

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

UNIVERSITE DE CONSTANTINE 3



**FACULTE D'ARCHITECTURE ET D'URBANISME
DEPARTEMENT D'ARCHITECTURE**

THESE

**POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE
DOCTORAT EN SCIENCES
SPECIALITE : ARCHITECTURE
OPTION : ARCHITECTURE BIOCLIMATIQUE**

**L'ENVELOPPE VEGETALE : UNE ALTERNATIVE AU
RAFRAICHISSEMENT PASSIF
CAS DE LA FACADE VEGETALE**

Présentée par :

BENHALILOU KARIMA

Année universitaire

2020-2021

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DE CONSTANTINE 3



FACULTE D'ARCHITECTURE ET D'URBANISME
DEPARTEMENT D'ARCHITECTURE

N° de Série.....

N° d'Ordre.....

L'ENVELOPPE VEGETALE : UNE ALTERNATIVE AU
RAFRAICHISSEMENT PASSIF
CAS DE LA FACADE VEGETALE

THESE
POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE
DOCTORAT EN SCIENCES
SPECIALITE : ARCHITECTURE
OPTION : ARCHITECTURE BIOCLIMATIQUE

Présentée par :

BENHALILOU KARIMA

Sous la direction de :

Pr. OUTTAS SALIHA

Devant le jury composé de :

Président	PR DERRADJI MOHAMED	Université de Constantine 3
Examineur	PR BELHAMRI AZZEDINE	Université de Constantine 1
Examineur	PR BENABBAS MOUSSADEK	Université de Biskra
Examineur	PR MAZOUZ SAID	Université d'Oum El Bouaghi
Examineur	PR ROUAG DJAMILA	Université de Constantine 3
Directeur de thèse	PR OUTTAS SALIHA	Université de Constantine 3

Année 2020-2021

Remerciements

Je voudrais en premier exprimer ma reconnaissance à ma directrice de thèse, madame le Professeur Outtas Saliha, pour sa disponibilité et ses précieux conseils tout au long de ma formation. J'ai apprécié sa rigueur scientifique et ses qualités humaines indéniables ;

Je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude à Monsieur Derradji Mohamed, Professeur à l'université de Constantine 3 pour avoir aimablement accepté de présider le jury de cette thèse ;

J'adresse mes vifs remerciements à Madame Rouag Djamila, Professeur à l'université de Constantine 3, Monsieur Belhamri Azzedine, Professeur à l'université de Constantine 1, Monsieur Benabbas Moussadek Professeur à l'université de Biskra et Monsieur Mazouz Said, Professeur à l'université d'Oum El Bouaghi pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'examiner ce travail ;

Je remercie chaleureusement Dr Djedjig Rabah de l'IUT de Longwy, Université de Lorraine, pour sa précieuse contribution scientifique et sans qui le modèle développé n'aurait jamais vu le jour ;

Mes sincères remerciements au directeur du laboratoire LERMAB, le Professeur Mohamed El Ganaoui pour son accueil chaleureux, son aide et pour l'ensemble de nos échanges scientifiques ;

Mes plus sincères remerciements au Dr Sotehi Walid pour m'avoir appris les rudiments du logiciel TRNSYS;

Je témoigne ma gratitude aux propriétaires des maisons pour leur coopération et leur hospitalité ;

Je remercie aussi toute l'équipe du Laboratoire ABE tout particulièrement Pr Bourbia Fatiha, Pr Bouchahm Yasmina et mme Nini Guarmia pour leurs précieux conseils tout au long de ma formation ;

J'adresse mes remerciements à mes amies pour leur soutien et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour l'accomplissement de ce travail : Amina, Adra, Souheila, Sara, Ouarda, Mounira, Dalel, Chahra et Sarah.

