présente des valeurs supérieures à cette dernière avec un écart max de 3.37°C enregistré à 20h00. Sachant que les températures de surface externes des deux maisons ont été mesurées dans la face ombrée de la façade au dessous des feuilles.

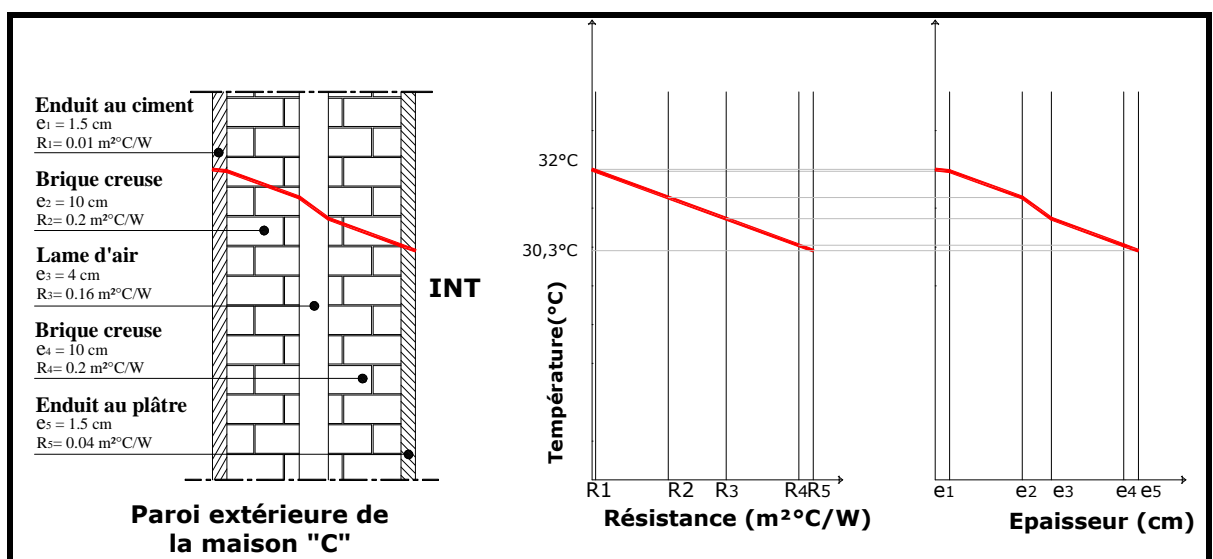


Figure VI-10 : Tracé du gradient thermique au niveau de la paroi extérieure de la maison "C"

Notons, par ailleurs, que la paroi extérieure "C" est d'une couleur claire (blanc) favorisant une absorption moyenne (coefficient d'absorption égal à 0.3), et couverte partiellement en vigne vierge vraie (rapport de couverture de 80%). Cette plante ayant une faible épaisseur de feuillage ainsi qu'une densité foliaire inférieure à celle de la maison "A", ce qui explique l'écart de températures enregistré.

De plus, les deux maisons reçoivent les mêmes quantités de rayonnement solaire direct, du moment que les constructions opposées à la maison "C" ne font pas obstruction aux radiations frappant cette dernière (fig VI-11). Néanmoins, il ne faut pas négliger le rayonnement incident provenant des surfaces environnantes qui dépendent de la couleur de celles-ci.

D'ailleurs, la paroi de la maison "C" reçoit une quantité considérable de lumière solaire réfléchiée, plus une fraction du rayonnement onde longue émis par les façades opposées peintes en couleur claire. Mais du moment que la maison "C" est couverte partiellement de végétation, le rayonnement solaire réfléchi sera alors réduit ainsi que le rayonnement de grande longueur d'onde émis par les parois, abaissant de ce fait les gains solaires en été, ce qui est en accord avec les résultats de Givoni, 1994. Suite à cette réflexion, Rosenfeld, 1995⁴ a démontré qu'en augmentant l'albédo des surfaces urbaines et en plantant des arbres, le phénomène de l'îlot de chaleur urbain est atténué.

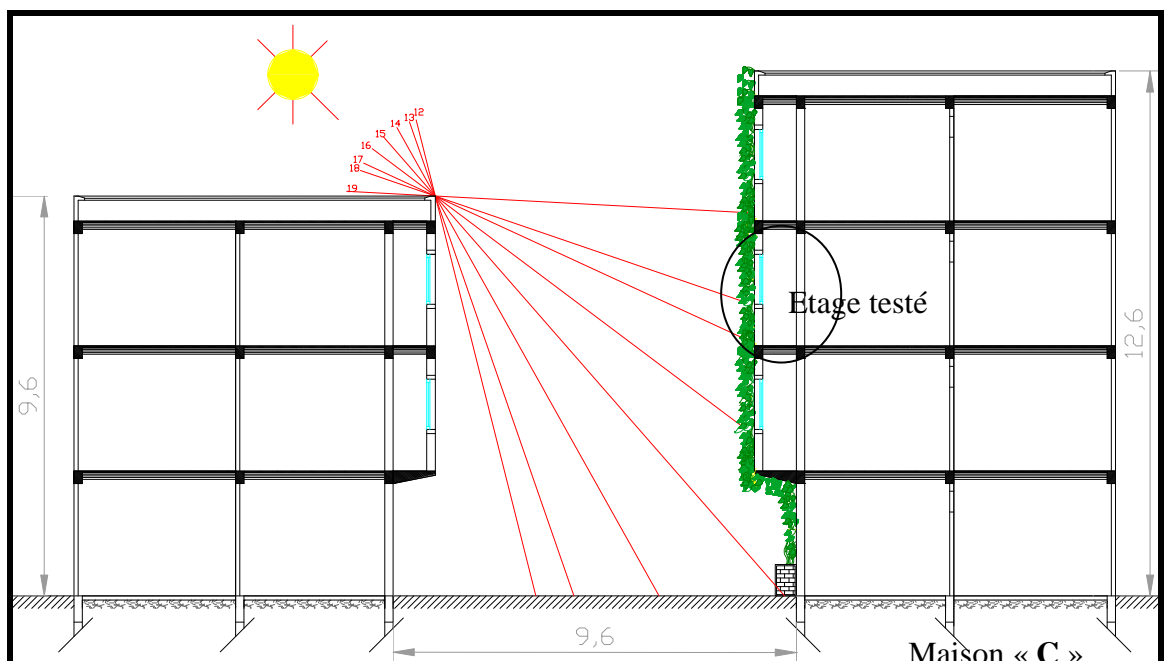


Figure VI-11 : Prospect de la rue bordée de maisons (maison "C" à droite)

⁴ ROSENFELD.A.H et al : « Mitigation of urban heat island : materials unity programs, and updates ». Energy and Buildings 22,1995. pp: 255-265

1.2.3. Variation des températures du feuillage des maisons "A" et "C":

D'après le graphe ci-dessous (fig VI-12), il apparaît que la température près du feuillage et celle du feuillage dans les deux cas augmentent avec l'augmentation de la température de l'air extérieur en restant inférieure à cette dernière.

Au fur et à mesure que les feuilles sont exposées au rayonnement solaire, leurs stomates s'ouvrent pour dégager la quantité de chaleur reçue en vue d'équilibrer leur température, ce qui explique l'augmentation de la température du feuillage. Mais arriver à un certain seuil, les stomates des feuilles se referment pour éviter la sécheresse de la plante (la courbe décroît à partir de 14h00). Donc, la température est progressivement réduite par le feuillage et cette diminution par rapport à celle de l'air extérieur est due essentiellement au phénomène d'évapotranspiration; un phénomène grâce auquel la plante régule sa température (Voir chapitre III).

La température du feuillage enregistre un écart de 3.7°C avec celle de l'air extérieur pour la maison "A" et 2.4°C à 12.00h pour la maison "C". Le feuillage de la plante de la maison "A" étant plus dense que celui de la maison "C", ce qui explique cet écart enregistré entre les deux maisons.

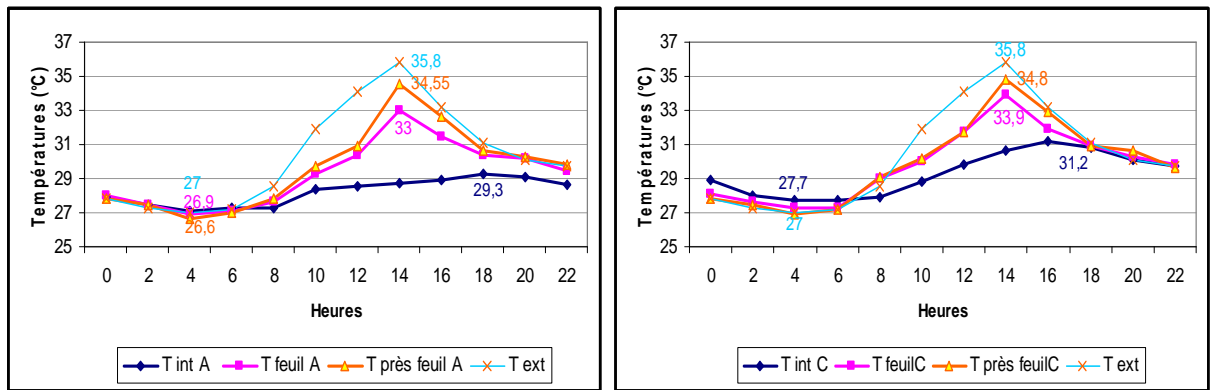


Figure VI-12: Variation des températures moyennes intérieures et extérieures et celles du feuillage dans les maisons "A" et "C"

A partir de 20h00, la température du feuillage dépasse légèrement celle de l'air extérieur avec un écart de 0.2°C. En effet, la nuit, quand la température atmosphérique est relativement basse, le bâtiment libère la chaleur par rayonnement de grande longueur d'onde au ciel et par convection avec de l'air environnant.

Au fur et à mesure que le flux de chaleur s'approche de la paroi, il est amorti (fig VI-13). En effet, à 14h00, pendant que la température de l'air extérieur enregistre sa valeur maximale de 35.8°C, la température près du feuillage de la maison "A" est de 34.55°C, marquant un écart de 1.25°C et celle des feuilles est de 33°C avec un écart de 2.8°C. Ceci prouve que l'air en contact avec le feuillage a été refroidi grâce à l'évaporation de l'eau à la surface des feuilles. Ainsi, grâce à la convection, le refroidissement est accéléré, notons que la vitesse de l'air à cette heure-ci est de 1.39m/s.

Quant à la température de surface externe, elle est de 29.5°C et la plus basse température enregistrée à cette heure est celle de la surface interne de la paroi avec 27.1°C. La température de l'air intérieur est de 28.75°C, dépassant celle de surface interne de 1,65°C. Une augmentation due essentiellement aux apports internes ainsi qu'au flux d'énergie transmis à travers la fenêtre.

En comparant, ces valeurs avec celles enregistrées dans la maison "C", à cette heure ci, ces dernières restent insignifiantes. Ceci montre clairement que la maison "C" est moins protégée que la maison "A" et fait comprendre que la densité, l'épaisseur et le pourcentage de couverture de l'écran végétal jouent un rôle déterminant dans l'amélioration du confort thermique du bâtiment.

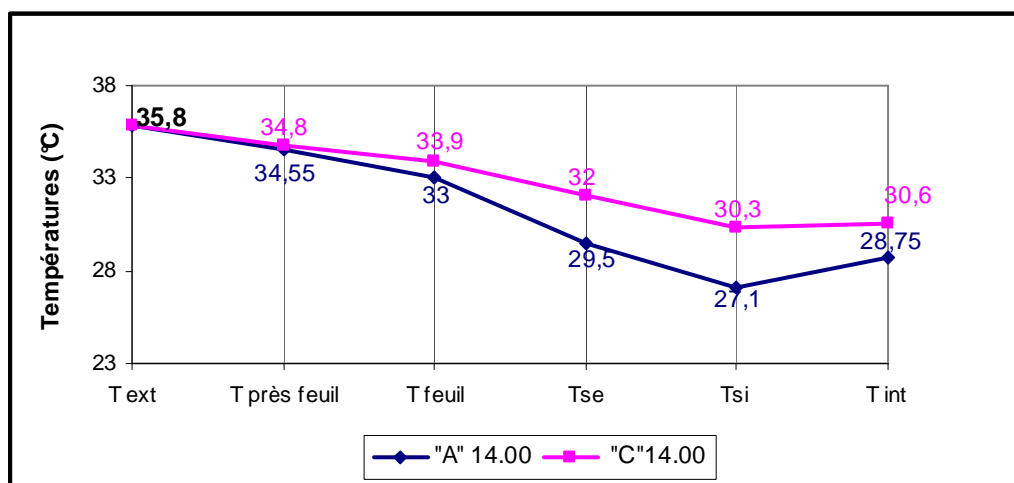


Figure VI-13: Evolution des températures dans les maisons "A" et "C" à différents points de mesure à 14h00

Toutes ces fluctuations s'expliquent par les différents mécanismes de transfert de chaleur entre la couche de feuilles, le mur et l'environnement détaillés par Wang et Di en 1999. En effet, pendant le jour, une partie du rayonnement solaire qui atteint l'écran végétal est réfléchi par les feuilles et une autre pénètre dans la couche de feuille et elle est absorbée

par le mur, alors que le reste est absorbé par les feuilles vertes. Une partie de l'énergie solaire absorbée par la couche de feuille, est employée pour la photosynthèse, une autre pour la transpiration par refroidissement. Enfin, une partie est émise en tant que rayonnement de grande longueur d'onde, et le reste est dégagé par le transfert thermique à l'air environnant. Par conséquent, tous ces transferts d'énergie déterminent combien les plantes vertes peuvent réduire le gain de chaleur pendant le jour.

Nous déduisons alors que les températures de l'air sont réduites par l'effet du masque végétal, en d'autres termes par l'évapotranspiration de la vigne vierge vraie, ce qui limite les apports de chaleur par conduction et convection. Les feuilles ont absorbé une grande quantité du rayonnement solaire incident dont une partie est transformée par photosynthèse. L'évaporation de l'eau des feuilles exposées au soleil consomme une grande partie du rayonnement absorbé et l'évaporation refroidit alors les feuilles et l'air qui est en contact avec ces feuilles.

Ce qui vient conforter les propos de Lam, 2004 que l'évapotranspiration de la plante grimpante contribue à la réduction de la température de l'air intérieur. L'énergie calorifique est absorbée pendant l'évaporation d'eau des plantes, ce qui extrait l'excédent de chaleur du microclimat. Par conséquent, l'évapotranspiration de l'eau entraîne un gradient thermique entre l'air ambiant et l'écran végétal (MUSY. A, 2005).

1.2.4. Etude de la variation de l'humidité relative moyenne intérieure et extérieure dans les maisons "A" et "C":

La figure VI-14 montre que les valeurs d'humidité relative intérieure dans la maison "C" enregistrent de légères fluctuations en étant supérieures à celles extérieures. Elles augmentent à partir de 8h00 pour atteindre leur maximum de 51.33% à 10h00 (moment des tâches ménagères, sol aspergé d'eau). A partir de cette heure, on enregistre une baisse jusqu'à atteindre un minimum de 44% à 16h00. Et c'est à partir de 18h00, que le taux d'humidité relative dans la pièce augmente à nouveau.

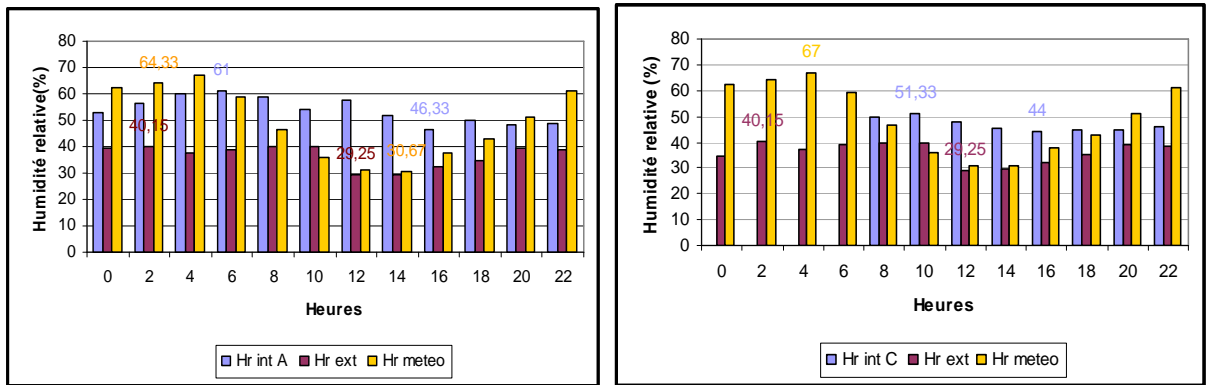


Figure VI-14: Variation de l'humidité relative moyenne intérieure et extérieure dans les maisons "A" et "C"

On remarque également que les plus hautes valeurs d'humidité relative intérieure correspondent à celles de la maison "A" enregistrant un écart maximal de 9,67 % atteint à 12h00 par rapport à l'humidité intérieure de la maison "C". Alors que l'après midi (à 16h) cette différence est de 2.33% seulement. Ainsi, l'humidité relative enregistrée à l'intérieur des deux maisons est supérieure à celle extérieure et de météo témoignant d'un apport supplémentaire en humidité provenant de l'écran végétal.

1.2.5. Etude de la variation de l'humidité relative moyenne du feuillage dans les maisons "A" et "C":

La lecture des histogrammes de la figure VI-15 laisse apparaître que l'humidité relative du feuillage de la maison "A" évolue dans le même sens que celle extérieure. Elle enregistre un écart moyen de 16% entre sa valeur maximale de 65% et minimale de 49%. On note que durant la journée, et précisément à 14h00, l'humidité du feuillage enregistre un écart de 19.67% avec l'humidité extérieure et 3.67% avec celle près du feuillage. Ces valeurs élevées d'humidité relative du feuillage influent directement sur celle de l'air intérieur.

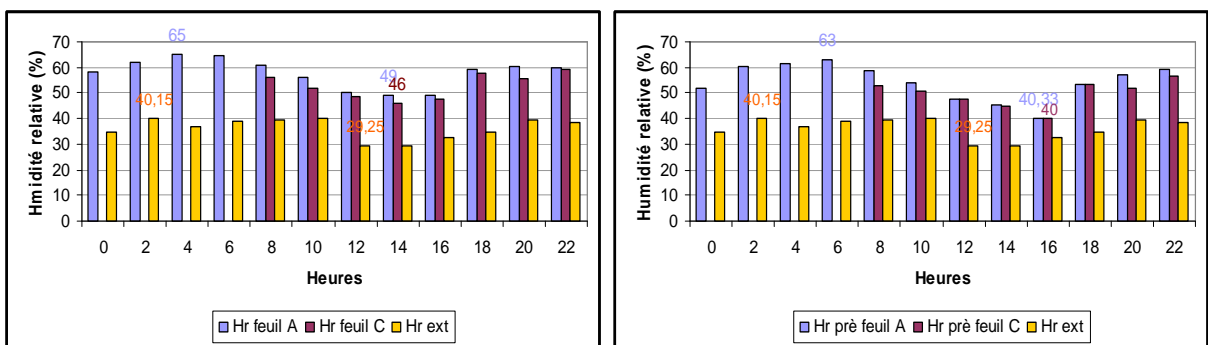


Figure VI-15 : Variations des humidités relatives moyennes intérieures et extérieures et celles du feuillage dans les maisons "A" et "C"

Cette augmentation du degré hygrométrique au niveau du feuillage et près du feuillage par rapport à celle extérieure est due essentiellement à deux facteurs :

- Le premier facteur est l'élévation de la température qui a pour cause une plus grande ouverture des stomates, et par conséquent une plus grande sortie d'eau par évaporation, augmentant ainsi la quantité d'eau évaporée.
- Le deuxième facteur est le vent. En général, plus il vente, plus les stomates auront tendance à s'ouvrir. Toutefois, au-delà d'une certaine vitesse de l'air et d'une certaine température, les stomates se referment pour permettre l'équilibre hydrique de la plante.
- Enfin, le troisième facteur est non le moindre, la lumière. La présence de la lumière provoque l'ouverture des stomates et favorise donc la transpiration.

Cependant, la diminution de l'humidité relative pendant l'après midi peut être expliquée par l'augmentation de la température qui a provoqué à son tour l'augmentation de la résistance des stomates et par la suite la diminution de la transpiration dont la figure VI-16 illustre ce phénomène.

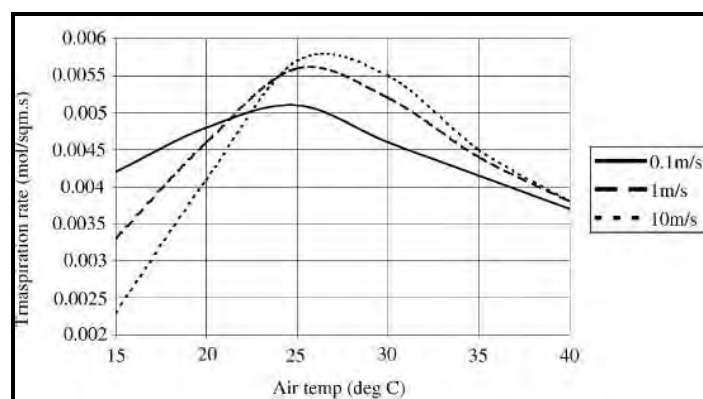


Figure VI-16: Variation du taux de transpiration des feuilles et des températures de l'air pour différentes vitesses du vent. (Source : Dimoudi.A & Nikolopoulou.M, 2003)

La figure VI-15 indique également que l'humidité relative mesurée dans la masse foliaire et celle près du feuillage dans la maison "C" sont inférieures à celles de la maison "A". Elles atteignent leur valeur maximale de 59.2% et 56.67% à 22h00. Quant à l'humidité extérieure, elle enregistre les plus faibles valeurs avec un maximum de 40.15% à atteint à 2h00.

Par conséquent, le phénomène de transpiration de la plante dépend de la surface d'évaporation et donc du nombre des feuilles, de leur constitution et de la densité⁵. L'écran de

⁵ **Les cahiers de l'agriculture et de l'environnement** : « *L'eau et la plante* ». Publication de la Province des îles Loyauté. N°6/ mars 2004, p5.

vigne vierge vraie couvrant la maison "C" étant moins épais et moins dense que celui couvrant la maison "A", ce qui explique les quantités d'humidité du feuillage enregistrées dans les deux plantes.

1.3. Analyse comparative des trois échantillons:

1.3.1. Evaluation de la performance thermique des trois pièces :

La comparaison des températures intérieures et extérieures démontre l'effet des paramètres intervenants; les limites de confort situent l'origine du problème et proposent des dispositions architecturales.⁶ Pour cela, les températures mesurées des différents échantillons dans ce cas seront situées dans une zone de confort établie d'après la température neutre de Humphrey lors de l'analyse bioclimatique de la ville de Constantine. Cette zone est comprise entre la limite supérieure de 28.6 °C et la limite inférieure de 24.6°C pour la période estivale (Voir annexe II)

En effet, les températures moyennes intérieures de la maison « A » se situent dans la zone de confort avec une légère augmentation de 0.45°C qui se fait sentir à partir de 14h00 par rapport à la limite supérieure de confort pour atteindre un écart maximum de 0,7°C à 18h00 (fig VI-17). Cet écart provient essentiellement des apports à travers la fenêtre, et des apports internes qui concernent l'apport de chaleur dégagé sous forme latente ou sensible à l'intérieur de la pièce, qui ont pour origine les occupants et les appareils électriques.

Par rapport à la limite inférieure de confort, elle reste nettement supérieure, où elle présente un écart maximal de 3.3°C à 00h00 car les échanges convectifs sont limités par la couche de feuillage, en plus du manque de ventilation transversale.

Par conséquent, ce résultat montre l'importance de la protection contre la radiation solaire, ce qui fait de cet espace un espace confortable surtout la matinée en absence de radiations solaires intenses dans cette orientation à ce moment là.

⁶ **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. page157

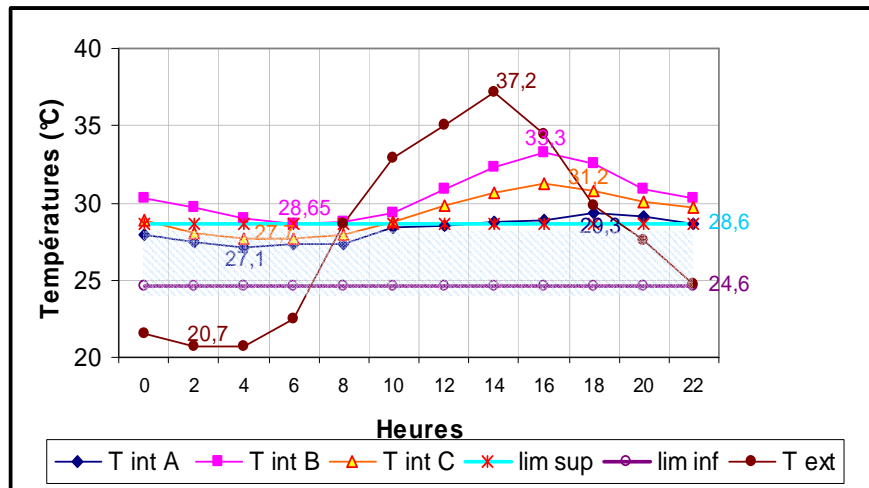


Figure VI-17 : Comparaison des températures moyennes intérieures des trois maisons avec les limites de confort

Durant le jour, les températures de l'air à l'intérieur de la maison "C", sont supérieures à la limite supérieure de confort. La nuit, bien qu'elles se positionnent dans la zone de confort, elles restent beaucoup éloignées de la limite inférieure de confort avec un écart maximal de 4,3°C à 00h00.

Ainsi, il apparaît que la maison "C" a gardé des températures relativement appréciables comparées à celles dans la maison "B". En effet, la courbe des températures de l'air intérieur de la maison "B" reste au dessus des limites de confort durant toute la journée avec un écart maximal de 4,7°C à 16h00 avec la limite supérieure de confort. Par rapport à la limite inférieure, l'écart est de 5,65°C à 00h00. Ces résultats justifient l'inconfort à l'intérieur de l'espace surtout l'après midi par la chaleur transmise à travers la combinaison des hautes températures enregistrées à ce moment et l'incidence des rayons solaires sur la façade orientée sud ouest. Pendant la nuit, quand la température extérieure est inférieure à la température intérieure, la persienne est généralement ouverte de manière à permettre à l'air chauffé par la structure du bâtiment de s'échapper, et à l'air frais extérieur de s'infiltrer. Mais faute de ventilation transversale, les températures de l'air intérieur restent supérieures à celles de l'air extérieur.

Par conséquent, nous pouvons déduire que l'espace le plus confortable reste celui de la maison "A", car c'est à l'intérieur de cette dernière que sont enregistrés les meilleurs résultats. L'écran végétal a joué le rôle d'isolant en limitant les gains de la chaleur à l'intérieur de l'espace.

1.3.2. Comparaison des écarts de température moyenne intérieure et extérieure (ti-te) :

Selon Bennadji.A, 1999⁷, la soustraction des températures moyennes extérieures à celles de l'intérieur du local permet d'apprécier l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur. Car le confort intérieur est de plus en plus apprécié lorsque cet écart s'éloigne du zéro en valeurs négatives. La figure VI-18 indique que la maison "A" présente un écart négatif durant toute la journée avec un maximum de 7.05°C enregistré à 14h00 qui coïncide avec la température extérieure maximale. Ce qui explique le comportement très positif de la pièce durant toute la journée sous l'effet de l'écran de vigne vierge vraie.

Pour la courbe de la maison "C" (fig VI-18), on constate un écart positif entre 00h00 et 6h00 dû à l'effet de la paroi extérieure qui restitue la chaleur vers l'intérieur et au manque de ventilation transversale, la porte et la persienne étant fermées à ce moment là. Mais, de 8h00 à 18h00, l'écart est négatif avec un maximum de 5.2°C atteint à 14h00, cela s'explique par la protection de la paroi malgré sa couverture partielle (80%).

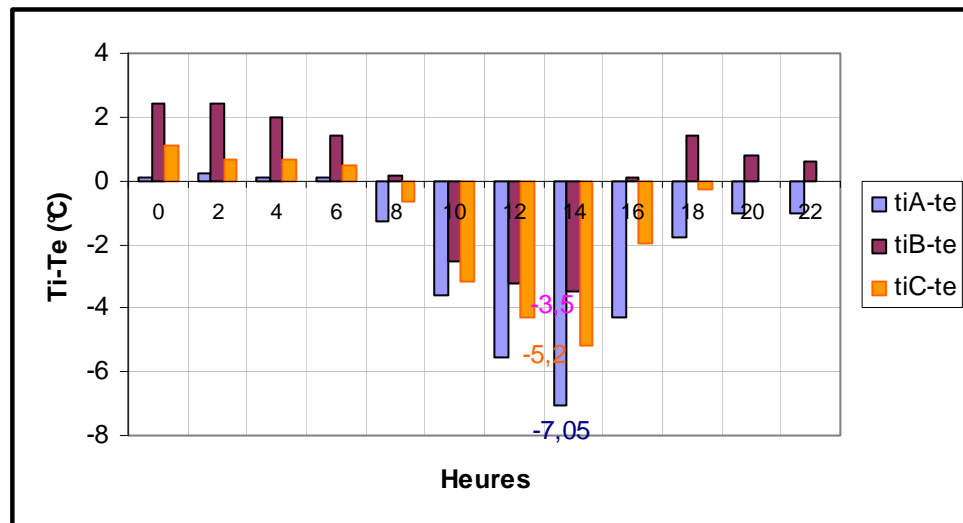


Figure VI-18: Variation de l'écart de température intérieure et extérieure pour les trois échantillons

Quant à la maison "B", entre 16h00 et 8h00, son bilan énergétique est plutôt positif dû à un apport énergétique supplémentaire qui n'a pas été évacué à cause de l'exposition de la paroi aux radiations directes d'une part et au manque de ventilation transversale d'autre part. Même si l'écart entre les température moyennes intérieures et celles extérieures entre 8h00 et

⁷ BENNADJI. A : « *Adaptation climatique ou culturelle en zones arides : cas du sud-est Algérien* » Thèse de doctorat. Université d'Aix-Marseille1-Université de Provence. 1999.

16h00 est négatif, marquant un maximum de 3.3°C à 14h00, il reste minime comparé aux écarts des maisons "A" et "C".

Sous l'effet de l'écran de vigne vierge vraie, le bilan énergétique reste négatif toute la journée, par conséquent, la végétation tempère les variations de températures.

1.3.3. Comparaison des températures surfaciques externes des trois maisons :

La figure VI-19 indique que la courbe des températures surfaciques extérieures de la maison "B" enregistre les plus hautes valeurs. Elle marque un écart maximum de 10.5°C par rapport à celle de la maison "A" et 8°C avec la maison "C". Ces écarts indiquent nettement :

- L'effet tampon de l'écran végétal des maisons "A" et "C" ;
- L'exposition aux radiations solaires et au manque d'ombrage de la paroi "B".

De plus, la comparaison des courbes de températures surfaciques des maisons "A" et "C" montre clairement que la maison "C" est moins protégée que la maison "A" sachant bien que les températures de surface pour les deux cas ont été mesurées dans des endroits ombrés sous le feuillage.

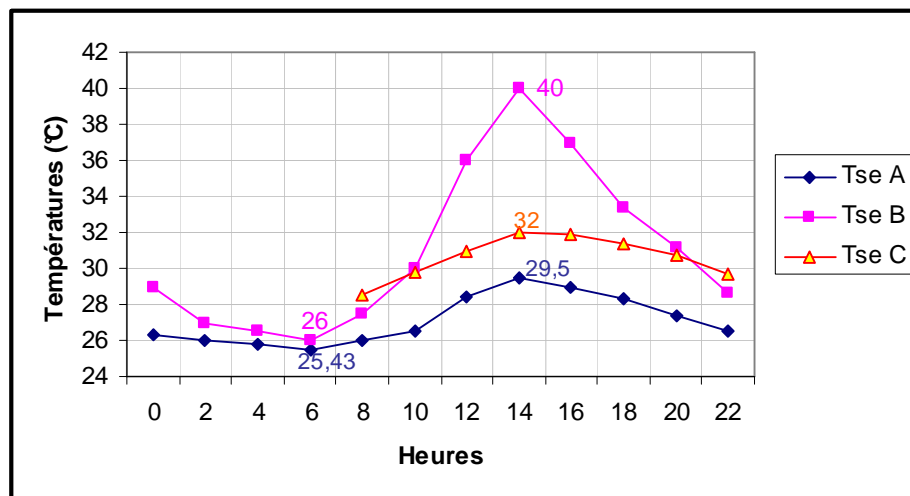


Figure VI-19: Variation des températures surfaciques extérieures des trois maisons "A", "B" et "C"

1.3.4. Comparaison des humidités relatives dans les trois échantillons:

La figure VI-20 montre que le niveau hygrométrique dans la maison "A" est supérieur à celui des maisons "B" et "C". En effet, un écart maximum de 22.7% est enregistré avec la maison "B" dû au phénomène d'évapotranspiration de l'écran végétal, ce qui rejoint les résultats de Lam et al, 2004. Comparé aux humidités de la maison "C", on enregistre un écart maximum de 8.67% avec la maison « A », conjugué à la différence de densité et de rapport de

couverture du feuillage des deux parois car le phénomène de transpiration de la plante dépend de la surface d'évaporation et donc du nombre des feuilles, et de la densité. Plus ces derniers sont grands, plus grande sera l'évapotranspiration.

Ainsi, malgré, la meilleure performance de la maison "A" en matière de température, le niveau hygrométrique reste élevé par rapport aux moyennes extérieures durant toute la journée. Ces valeurs élevées témoignent de l'effet de l'écran végétal (vapeur d'eau émise par le feuillage) et de l'utilisation de l'espace surtout durant la nuit, rappelant que le taux d'humidité est directement relié à l'usage de l'espace par les occupants.

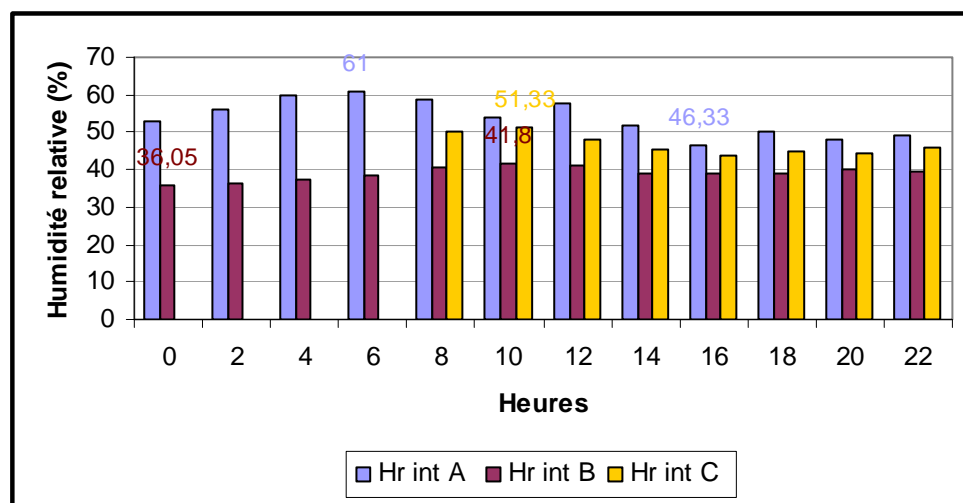


Figure VI-20: Variation de l'humidité relative moyenne des trois échantillons "A", "B" et "C"

1.3.5. Comparaison de la température du feuillage "A" et la température de surface "B"

Quoique le feuillage de la maison « A » ait également absorbé une quantité de rayonnement solaire tel que le mur nu, la température moyenne des feuilles a enregistré une température maximale de 33°C comparée à celle du mur nu qui est de 40°C à 14h00 enregistrant un écart de 7°C (fig VI-21). Rappelons que c'est à cette heure ci que la température moyenne extérieure a atteint sa valeur maximale de 35.8°C. La majeure partie du rayonnement solaire reçu par le mur nu a été absorbée par ce dernier, faisant augmenter sa température. Pour la couche de feuille, l'effet d'évaporation et de convection thermique a réduit la température des feuilles, la rendant inférieure à celle du mur exposé, ce qui rappelle les résultats de Wang et Di, 1999.

La nuit, lorsque les températures sont basses, la couche de feuille réduit la perte de chaleur du bâtiment parce qu'elle réduit le transfert de chaleur par rayonnement, ce qui rend la

température de la couche du feuillage légèrement supérieure à la température de surface externe du mur "B".

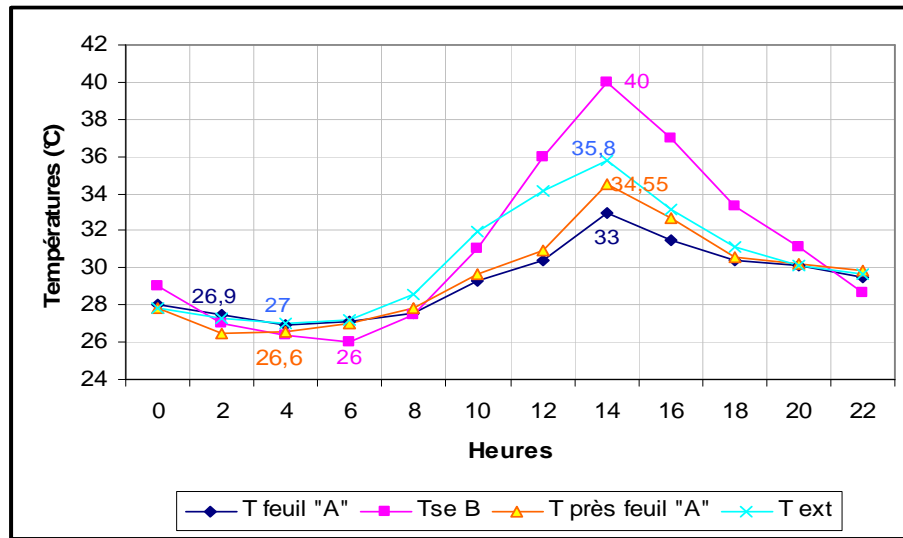


Figure VI-21: Variations des températures du feuillage de la maison "A" et les températures de surface de la maison "B"

2. Etude comparative du comportement thermique des maisons A et D au mois d'août:

Pendant la période d'août (du 14 au 16), les mesures ont été reprises à nouveau en comparant cette fois ci la maison "A" et "D". Pour rappel voici les caractéristiques de la paroi "D" :

Récapitulation	
Maison « D »	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Mur couvert par un écran végétal (vigne) ➤ Epaisseur mur = 24cm ➤ Couleur paroi extérieure : Gris clair ➤ Orientation : Sud sud ouest

Tableau VI-3: Caractéristiques de la maison "D"

2.1. Comparaison des températures moyennes intérieures et extérieures des maisons "A" et "D":

La lecture de la figure VI-22, révèle une différence perceptible entre les deux maisons durant toute la journée. Malgré les fluctuations des températures extérieures et celles enregistrées par les services météorologiques, la courbe des températures de l'air intérieur dans la pièce "A" enregistre une évolution régulière et affiche des valeurs de température variant entre 27.1°C et 29.23°C. Cependant, la maison "D" enregistre les plus hautes valeurs de températures intérieures avec un maximum de 32°C et un minimum de 28°C.

L'écart maximum enregistré entre les deux maisons est de 3.1°C . En effet, la paroi "D" reste soumise aux effets de la radiation solaire directe et à l'effet de la température extérieure malgré l'ombre de l'écran de vigne porté sur la paroi.

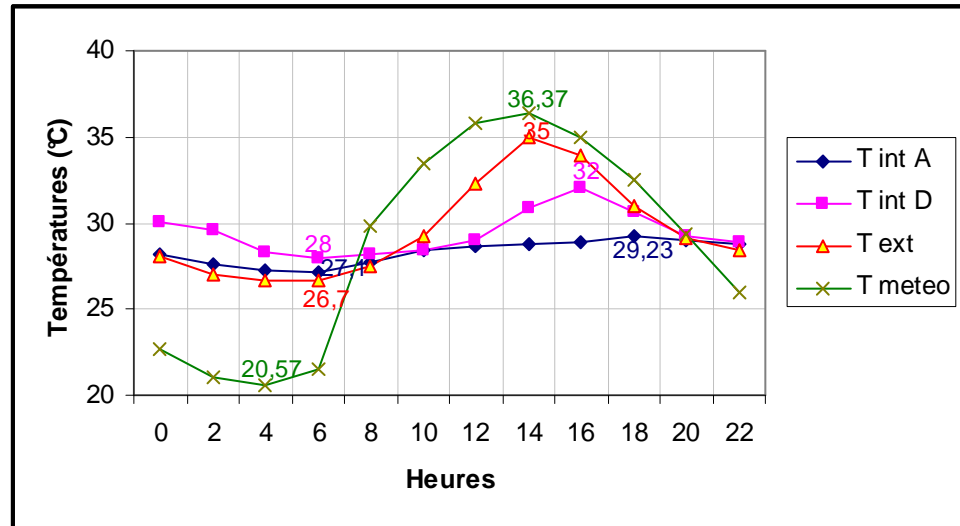


Figure VI-22: Variations de la température moyenne dans les maisons "A" et "D"

2.2. Comparaison des températures surfaciques internes et externes des maisons "A" et "D":

Les températures surfaciques extérieures ont une relation directe avec l'intensité solaire et le degré d'incidence des rayons solaires. En effet, la figure VI-23, indique que la courbe des températures surfaciques extérieures de la maison "D" enregistre les plus hautes valeurs durant la journée en évoluant dans le même sens que celles de l'air extérieur.

De 10h00 à 14h00, elle fluctue rapidement, pour atteindre sa valeur maximale de 36°C à 14h00 au moment où la température extérieure est la plus élevée, témoignant de l'exposition de la paroi au rayonnement solaire direct durant le début d'après midi.

Quant à la température de surface externe de la paroi "A", elle varie entre 27.3°C et 29.7°C , où la valeur minimale est enregistrée à 8h00 et la maximale à 16h00. Elle marque un écart maximum de 6.4°C par rapport à celle de la maison "D", et 5.4°C par rapport à la température de l'air extérieur.

En revanche, pendant la nuit, la courbe des températures surfaciques extérieures de la maison "A" dépasse celle de la maison "D" marquant un écart maximum de 1.9°C et de 1.55°C par rapport à celle de l'air.

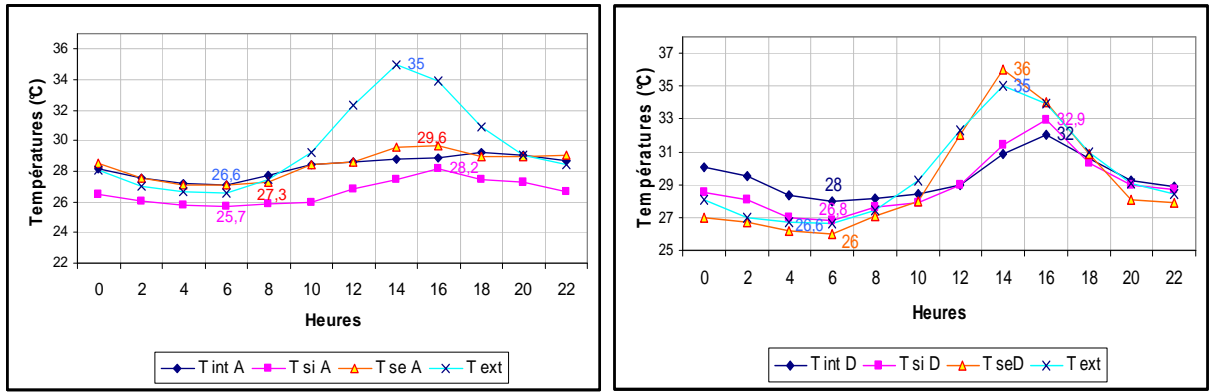


Figure VI-23: Variation des températures surfaciques des maisons "A" et "D"

Rappelons par ailleurs, que la température de surface externe pour les deux cas a été mesurée dans la partie ombrée de la paroi sous le feuillage. De plus, la maison "D" reçoit la même quantité de rayonnement solaire incident que la maison "A" qui ne possède pas de masque environnemental proche (fig VI-24). Néanmoins, la couleur claire des parois extérieures environnantes favorise une lumière réfléchie de 74%⁸.

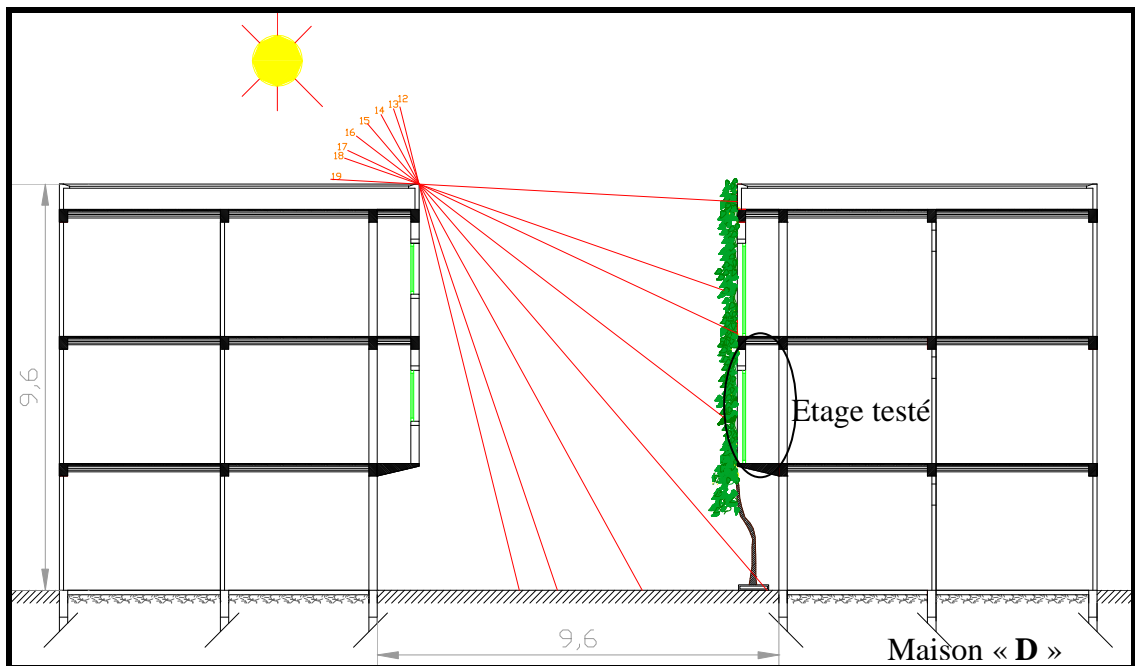


Figure VI-24 : Prospect de la rue

Ainsi, la paroi extérieure de la maison "D" est d'une couleur gris clair d'un facteur d'absorption moyen de 0.5⁹. Cependant, la plante de vigne ne couvre que la fenêtre et une

⁸ CRAU (Centre de recherche en architecture et en urbanisme El Harrach. En collaboration avec l'université des nations unies UNU) : « *Village solaire intégré* ». Edition OPU.1988, p 248.