A mes parents pour leur amour et leur sacrifice

A mes frères, mes sœurs et mon mari pour leur soutien indéfectible

A tous ceux qui me sont chers

TABLE DES MATIERES

Table des matières	iv
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	xii
Liste des annexes	xiii
Nomenclature	xiv
Résumé	xvi

INTRODUCTION GENERALE

Introduction	1
Problématique	4
Hypothèses	6
Objectifs	7
Méthodologie et outils de recherche	7

CHAPITRE I: LA VEGETALISATION DES ENVELOPPES : LES FAÇADES VEGETALES

Introduction	10
1. Formes végétales en milieu urbain	11
2. L'enveloppe végétale	11
3. la végétalisation verticale	12
4. Historique et évolution de la végétalisation verticale	13
4.1. Le mur vert en tant que matériau	13
4.2. Le mur vert comme élément d'agrément	13
4.3. Le mur vert scénique	14
4.4. Le mur végétal du XX ^{ème} siècle né de l'observation des falaises végétales	15
4.5. Le mur vert comme image	17
4.6. L'émergence des murs vivants actifs	18
5. Typologies de murs verts	19
5.1. Les façades vertes	23
5.1.1. Les façades vertes directes	23
5.1.2. Les façades vertes indirectes	24
5.2. Les murs vivants	24

5.2.1. Le système de feutre tissé	24
5.2.2. Le système de panneaux	24
6. Choix des typologies végétales	26
7. Types de supports pour les façades végétales	29
8. Impacts de la végétalisation verticale des enveloppes	31
8.1. Impact esthétique et psychologique	31
8.2. Impact social	32
8.3. Impact sur la qualité de l'air et la séquestration des polluants	32
8.4. Impact pour la biodiversité	32
8.5. Impact acoustique	33
8.6. Impact économique	33
8.7. Impact thermique	33
Conclusion	36

CHAPITRE II : ETAT DE L'ART : ETUDES EXPERIMENTALES ET NUMERIQUES

Introduction	37
I. Etudes expérimentales	37
I.1. Performance de rafraichissement par isolation	37
I.1.1. Effet isolant de la cavité d'air (Propriétés d'isolation des façades végétales dues à la réduction de la vitesse du vent).....	41
I.2. Performance de rafraichissement par effet d'ombre	46
I.3. Performance de rafraichissement par évapotranspiration	56
I.4. Synthèse	58
II. Etudes numériques : Modélisation des façades végétalisées	62
II.1. Modélisation des façades végétales sous climat subtropical	62
II.2. Modélisation des façades végétales sous climat tropical	66
II.3. Modélisation des façades végétales sous climat océanique	68
II.4. Modélisation des façades végétales sous climat méditerranéen	73
II.5. Modélisation des façades végétales sous climat continental	75
II.6. Modélisation des façades végétales sous climat désertique	76
II.7. Synthèse	78
Conclusion	82

CHAPITRE III : TRANSFERTS THERMIQUES A L'ECHELLE DE LA FAÇADE VEGETALE : PRESENTATION DU MODELE

Introduction	84
I. Interactions de la végétation avec le bâtiment	84
1. Caractéristiques du rayonnement solaire intercepté par la paroi végétale	84
1.1. Propriétés spectrales des feuilles	85
1.2. Répartition de l'énergie incidente	86
1.2.1. Le flux solaire réfléchi	86
1.2.2. Le flux solaire transmis	86
1.2.3. Le flux solaire absorbé	87
1.3. Bilan d'énergie	87
2. Phénomènes physiques à l'échelle de la paroi végétale	87
3. Grandeurs du transfert thermique	89
3.1. La chaleur sensible	89
3.2. La chaleur latente	90
4. Modes de transfert de chaleur	91
4.1. Transfert de chaleur par conduction	91
4.2. Transfert de chaleur par convection	92
4.3. Transfert de chaleur par rayonnement	93
5. Les propriétés thermiques et physiques des plantes	94
5.1. L'indice de surface foliaire	94
5.2. Le taux de couverture de feuillage	95
5.3. Le Déficit de Pression de Vapeur	95
5.4. La réflectivité du feuillage (Albédo)	96
5.5. L'émissivité du feuillage	96
5.6. La transmissivité du feuillage	97
5.7. L'absorptivité des feuilles	97
5.8. La résistance stomatique et la résistance aérodynamique	97
II. Description du modèle de la paroi végétale développé	98
1. Description du logiciel de simulation	101
2. Bilan énergétique	106
2.1. Bilan énergétique au niveau de la couche végétale	106
2.1.1. Le flux du rayonnement infrarouge	107
2.1.2. Le bilan de chaleur sensible H_f	107

2.1.3. Le bilan de chaleur latente L_f	107
2. 2. Bilan énergétique de la cavité d'air	109
2.3. Equations finales	109
Conclusion	111

CHAPITRE IV : EXPERIMENTATION ET VALIDATION DU MODELE

Introduction	112
I. Etude expérimentale	112
I.1. Situation et contexte climatique de la ville de Constantine	112
I.2. Description de l'étude expérimentale	114
I.2.1. Présentation du cas d'étude	114
1.2.1.1. Site et situation	114
1.2.1.2. Description et orientation du bâtiment objet d'étude	114
1.2.1.3. Configuration des espaces testés	116
I.2.2. Protocole de mesure	117
I.2.3. Instruments de mesures utilisés	117
I.3. Interprétation et discussion des résultats	119
I.3.1. Evolution des températures de l'air intérieur	119
I.3.2. Evolution des températures de surface	120
I.3.3. Evolution des températures de feuillage	122
I.3.4. Evolution des humidités relatives	123
II. Validation du modèle	124
II.1. L'analyse des courbes	124
II.2. L'analyse de corrélation	126
II. 2.1. Le coefficient de détermination et le coefficient de corrélation	126
II. 2.2. L'erreur de biais moyen et l'erreur Quadratique Moyenne	126
III. Etude de sensibilité	129
III.1. Evaluation de l'impact de l'indice de surface foliaire	130
III.2. Evaluation de l'impact du taux de couverture végétale	131
III.3. Evaluation de l'impact de la transmissivité des feuilles	132
III.4. Evaluation de l'impact de l'épaisseur de la cavité d'air	133
III.4.1. Variation de (T_c)	133
III.4.2. Variation de (T_{op})	135
III.4.3. Variation de (HR_{int})	136
Conclusion	138

CHAPITRE V : EFFETS DES FAÇADES VEGETALES SUR LES BESOINS ENERGETIQUES DES BATIMENTS

Introduction	139
I. Comparaison entre les performances thermiques et énergétiques d'une façade végétale et d'une façade avec isolation classique	140
I.1. Scénarii de simulation	141
I.2. Présentation du fichier météo	143
I.3. Comparaison des effets thermiques et énergétiques des différents scenarii	143
I.3.1. Comparaison des effets thermiques des différents scénarii	143
I.3.2. Comparaison des besoins énergétiques des différents scénarii	145
II. Evaluation du comportement thermique et énergétique des FV en fonction de leurs orientations	149
II.1. Déroulement des simulations	149
II.2. Evaluation thermique du bâtiment selon l'orientation des façades végétales ..	150
II.2.1. Variation des températures de surface extérieures (T _{so})	150
II.2.2. Variation des températures opératives (T _{op})	152
II.3. Evaluation énergétique selon l'orientation des façades végétales	153
II.3.1. Les besoins en refroidissement	153
II.3.2. Les besoins en chauffage	156
Conclusion	159
CONCLUSION GENERALE & PERSPECTIVES	161
BIBLIOGRAPHIE	167
ANNEXES	
Annexes A	179
Annexes B	182
Annexes C	183
Annexes D	184