⁹ IZARD.J.L : « *Architectures d'été/Construire pour le confort d'été* ». Editions : Edisud, 1993. p 48.

partie de la paroi c'est-à-dire que cette dernière reçoit une quantité considérable des radiations solaires incidente ce qui explique d'ailleurs, les valeurs élevées de températures de surface enregistrées dans la maison "D".

La figure VI-23, montre aussi que les températures de surface interne de la maison "A" sont inférieures à celles de surface extérieure et celles de l'air intérieur durant toute la journée. Quant aux températures de surface interne de la maison "D", elles sont inférieures à celles de surface extérieure de la même maison et celle de l'air intérieur durant le jour seulement. Mais la nuit, cette situation s'inverse.

En outre, il apparaît que la courbe des températures de surface interne de la maison "D" dépasse celle de la maison "A", marquant un écart maximum de 4.7°C et minimum de 1.1°C . C'est-à-dire que le transfert de chaleur vers l'intérieur de la paroi "A" a été diminué réduisant de ce fait la température intérieure pour le refroidissement en période d'été.

la comparaison des courbes de températures surfaciques des maisons "A" et "D" montre clairement que la maison "D" est moins protégée que la maison "A". D'ailleurs, la température de surface interne de la paroi est essentiellement liée à la qualité thermique du matériau utilisé.

Toutefois, les deux parois extérieures de la maison "A" et "D" assurent une même résistance totale de $0.78 \text{ m}^2\text{C/W}$ et un coefficient de transmission de $1.28\text{W/m}^{\circ}\text{C}$. Elles présentent alors la même inertie. Pour la maison "D", les apports de chaleur sont amortis d'un maximum de 2.1°C (entre 34.4°C de T_{se} et 32.3°C de T_{si} à 14h00) (fig VI-25). Quant à la maison "A", ils sont amortis d'un maximum de 1.97°C (entre 29.5°C de T_{se} et 27.53°C de T_{si} à 14h00).

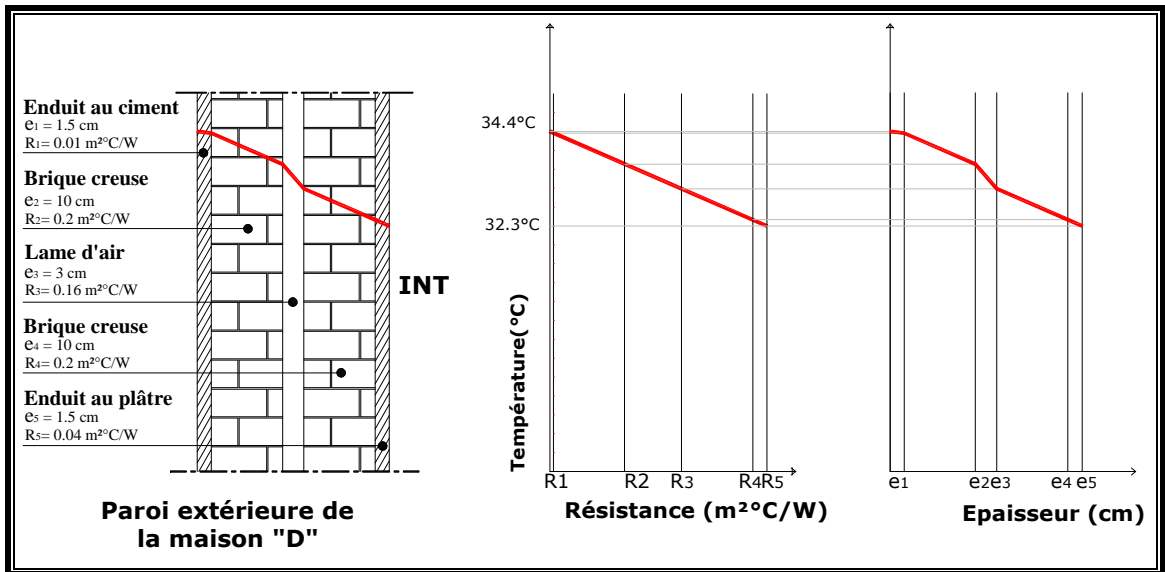


Figure VI-25 : Tracé du gradient thermique au niveau de la paroi extérieure de la maison "D"

2.3. Evaluation de la performance thermique des deux pièces :

En comparant les températures moyennes intérieures des deux échantillons avec les limites de confort calculées à travers la formule de Humphrey; dont la limite supérieure est de 28.6°C et la limite inférieure est de 24.6°C , il ressort que :

Pendant la journée, la courbe des températures intérieures de la maison "D", reste au dessus de la limite supérieure avec un écart maximal de $3,4^\circ\text{C}$ à 16h00 avec (fig VI-26). Ce qui montre son exposition aux radiations solaires durant l'après midi. Durant la nuit, elle dépasse la limite inférieure de confort enregistrant un écart maximum de $5,45^\circ\text{C}$ à minuit.

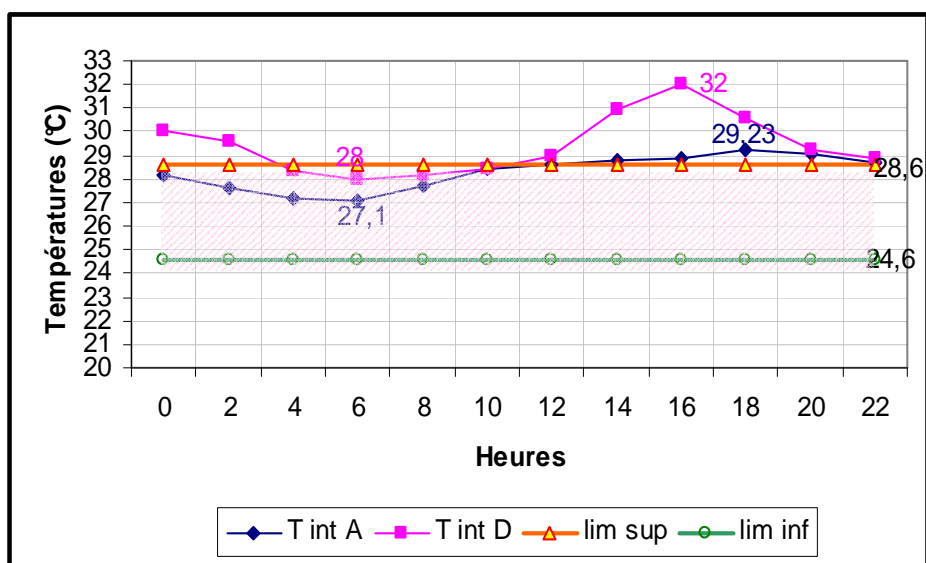


Figure VI-26: Comparaison des températures moyennes intérieures avec les limites de confort

Quant aux températures moyennes intérieures de la maison "A", générées essentiellement par les apports à travers la fenêtre, et les apports internes, elles se situent dans la zone de confort avec une augmentation négligeable de 0.2°C à partir de 14h00 par rapport à la limite supérieure pour atteindre un écart maximum de $0,63^{\circ}\text{C}$ à 18h00. Par rapport à la limite inférieure, elle reste nettement au dessus de cette dernière, où elle présente un écart maximal de 2.5°C à 6h00. En fait, malgré ces fluctuations, la pièce "A" peut être jugée confortable comparée à celle de la maison "D".

2.4. Comparaison des écarts de température moyenne intérieure et extérieure (ti-te) :

La figure VI-27 montre que la maison "A" présente un écart négatif de 8h00 à 20h00 avec un écart négatif maximum de 6.2°C coïncidant avec la température extérieure maximale. Ce qui confirme le comportement positif de la pièce sous l'effet de l'écran de vigne vierge vraie. La nuit, cet écart devient positif, d'une valeur maximale de 0.6°C enregistré à 2h00 dû essentiellement au manque de ventilation transversale.

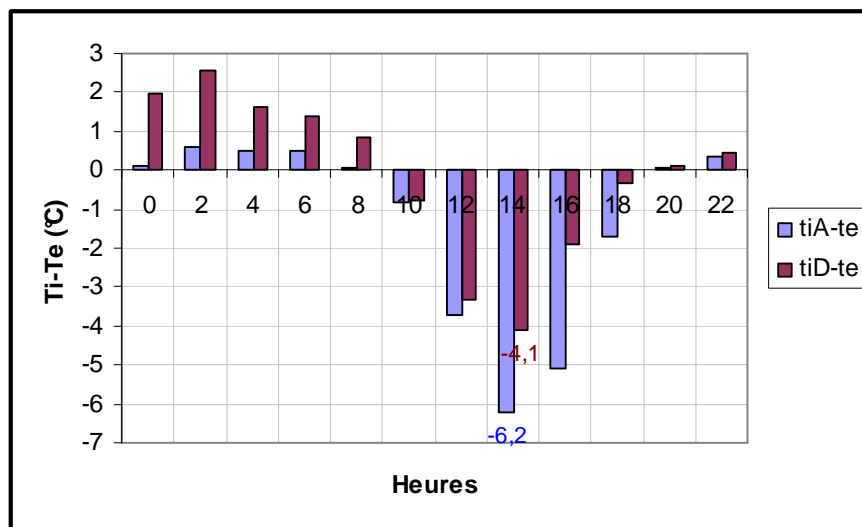


Figure VI-27: Ecart de températures bi-horaires intérieures et extérieures des échantillons "A" et "D"

Quant à la courbe de la maison "D", on constate une durée assez longue durant laquelle l'écart entre la température moyenne intérieure et la température moyenne extérieure est positif entre 20h00 et 8h00 avec une valeur maximale de 2.55°C à 2h00 dû à la restitution de la chaleur vers l'intérieur faute de ventilation transversale. En revanche, pendant le jour, même si l'écart entre les température moyennes intérieures et celles extérieures est négatif marquant un maximum de 4.1°C , il reste minime comparé à celui de la maison "A", expliqué par le

manque de protection de la paroi. Par conséquent avec l'écran de vigne vierge vraie, les températures sont nettement inférieures qu'avec la vigne. Ce qui coïncide avec les résultats de Sandifer et Givoni, 2002 qui ont révélé que la vigne de trompette et le chèvrefeuille ont des performances thermiques meilleures que celles du jasmin (moins dense).

2.5. Comparaison des températures du feuillage des maisons "A" et "D":

A travers la figure VI-28, il apparaît que la température du feuillage dans la maison "D" varie entre 26.65°C et 35,1°C, pendant que celle de la maison "A" fluctue entre 26,6°C et 33,6°C. L'écart maximal enregistré entre les températures des deux plantes est de 1.5°C. Ceci est dû à la faible densité du feuillage de la vigne par rapport à celle de la vigne vierge vraie. Quoique la plante de vigne ait de grandes feuilles, sa masse foliaire reste très éparsée comparée à celle de la vigne vierge vraie coïncidant avec les résultats de Sandifer et Givoni 2002 (Voir chapitre V).

En outre, la courbe de la température du feuillage dans la maison "D" et celle de l'air extérieur se confondent durant la journée en enregistrant un écart maximal de 0.3°C à 8H. Par rapport à la maison "A", cet écart est de 1.3°C à 12H. Par conséquent, la réduction de la température du feuillage par rapport à celle de l'air extérieur est due au phénomène l'évapotranspiration. Toutefois, cette différence se réfère à la densité du feuillage ; plus le feuillage est dense, plus grand est le phénomène d'évapotranspiration, ce qui coïncide avec les résultats de Sandifer et Givoni en 2002.

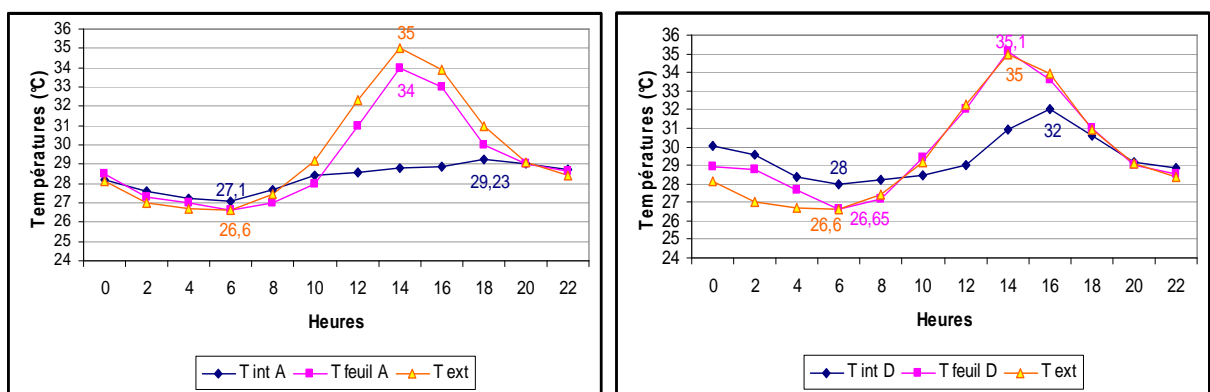


Figure VI-28: Comparaison des températures intérieures et celles du feuillage des maisons "A" et "D"

Pendant le jour, la température du feuillage est supérieure à celle de l'air intérieur avec un écart maximum de 5.2°C atteint à 14h00 pour la maison "A" et 4.2°C pour la maison "D". Ce qui confirme une fois de plus l'efficacité de l'écran végétal dans l'atténuation des fluctuations de température.

En revanche, durant la nuit, la température du feuillage est inférieure à celle de l'air intérieur mais dépassant la température de l'air extérieur. A ce moment là, l'écran végétal réduit la perte de chaleur du bâtiment en réduisant le transfert de chaleur par rayonnement.

2.6. Comparaison des humidités relatives internes et externes et celles du feuillage des maisons "A" et "D":

Ce qui se distingue de la lecture des histogrammes de la figure VI-29, est le taux élevé de l'humidité relative à l'intérieur de la pièce "A", dépassant même celle extérieure et du feuillage et celle de la maison "D". Elle enregistre un écart maximum de 21.23% et minimum de 9.25% avec cette dernière.

En effet, pendant que l'humidité relative à l'intérieur du séjour "D", enregistre de légères fluctuations entre 39.5% et 44.57%, celle de la maison "A" fluctue entre 52.5% et 61.33%.

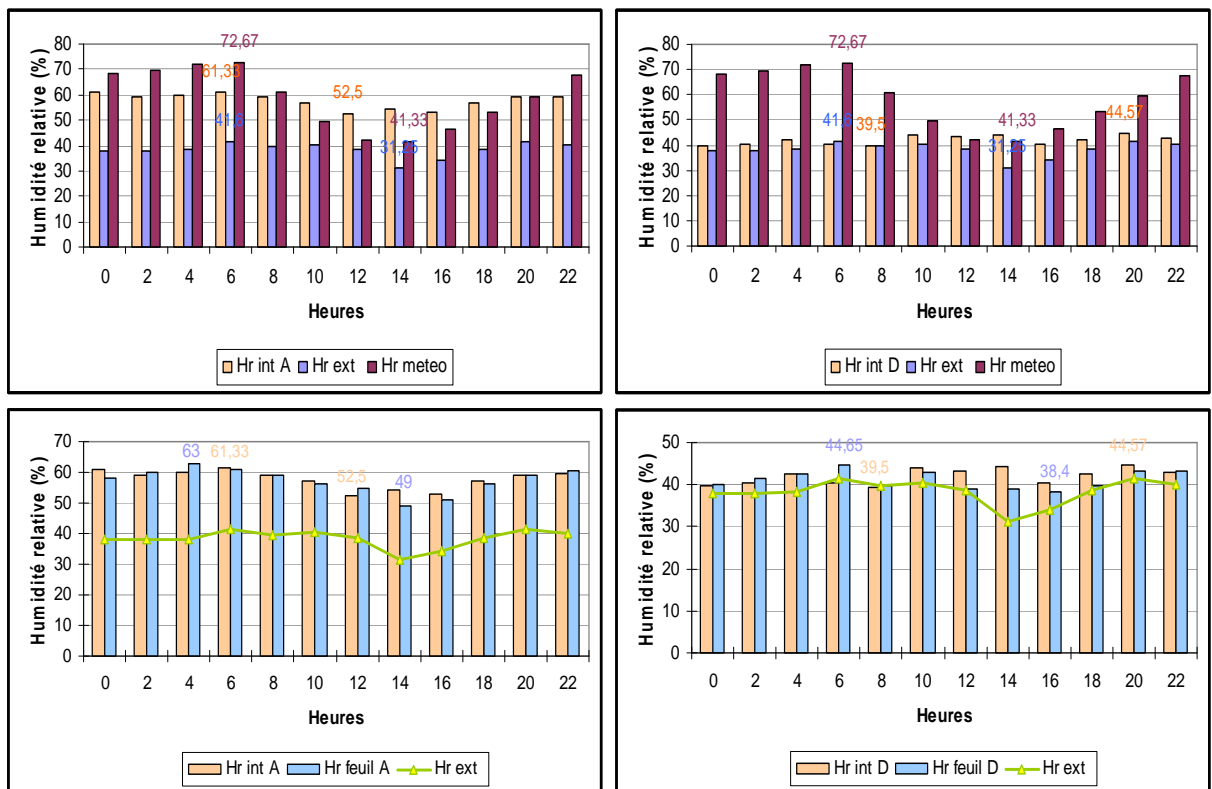


Figure VI-29 : Variation de l'humidité relative moyenne intérieure et extérieure et celle du feuillage des deux échantillons "A" et "D"

Durant la journée, l'humidité relative intérieure dans la maison "D" dépasse légèrement celle mesurée dans le feuillage avec un écart max de 5.15%. En revanche, durant la nuit, cette situation s'inverse où un écart maximum de 1.25% est enregistré.

Quant à l'humidité relative du feuillage, la figure VI-29 révèle également que le taux d'humidité du feuillage de la maison "A" est nettement supérieur à celui de la maison "D", enregistrant un écart maximum de 20.3%.

Le feuillage de la vigne vierge vraie, enregistre une amplitude de 14% entre un minimum de 49% et un maximum de 63% quant à l'humidité relative du feuillage de vigne, elle enregistre une amplitude de 6.25%. Par ailleurs, l'humidité relative extérieure est inférieure à celle mesurée dans la masse foliaire des deux plantes, enregistrant une moyenne maximale de 41,33% et une valeur minimale de 31.25%.

Par conséquent, les valeurs élevées d'humidité relative reviennent essentiellement au phénomène d'évapotranspiration des plantes qui sera ensuite dissipée à travers la paroi pendant toute la journée. En outre, le degré hygrométrique est étroitement lié à la densité du feuillage et à la distance de l'écran végétal par rapport à la paroi. En effet, l'écran végétal de la maison "A" constitue une masse foliaire dense et en contact direct avec le mur ce qui influence directement ce dernier. Comparé à l'écran végétal de la maison "D" qui est épars et situé à une certaine distance du mur, ce qui explique les faibles valeurs d'humidité enregistrées. En outre, la présence des occupants dans le lieu pour dormir et regarder la télévision contribue également à l'augmentation du niveau d'humidité relative à l'intérieur de la pièce.

Conclusion

Les observations issues de cette première analyse concernant l'effet des plantes grimpantes à feuillage caduc sur les bâtiments sous les conditions estivales de Constantine soulignent :

- le rôle important que joue la végétation grimpante implantée à côté du bâtiment dans la régulation des apports externes et de l'environnement proche.
- La réduction des gains de chaleur conductifs et radiatifs
- Grâce à l'ombrage et l'évapotranspiration du feuillage, les variations de températures sont régulées durant toute la journée.
- L'effet de l'inertie sur les températures de l'air et de surface paraît négligeable devant l'effet de la végétation.
- Un apport supplémentaire en humidité durant la nuit nécessitant une ventilation transversale.
- La performance thermique de l'écran végétal dépend étroitement de l'épaisseur et de la densité du feuillage, du rapport de couverture et de la typologie végétale. Ce qui rejoint les résultats de ZAIYI.L et JINYEU.T, 2000, Watson et Camous, 1986, Sandifer.S et Givoni.B, 2002 et Lam et al, 2006 (voir résultats de recherche dans chapitre IV).

3. Simulation à l'aide du logiciel TRNSYS version 14.1:

3.1. Description du logiciel :

TRNSYS (TRANSIENT SYSTEM SIMULATION PROGRAM : programme de simulation de systèmes transitoires), est un logiciel développé par le laboratoire « solar energy » de l'université de WISCONSIN Madison. C'est un outil de simulation en régime dynamique multi zones, structuré de manière modulaire, ce qui assure au programme une grande flexibilité et facilité par l'insertion des sous-programmes. La version 14.1 est développée en fortran.

Ce logiciel informatique, se caractérise par ses trois fonctions qui se résument comme suit :

- Les entrées (inputs):

Elles concernent toutes les informations à introduire et à stocker selon l'ergonomie du logiciel dans des bibliothèques que le concepteur peut utiliser. Ces entrées englobent l'environnement physique (climat, site), le bâtiment (l'enveloppe), les apports internes (occupants...) et les équipements « ventilation, chauffage, climatisation... »

- Le traitement des données : se fait en fonction d'un modèle de représentation du bâtiment et la demande de l'utilisateur.

- Les sorties (outputs): sont les ensembles des résultats qui peuvent être fournis par le logiciel à l'issue d'une exécution.

TRNSYS utilise un grand nombre de modules représentant les composants de systèmes courants mais également de sous programmes et de gestion de base de données thermiques. Ce logiciel multi zones permet de valider plusieurs options architecturales. Les types les plus utilisés pour la simulation dans le bâtiment sont :

- Type 9 : Lecteur de données standard.
- Type 54 : Générateur des données météorologiques.
- Type 33 : Lecture à partir du diagramme psychrométrique.
- Type 16 : Processeur ou générateur d'ensoleillement.
- Type 56 : Bâtiment multi zones (simuler le comportement thermique du bâtiment).
- Type 34 : Introduction et simulation des caractéristiques de la fenêtre; dimensions, type de protections, position de la protection avec détail.
- Type 25 : Impression des données.
- Type 65 : Affichage des résultats.

Pour ce travail, la simulation est utilisée pour l'évaluation du cas existant avec la variation du paramètre de la couleur.

Les phénomènes que le model de simulation thermique doit prendre en compte :

- Le transfert de chaleur par conduction à travers l'enveloppe et les effets de stockages calorifiques dans la masse du bâtiment.
- Les gains dus aux occupants, aux appareils, à la lumière électrique.
- L'ombrage des parois opaques et transparentes.
- Les effets des radiations solaires de courte longueur d'onde et les radiations reçues par les surfaces exposées et internes.
- Les radiations de longueur d'ondes échangées entre les surfaces externes, la voûte céleste et l'environnement.
- Les effets de l'humidité.

3.1.1. Avantages du logiciel TRNSYS :

- Grâce à son approche modulaire, TRNSYS est extrêmement flexible pour modéliser un ensemble de systèmes thermiques à différents niveaux de complexité.
- L'accès au code source permet aux utilisateurs de modifier ou d'ajouter des composants qui ne figurent pas dans la bibliothèque d'origine.
- Documentation vaste de sous programmes y compris explication, usages usuels et équations de base.
- Définition très souple de la période de simulation : choix de pas de temps, du début et de la fin de la simulation.

3.1.2. Inconvénients du logiciel TRNSYS :

TRNSYS ne dispose pas de valeur ou de système par défaut, l'utilisateur doit donc posséder des données définissant le bâtiment et le système.

3.2. Déroulement de la simulation :

A partir des données architecturales et des propriétés thermo physiques du matériau, une analyse du comportement thermique des échantillons est effectuée à l'aide du logiciel « TRNSYS V 14.1 »

Le déroulement de la simulation a pris comme cheminement :

1. La première étape : concerne l'introduction des données climatiques de la région de Constantine (36° 17') ; les valeurs horaires des températures et des humidités relatives pour la période d'été.
2. La deuxième étape concerne la description détaillée du bâtiment et les scénarios de la pratique de l'espace dans les fichiers TRNWIN et BID (voir annexe V).
3. La dernière étape concerne la lecture des résultats de la simulation par le biais du logiciel Excel.

Étant donné que cette version de TRNSYS ne traite pas l'élément végétal, on s'est limité à la simulation de la maison "B" avec ses propriétés pour vérifier d'abord l'écart des valeurs mesurées et simulées (à titre de vérification). Puis, il s'agit de simuler la maison "A" avec ses propres caractéristiques sans écran végétal dans un but de comparer les températures mesurées et celles simulées (c'est-à-dire pour voir si l'écran végétal a pu améliorer le confort ou non). Il s'agit d'évaluer la température intérieure de la zone d'étude, les températures surfaciques intérieures et extérieures du mur extérieur et les quantités d'humidité relatives intérieures.

Cependant, pour la maison "A" ayant une paroi extérieure de couleur foncée (un facteur d'absorption de 0.9), on a essayé de faire changer ce paramètre en lui attribuant un coefficient d'absorption de couleur claire et de le comparer avec les températures mesurées dans le but de vérifier lequel de ces paramètres est le plus performant, la couleur claire ou l'écran végétal.

Les résultats du traitement sont rassemblés dans un fichier contenant l'évolution heure par heure des différents paramètres pour la durée de simulation qui a pris une seule période en l'occurrence la période estivale.

Nous déterminons les valeurs de l'attribue « azimut » qui caractérise le modèle du bâtiment multi zone de TRNSYS. Ses valeurs horaires sont lues dans TRNSYS par un model « data reader » (type 9) standard, puis connectées aux inputs du type 56 assignés à la valeur d'azimut (figure VI-30).

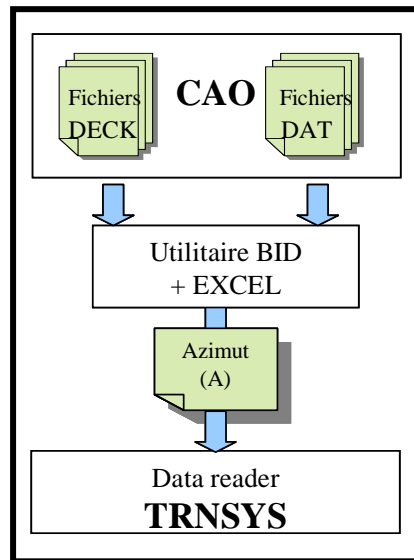


Figure VI-30 : Schéma de déroulement de la simulation.

3.3. Comparaison entre températures mesurées et calculées par TRNSYS :

3.3.1.a. Vérification des températures mesurées et celles simulées par TRNSYS dans la maison "B" :

La figure VI-31 montre une concordance entre la courbe des températures intérieures mesurées et celles simulées. D'ailleurs, elles suivent la même évolution que la température extérieure et enregistrent leur valeur maximale à la même heure à 18h00. Comme indiqué dans la figure ci dessous, l'écart maximal obtenu entre les températures intérieures mesurées et celles modélisées est de 2,01°C enregistré à 2h00. Ce qui peut être justifié par l'intervention de l'usager dans l'espace habité sans oublier la précision des appareils utilisés.

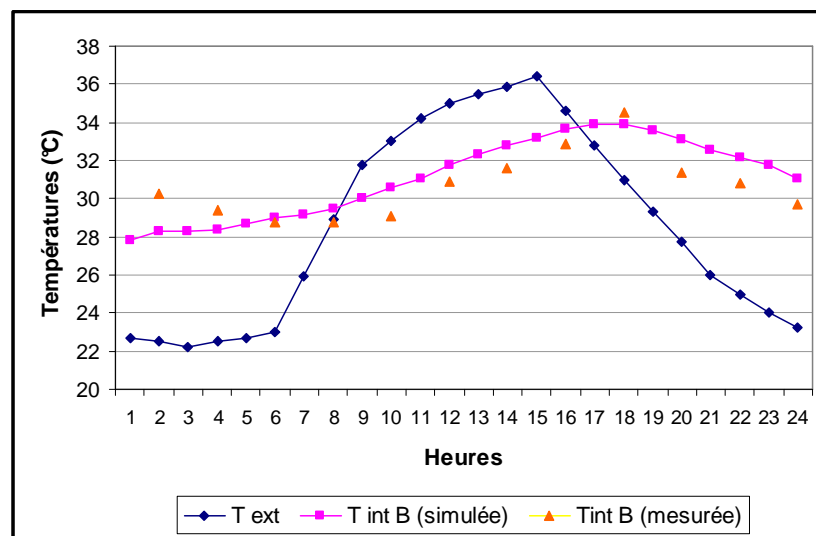


Figure VI-31 : Comparaison des températures intérieures mesurées et simulées pour la maison "B" [Période de juillet, journée du 08-07-2007].

3.3.1.b. Vérification des températures surfaciques mesurées et celles simulées par TRNSYS dans la maison "B" :

Les valeurs de températures surfaciques intérieures et extérieures obtenues en simulation sont légèrement plus élevées que celles obtenues par les mesures (fig VI-32). L'écart maximal enregistré entre tse simulée et tsi mesurée est de 2,98°C à 18h00. Pour les températures de surface internes, l'écart maximal est moins important de l'ordre de 2,18°C enregistré à 20h00.

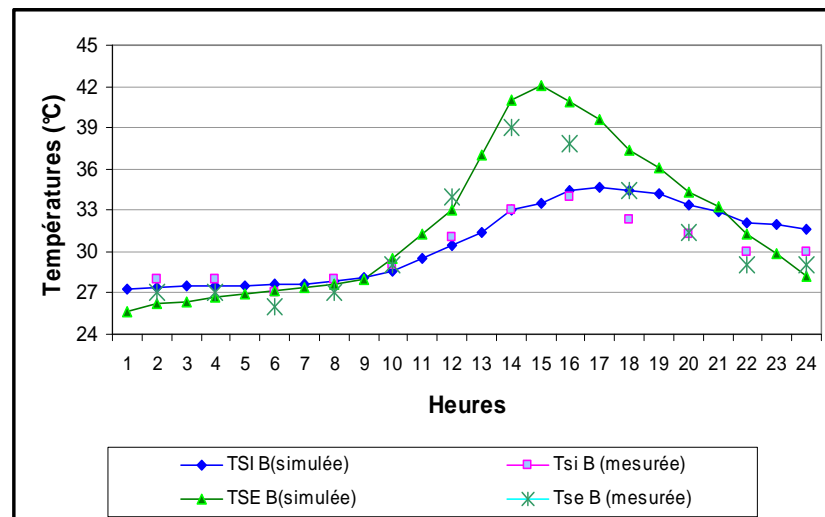


Figure VI-32 : Comparaison des températures surfaciques mesurées et simulées pour la maison "B" [Période de juillet, journée du 08-07-2007].

3.3.1.c. Vérification des humidités relatives mesurées et celles simulées par TRNSYS dans la maison "B" :

Les histogrammes de la figure VI-33 témoignent d'un écart maximal de 3.4% à 4h00 et un écart minimal est 0.4% enregistré 16h00 entre les humidités relatives mesurées dans la maison "B" et celles simulées par TRNSYS. Ceci revient certainement à la précision de l'hygromètre utilisé pour les mesures de l'humidité intérieure et extérieure.

Par conséquent, à travers les chiffres obtenus par la simulation, les mesures sur site peuvent être validées. Il y a lieu alors de simuler la maison "A".

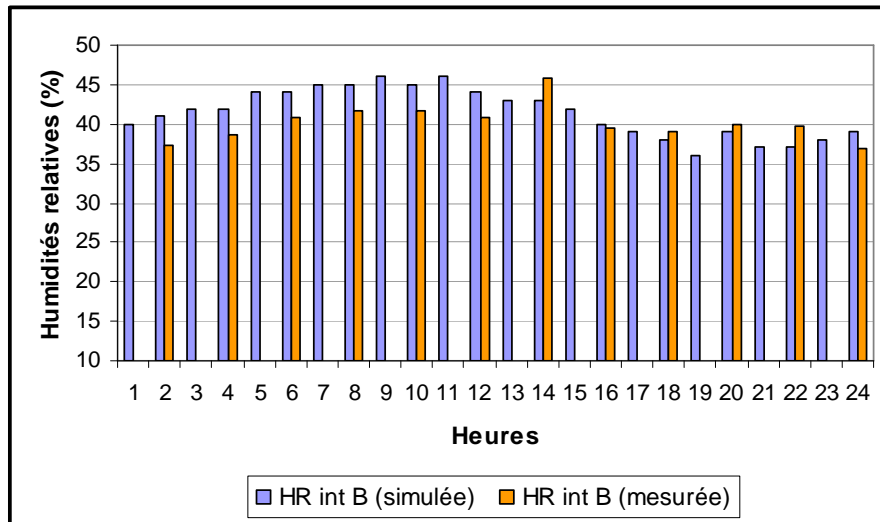


Figure VI-33 : Comparaison des humidités relatives mesurées et simulées pour la maison "B" [Période de juillet, journée du 08-07-2007].

3.3.2.a. Comparaison des températures intérieures mesurées et celles simulées sans l'écran végétal par TRNSYS dans la maison "A" :

La figure VI-34 indique une grande différence entre la courbe des températures simulées dans la maison "A" avec ses propres caractéristiques sans l'écran de vigne vierge vraie (couleur initiale sombre avec un coefficient d'absorption égale à 0.9), et celle mesurée avec l'écran végétal. L'écart maximal entre les deux températures est de 6.76°C enregistré à 18h00. Ceci peut être expliqué par l'efficacité de l'écran végétal dans l'amélioration du confort thermique intérieur du bâtiment.

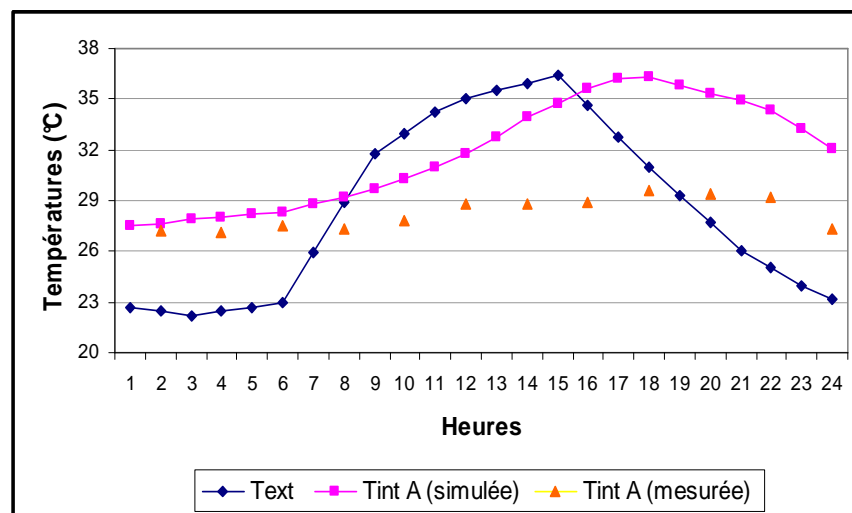


Figure VI-34 : Comparaison des températures intérieures mesurées et simulées pour la maison "A". [Période de juillet, journée du 08-07-2007].

3.3.2.b. Comparaison des températures surfaciques mesurées et celles simulées sans l'écran végétal par TRNSYS dans la maison "A" :

La comparaison des courbes des températures surfaciques de la paroi sombre et celle couverte de végétation témoigne d'un grand écart entre les températures simulées et celles mesurées (fig VI-35). Pour le deuxième cas, les valeurs faibles de températures intérieures obtenues témoignent de la protection de la paroi extérieure.

L'écart maximal enregistré entre tse simulée et tse mesurée est de 17,31°C à 16h00. Pour les températures de surface internes, l'écart maximal est moins important de l'ordre de 10,8°C enregistré à 20h00. Ce qui a permis de conclure que l'écran végétal peut éliminer l'effet négatif de la paroi sombre en période estivale.

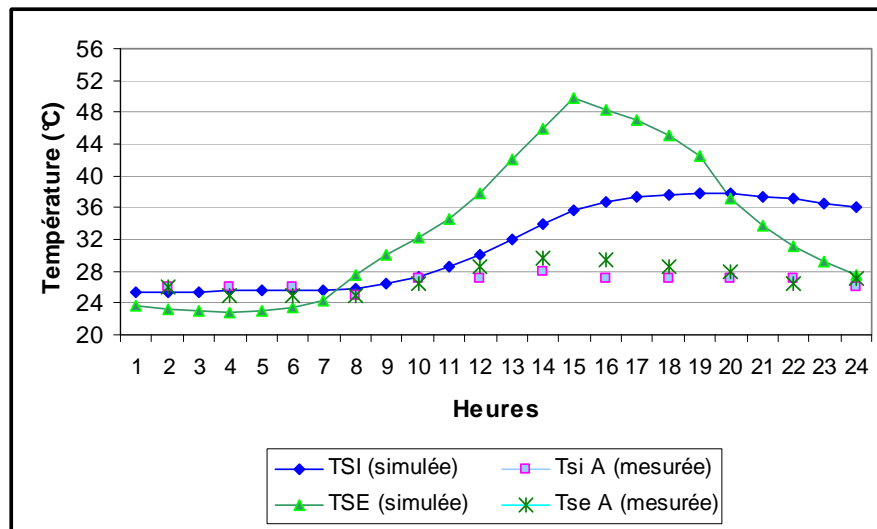


Figure VI-35 : Comparaison des températures surfaciques mesurées et simulées pour la maison "A". [Période de juillet, journée du 08-07-2007].

3.3.2.c. Comparaison des humidités relatives mesurées et celles simulées sans l'écran végétal par TRNSYS dans la maison "A" :

Les histogrammes de la figure VI-36 révèlent que les humidités relatives mesurées dans la maison "A" sont plus élevées que celles simulées par TRNSYS témoignant d'un écart maximal de 17.4% enregistré à 14h00. Ce qui peut être expliqué d'une part, par le degré de précision de l'hygromètre utilisé et d'autre part par l'effet de l'écran végétal sur le degré hygrométrique intérieur (apport supplémentaire en humidité).

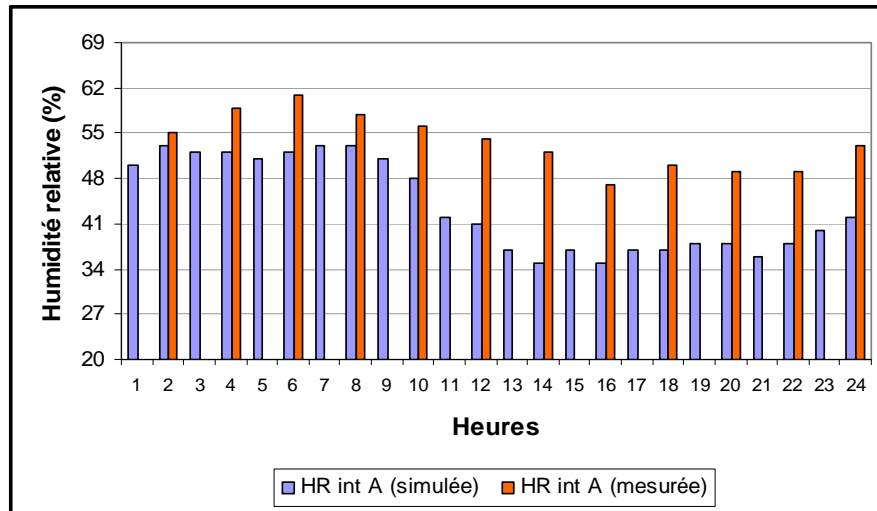


Figure VI-36 : Comparaison des humidités relatives mesurées et simulées pour la maison "A" [Période de juillet, journée du 08-07-2007].

3.3.3.a. Comparaison des températures intérieures mesurées et celles simulées sans l'écran végétal pour une couleur claire dans la maison "A" :

La variation du paramètre de la couleur externe montre l'effet de ce facteur sur la température intérieure et de surface à l'aide de la simulation. En effet, à travers la figure VI-37, le résultat de simulation a révélé une réduction de la température intérieure par rapport à la paroi sombre d'origine. Néanmoins, les températures dans le cas d'une paroi claire (facteur d'absorption = 0.3) restent supérieures aux températures mesurées dans la maison "A" (paroi végétalisée) d'où l'écart maximum entre T_{int} (paroi claire) et T_{int} (mesurée) est égale à 3.87°C enregistré à 16h00. Ce qui confirme encore une fois l'importance de la végétation dans l'amélioration de l'ambiance intérieure.

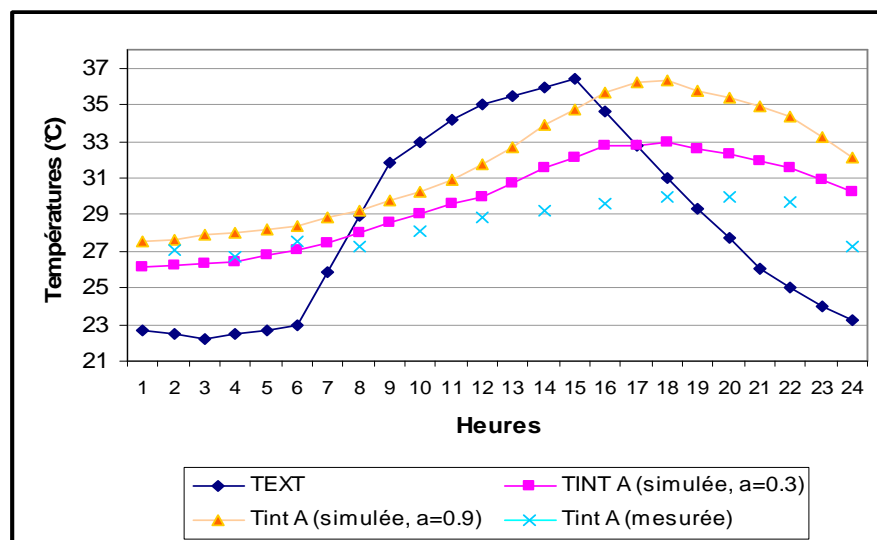


Figure VI-37 : Comparaison des températures intérieures mesurées et simulées pour la maison "A" pour une couleur claire [Période de juillet, journée du 08-07-2007].

3.3.3.b. Comparaison des températures surfaciques mesurées et celles simulées sans l'écran végétal pour une couleur claire dans la maison "A" :

Même les températures de surface pour une couleur claire de la paroi externe ont témoigné d'une hausse par rapport à celles mesurées avec l'écran de vigne vierge vraie (fig VI-38). Alors que la température de surface externe dans le cas de la paroi claire, atteint une température maximale de 35.09°C à 16h00, celle mesurée est de 29°C soit un écart de 6.09°C. Quant à la température de surface interne dans le cas d'une couleur claire enregistre une valeur maximale de 33.34°C à 18h00. Par contre, celle mesurée n'atteint que 28°C enregistrée à 18h00 soit un écart de 5.44°C.

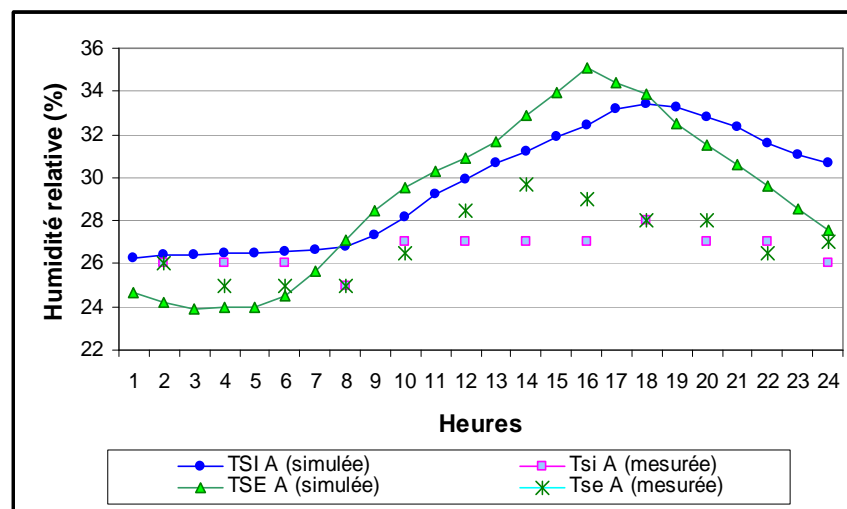


Figure VI-38 : Comparaison des températures surfaciques mesurées et simulées pour la maison "A" pour une couleur claire
[Période de juillet, journée du 08-07-2007].

Conclusion de la simulation :

Ces résultats affirment que pour la période d'été, la couleur extérieure a une influence considérable sur la partie du rayonnement solaire incident absorbé par la paroi. D'ailleurs, Cheng.V, NG.E et Givoni.B, 2005 affirment que l'application d'une surface claire est un moyen efficace pour réduire la température intérieure.

Cependant, les résultats obtenus pour une couleur claire restent insignifiants comparés à l'écran végétal. C'est-à-dire que ce dernier reste plus performant qu'une couleur claire en matière de confort thermique sous un climat semi aride. Ceci rejoint une fois de plus les résultats de Bass. B, 1999, et Sandifer.S et Givoni.B, 2002.

Conclusion de l'investigation:

En résumé, il existe une différenciation des valeurs de mesures climatiques effectuées dans les différents échantillons qui comportent à la fois: la température de l'air, la température de surface et l'humidité relative. Il s'en suit que, les résultats obtenus ont permis de constater l'effet de l'écran végétal sur l'ambiance hygrothermique des logements.

Contrairement à la maison "B", la présence de la végétation sur les parois verticales des maisons "A", "C" et "D" diminue la température de l'air par évapotranspiration d'eau. En outre, la végétation réduit la température de surface par l'ombre qu'elle procure. Ces parois végétalisées avec des températures plus faibles que celle exposée de la maison "B" émettent moins de rayonnement de grande longueur d'onde et le transfert de chaleur vers l'intérieur des maisons est diminué améliorant, de ce fait, l'ambiance intérieure de ces maisons pour le refroidissement en période d'été.

Par ailleurs, la maison "A" a enregistré les plus faibles valeurs de température de l'air et celles de surface par rapport aux autres maisons. Il en résulte que la plus grande réduction de température de l'air intérieur est enregistrée l'après midi c'est-à-dire lorsque les températures extérieures sont maximales. La réduction des températures est de 4.4°C à 16h00 par rapport à la maison "B", de 2.3°C par rapport à la maison « C » et de 3.1°C par rapport à la maison "D". En revanche, la maison "A" a enregistré les plus hautes valeurs d'humidité avec un écart maximal de 22.7% par rapport à la maison "B", et 20.3% par rapport à la maison "D". Tous ces résultats, révèlent que la densité, l'épaisseur et le rapport de couverture du feuillage ainsi que la typologie ont un effet significatif sur le comportement thermique du mur et jouent un rôle prépondérant dans l'amélioration du confort intérieur.

Nous pouvons alors conclure que notre hypothèse principale est confirmée : la végétation attenante aux bâtiments constitue une protection saisonnière susceptible de remédier aux problèmes liés aux surchauffes, procure de l'ombrage et réduit donc l'insolation directe sur les bâtiments. Elle constitue, par conséquent, une stratégie efficace de rafraîchissement passif sous le climat de la ville de Constantine.

De même que pour les hypothèses secondaires, la vapeur d'eau émise par évapotranspiration des feuilles de la végétation grimpante permet de rafraîchir l'air ambiant à côté du bâtiment et participe par conséquent à la régulation de l'ambiance hygrothermique intérieure. En outre, de part sa densité, la vigne vierge vraie constitue un dispositif performant

d'ombrage saisonnier et de rafraîchissement en période estivale comparé à la vigne ordinaire. D'ailleurs, la densité, l'épaisseur du feuillage et le rapport de couverture sont les éléments clefs de la performance de l'écran végétal.