LISTES DES FIGURES

Figure I. 1 : Formes végétales en milieu urbain	11
Figure I. 2 : Enveloppes végétales.....	12
Figure I. 3 : La cabane primitive.	13
Figure I. 4 : Les jardins de Babylone.....	14
Figure I. 5 : Scènes de murs végétalisés.....	15
Figure I. 6 : Mur végétal moderne à Sao Paulo – Roberto Burle-Marx	16
Figure I. 7 : La maison Hundertwasser à Vienne	17
Figure I. 8 : Mur végétal du musée du Quai Branly (à gauche), les Halles d'Avignon (à droite) (Patrick Blanc)	18
Figure I. 9 : Murs dépolluants à la gare de Perrache à Lyon (à gauche) et à l'entrée de Villeurbanne (à droite).....	18
Figure I. 10 : Projets de Callebaut Vincent	19
Figure I. 11 : La végétalisation "directe "a" et indirecte "b"	20
Figure I. 12 : Différents types de façades végétalisées.....	20
Figure I. 13 : Typologies de murs verts.....	22
Figure I. 14 : Les différents types de murs végétaux.....	23
Figure I. 15 : Façade végétale directe (a),Façade végétale indirecte (b), mur vivant(c) et mur vivant modulaire (d).....	23
Figure I. 16 : Les systèmes feutre tissé et de panneaux.....	25
Figure I. 17 : Les systèmes de murs biologiques.....	25
Figure I. 18 : Types de murs végétaux	26
Figure I. 19 : ambiance végétale estivale et automnale de la vigne vierge vraie du bâtiment Consorcio à Santiago au Chili (Architecte : Enrique Brown)	27
Figure I. 20 : Supports de façades vertes.....	31
Figure II.1 : Comparaison des températures de surface pour les parties claires et végétalisées.....	39
Figure II. 2 : Les systèmes de végétalisation verticale (a) façade verte directe, (b) Murs vivants à base de jardinières, (c) Murs vivants à base de laine minérale	40
Figure II. 3 : Comparaison des performances hygrothermiques des différentes configurations.....	42
Figure II. 4 : Comparaison de la température et de la vitesse de l'air a) sans ventilation b) avec ventilation naturelle.....	44
Figure II. 5 : Profils de température et de vitesse de l'air dans les 3 systèmes végétalisés.....	45
Figure II. 6: Variations journalières du rayonnement solaire incident sur les vérandas testées.....	46
Figure II. 7 : Variation des températures de l'air dans les maisons testées.....	48
Figure II. 8: Transmission solaire des feuilles en fonction du nombre de couches de feuilles.	49
Figure II. 9 : Evolution des températures de surfaces	50
Figure II. 10 : les 8 systèmes végétaux verticaux testés à Hortpark à Singapour	51
Figure II. 11 : Bâtiments expérimentaux situés sur une plate-forme de béton à Clarksville.	51
Figure II. 12 : Evolution des températures de l'air ambiant et de surface extérieure.	52

Figure II. 13 : Les bâtiments testés: a) façade recouverte de <i>Parthenocissus tricuspidata</i> (sud-sud-ouest) b) façade recouverte de <i>Hedera helix</i> (Est) et (c) façade recouverte de <i>Fallopia baldschuanica</i> (Ouest)	53
Figure II. 14 : Températures moyennes de surface du bâtiment nu et végétalisé.....	53
Figure II. 15 : Evolution des températures de surface externes pour différentes orientations	54
Figure II. 16 : Bâtiment testé et évolution de la température moyenne de surface.	55
Figure II. 17: Evolution des températures de surface extérieures pour les façades vertes et nues (Est et sud).....	56
Figure II. 18 : Modèle du mur végétal.....	63
Figure II. 19 : Les charges annuelles d'énergie de chauffage et de climatisation pour les deux bâtiments.....	64
Figure II. 20 : les écarts de températures entre le mur végétal et le mur nu	65
Figure II. 21 : Flux de chaleur à travers la paroi végétale	66
Figure II. 22 : Nœuds thermiques pour un mur végétalisé	67
Figure II. 23 : Corrélation entre le coefficient d'ombrage (SC) et l'indice de surface foliaire (LAI).....	68
Figure II. 24 : Installation des plantes et des stores dans la cavité de la façade.....	69
Figure II. 25 : Echanges de chaleur dans la façade verte double peau.....	69
Figure II. 26 : Bâtiment utilisé pour la validation numérique du modèle.	70
Figure II. 27 : Echanges de chaleur entre les différentes couches de la façade verte double peau.....	71
Figure II. 28 : Eléments du bilan énergétique des occultations artificielle et végétale	72
Figure II. 29 : Les processus de transfert de chaleur à travers une façade végétale.....	73
Figure II. 30 : Modèles du mur nu et du mur végétal.....	74
Figure II. 31 : Le modèle développé par	75
Figure II. 32 : Mécanismes de flux de chaleur à la surface du mur et de la couche végétale	76
Figure II. 33 : Charges de refroidissement des cinq zones.....	77
Figure II. 34 : Diminutions des charges de climatisation des bâtiments sous l'effet de la végétation.....	79
Figure III. 1 : Propriétés spectrales des plantes sur les longueurs d'onde du visible et du proche infrarouge.....	86
Figure III. 2 : Phénomènes physiques mis en jeu dans une paroi végétale	88
Figure III. 3 : Interactions bâti/végétation	89
Figure III. 4 : Variation du taux de transpiration des feuilles et des températures de l'air pour différentes vitesses du vent	91
Figure III. 5 : Coupe schématique d'un stomate	93
Figure III. 6 : Représentation schématique des échanges de chaleur modélisés dans la façade végétale	99
Figure III. 7 : Interconnexions des différents composants du modèle dans l'interface TRNSYS.....	100
Figure III. 8 : Schéma de résolution	101
Figure III. 9 : Interface graphique Simulation Studio TRNSYS	102
Figure III. 10 : Bilan énergétique dans une zone thermique	104
Figure III. 11 : Les deux modèles de transferts radiatifs standard et détaillé.....	105