Néanmoins, dans les bâtiments à faible inertie et ayant un manque de ventilation transversale, l'écran végétal peut augmenter le degré hygrométrique à l'intérieur de ces derniers.

Le développement des exigences de confort dans les bâtiments a conduit à des solutions consommatrices d'énergies contradictoires avec des notions nouvelles telles que la nécessité d'un développement durable.

En effet, si ces dernières années ont vu l'émergence de considérations de développement durable lors des opérations de construction, un effort considérable reste à produire, notamment sur le bâti existant. Nous devons aujourd'hui faire face à un patrimoine bâti dont les performances et prestations sont bien inférieures à ce que préconisent les différentes normes. Ces dernières ne sont d'ailleurs que très partiellement applicables à l'existant.

De ce fait, en période estivale, les bâtiments résidentiels sont confrontés à des problèmes d'inconfort liés au phénomène de surchauffe et de l'exposition des façades aux radiations solaires. Ceci a pour conséquence une grande consommation d'électricité pour la climatisation et l'accroissement des émissions de gaz à effet de serre (GES).

A travers les chiffres présentés dans l'analyse climatique et bioclimatique de la ville de Constantine, le climat de cette dernière apparaît comme semi aride avec un été assez sec et chaud. Durant les mois d'été où les températures sont très élevées et l'humidité relative basse, il est nécessaire de procurer un contrôle de la radiation et une inertie par absorption avec une ventilation nocturne. De plus, pour les périodes caniculaires correspondant au mois de juillet et août (température maximale atteignant 37.2°C), un système de rafraîchissement par évaporation ressort comme recommandation.

Par conséquent, le recours aux procédés passifs s'avère nécessaire pour palier aux surcoûts de la climatisation et d'améliorer les conditions de confort des usagers en été. En fait, parmi les systèmes passifs procurant un tel effet se trouve la végétation, reconnue pour ses bienfaits de rafraîchissement dans différents climats.

La présente recherche consiste donc en une investigation in situ des phénomènes physiques du confort hygrothermique estival. Ses objectifs sont, d'une part, l'évaluation du confort hygrothermique des bâtiments sous l'effet des écrans végétaux et plus précisément de la végétation grimpante à feuillage caduc sous le climat semi aride de Constantine, et d'autre part, la mise en évidence des différents paramètres déterminants dans l'efficacité de ces écrans afin de pouvoir déterminer leurs effets sur l'environnement extérieur proche et sur les conditions intérieures de confort thermique.

Et pour ce faire, afin d'atteindre cet objectif, une investigation sur un cas réel de maisons individuelles, situées à Constantine a été entamée. Quatre échantillons représentatifs ayant la même orientation sud sud ouest ont servi de support à l'analyse du comportement thermique de ces maisons et ce, pendant plusieurs jours successifs au mois de juillet et août.

L'expérience menée est basée sur une campagne de mesures in situ avec des relevés bi horaires (mesurés simultanément) de plusieurs paramètres physiques tels que : la température de l'air, les températures de surface, l'humidité de l'air et la vitesse de l'air.

En effet, pendant la période de juillet, l'effet de refroidissement de l'écran végétal sur l'ambiance hygrothermique des bâtiments a été étudié en comparant la qualité performantielle de trois maisons « **A** », « **B** » et « **C** ». La première ayant une couverture de 100% de vigne vierge vraie de 20 à 30cm d'épaisseur, la deuxième ne possédant aucune protection solaire c'est-à-dire un mur nu et la troisième possédant un écran de vigne vierge vraie d'une faible épaisseur et de faible densité avec un rapport de couverture de 80%.

Par ailleurs, nous avons pu constater une différence perceptible entre les trois échantillons testés : une baisse de la température ambiante dans la pièce ciblée dans la maison « **A** » pour la plupart des après-midi d'été où les températures extérieures ont enregistré leurs plus hautes valeurs. Pendant les jours chauds d'été, l'écran de vigne vierge vraie réduit les températures près de la paroi extérieure, celles de surface ainsi que celles de l'air intérieur.

En outre, l'écran végétal peut éliminer l'effet de la couleur extérieure foncée en jouant un rôle d'isolant. Ses avantages sont d'ordre protecteur et de confort. L'énergie absorbée par le mur est sensiblement réduite et les températures d'intérieur et de surfaces sont diminuées.

Les plantes grimpantes à feuillage caduc offrent une bonne protection solaire et protègent les murs extérieurs en réduisant les transferts conductifs et les gains par rayonnement. L'effet de refroidissement de la vigne vierge vraie change selon la densité du feuillage, de son épaisseur et de la surface ombrée (rapport de couverture). Tous ces éléments constituent des paramètres importants affectant, sans doute, le confort thermique intérieur. Plus l'épaisseur, la densité et le rapport de couverture sont grands, plus la performance de l'écran végétal est grande. Toutes ces conclusions viennent confirmer ceux

de bon nombre de chercheurs (HOYANO.A, 1988 - SANDIFER.S, GIVONI. B, 2002 - LAM. M et al, 2006), dont les résultats ont été exposés dans le chapitre IV.

Pendant la période d'août, l'étude comparative a été entreprise entre deux maisons « A » et « D ». La première ayant été déjà définie et la deuxième ayant un écran de vigne.

Par conséquent, les résultats ont révélé que l'effet de refroidissement des plantes grimpantes varie selon la typologie. D'ailleurs, la vigne vierge vraie est plus performante que la vigne. Cette dernière, bien qu'elle ait de grandes feuilles, présente un feuillage épars et peu dense comparé à la vigne vierge vraie.

Telle une seconde peau, les plantes à feuilles caduques à côté du bâtiment peuvent contrôler les apports de chaleur extérieurs et réguler les températures intérieures sans aide d'équipement. Par un choix judicieux de la typologie, elles constituent un élément acteur du confort hygrothermique en été en évitant les surchauffes.

En outre, le phénomène d'îlot de chaleur a des conséquences directes sur les charges climatiques des bâtiments, donc sur le confort thermique à l'intérieur de ceux-ci mais aussi sur leur demande énergétique. Si, en hiver, l'effet peut être positif sur la réduction des consommations dues aux systèmes de chauffage, il l'est moins en été s'agissant des bâtiments climatisés qui nécessitent, en revanche, une consommation énergétique accrue.

Les dissipations thermiques des bâtiments participent alors de façon importante à l'amplification du réchauffement urbain. La densification des villes et l'accroissement général des consommations énergétiques font augmenter l'énergie dissipée, et les systèmes de climatisation peuvent représenter une part significative d'autant plus que leur charge augmente avec le réchauffement.

D'autre part, l'urbanisation a souvent entraîné une diminution globale de l'albédo de surface, due en particulier à la disparition de la végétation. Cette caractéristique du milieu urbain minéral peut avoir un impact sur les bâtiments du même ordre que l'effet d'îlot de chaleur et provoque donc des effets de rayonnements très importants en période estivale.

Bozonnet. E, 2005, précise que le microclimat urbain proche peut aussi être amélioré par la présence de la végétation : l'évapotranspiration de la végétation rafraîchit l'air. En été, l'ombrage apporté par les bâtiments voisins est rarement efficace et, en hiver, ceux-ci deviennent de réels obstacles à l'ensoleillement.

Pour cela, à travers la végétalisation des façades, l'effet de l'îlot de chaleur est diminué. L'écran végétal minimise les réflexions entre façades lorsque l'albédo est moindre. Le rayonnement solaire réfléchi est réduit ainsi que les rayonnements de grande longueur d'onde émis par les différentes surfaces vers les murs. Notons que l'élément végétal et plus particulièrement les plantes à feuilles caduques présentent un albédo de 0.15 à 0.2 (OKE, 1987).

La végétation a aussi un impact important, notamment les arbres, de façon directe et indirecte. Les ombres portées sur les bâtiments et autres surfaces participent à la diminution des charges de climatisation.

Les résultats démontrés dans l'investigation nous confirment bien l'influence de la végétation sur l'amélioration du microclimat extérieur et intérieur, se traduisant par l'ombrage permanent du végétal sur les surfaces verticales évitant ainsi leurs surchauffes en plus de l'effet d'évapotranspiration, et d'un apport en humidité permettant de rafraîchir l'environnement immédiat.

Par conséquent, l'impact de la végétation, ne devra plus avoir seulement une fonction d'agrément et d'ornementation mais devra être utilisé comme stratégie pour le confort des usagers. La présence de végétation sur des façades permet d'obtenir des effets esthétiques et thermiques intéressants. Comparativement à une paroi en "dur" qui s'échauffe au soleil, la paroi végétale joue le rôle d'une "paroi froide" très performante. La couleur et la texture du feuillage permettent une absorption du rayonnement solaire dont une partie est évacuée par évapotranspiration.

Précisément, dans un climat semi-aride de Constantine, caractérisé par des étés chauds, la végétalisation des façades s'avère efficace dans l'amélioration du confort hygrothermique des logements et de leur environnement immédiat. Elle constitue d'ailleurs, une stratégie efficace pour le refroidissement passif de l'été en réduisant les températures de surfaces et celles de l'air intérieur et extérieur et peut même être généralisée et appliquée aux bâtiments tertiaires.

Néanmoins, compte tenu de l'apport supplémentaire en humidité que fournit le mur végétalisé, on peut conclure que cette stratégie peut avoir un effet négatif en climat humide.

Recommandations :

L'ombrage naturel de la végétation doit de préférence être plus important en été qu'en hiver, afin de profiter des apports d'énergie solaire hivernaux. Pour des climats tempérés, il est donc conseillé d'opter pour des plantations à feuilles caduques, avec peu de branches, pour avoir un ombrage minimal en hiver, mais un feuillage dense, pour la raison inverse en été. Les protections végétales réalisées à l'aide de plantes grimpantes (vigne vierge, chèvrefeuille, glycine) peuvent aussi être très efficaces et être aménagées sur les parois verticales pour réduire leur échauffement. Rappelons que la densité des plantes caduques, change d'une saison à une autre.

Pour ce qui est du choix des différentes familles de plantes pour coloniser les façades, LEROUX. F, 2005, envisage les plantes à crampons, faciles à mettre en oeuvre, qui fournissent un résultat spectaculaire. Pour ce genre de plantes, le choix des surfaces d'implantation sera primordial. En effet, pour qu'elles puissent coloniser la façade, leurs racines aériennes doivent trouver suffisamment de rugosité, ce qui n'est pas le cas lorsqu'elles se trouvent face à des surfaces de métal ou de plastique. Par ailleurs, tous les types de revêtements ne sont pas susceptibles d'accueillir ces plantes, car certains sont trop sujets à détérioration, comme c'est le cas pour les murs à colombage ou les enduits chaux.

Autre famille de plantes susceptible d'être utilisée en tant qu'élément structurant d'une façade végétalisée, les plantes volubiles telles que les wistérias, se développent à la verticale et peuvent atteindre des hauteurs voisines d'une trentaine de mètres.

Leur développement horizontal est beaucoup moins évident et lorsqu'on souhaite y parvenir, les plantes sont attachées et taillées régulièrement. Pour pousser correctement, ces plantes nécessitent des surfaces suffisamment rugueuses pour empêcher tout glissement éventuel. La plupart des sections des supports utilisés sont d'un diamètre compris entre 4 et 30 mm. Plus la hauteur de la grille de racine est grande, plus le flux de chaleur est élevé, ce qui augmente alternativement la convection thermique de l'air au mur (L.ZAIYI et T.JINYEU 2000).

Les plantes à vrilles sont aussi couramment utilisées dans ce cadre. Elles poussent la plupart du temps sur des treillages constitués d'éléments horizontaux et verticaux. On peut aussi utiliser des arbrisseaux à tiges flexibles, dénués de systèmes d'attache, mais qui peuvent se hisser en hauteur grâce à leurs aiguillons. A titre d'exemple, les rosiers peuvent

former des buissons très touffus au sol et ne pas grimper le long de supports verticaux spécialement aménagés pour cet usage.

Quelques grimpants conviennent parfaitement aux espaces vitrés, terrasses et pergolas, permettant le captage solaire d'hiver et la protection solaire d'été tels que : Aristoloche siphon, Bignone à grandes fleurs, Glycine de chine, Jasmin de virginie, Vigne, Vigne vierge à 5 folioles, Volubilis...

Pour éviter toute colonisation sauvage désordonnée, des interventions régulières de domestication de leur développement, permettront un meilleur résultat esthétique. A noter que les plantes retombantes sont elles-aussi tout à fait adaptées à la végétalisation des façades, mais leur développement est assez limité sous les climats tempérés, puisqu'elles n'atteignent en général que 5 mètres environ. Citons aussi l'emploi possible de plantes annuelles telles que le houblon ou le recours à des arbres taillés en espalier.

Pour cette dernière solution, une taille régulière est nécessaire pour éviter tout débordement incontrôlé susceptible de nuire au bon état du bâtiment. Ainsi, pour les arbres, une distance de 2 à 6m entre l'arbre et le mur est recommandée pour la plupart des arbres moyens (3 à 9m de haut) (ROBINSON M.L et EDDINGTON. C, 1996).

Pour les plantes grimpantes, Brochard.D et BENECH.L, 2004 conseillent d'éloigner l'écran végétal d'une dizaine de centimètre du mur de façon à ce qu'il y ait une circulation d'air pour éviter une humidité stagnante qui pourrait endommager le mur.

De plus, la végétation joue un rôle d'enveloppe thermique complémentaire lorsqu'elle est implantée sur une paroi horizontale (toiture végétalisée). Pour de meilleurs résultats, Leur application doit être adéquate pour offrir un intérêt significatif dans la régulation des ambiances en hiver comme en été.

L'environnement immédiat d'un bâtiment a également une influence significative sur les conditions de confort thermique à l'intérieur de celui-ci. C'est le cas en particulier du revêtement du sol à la périphérie du bâtiment qui ne doit ni réfléchir le rayonnement solaire vers le bâtiment, ni contribuer à un échauffement de l'air ambiant autour de celui-ci. La végétation en milieu urbain peut être mise en valeur, sous forme de parcs, square et jardins de détente et de loisirs.

Axes pour futures recherches :

Les champs d'investigation concernant les effets de la végétation sont aussi vastes que nombreux. De nombreux domaines d'application liés à l'urbanisme et aux bâtiments restent à développer. Les résultats obtenus dans la présente recherche peuvent être mis en application dans les stratégies de rafraîchissement estival des bâtiments. D'autres axes de recherche s'ouvrent surtout au moyen des simulations sur ordinateur ; ce qui permettra de vérifier et de valider d'abord les résultats obtenus par la campagne de mesure, d'évaluer l'effet global d'ombrage dans les saisons froides et chaudes pour différentes typologies, et de tester une variété de plantes grimpantes à différentes distances en cherchant les dimensions adéquates entre l'écran végétal et le mur pour assurer un confort optimum.

D'autres orientations critiques peuvent être testées sous l'effet de la végétation comme le cas des orientations Est et Ouest ainsi que son rôle sur l'isolation acoustique et la consommation énergétique.

Il n'y a pas lieu d'oublier l'effet de la végétation sur les surfaces horizontales qui est loin d'être négligeable en terme de confort surtout sous notre climat. L'étude des toitures végétalisées doit requérir, donc, une attention particulière de la part des chercheurs.

Livres :

- 1- **AFME** « Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie » « Conception thermique de l'habitat guide pour la région Provence-Alpes-Côte d'Azur » Ed EDISUD, Décembre, 1988.
- 2- **ALEXANDROFF.G** « Architecture et climat soleil et énergies naturelles dans l'habitat » ; Ed architectures, Berger- Levrault, Paris1982
- 3- **BLOCH –LAINE J. M.** « Construire avec le Climat » ministère de l'environnement et du cadre de vie Paris 1979
- 4- **BONHOMME ANDRE** « L'isolation thermique des bâtiments- conceptions des projets, ventilation, apports solaires, besoin de chaleur, économies d'énergie » Edition Le moniteur. Paris, 1986
- 5- **BROCHARD. D & BENECH. L** « Le jardin de ville” Editions Nathan, Paris, 2004
- 6- **CAPDEROU.M** « Atlas solaire de l'Algérie » Tome 2: Aspect énergétique. OPU Alger,1985
- 7- **CHITOUR.CH.E** « L'énergie : Les enjeux de l'an 2000 » Vol/1 Office des Publications Universitaires Alger, 1994.
- 8- **CRAU** : Centre de recherche en architecture et en urbanisme « Village solaire intégré » Edition OPU En collaboration avec l'université des nations unies UNU El Harrach.1988
- 9- **DEOUX. SUZANE et PIERRE** « Le guide de l'habitat sain ». Edition MEDIECO, Andorra, Avril 2002
- 10- **GAUZIN-MÜLLER. D** « L'architecture écologique, 29 exemples européens » éd. Le Moniteur, 2001
- 11- **GIVONI .B** « L'homme, l'architecture et le climat » édition : Le Moniteur Paris, 1978
- 12- **GIVONI.B** « Passive and low energy cooling of buildings » John Wiley&Sons,Inc USA, 1994
- 13- **GIVONI.B** « Climate considerations in building and urban design » Van Nostrand Reinhold, New-York, 1998
- 14- **GUINAUDEAU.C** « Planter aujourd'hui, bâtir demain le préverdissement » Institut pour le développement Forestier, Paris, 1987
- 15- **IZARD.J.L** « Architectures d'été/Construire pour le confort d'été » Editions : Edisud, 1993.
- 16- **IZARD.J.L, GUYOT.A** « Archi Bio » Editions Parenthèses, Roquevaire 1979.
- 17- **KOENIGSBERGER et al** « Climatic design » Edition : Longman, London & New York, 1973

- 18- LABOUZE, E *« Bâtir avec l'environnement, enjeux écologiques et initiatives industrielles »* Ed de l'entrepreneur, Paris, 1993
- 19- LAVIGNE.Pierre et al *« Architecture climatique Une contribution au développement durable Tome 1 : Bases physiques »* EDISUD.1994.
- 20- LAVIGNE.P et al *« l'architecture climatique : une contribution au développement durable Ttome 2 : concepts et dispositifs »* EDISUD Aix en Provence France, 1998.
- 21- LIEBARD.A et De HERDE.A *« Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques ; Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable »* Presses de l'imprimerie Moderne de l'Est, Baume-les-Dames-décembre.2005
- 22- MAZRIA, Edouard *« Le guide de l'énergie solaire passive »* Editions Parenthèses,1980
- 23- MINISTERE DE L'HABITAT *« Recommandations architecturales »* Ed ENAG, Alger, 1993.
- 24- MURET.J.P & ALLAIN.Y.M *« les espaces urbains, concevoir, réaliser, gérer »* Edition Le Moniteur, Paris, 1987
- 25-OLGYAY &OLGYAY *« Solar control & shading devices »* Princeton university press, USA, 1976
- 26- PEUPORTIER. BRUNO *« Eco construction des bâtiments Bâtir en préservant l'environnement »* Paris : Les presses de l'école des mines, 2003.
- 27- SALOMON Thierry &AUBERT Claude *« Fraîcheur sans clim, le guide des alternatives écologiques »,* Ed : Terre vivante, 2004.
- 28- SOMON ERNEST *« Arbres, Arbustes et Arbrisseaux en Algérie »* Office des Publications Universitaires, Alger.
- 29- SZOCOLAY.SV *« Environmental science handbook for architects and builders »* the Construction Press, Lacastre, London, New York, 1979.
- 30- WATSON. D & CAMOUS. R *« L'habitat bioclimatique de la conception à la construction »* Ed l'étincelle Canada 1986.
- 31- WRIGHT DAVID *« Soleil, Nature, Architecture »* Ed Parenthèses1979

Mémoires et Thèses :

- 1- 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 Medina de Constantine » Thèse de doctorat d'état Université de Constantine, 2004
- 2- BENNADJI. A « Adaptation climatique ou culturelle en zones arides : cas du sud-est Algérien » Thèse de doctorat. Université d'Aix-Marseille1- Université de Provence. 1999.
- 3- BOUCHAHM.Y : « Une investigation sur la performance thermique du capteur a vent pour un rafraîchissement passif dans les régions chaudes et arides Cas de Ouargla » Thèse de doctorat d'état. Université de Constantine, 2004.
- 4- BOZONNET. E « Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments Cas de la rue canyon » Thèse de doctorat. Université de la Rochelle 2005.
- 5- BRUANT.M « Développement et paramétrage de contrôleurs flous multicritères du confort d'ambiance » Thèse de doctorat : INSA de Lyon. Lyon. 1997
- 6- DEPECKER.P « Constitution et modes de transfert d'un savoir scientifique dans le champs de l'architecture : le cas de la thermique » Thèse de doctorat, INSA, Lyon, 1985
- 7- FLEURY. S « Aménagements Urbains et Haute Qualité Environnementale » Mémoire de fin d'études, Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes. 2005
- 8- LEHTIHET
MOHAMED CHERIF « Modification des microclimats urbains par la couverture végétale avec référence à la ville de Jijel » Mémoire de Magister, université de Jijel, 2007
- 9- LEROUX. François,
 Animateur technique
 éco-construction Oikos « Intégration végétale des bâtiments, contributions environnementales sur une maison individuelle » Mémoire de formation continue architecture HQE, Ecole d'Architecture de Lyon, Session 2005
- 10- LOUAFI SAMIRA « Impact de l'orientation sur le confort thermique intérieur dans l'habitation collective Cas de la nouvelle ville Ali Mendjeli Constantine » Mémoire de magistère. Université de Constantine, 2005.
- 11- LUQUET.D « Suivi de l'état hydrique des plantes par infrarouge thermique : analyse expérimentale et modélisation 3D de la variabilité thermique au sein d'une culture en rang de coutonnier » Thèse de doctorat. Institut National Agronomique. Paris, 2002
- 12- MEDJELEKH
DALEL « Impact de l'inertie thermique sur le confort hygrothermique et la consommation énergétique du bâtiment Cas de l'habitat de l'époque coloniale à Guelma » Mémoire de magistère. Université de Constantine, 2006.

Rapports d'étude et articles publiés :

- 1- AKBARI.H et al “Peak power and cooling energy savings of shade trees” Energy and Buildings, vol 25, USA 1997. pp: 139-148.
- 2- AKBARI.H “Shade trees reduce building energy use and CO2 emissions from power plants” Environmental Pollution, vol 116, USA 2002. pp: 119–126.
- 3- BALARAS.C.A “The role of thermal mass on the cooling load of buildings. An overview of computational methods” Energy and Buildings.vol 24, 1996. pp1-10.
- 4- BASS. B, HANSELL.R
et POOLE.G “Adapting Urban Areas to Climate Change with Vertical Gardens” University of Toronto, 1999
- 5- BASS.B,
BASKARAN.B “Evaluating Rooftop and Vertical Gardens as an Adaptation Strategy for Urban Areas” Canada, 2001
- 6- BAUMANN. I.R “The Constructural importance of climbing plants” Athènes vol 1, 1986. pp. 22-28.
- 7- BEN HABIB et al « Analyse bioclimatique de l’habitat traditionnel des régions désertiques nord sahariennes » Rapport d’étude, Université de la Rochelle et l’institut USTO d’Oran, 1995.
- 8- BERNATZKY.A « The contribution of trees and green spaces to a town climate » Energy and Buildings, vol 25, 1982. pp 139 – 148
- 9- BRAGER Gail.S, de
DEAR Richard.J “Thermal adaptation in the built environment: a literature review”. Energy and Buildings vol 27 (1). 1998.
- 10- CANTUARIA.G « A comparative study of the thermal performance of vegetation on building surface ». PLEA: Architecture, City, Environment, Cambridge, UK. 2000. pp312-313.
- 11- CHENG.V, NG.E &
GIVONLB “Effect of envelope color and thermal mass on indoor temperatures in hot humid climate” Solar Energy, vol 78. 2005. p528-534.
- 12- COPPIN. M.J, et
RICHARDS. I.G « Use of Vegetation in Civil Engineering » Construction Industry research and Information Association, Butterworths, London, 1990.
- 13- DE LORME, E “Garden Pavillons and the 18th Century French Court” Suffolk: Antique Collectors Club, 1996.
- 14- DI.H.F et WANG.D.N “Cooling effect of ivy on a wall” Experimental Heat Transfer. Vol. 12, no.3., Tsinghua University, Chine, 1999. pp 235-345.
- 15- DIMOUDLA &
NIKOLOPOULOU.M « Vegetation in the urban environment : microclimatic analysis and benefits », Energy end buildings 35, 2003, 69-76

- 16- EBEN SALAH. M.A *“Impact of thermal insulation location on building in hot dry climates”* Rapport de recherche Saudi Arabia : King Saudi University, Department of Architecture and Building sciences, 5 june 1989.
- 17- GIVONI.B *“Performance and applicability of passive and low energy cooling systems”* Energy and building vol.17, 1991. pp177-199.
- 18- HEISLER. G.M *« Energy Saving With Trees »* Journal of Arboriculture vol 12(5). 1986. pp. 113-125.
- 19- HOFFMAN,M.E et SHASHUA,L *« Geometry and orientation aspects in passive cooling of canyon streets with trees »* Cambridge, UK. PLEA 2000
- 20- HOLM. D *“Thermal improvement by means of leaf cover on external walls - A simulation model”* Energy and Buildings, Volume 14, Issue 1, 1989. pp 19-30.
- 21- HOYANO.A *“Climatological uses of plants for solar control and the effects on the thermal environment of a building”* Japon Energy and Buildings, vol 11, 1988. pp181-199.
- 22- HUANG, Y.J et al *“The potential of vegetation in deducing summer cooling loads in residential buildings”* Climate and Applied Meteorology vol 26 (9). 1987. pp 1103 – 1116.
- 23- IRFAN.N, ZAHOOR.A et KHAN.N *“A study of co-relationship between internal temperature of buildings and tree shading in hot and dry climate”* Mehran university of engineering and technology, Pakistan 1996
- 24- IZARD. J.L et DESTOBELEIRE.G *« Rôle de la végétation dans le microclimat urbain : utilisation de la thermographie »* Lyon 1998
- 25- LAM.M et al *« Résumé d’une étude de cas- Végétation sur la façade des constructions : « Bioshader »* Centre for Sustainability of the Built Environment university of Brighton 2004
- 26- LAM.M et al *“Experimental modelling of deciduous climbing plants as shading devices”* Institute for tropical architecture, august 2006
- 27- LE LUN. C *« Le mur végétal; la Jungle Verticale: Une Solution Écologique »* 2006
- 28- LOHMANN. G *“The Effect of Trees on Air Pollution”* Urban Forests, Issue33, 1990
- 29- MEIER.A. K *« Strategic Landscaping and Air Conditioning Savings: A Literature Review »* Energy and Buildings, vol. 15-16, 1990-1991. pp 479- 486
- 30- NEZZAR, Salah S & GOURDACHE.M *« Etude des performances énergétiques d’une conception bioclimatique en région aride »* Laboratoire des Energies Renouvelables - Institut de Génie Mécanique Batna, ALGERIE
- 31- NIACHOU. A *« Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance »* Energy and Buildings, 33, 2001. pp.719-729.

- 32- NOWAK.D.J et MCPHERSON.E.G « Comment quantifier l'incidence arbres: le projet de Chicago concernant les effets des espaces boisés urbains sur le climat » Etats-unis, 1993
- 33- PAPADAKIS.G et al An experimental investigation of the effect of shading with plants for solar control of buildings Energy and Buildings Vol 33, Issue 8 , Octobre 2001. pp 831-836.
- 34- PARKER,J.H “The use of shrubs in energy conservation plantings” Landscape journal 6, 1987. pp132-139.
- 35- PATRICK. BLANC « Quand la nature fait le mur » Article publié dans LE MONDE le 15 Janvier 2005
- 36- PECK.S, CALLAGHAN.C “Forging a new industry in Canada; Status report on benefits barriers and opportunities for green roof and vertical garden technology diffusion” 1999.
- 37- QIAN.Z.M “An Investigation to the Cooling and Moisturizing Effects of Creepers on the Surrounding Area” Researches on the Green Effects, Chinese Environmental Science Press, Bekin, 1995
- 38- ROBINSON.M.L. et EDDINGTON.C “Shade Factors in Southern Nevada Using Trees and Shrubs for Shading Outdoor Spaces” University of Nevada, 1996
- 39- ROSENFELD.A.H et al “Mitigation of urban heat island : materials unity programs, and updates” Energy and Buildings vol 22.1995. pp 255-265
- 40- SANDIFER.S, GIVONI. B “Thermal effects of vines on wall temperatures- comparing laboratory and field collected data UCLA” University of California at Los Angeles, 2002
- 41- STEPHENSON. D.G « Gains de chaleur solaire au travers des fenêtres et des parements vitrés » Publié à l'origine en novembre 1964.
- 42- STEPHENSON.D.G « Températures extrêmes à la surface extérieure des bâtiments » Publié à l'origine en août 1966.
- 43- WONG. N.H, TAN. P.Y et CHEN. Y « Study of thermal performance of extensive rooftop greenery systems in the tropical climate » Building and Environment, Volume 42, Issue 1, 2006. pp 25-54.
- 44- WONG Nyuk Hien “The use of Urban Greenery to mitigate Urban Heat Island in Singapore” School of Design and Environment Department of Building, National University of Singapore, 2007
- 45- ZAIYI. L & NIU. J.L “Study on thermal function of ivy-covered walls” Dept of building services engineering, Hong Kong, 2000

Compte-rendu de colloques et congrès :

- 1- CANTIN.R,
MOUJALLED.B,
GUARRACINO.G « Complexité du confort thermique dans les bâtiments » 6^{ème}
congrès Européen de Science des Systèmes Paris 19-22 septembre
2005
- 2- PARKER. J.H « A comparative analysis of the role of various landscape
elements in passive cooling in warm, humid environments »
Passive and Hybrid Cooling Conf, Miami, 1981
- 3- SIDLER.O « L'inertie thermique en climat méditerranéen. Confort et
consommations d'énergie » Montpellier, Colloque le 15-05-2003
e-mail : sidler@club.fr
- 4- SIDLER Olivier,
Directeur ENERTECH « Les bâtiments à faible consommation d'énergie - Eléments de
contexte » Journée technique sur l'étanchéité à l'air des bâtiments
Dijon - 21 Novembre 2007.
- 5- YAKUBU.G.S &
SHARPLES.S « Bioclimatic design studies for passive and low energy buildings
design in hot dry/semi-arid climates » World renewable energy
congress, Pergamon press, 1992.
- 6- YASEF, A. « Eléments pour une politique énergétique nationale », proc. 1^{er}
Symposium du comité Algérien d'énergie, Alger, 25-26
Novembre, 1996.
- 7- ZAIYI.L et JINYEU.T “Impacts of Greenbelts on the Thermal Environment of
Residential Communities” The First Conference on Architectural
Design and Technology for Sub-Tropical Climates., Chine, 1998.

Revues, guides Documents techniques:

- 1- Association HQE « Bâtiment et démarche HQE » Valbonne : ADEME. Réédition
Avril 2007
- 2- AUDURIER-CROS.A,
GUYOT.A « La palette végétale méditerranéenne et les ambiances
bioclimatiques dans le projet d'architecture » Mappes Monde 88/1,
1988
- 3- BEGUIN DANIEL Guide de l'éco-construction. Agence Régionale de
l'Environnement en Lorraine, ADEME Février 2006
- 4- CERTU : Centre
d'études sur les réseaux,
les transports,
l'urbanisme et les
constructions publiques « Mémento technique du bâtiment : Confort thermique » juillet
2003
- 5- Comité Territorial
pour la Maîtrise de
l'Energie Nouvelle
Calédonie « Opération de qualification de la qualité thermique et des
performances énergétiques des logements neufs » Cahier de
prescriptions techniques et de recommandations Avril 2006

- 6- **Conseil régional de l'environnement de Montréal** « Le verdissement montréalais pour lutter contre les îlots de chaleur urbains, le réchauffement climatique et la pollution atmosphérique » 2007
- 7- **FACER.J** “The role of ‘greening’ in commercial property development”
Fourth-year undergraduate project, UK 2004/2005
- 8- **GRANT.G, ENGLEBACK.L, NICHOLSON.B** « Green roofs: their existing status and potential for conserving biodiversity in urban areas » English Nature Report no. 498, 2003
- 9- **HOFMANN. H** « Phénomènes de transfert de chaleur et de masse » Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne LTP, IMX, EPFL.
- 10- **IBGE** Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement « Guide pratique pour la construction et la rénovation durables de petits bâtiments : redéfinir la notion de confort thermique » février 2007.
- 11- **JOHNSTON Jacklyn & NEWTON John** « Building Green A guide to using plants on roofs, walls and pavements » Published by Greater London Authority, Mai 2004. www.london.gov.uk
- 12- **Les cahiers de l'agriculture et de l'environnement** « L'eau et la plante » Publication de la Province des îles Loyauté. N°6/ mars 2004, p5.
- 13- **LIEBARD.A et DE HERDE.A** « Guide de l'architecture bioclimatique ; Tome4 ;Cours fondamental : Construire avec le développement : durable » .2002.
- 14- **LIU. K.Y et BASKARAN.A** « Des toitures jardins pour une meilleure durabilité des enveloppes des bâtiments » solution constructive n° 65, sept. 2005
- 15- **MILLET.J.R & NICOLAS.C** « Les paramètres objectifs du confort » Bâtiment et énergie N° 60 Jan/Fev 1990.
- 16- **MINISTERE DE L'ENERGIE** Bilan énergétique national de l'année 1999/ DGE, 2000. EPE novembre, 2000.
- 17- **MINISTERE DE L'HABITAT** Document Technique Réglementaire (D.T.R.C3-2)
« Réglementation thermique des bâtiments d'habitation » Règles de calcul des déperditions calorifiques Fascicule1 Centre National d'Etudes et de Recherche Intégrées du Bâtiment CNERIB 1998.
- 18- **NEUF** « Climat intérieur/confort, Santé, confort visuel » revue européenne d'architecture N° 77, novembre – décembre 1978
- 19- **ONS** « Projection de la Population » collections statistiques n° 66-0994
- 20- **ONS** rétrospectives 62-90, bulletin statistique, n° 31, p.31-33- n°163/décembre 96 (juin 96)
- 21- **PECK.S, CALLAGHAN.C** “Greenbacks from Green Roofs : forging a new industry in Canada” Prepared for Canada Mortgage and Housing Corporation. Canada. 1999.

- 22- SONELGAZ « *bulletin statistique* » Direction de la planification –Annuaire statistique 62-86, Divers bulletins annuels statistiques 87-2002

Sites Internet :

- 1- AKBARI HASHEM [En ligne] Eetd.lbl.gov/heatiland/pubs. (page consultée le 16-05-2006)
- 2- CERMA « *Le rayonnement solaire* » [En ligne] http://audience.cerma.archi.fr/cerma/pageweb/theorie/solaire/rayon_solaire.html (page consultée le 12-06-2007)
- 3- Division de l'Énergie du Ministère de la Région wallonne « *Guide pratique destiné aux candidats bâtisseurs* » [En ligne] <http://energie.wallonie.be/xml/doc-IDC-2833-html> 2005
- 4- Groupe A.B.C « *ProtecSolWeb* », [En ligne] <http://www.marseille.archi.fr/~abc/Textes/ProtecSolWeb.PDF>
- 5- GUYOT.A « *l'arbre urbain, un composant de confort pour l'architecture et l'espace urbain public* » extrait d'intervention du cours [En ligne] <http://www.arbreurbain.com> (page consultée le 12 janvier 2005)
- 6- IZARD. J.L & BOUKARA.A « *le rôle du végétal en architecture et en microclimatique urbaine* » (école d'architecture 1998,2001) in [En ligne] <http://www.archi.fr/pages/recherches/labos.html> (page consultée le 02.09.2006)
- 7- MARSH.A [En ligne] www.squ1.com
- 8- MUSY. ANDRE « *Chapitre 4 : L'évapotranspiration et l'interception* » Hydrologie générale. Section SIE et GC. 4^{ème} semestre 2005. [En ligne] www.Hydrau.epfl.ch/e-drologie/resumes/chapitre4/resume4.html
- 9- PALHEIRE.J.Y « *Confort thermique* » [En ligne] <http://www.ac-amiens.fr> (Page consultée le 10-09-2007)
e-mail : Jean-Yves. Palheire@ac-amiens.fr
- 10- TAREB « *Energie dans l'environnement urbain ; Chapitre 4 : Architecture Basse Energie* » document pdf
- 11- UTC Université de Technologie Compiègne « *Transfert de chaleur : Généralités sur le transport et le transfert de l'énergie thermique* » [En ligne] <http://www.utc.fr/~houde//ch3a.html>
- 12- [En ligne] <http://www-energie.arch.ucl.ac.be/Climatisation/theorie/confortthermique.htm>
- 13- Optimisation des systèmes énergétiques [En ligne] <http://www.ose.cma.fr/événements/2001/conférences.htm>
- 14- [En ligne] <http://www.bilan-thermique.com>
- 15- [En Ligne] <http://www.wikipedia.org/wiki/Greenroof>

- 16- [En Ligne] [http:// www.plantyfolia.com](http://www.plantyfolia.com) (page consultée le 15 août 2007).
- 17- [En Ligne] [http:// www.aujardin.info](http://www.aujardin.info)
- 18- [En Ligne] [http:// www.ac-clermont.fr](http://www.ac-clermont.fr)
- 19- [En Ligne] http://www.assolhqe.org/association_objectifs.php (consultée le 15-01-2008)
- 20- [En Ligne] <http://www.vivreenville.org> (page consultée le 02-12-2006)
- 21- [En ligne] <http://www.maison-solaire.fr/Bioclimatique.htm> (page consultée le 23-12-2007)
- 22- [En ligne] <http://www.truffaut.com/conseils/encyclopedie-plantes/fivhe-plantes-grimpantes-vignedornement>

Encyclopédie :

- 1- **Microsoft® Encarta® 2007.** © 1993-2006 Microsoft Corporation. Tous droits réservés
- 2- **Encyclopédie libre :** [En ligne] www.wikipedia.org

Annexe I:**1. Unités pratiques :**

Les thermiciens avaient généralisé l'emploi d'unités dans lesquelles la chaleur s'exprimait en kilocalories (kcal) ou en thermies (1 th = 1000 kcal), et les intervalles de temps en heures. De plus, on est souvent confronté aux unités anglo saxonnes. Il est donc indispensable de mentionner les formules de passage :

Energie ³ ¹	1 kcal = 4,18 kJ 1 thermie = 1000 kcal = 4180 kJ 1 BTU = 1,055 kJ 1 kWh = 3600 KJ
Puissance	1 kcal/h = 1,16 W 1 BTU/h = 0,2929 W 1 cheval vapeur (horse power) = 0,746 kW 1 BTU.ft-2h-1 = 3,1525 W.m-2
Chaleur spécifique	1 BTU.lb-1°F-1 = 4,184 kJ.kg-1K-1 1 cal.g-1°C-1 = 4,184 kJ.kg-1K-1
Conductivité	1 BTUft-1h-1°F-1 = 1,73 W.m-1K-1
Conductance	1 BTU.ft-2h-1°F-1 = 5,6745 W.m-2.K-1
Température	Fahrenheit ⁴ ² : x °F correspond à (x - 32)/1,8 °C Celsius : x °C = (x - 273,15) K Rankine : x °R = (x/1,8) K (même graduation que °F)

¹ Cette formule de conversion bien connue doit rappeler qu'en 1847 James Joule établit l'équivalence entre le travail et la chaleur en enfermant un moteur dans une enceinte calorifugée emplie d'eau et en mesurant l'élévation de température.

² 4 100 °F correspondent à la température intérieure du corps humain : 37,7°C.

2. Définition des concepts :

2.1. Aspect géométrique du soleil

2.2.1. Déclinaison du soleil

C'est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial

$$\delta = 23.45 (\sin (280.1 + 0.9863 n))$$

Où n est le nième jour de l'an

2.2.2. La position du soleil

Cette position est déterminée par :

- **l'azimut** : il est défini comme étant l'angle entre le plan vertical contenant le rayon solaire et le plan de référence (le méridien du lieu).

Le plan vertical, varie entre -180° et $+180^\circ$, négatif à l'Est, positif à l'Ouest, par convention et vaut 0° au Sud dans l'hémisphère nord. (Fig ci-dessous)

- l'azimut à son coucher ou son lever se calcule par la formule :

$$\cos \text{azimut} = \sin \text{déclinaison} / \cos \text{latitude}$$

L'azimut est calculé en général par la formule :

$$\sin \text{azimut} = \sin \omega \cos \delta / \cos h \quad \text{où :}$$

ω est l'angle horaire

δ est la déclinaison

h est la hauteur solaire

(altitude solaire)

- ✓ **la hauteur solaire ; altitude** : elle est définie comme étant l'angle formé par le plan horizontal du lieu et la direction du soleil. Cette hauteur est comprise entre 0° (soleil à l'horizon) et 90° (soleil au zénith) entre le rayon solaire et le plan horizontal du lieu (Fig ci-dessous) cette hauteur au cours de la journée peut être calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \omega \cos \delta$$

h est la hauteur du soleil a une heure donnée

φ est la latitude du lieu

ω est l'angle horaire

δ est la déclinaison du soleil

- ✓ **l'angle horaire** est compté dans le sens rétrograde (dans le sens du mouvement apparent du soleil) il est nul au moment du passage du soleil au méridien

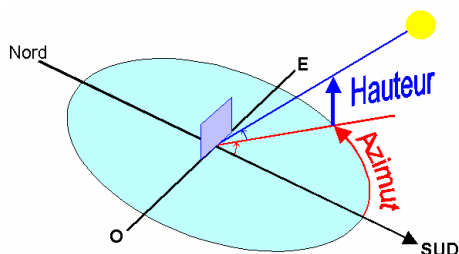


Figure 1 : Hauteur et Azimut solaire.

(Source: www.outilsolaires.com)

3. Les propriétés des matériaux :

3.1. Le coefficient à la diffusion de vapeur μ [μ] :

Ce coefficient détermine la perméabilité d'un matériau à la vapeur d'eau. Plus μ est élevé, plus la résistance est grande. Une valeur inférieure à 10 correspond à une bonne diffusion de la vapeur d'eau. En règle générale, les matériaux les plus perméants sont le bois, la laine de bois, la laine végétale et animale, la terre cuite, la chaux, le plâtre....

3.2. La conductivité thermique [λ λ]

Pour un matériau c'est le flux de chaleur 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 λ est faible, plus le matériau est résistant au transfert par conduction. Il est exprimé en watts par mètre et par degré Celsius [$W/m^{\circ}C$] ou degré kelvin [$W/m^{\circ}K$].

3.3. 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 en mètre carré degré Celsius par watt [m^2C/W].

3.4. Le coefficient de transmission calorifique [U]

En référence à la réglementation, le coefficient de transmission surfacique U caractérise les déperditions thermiques 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. Il est exprimé en watt par mètre carré degré Celsius [W/m^2C] ou degré kelvin [W/m^2K].

3.5. 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.

3.6. La capacité thermique

C'est la quantité de chaleur 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 exprime la densité par la chaleur spécifique d'un matériau en kilojoules par m³ en degré Celsius [kJ/m³°C]. 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 comme le montre le tableau suivant.

3.7. 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 et la capacité thermique d'un matériau et s'exprime en m²/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.

3.8. Diffusivité et onde de chaleur (m²/h)

Il existe un autre facteur étroitement lié à la diffusivité : la vitesse de l'onde de chaleur ou déphasage. C'est la distance parcourue en un temps par le rayonnement solaire pour traverser une paroi opaque. Plus la diffusivité est faible, plus la vitesse de l'onde de chaleur est faible. Cette valeur est indiquée dans la colonne «transfert» du tableau sur les propriétés.

3.9. L'effusivité thermique [Ef] (W/m²°C)

Elle indique la capacité des matériaux à absorber (ou restituer) plus ou moins rapidement un apport de chaleur.

L'effusivité caractérise la sensation de «chaud» ou de «froid» que donne un matériau. Si la valeur d'effusivité est élevée, le matériau absorbe rapidement beaucoup d'énergie sans se réchauffer notablement en surface (métal, pierre, faïence...). A l'inverse une valeur d'effusivité faible indique que le matériau se réchauffe rapidement en surface en absorbant peu de chaleur (isolant, bois...). La valeur Ef exprime combien de kilojoules [kJ/m².S.°C] ont pénétré sur 1 m² de surface de matériau, 1 seconde après qu'elle a été mise en contact avec une autre surface de 1 m² plus chaude qu'elle de 1 °C. Tout comme la diffusivité, elle utilise la capacité thermique et la conductivité thermique du matériau pour son calcul.

3.10. Le déphasage :

Le déphasage, tel qu'il est défini par M.EVANS, 1980 est le délai entre l'impact de la variation diurne de la température et du rayonnement solaire sur la surface externe et la variation de température résultante sur la surface interne.

Il n'existe pas de formule exacte pour l'estimation du déphasage car l'écoulement de la chaleur à travers une paroi ne dépend pas seulement des propriétés thermo physiques des matériaux, mais aussi des caractéristiques de la surface de la paroi.

Pour une paroi constituée par plusieurs composantes, l'estimation du déphasage est complexe et dépend de la constante : Q/U qui est la somme des temps de chaque composant.

$$Q/U = Q_1/U_1 + Q_2/U_2 + Q_3/U_3 + \dots + Q_n/U_n \dots\dots\dots$$

Où :

- *- $Q_1/U_1 = (r_0 + r_1 \cdot e_1/2) e_1 c_1 d_1$
- *- $Q_2/U_2 = (r_0 + r_1 \cdot c_1 r_1 \cdot r_2 c_2/2) e_2 c_2 d_2$
- *- $Q_3/U_3 = (r_0 + r_1 \cdot c_1 r_1 \cdot r_2 c_2/2) e_3 c_3 d_3$

Q : représente la capacité calorifique de la couche du matériau

U : Flux de chaleur qui est transmis

r_0 : résistance de la surface externe (m^2C/w)

r_1, r_2, \dots : résistivité de couches successive (m^2C/w)

e_1, e_2, \dots : épaisseurs des couches (m)

c_1, c_2, \dots : chaleur spécifiques des couches (J/kg)

d_1, d_2, \dots : densité des matériaux (kg/m^3)

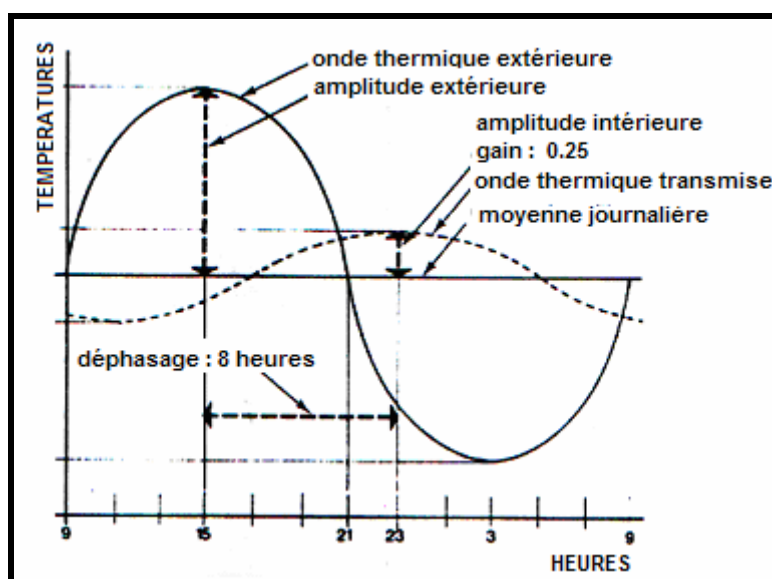


Figure 2 : Déphasage et amplitude de l'onde incidente par une paroi homogène.