Figure IV. 1 : Profils des températures et des humidités de la ville de Constantine	113
Figure IV. 2 : Diagramme psychrométrique de la ville de Constantine	113
Figure IV. 3 : Site d'investigation	114
Figure IV. 4 : Bâtiment objet d'étude	115
Figure IV. 5 : Vue en plan (étage courant) du bâtiment objet d'étude	115
Figure IV. 6 : Data logger USB PCE-HT71	118
Figure IV. 7 : Thermomètre Infrarouge	118
Figure IV. 8 : Variation des températures intérieures et extérieures	120
Figure IV. 9 : Variation des températures de surface internes et externes	121
Figure IV. 10 : Variation des températures de feuillage	122
Figure IV. 11 : Variation des humidités relatives	123
Figure IV. 12 : Comparaison des températures ambiantes calculées et mesurées	125
Figure IV. 13 : Comparaison des températures de feuillage calculées et mesurées	125
Figure IV. 13 : Evolution de la température de surface pour différentes valeurs de (F)...	130
Figure IV. 14 : Cycle de croissance des plantes suivant leur taux de couverture	131
Figure IV. 15 : Evolution de la température de surface pour différentes valeurs de (σ_f) ..	132
Figure IV. 16 : Evolution de la température de surface pour différentes valeurs de (τ_f)...	133
Figure V. 1 : Evolution de la température opérative pour les différents cas	144
Figure V. 2 : Besoins énergétiques pour les différents scenarii	146
Figure V. 3 : Représentation des zones thermiques analysées.	150
Figure V. 4 : Variation des températures de surface pour les quatre façades (nues et végétales)	151
Figure V. 5 : Variation des températures opératives selon les différentes configurations proposées	153
Figure V. 6 : Besoins en refroidissement selon les différentes configurations proposées	154
Figure V. 7 : Besoins mensuels de climatisation selon les différentes configurations proposées	155
Figure V. 8 : Besoins de chauffage selon les différentes configurations proposées	156
Figure V.9 : Besoins mensuels de chauffage selon les différentes configurations proposées	157

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. 1 : Le rôle thermique des murs végétaux	21
Tableau I. 2 : Types de plantes grimpantes	28
Tableau I. 3 : Avantages et inconvénients des murs végétalisés	35
Tableau II. 1 : Synthèse des études expérimentales revues	59
Tableau II. 2 : Récapitulatif des modèles analysés	80
Tableau III. 1 : Emissivité et réflectivité de la végétation	96
Tableau IV. 1 : Caractéristiques thermophysiques du bâtiment objet d'étude	116
Tableau IV. 2 : valeurs statistiques obtenues	128
Tableau IV. 3: Paramètres retenus pour la validation du modèle	128
Tableau IV. 4 : Les différents paramètres étudiés et leurs valeurs respectives	129
Tableau IV. 5 : Variation des températures de la cavité d'air selon son épaisseur	134
Tableau IV. 6 : Variation des températures opératives selon l'épaisseur de la cavité	135
Tableau IV. 7 : Variation des humidités relatives intérieures selon l'épaisseur de la cavité d'air	137
Tableau V. 1 : Les caractéristiques thermo-physiques des murs extérieurs des différents cas étudiés	142
Tableau V. 2 : Résultats des besoins énergétiques	147
Tableau V. 3 : Résultats des besoins et des économies d'énergies	158