(Source : IZARD. J.L & GUYOT.A, 1979).

3.11. L'admittance:

Selon M. EVANS, l'admittance est définie comme la vitesse à laquelle la surface peut absorber ou émettre de la chaleur, quand la température d'air est différente de la température de la surface. Elle permet d'évaluer les températures intérieures, en fonction des gains de

chaleur à travers les parois opaques ou transparentes, les gains interne, caractéristiques des matériaux et des conditions climatiques externe.

4. Coefficient de réflexion pour différentes textures :

	Réfléctance
-Eau calme.....	0.05 à 0.18 selon la saison et l'altitude
-Sable.....	0.25 à 0.40
-Terre, gravier, prairie, sol cultivé...	0.10 à 0.30
- Neige.....	0.60 à 0.90

Tableau 1 : Coefficient de réflexion suivant le plan récepteur.

(Source : LAVIGNE P, 1998)

5. Calcul du coefficient de transmission K pour les différents échantillons testés :

5.1. Calcul du coefficient de transmission K pour la paroi « A »

Composants du mur externe	Epaisseur e (m)	Conductivité thermique λ (W/m°C)	Résistance thermique r (m ² °C/W)
Enduit plâtre	0.015	0.35	0.04
Brique creuse	0.1	0.48	0.2
Lame d'air	0.02		0.16
Brique creuse	0.1	0.48	0.2
Enduit ciment	0.015	1.4	0.011
1/hi + 1/he			0.17
Rtotal = rt+1/hi+1/he (m²°C/W)			0.78
K =1/R (W/m² °C)			1.28

5.2. Calcul du coefficient de transmission K pour la paroi « B » et « C »

Composants du mur externe	Epaisseur e (m)	Conductivité thermique λ (W/m°C)	Résistance thermique r (m ² °C/W)
Enduit plâtre	0.015	0.35	0.04
Brique creuse	0.1	0.48	0.2
Lame d'air	0.04		0.16
Brique creuse	0.1	0.48	0.2
Enduit ciment	0.015	1.4	0.011
1/hi + 1/he			0.17
Rtotal = rt+1/hi+1/he (m²°C/W)			0.78
K =1/R (W/m² °C)			1.28

5.3. Calcul du coefficient de transmission K pour la paroi « D »

Composants du mur externe	Epaisseur e (m)	Conductivité thermique λ (W/m°C)	Résistance thermique r (m ² °C/W)
Enduit plâtre	0.015	0.35	0.04
Brique creuse	0.1	0.48	0.2
Lame d'air	0.03		0.16
Brique creuse	0.1	0.48	0.2
Enduit ciment	0.015	1.4	0.011
	1/hi + 1/he		0.17
	R total = rt+1/hi+1/he (m ² °C/W)		0.78
	K =1/R (W/m ² °C)		1.28

Etablit sur la base des données D.T.R C3-2

Annexe II:**1. Données météorologiques de la ville de Constantine pour la période de 1996-2005 :**

	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
Tmoy min	2,6	2,6	5,2	7,3	11,6	16	18,6	19,1	16	11,5	7,3	4,2
T moy max	12,3	13	17,1	19,5	25,5	31,3	34,6	34,4	28,6	24,3	16,8	12,9
T moy	7,5	7,8	11,2	13,4	18,6	23,7	26,6	26,8	22,3	17,9	12,1	8,6
Hr moy min	56,8	52,2	44	43,7	37,9	28,9	24,8	26,3	36,5	40,7	52,2	58,6
Hr moy max	93,8	94,6	92	92,6	89,3	80,3	74,4	75,9	88,8	89,7	92,8	94,2
Hr moy	75,3	73,4	68	68,15	63,6	54,6	49,6	51,1	62,65	65,20	72,5	76,4
Précipitations moy (mm)	76	55	38,5	55,9	41,2	20,7	5,6	13	40,8	32	72,7	83,9
Vent moy	2,6	2,9	2,5	2,9	2,5	2,4	2,4	2,4	2,1	2,2	2,8	2,9
Insol moy (h)	160	178	232	240	282	317	332	294	244	223	161	151

Tableau 2 : Données météorologiques de la ville de Constantine pour la période de 1996-2005*(Source : ONM Constantine, 2007)***2. Analyse bioclimatique de Constantine :****2.1. METHODE DE MAHONEY****Tableau 1 :**

Location	NORD - EST Algérien
Longitude	7° EST
Latitude	36°17' NORD
Altitude	675m

Température de l'air en °C:

	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aoû	Sep	Oct	Nov	Dec
Températures mensuelles max	12,3	13	17,1	19,5	25,5	31,3	34,5	34,4	28,6	24,3	16,8	12,9
Températures mensuelles min	2,7	2,6	5,2	7,3	11,6	16	18,6	19,1	16	11,5	7,3	4,2
Températures mensuelles moy	7,5	7,8	11,2	13,4	18,6	23,7	26,6	26,8	22,3	17,9	12,1	8,6

$$AMT = T_{max} + T_{min} / 2$$

$$AMR = T_{max} - T_{min}$$

T max	34.5
T min	2.6
AMT	31.9
AMR	18.5

Humidité relative en %:

Hr max	93,8	94,6	92	92,6	89,3	80,3	74,4	75,9	88,8	89,7	92,8	94,2
Hr min	56,8	52,2	44	43,7	37,9	28,9	24,9	26,3	36,5	40,7	52,2	58,6
Hr moy	75,3	73,4	68,0	68,2	63,6	54,6	49,7	51,1	62,7	65,2	72,5	76,4
Groupe d'humidité	4	4	3	3	3	3	2	3	3	3	4	4

Groupe d'humidité: 1	Si Hr < 30%
2	30-50%
3	50-70%
4	> 70%

Précipitations et vents:

Precipitations (mm)	76	55	38,5	55,9	41,2	20,7	5,6	13	40,8	32	72,7	83,9	535.3
---------------------	----	----	------	------	------	------	-----	----	------	----	------	------	-------

Vents dominants (m/s)	2,6	2,9	2,5	2,9	2,5	2,4	2,4	2,4	2,1	2,2	2,8	2,9
-----------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Limites de Confort :

Groupe d'humidité	AMT > 20°C		AMT 15-20°C		AMT < 15°C	
	Jour	Nuit	Jour	Nuit	Jour	Nuit
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

Tableau 2 :**Diagnostic de températures en °C**

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T moyennes max	12,3	13	17,1	19,5	25,5	31,3	34,5	34,4	28,6	24,3	16,8	12,9
Confort jour: Sup	24	24	25	25	25	25	31	29	29	29	25	24
Inf	18	18	20	20	20	20	25	23	23	23	20	18
T moyennes min	2,7	2,6	5,2	7,3	11,6	16	18,6	19,1	16	11,5	7,3	4,2
confort nuit: Sup	18	18	20	20	20	20	24	23	23	23	20	18
Inf	12	12	14	14	14	14	17	17	17	17	14	12
Confort thermique: Jour	C	C	C	C	H	H	H	H	O	O	C	C
Nuit	C	C	C	C	C	O	O	O	C	C	C	C

C: Cold (froid)

O: Comfort (confort)

H: Hot (chaud)

Indicateurs

Humide: H1													
H2													
H3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	12
Aride: A1			✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		8
A2							✓						1
A3	✓	✓	✓	✓							✓	✓	6

	Indicateurs	Confort thermique		Pluviométrie	Groupe Humidité	Δ moyennes
		Jour	Nuit			
mouvement d'air essentiel	H1	H			4	
		H			2,3	< 10°C
Mouvement d'air désirable	H2	O			4	
Protection contre la pluie	H3				> 200mm	
Capacité thermique nécessaire	A1				1,2,3	> 10°C
Espace extérieur pour dormir désirable	A2		H		1,2	
		H	O		1,2	> 10°C
Protection du froid	A3	C				

Tableau 3 :**Recommandations spécifiques**

Indicateurs totaux induits du tableau 2					
H1	H2	H3	A1	A2	A3
0	0	12	8	1	6

Implantation : plan de masse

			0-10			✓	1	Orientation Nord et Sud (axe long Est-Ouest)
			11,12		5-12			
					0-4			

Espacement entre bâtiments

11,12							3	Espace ouvert pour pénétration de brises
2-10							4	Protection contre vent chaud et froid
0,1						✓	5	plan compact

Mouvement d'air

3-12						6	Chambres individuelles permettant le mouvement d'air
1,2			0-5			7	Chambres doubles permettant une provision temporaire de l'air
			6-12				
0	2-12					8	Mouvement d'air non recommandé
	0,1				✓		

Ouvertures

			0,1		0		9	Large 40-80%
			11,12		0,1		10	Très petites 10-20%
Autres conditions						✓	11	Moyennes 20-40%

Murs

			0-2				12	Murs légers, court temps de déphasage
			3-12			✓	13	Murs intérieurs et extérieurs épais

Toits

			0-5				14	Toits légers
			6-12			✓	15	Toits épais, temps de déphasage plus de 8h

Terrasse

			2-12				16	Espace demandé pour terrasse
--	--	--	------	--	--	--	----	------------------------------

Protection contre la pluie

		3-12				✓	17	Protection nécessaire contre les pluies
--	--	------	--	--	--	---	----	-----------------------------------------

Tableau 4 :**Recommandations détaillées**

Indicateurs totaux induits du tableau 2					
H1	H2	H3	A1	A2	A3
0	0	12	8	1	6

Dimension des ouvertures

				0		1	Larges 40-80%
			0,1	1-12		2	Moyennes 25-40%
			2-5				
			6-10		✓	3	Petites 15-25%
			11,12	0-3		4	Très petites 10-20%
				4-12		5	Moyennes 25-40%

Position des ouvertures

3-12						6	Au nord et au sud du mur face au vent
1,2			0-5			7	Ouvertures hautes dans les murs intérieurs.
			6-12				
0	2-12						

Protection des ouvertures

				0-2		8	Exclure rayonnement solaire direct
		2-12				9	Protection contre la pluie

Murs et planchers

			0-2			10	Capacité thermique faible
			3-12			11	Épais, temps de déphasage plus de 8h

Toits

10-12			0-2			12	Léger, surface réfléchive, cavité
			6-12			13	Léger, avec insolation
0,9			0-5			14	Massif, temps de déphasage plus de 8h
			6-12				

Éléments extérieurs

				1-12		15	Espace pour dormir la nuit
		1-12				16	Drainage adéquat des pluies

2.2. Méthode de détermination des zones de confort : STEEVE SZOKOLAY**2.2.1. Détermination de la zone de confort :**

- a) La température moyenne annuelle :

$$T_m = \sum t_m/12 = \mathbf{16,3^\circ C}$$

- b) La température neutre sera :

$$T_n = 17.6 + (0.31 \times T_m).$$

$$\mathbf{T_n = 22,6^\circ C}$$

- c) Limites de la zone de confort:

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 12 g/kg.

$$T_1 = T_n + (A_{hn} - 12) \times 0.025 \times (T_n - 14) - 2$$

$$\mathbf{T_1 = 19,95^\circ C}$$

Où Ahn représente l'humidité absolue du point de neutralité.

$$T2 = T1 + 4.$$

$$\mathbf{T2 = 23.95^{\circ}\text{C}}$$

$$T3 = T1 + 0.2 \times (T1 - 14).$$

$$\mathbf{T3 = 21.14^{\circ}\text{C}}$$

$$T4 = T2 + 0.2 \times (T2 - 14).$$

$$\mathbf{T4 = 25.94^{\circ}\text{C}}$$

Les points 3 et 4 correspondront à celle de 4g/kg.

2.2.2. détermination de la zone de contrôle potentiel pour les périodes froides : Zone de chauffage solaire passif.

$$T5 = Tn + 0.36 - 0.0025 \times H_v. \quad / \quad H_v = 3732 \text{Wh/m}^2$$

$$\mathbf{T5 = 13.63^{\circ}\text{C}}$$

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.

Le point 5 correspond à la ligne de saturation $HB = 100\%$.

2.2.3. 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.

$$dT_m = T \text{ moy max} - T \text{ moy min.} = 34.5 - 18.6$$

$$\mathbf{dT_m = 15.3^{\circ}\text{C}}$$

$T6 = T2 + 0.5 (dT_m)$ situe à la ligne d'humidité absolue qui correspond à 12 g/kg.

$$\mathbf{T6 = 31.6^{\circ}\text{C}}$$

$T7 = T6 - 0.05 (T6 - 14)$ correspond à la ligne 14 g/kg.

$$\mathbf{T7 = 30.7^{\circ}\text{C}}$$

$T8 = T6 + 0.2 (T6 - 14)$ correspond à la ligne 4g/kg d'humidité absolue.

$$\mathbf{T8 = 35.12^{\circ}\text{C}}$$

La limite d'humidité la plus élevée correspond à la courbe d'humidité relative du point 1.

b- Zone d'effet de masse avec ventilation nocturne :

$T9 = T2 + 0.8 (dT_m)$. Le point 9 correspond à la ligne 12 g/kg (HA).

$$\mathbf{T9 = 36.67^{\circ}\text{C}}$$

$T10 = T9 - 0.05 (T9 - 14)$. Le point 10 correspond à la ligne 14 g/kg.

$$\mathbf{T10 = 35.53^{\circ}\text{C}}$$

$T_{11} = T_9 + 0.2 (T_9 - 14)$. Le point 11 correspond à la ligne 4 g/kg.

$$T_{11} = 41.2^{\circ}\text{C}$$

Cette zone est délimitée par les points 9,10 et 11.

c- Zone de ventilation naturelle – Mouvement d'air sur la surface de peau :

$T_{12} = T_2 + 5$ correspond à la ligne de 12 g/kg (HA).

$$T_{12} = 28.95^{\circ}\text{C}$$

$T_{13} = T_{12} + 0.1 (T_{12} - 14)$ correspond à la ligne de 4 g/kg (HA).

$$T_{13} = 30.44^{\circ}\text{C}$$

$T_{14} = T_1$. mais le point 14 sera localisé par la courbe de 90% d'humidité relative.

$$T_{14} = 19.95^{\circ}\text{C}$$

$T_{15} = T_{12} - 0.18 (T_{12} - 14)$. Le point 15 sera situé sur la courbe de 90% d'humidité relative

$$T_{15} = 26.26^{\circ}\text{C}$$

d- Zone de refroidissement évaporatif direct :

La température limite la plus élevée est :

$T_{16} = T_n + 12$. les limites supérieures et inférieures de cette zone sont tracés à partir des lignes de températures humides des points 2 et 3.

$$T_{16} = 34.6^{\circ}\text{C}$$

e- Zone de refroidissement évaporatif indirect :

La température limite la plus haute est :

$T_{17} = T_n + 15$. La limite supérieure de cette zone correspond à la ligne de 14 g/kg (HA).

$$T_{17} = 37.6^{\circ}\text{C}$$

2.2.4. Représentation des conditions climatiques qui prévalent :

Chaque mois est représenté par une ligne dessinée entre deux points :

- La température moyenne maximale mensuelle avec l'humidité relative minimum.
- La température moyenne minimale mensuelle avec l'humidité relative maximum.

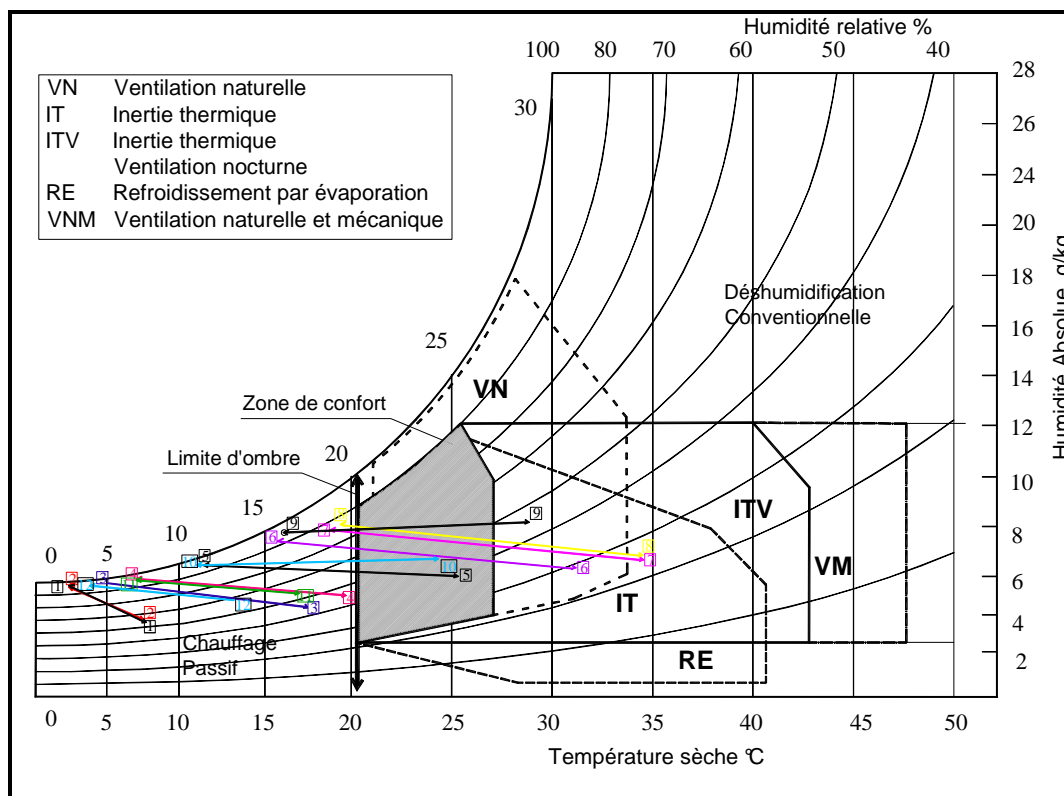


Figure 3: Digramme de Givoni appliqué à la ville de Constantine

(Source : Auteur)

a) Calcul de la température neutre T_n d'après la formule de Humphrey:

$$T_n = 11.9 + 0.531 T_0$$

Où T_n : la température neutre en °C

T_0 : la température extérieure moyenne du mois en question en °C.

$$T_0 = 27.7^\circ\text{C}$$

$$\mathbf{T_n = 26,6^\circ\text{C}}$$

b) Les températures limites de confort T_c

$$T_c = T_n \pm 2 \text{ K.}$$

$$T_c = T_n + 2\text{K} = \mathbf{28.6^\circ\text{C}}$$
 c'est la limite supérieure du confort.

$$T_c = T_n - 2\text{K} = \mathbf{24.6^\circ\text{C}}$$
 c'est la limite inférieure du confort.

c) Classification des zones climatiques selon l'indice de DeMartonne :

$Im < 5$ 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.

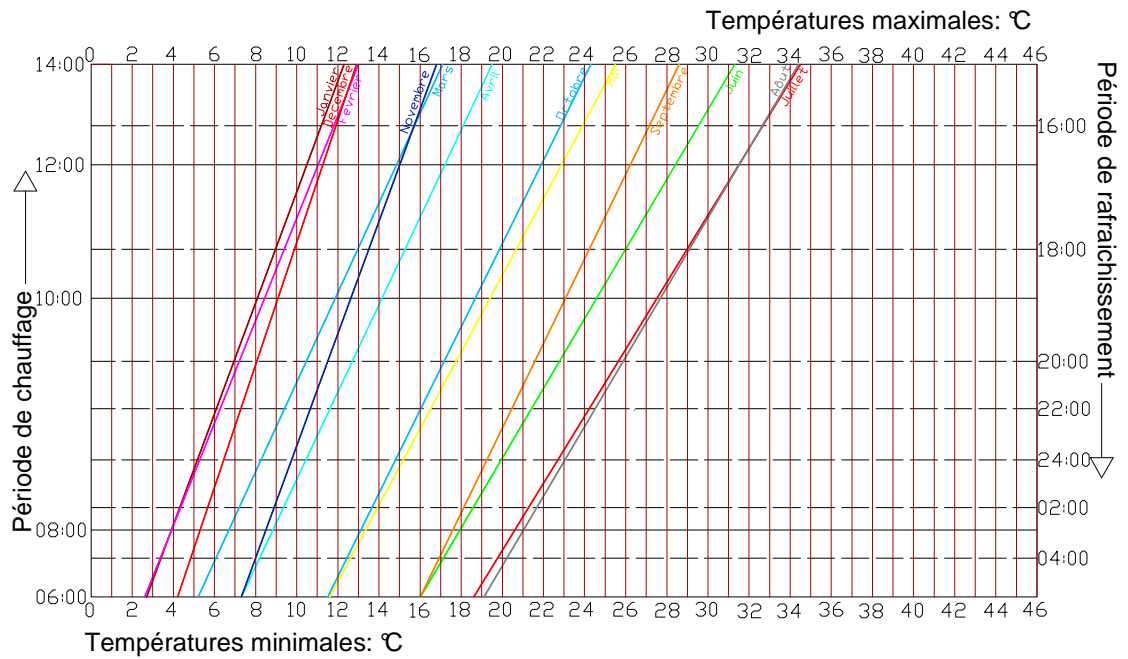
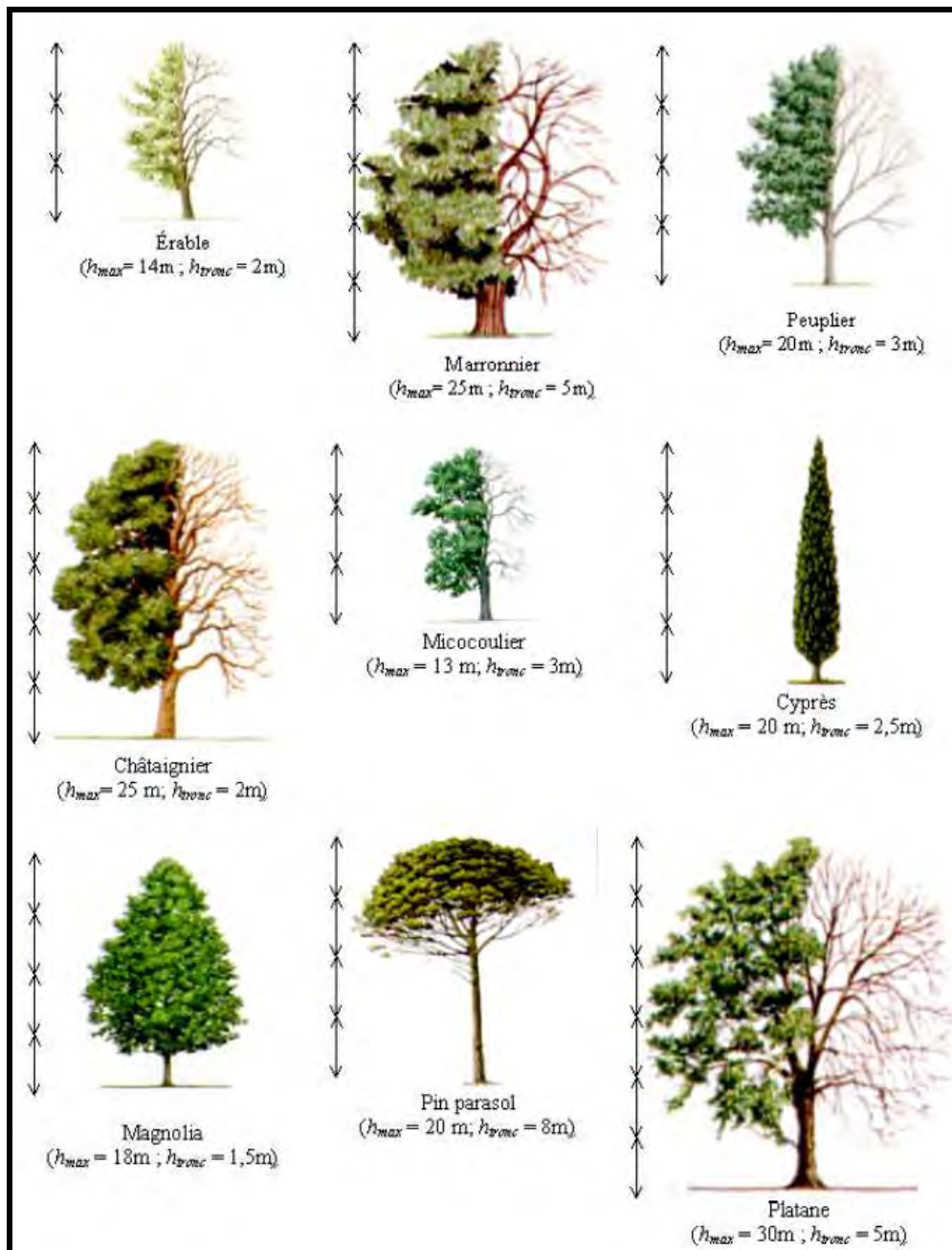


Figure 4: Calculatrice des températures horaires appliquée à la ville de Constantine

(Source : Auteur)

Annexe III:**Tableau 3: Dimensions d'arbres communs***(Source : Vinet, 2000)*

A Arbres, captage solaire, protection solaire		E Patios et humidification de l'air en été	
Nom commun	Nom scientifique	Nom commun	Nom scientifique
Acacia de Constantinople	Albissia Julibrissin	Abutilon	Abutilon
Bouleau	Butela	Acacia de Constantinople	Albissia Julibrissin
Catalpa commun	Catalpa Binoniodes	Bouleau	Butela
Charme Houblon	Ostrya Carpinifolia	Catalpa commun	Catalpa Bignoniodes
Erable de Montpellier	Acer Monspessulanum	Erable nain vert	Acer Megundo
Erable nain vert	Acer Megundo	Figuier commun	Ficus Carica
Erable Sycomore	Acer Pseudoplatanus	Jacinthe d'eau	Eichornia Crassipes
Figuier commun	Ficus Carica	Lierre commun des bois	Hedera Hélix
Flamboyant	Caesalpinia Gilliesh	Marronnier d'Inde	Aesculus Hippocastanum
Frêne blanc d'Amérique	Fraxinus Americana	Papyrus	Cyperus Papyrus
Frêne commun	Fraxinus Excelsior	Peuplier d'Italie	Populus Nigra Italica
Hêtre	Fagus	Saule blanc pleureur	Salix Alba Tristis
Judée (arbre de)	Cercis Ciliquastrum	Tilleul Argenté	Tilia Argentea
Marronnier d'Inde	Aesculus Hippocastanum	Vigne vierge	Ampélopsis Veitchii
Mûrier blanc	Morus Alba	Vigne vierge à 5 fleurs	Parthenocissus Quinquefolia
Mûrier de Chine	Broussonetia Papyrifera	Volubilis	Ipomea
Mûrier Platane	Morus Kagayamah	F Tapissants, Fixation des pentes	
Oranger des osages	Maclura Aurantiaca	Nom commun	Nom scientifique
Ormes Champêtre	Ulmus Carpinifolia	Acanthe à feuilles molles	Acanthas Mollis
Pallownia	Pallownia Fortunei	Agave du Mexique	Agave Mexicana
Peuplier d'Italie	Populus Nigra Italica	Ajonc	Ulex Europaeus
Platane	Platanus	Aloes	Aloe
Robinier Faux Acacia	Robinia Pseudoacacia	Belle de nuit	Mirabilis Jalapa
Sophora du Japon	Sophora Japonica	Cinénaire Maritime	Senecio Cineraria
Tilleul Argenté	Tilia Argentine	Coloquinthes	Cucurbita Pepo
B Treilles et pergolas, captage solaire, protection solaire		Fougères capillaires	Adiantum
Nom commun	Nom scientifique	Géranium	Pelargonium
Aristolochie Siphon	Aristolochia Siphon	Lavande officinale	Lavandula Officinale
Bignone à grandes fleurs	Campsis Grandiflora	Lupin des jardins	Lupinus
Capucine (la grande)	Tropeleum Majus	Pourpier de mer	Atriplex Halimus
Glycine de Chine	Wistaria Sinensis	Romarin	Rosmarinus Officinalis
Jasmin de Virginie	Campsis Radicans	Rosé trémière	Alihonia Simensis
Vigne	Vitis	Santoline maritime	Diotis Canissima
Vigne vierge	Ampélopsis Veitchii	Sauge	Salvia
Vigne vierge à 5 fleurs	Parthenocissus Quinquefolia	Saxifrage à grandes feuilles	Bergenia Cordiflora
Volubilis	Ipomea	Thym	Thymus Communis
C Arbres, grands brise-vents hiver		G Grimpants, Fixation des pentes	
Nom commun	Nom scientifique	Nom commun	Nom scientifique
Cèdre de l'Atlas	Cedrus Atlantica	Asparagus de Spenger	Asparagus Spengeri
Cèdre du Liban	Cedrus Libani	Bruyère Arborescente	Eruca Arborea
Chêne vert	Quercus Ilex	Capucine (la grande)	Tropeleum Majus
Cyprès de Lambert	Cupressus Macrocarpa	Chèvrefeuille entrelacé	Lonicera Implexa
Cyprès de Provence	Cupressus Sempervirens	Cobée grimpant	Cobaea
Filao	Casuarina Equisetifolia	Coloquinthes	Cucurbita Pepo
D Arbustes, petits brise – vents		Figuier grimpant	Ficus Repens
Nom commun	Nom scientifique	Fusain grimpant	Evonimus Fortunei
Argousier	Hypophae Rhamnoides	Jasmin d'hiver	Jasminum Primulinum
Bambous	Arundinaria	Lierre commun des bois	Hedera Hélix
Bruyère Arborescente	Erica Arborea	Lierre des Canaries (Gloire de Marengo)	Hedera Canariensis
Buis commun	Buxus Sempervirens	Passiflore	Passiflora Coerulea
Buisson Ardent	Pyracantha Coccinea	Vigne	Vitis
Chêne Kermès	Quercus Coccifera		
Fusain du Japon	Evonimus Japonicus		

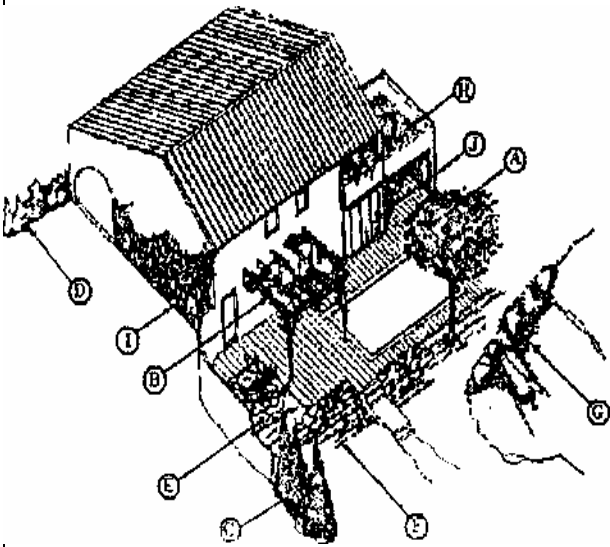
Fusain grimpant Genêt d'Espagne Genêt épineux Houx commun Laurier amande Laurier rose Laurier sauce Laurier tin Pittosporum de Chine Thuya Troène de Californie Yucca	Evonimus Fortunei Spartium Junceum Calicotome Spinosa Ilex Aquifolium Prunus Laurocerasus Nerium Oleander Laurus Nobilis Viburnum Tinus Pittosporum Tobira Thuya Ligustrum Ovalifolium Yucca Gloriosa	H Toits, terrasses, protection thermique hiver et été	
		Nom commun	Nom scientifique
		Cobée grimpant Lierre commun des bois (Gloire de Marengo) Lierre des Canaries	Cobaea Hedera Helix Hedera Canariensis
		I Grimpants, isolation thermique hiver et été	
		Nom commun	Nom scientifique
		Cobée grimpant Figuier grimpant Fusain grimpant Jasmin d'hiver Lierre commun des bois Lierre des Canaries	Cobaea Ficus Repens Evonimus Fortunei Jasminium Primulinum Hedera Helix Hedera Canariensis
		J Vérandas et serres, captage solaire et protection	
		Nom commun	Nom scientifique
		Aristoloche Siphon Capucine (la grande) Cognassier du Japon Flamboyant Grenadier Pommier Vigne Vigne vierge Vigne vierge à 5 folioles Volubilis	Aristoclochia Siphon Tropeleum Majus Chaenomeles Japonica Caesalpinia Gilliesh Punicagranatum Malus Vitis Ampélopsis Veitchii ParthenocissusQuinquefolia Ipomea

Tableau 4 : répartition possible de différentes plantes autour de l'habitat

(Source : AFME : Agence Française pour la Maîtrise de l'Énergie, 1988)

Type de plantes grimpantes	C CADUQUE P PERSISTANT	HAUTEUR MAXIMUM (m)	TAUX DE CROISSANC E	TYPE DE SOL
GRIMPEURS A CRAMPONS (aucun support requis).				
<i>Hedera Helix</i> Lierre	P	30	Lent mi-ombre ou ombre	Ordinaire pauvre et sec
<i>Parthenocissus Quinquefolia / Virginia Creeper</i> Vigne vierge de Virginie ou Vigne vierge vraie ou Vigne vierge à cinq folioles	C	15	Rapide Soleil	Ordinaire
<i>Parthenocissus Tricuspidata/ Boston Ivy</i> Lierre de Boston ou Lierre japonais ou Vigne vierge japonaise	C	15	Rapide Soleil	Ordinaire
<i>Hydrangea Petiolaris</i> Hortensia grimpant	C	15	Moyen mi-ombre ou ombre	Riche et frais
<i>Euonymus fortunei vars.</i> Fusain	P	5	Lent Soleil ou mi-ombre	Ordinaire supporte le calcaire
GRIMPEURS VOLUBILES TORTILLANTS (Support requis. Certains ont besoin d'un réseau de fil d'acier mince, barres en plastique rudes ou treillis en bois)				
<i>Polygonum bauldschianicum</i> Vigne russe	C	30	Rapide Soleil ou mi-ombre	Riche frais
<i>Lonicera Periclymenum</i> Chèvrefeuille (Woodbine)	C	5	Moyen Soleil ou mi-ombre	Ordinaire
<i>Lonicera.</i> Chèvrefeuille	Principalement C Certains P	6	Moyen Soleil ou mi-ombre	Ordinaire
<i>Clematis Vitalba</i> La barbe du vieil homme	C	10	Rapide Soleil	Ordinaire , léger et frais
<i>Clematis</i> Clematite	Principalement C Certains P	10	Rapide Soleil	Ordinaire , léger et frais
<i>Humulus Iupulus</i> Houblon	C	6	Rapide Soleil ou mi-ombre	Sol riche
<i>Aristolochia</i> La pipe du Néerlandais	C	10	Moyen	
<i>Jasminum officinale</i> Jasmin	C	9	Rapide Soleil Ombre	Ordinaire frais
<i>Vitis</i> Vigne	C	20	Moyen/ Rapide	
<i>Wisteria</i> Glycine	C	18	Moyen Plein soleil	Ordinaire, mais redoute le calcaire ou

				l'humidité stagnante
<i>Capsis Radicans</i> Vigne de trompette	C	12	lent	
<i>Passiflora Caerulea</i> Fleur de passion La passiflore	C	8	Rapide Plein soleil	Normal mais fertile
<i>Lathyrus Odoratus</i> Pois doux	P	2	Rapide Plein soleil	
<i>Tropaeolum.</i> Nasturce	P	2	Rapide	
ARBUSTES A PALISSER (Des grimpeurs mais peuvent être formés sur les structures larges de grille ou attachés à un mur)				
<i>Rubus Fruiticus</i> Mûre	P		Moyen Soleil	ordinaire
<i>Jasminum Nudiflorum</i> Jasmin d'hiver	C	5	Moyen Soleil Ombre	Ordinaire frais
<i>Rosa Canina</i> Dogrose	C	3	Moyen Soleil	Ordinaire
<i>Rosa.</i> Rose grimpante	C	5	Moyen Soleil	Ordinaire
<i>Forsythia suspense</i> Forsythia	C	4	Moyen Plein soleil	Ordinaire frais
<i>Cotoneaster</i> Cotonéaster	Principalement C Certains P	3-6	Lent Soleil ou mi-ombre	Ordinaire même calcaire
<i>Pyracantha atalantiodes</i> Buisson-ardent	P	5	Lent Soleil	ordinaire

Tableau 5: Choix des plantes appropriées pour la couverture des murs

(Source : Johnston.J, Newton.J, 2004 & Brochard.D, 2004 et réadapté par auteur)

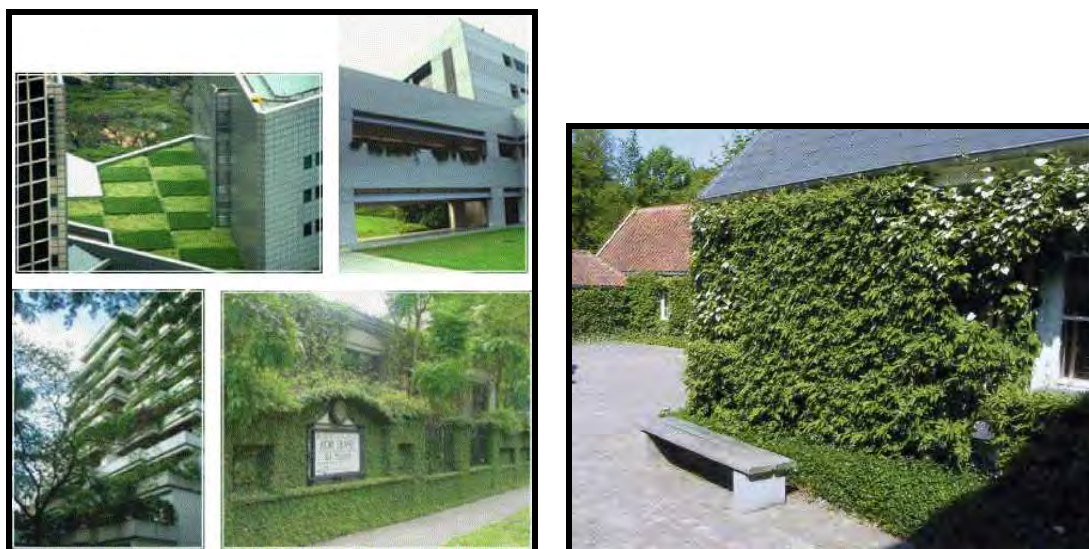


Figure 5: Différentes techniques de végétalisation

(Source : à droite : Wong et al, 2005, à gauche: Leroux.F, 2005)



Figure 6: Un exemple d'utilisation verticale de la végétation : le parc MFO à Zurich
(Source : Vision futuriste d'un artiste issu du livre de N.Dunnet, *Toits et murs végétaux*)

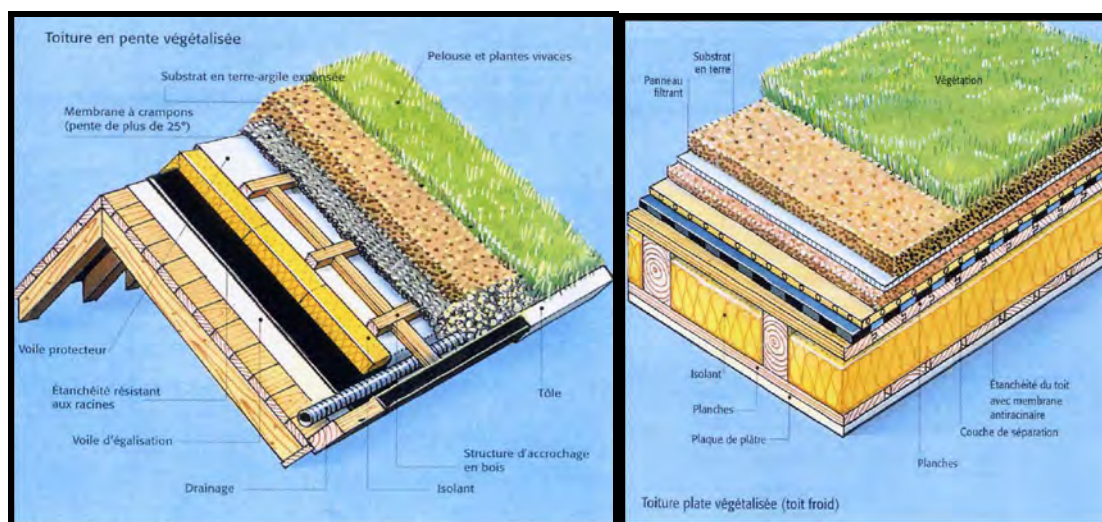


Figure 7: Schémas de principe du fonctionnement de toitures végétalisées
(Source : Issus du livre *Eco-Logis* de Thomas Schmidt-Gunter)



Figure 8: Multiplication des toits végétalisés comme moyen de réduction de l'effet d'ICU
(Source : Leroux.F, 2005)

Résumé :

En ce début du XXI^{ème} siècle, l'émergence de préoccupations environnementales a revêtu une importance cruciale nécessitant des études plus approfondies sur la demande énergétique des bâtiments, liée principalement aux systèmes de conditionnement des ambiances.

En Algérie, le secteur résidentiel et tertiaire se trouve parmi les secteurs les plus énergivores. En période estivale, les bâtiments résidentiels sont confrontés à des problèmes d'inconfort liés au phénomène de surchauffe et d'exposition des façades aux radiations solaires intenses et de consommation irrationnelle et abusive d'électricité pour la climatisation. En effet, l'ambiance thermique dans les bâtiments est un facteur important pour le confort des occupants car les températures extrêmes, qu'elles soient chaudes ou froides, peuvent provoquer des effets gênants chez l'homme.

Avec la crise énergétique, le recours aux procédés passifs a connu donc un essor de plus en plus amplifié. Par conséquent, l'effet de la végétation comme dispositif de rafraîchissement est reconnu ; son impact sur le confort extérieur a fait l'objet de maintes recherches. Quant à l'effet de la végétation sur le confort intérieur, celui-ci semble être insuffisamment traité.

L'objectif de notre étude consiste donc à évaluer le confort hygrothermique des bâtiments sous l'effet des écrans végétaux dans un climat semi aride de Constantine. Pour cela, une campagne de mesures in situ a été effectuée, autour de laquelle des échantillons représentatifs ayant la même orientation ont servi de support à l'analyse du comportement thermique de ces derniers.

Cette investigation sur cas réel de quatre maisons individuelles a permis d'évaluer l'impact de la végétation grimpante sur la température de l'air et de surfaces, ainsi que l'humidité de l'air, en d'autres termes sur le confort hygrothermique de ces maisons en période estivale.

D'ailleurs, les résultats de mesures ont révélé que, les plantes grimpantes à feuillage caduc sur un mur orienté sud sud ouest ont un effet bénéfique sur l'environnement thermique extérieur près du bâtiment et par conséquent sur l'ambiance intérieure de ces derniers. En outre, nous avons relevé que la performance hygrothermique des plantes grimpantes vis-à-vis des bâtiments dépendaient étroitement de la densité du feuillage, de son épaisseur et du rapport de couverture, et finalement de la typologie.

Mots clés :

Végétation grimpante à feuillage caduc, mesures in situ, confort hygrothermique estival, climat semi aride.

Summary:

At the beginning of the XXIth century, the emergence of environmental concerns dressed a crucial importance requiring detailed studies on the energy demand of buildings for heating and cooling systems.

In Algeria, the residential and tertiary buildings are among most energivors sectors. During summer period, residential buildings are facing problems of discomfort related to the phenomenon of overheating and facade exposure to strong solar radiations and irrational consumption of electricity for the air conditioning.

With the energy crisis, the resort to passive processes known for their performance are more and more developed. Therefore the effect of the vegetation as a cooling device is recognized, its impact on the outside comfort was the object of many researches while its effect on internal thermal comfort is less developed.

The objective of the present study consists in estimating the thermal comfort of the buildings under the influence of plant screens in a semi arid climate of Constantine. For that purpose, an investigation in situ was made. Representative sample houses having the same orientation were used as support to the analysis.

This investigation on real case of four detached houses allowed to estimate the impact of the climbing vegetation on the surface and air temperature and humidity, in other words on the hygro -thermal comfort of these houses in summer period.

A simulation program is used to validate site results; it concerns (TRNSYS 14)

The results revealed that, deciduous creepers on a directed south western wall have a beneficial effect on the outside thermal environment near the building and consequently on the internal thermal conditions of these last ones. Besides, we raised (found) that the hygro thermal performance creepers effects on buildings depends strictly on the density of the foliage, its thickness and covering ratio and finally on vegetal typology.

Key words:

Deciduous Climbing vegetation, in situ measurements, thermal comfort, dry climate, building behavior.

ملخص:

عرفت بداية القرن الواحد والعشرين بروز انشغالات بيئية ذات أهمية بالغة استوجبت إجراء دراسات عميقة خاصة بالطلب الطاقوي للبناءات و المنشآت المرتبطة بوسائل التكيف.

يمثل قطاع السكن و الخدمات في الجزائر من أهم القطاعات المستعملة للطاقة. إذ تتعرض البناءات السكنية في فصل الصيف إلى مشاكل عدم الرفاهية الناجمة عن الحرارة الفائقة و تعرض الواجهات إلى أشعة الشمس الحارقة و الاستهلاك اللاعقلاني للطاقة الكهربائية جراء اللجوء المفرط إلى التهوية و التبريد، بحيث يعتبر المناخ الحراري العامل الهام المساهم في رفاهية الفرد علما أن درجات الحرارة القصوى أو الدنيا من شأنها تسبب آثار مزعجة لرفاهية و راحة الأفراد.

بالموازاة مع الأزمة الاقتصادية، عرف اللجوء إلى الأساليب الطبيعية تطورا ملحوظا. نتيجة لذلك أصبح أثر النباتات كأداة تستعمل للتبريد معترف بها فيما يخص مساهمتها في الرفاهية الخارجية فكان محل أبحاث عديدة. أما فيما يخص أثرها على الرفاهية الداخلية يبدو أن الموضوع لم يحض بدراسات كافية.

هدف هذه الدراسة يتجلى إذا في تقييم الرفاهية الرطوبة و الحرارية للبناءات تحت تأثير الغطاء النباتي ضمن المناخ شبه الجاف لمدينة قسنطينة.

من أجل ذلك، جاء موضوع بحثنا في شكل استقصاء ميداني لعينات. خصت الدراسة أربعة منازل فردية لها نفس الاتجاه مكنت من تقييم التأثير النباتي المتعلق على الرفاهية الرطوبة و الحرارية للمنازل في فصل الصيف.

حيث أسفرت نتائج الدراسة إلى أن النباتات المتسلقة ذات أوراق معبلة (caduc) على حائط متوجه جنوب جنوب غربي لنمط مناخي شبه جاف لها تأثير مفيد على الجو الخارجي للمبنى و بالتالي على الجو الداخلي لهذا الأخير. من جهة أخرى، تبين أن النجاعة الحرارية و الرطوبة لهذه الإستراتيجية مرتبطة بكثافة أوراق النبات و سمكها و بالمساحة المغطاة و أخيرا بصنفها.

الكلمات المفتاحية :

النباتات المتسلقة ذات أوراق معبلة (caduc) - رفاهية حرارية و رطوبة في فصل الصيف – استقصاء ميداني – مناخ شبه جاف.