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	179
Annexe B	182
Annexe C	183
Annexe D	184
Glossaire	186

NOMENCLATURE

Caractères latins

Désignation	Description	Unité
C_{pf}	: Chaleur spécifique ou massique du feuillage	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
C_{pair}	: Capacité thermique massique de l'air	$J.kg^{-1}.K^{-1}$
df	: Épaisseur moyenne des feuilles	M
F	: Indice de couverture foliaire	-
Hf	: Flux de chaleur sensible	$W.m^{-2}$
hfe, hfi	: Coefficient d'échange de chaleur par convection	$W.m^{-2}.K^{-1}$
h_{fe}^m, h_{fi}^m	: Coefficient de transfert massique	$W.m^{-2}.Pa^{-2}$
h_e^{IR}, h_i^{IR}	: Coefficient d'échange de chaleur par rayonnement	$W.m^{-2}.K$
H_w	: Coefficient de convection (mur ext)	$W.m^{-2}.K^{-1}$
HR	: Humidité relative	%
Lf	: Flux thermique latent	$W.m^{-2}$
pva	: Pression de vapeur	Pa
Pv_sat_f	: Pression de vapeur saturante feuilles et air	Pa
Pv_sat_a	: Pression de vapeur saturante à la température de la surface s	Pa
Q_s	: Flux de chaleur	$W.m^{-2}$
Q_v	: Débit d'air volumique	$m^3.s$
Rn	: Flux radiatif net	$W.m^{-2}$
T	: Température	°C
X	: Épaisseur de la cavité d'air	m

Caractères grecs

ρ_w	: Réflectivité solaire du mur	-
ρ_{air}	: La masse volumique de l'air	kg.m^{-3}
ρ_f	: La masse volumique de la couche végétale	kg.m^{-3}
ρ_s	: Réflectivité solaire de la couche végétale	-
ρ_w	: Réflectivité solaire du mur	-
τ_f	: Transmissivité de la couche végétale	-
σ_f	: Taux de couverture végétale	-
σ	: Constante de Stefan-Boltzmann	$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$
α	: Coefficient d'absorption solaire	-
ε	: Emissivité	-

Indices et abréviations

APRUE	: Agence Nationale pour le Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie
ASHRAE	: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
CSTB	: Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
c	: Cavité
f	: Feuillage
s	: Solaire
w	: Wall (mur)
CLO	: Courte longueur d'onde
GLO	: Grande longueur d'onde
ext	: Extérieur
int	: Intérieur
ICU	: Ilot de chaleur urbain
IR	: Infrarouge
FN	: Façade nue
FV	: Façade végétale
FVD	: Façade végétale directe
FVI	: Façade végétale indirecte
Top	: Température opérative
Tso	: Température de surface extérieure
Tsi	: Température de surface intérieure

Résumé

La présente recherche aborde la question de l'efficacité de l'enveloppe végétale en tant que procédé de rafraîchissement passif des bâtiments sous un climat semi aride. Elle vise l'évaluation des performances thermiques et énergétiques des façades végétales par le biais de l'expérimentation et de la modélisation.

Les plantes sont des organismes vivants qui répondent d'une manière très complexe aux conditions environnementales. La complexité des phénomènes biophysiques en jeu entre la plante, le bâtiment et l'environnement rend encore difficile la modélisation des façades végétales nécessitant l'élaboration de modèles numériques rigoureux.

Pour cela, un modèle mathématique reposant sur des hypothèses simplificatrices et considérant les interactions bâti-végétation-environnement a été développé afin de caractériser les effets des façades végétales. Ce modèle a la particularité de reproduire l'effet tampon fourni par la cavité d'air et tous les flux radiatifs et convectifs y afférents. En effet, différents processus de transfert de chaleur ont été pris en compte dans le bilan énergétique de la paroi végétale à savoir l'absorption du rayonnement solaire, l'échange de chaleur sensible par convection entre le feuillage et l'air ambiant, l'échange d'énergie infrarouge entre le feuillage et l'environnement et la chaleur latente dégagée par la plante par transpiration. Pour valider ce modèle, les résultats numériques sont comparés aux données expérimentales où de fortes corrélations ont été obtenues.

Les résultats expérimentaux ont révélé que l'adoption des façades végétales peut avoir un effet thermique positif pour les bâtiments sous le climat semi-aride durant la période estivale. Les résultats numériques ont ainsi montré que la façade végétale peut réduire considérablement le transfert de chaleur à travers l'enveloppe du bâtiment diminuant ainsi les charges de climatisation.

L'étude de sensibilité a aussi mis en évidence l'efficacité thermique des façades végétales qui dépend fortement de la densité foliaire caractérisée par l'indice de surface foliaire et le taux de couverture. D'autres paramètres tels que l'épaisseur de la cavité d'air, intervient également dans le comportement thermique de ce type de parois.

Mots clés :

Façades végétales, modélisation, rafraîchissement passif, validation expérimentale, performances thermiques et énergétiques.

Summary

This research addresses the issue of the effectiveness of green envelopes as a passive cooling process for buildings in a semi-arid climate. It aims to assess the thermal and energy performance of green facades through experimentation and modeling.

Plants are living beings that respond in a very complex way to environmental conditions. The complexity of the biophysical phenomena at play between the plant, the building and the environment still makes it difficult to model green façades, requiring the development of rigorous numerical models.

For this purpose, a mathematical model based on simplifying hypotheses and considering the interactions between building, vegetation and environment has been developed to characterize the effects of green facades. This model has the particularity of reproducing the buffer effect provided by the air cavity and radiative and convective flows. Indeed, different heat transfer processes have been taken into account in the energy balance of the green facade, namely the absorption of solar radiation, the sensible heat exchange by convection, the infrared energy exchange between the foliage and the environment and the latent heat released by the plant through transpiration. To validate this model, the numerical results are compared with experimental data where strong correlations have been recorded.

The experimental results revealed that the adoption of green facades can have a positive thermal effect for buildings in the semi-arid climate during the summer period. Numerical results thus showed that green facades can significantly reduce heat transfer through the building envelope thereby reducing cooling loads.

The sensitivity analysis also highlighted the thermal effectiveness of green facades, which greatly depends on the leaf density characterized by the leaf area index and the coverage rate. Other parameters, such as the depth of the air cavity, are also involved in the thermal behavior of this type of wall.

Key words:

Green facades, modeling, passive cooling, experimental validation, thermal and energy performance.

الملخص

يدور هذا البحث حول فعالية الجدار الأخضر كوسيلة تبريد سلبية للمباني في مناخ شبه جاف ويهدف إلى تقييم الأداء الحراري والطاقي للواجهات النباتية من خلال دراسة تجريبية ومحاكاة.

تستجيب النباتات بطريقة معقدة للغاية مع الظروف البيئية ويزداد هذا تعقيدا بالنسبة للتفاعلات البيوفيزيائية الموجودة بين النبتة والمبنى والبيئة مما يجعل من الصعب محاكاة الواجهات النباتية و مما يتطلب تطوير نماذج رياضية و فيزيائية صارمة.

لهذا تم تطوير نموذج رياضي مبني على تبسيط الافتراضات والنظر في التفاعلات الحرارية المأثرة في الواجهات الخضراء. يتميز هذا النموذج بخصوصية الأخذ بعين الاعتبار التأثير العازل الذي يوفره تجويف الهواء الموجود بين الواجهة و النبتة وجميع التدفقات الحرارية الحملية و الإشعاعية المرتبطة به. حيث تم اعتبار جميع عمليات نقل الحرارة المختلفة في تقييم الطاقة للواجهة النباتية، وهي امتصاص الإشعاع الشمسي، وتبادل الحرارة عن طريق الحمل الحراري بين النبتة والهواء المحيط، تبادل الأشعة تحت الحمراء بين أوراق النبتة والبيئة والحرارة الكامنة المنبعثة من النبات من خلال النتح. و للتحقق من صحة هذا النموذج تمت مقارنة النتائج العددية بالبيانات التجريبية حيث تم تسجيل ارتباطات قوية.

أوضحت النتائج الميدانية أن تبني الواجهات الخضراء له تأثير إيجابي على رفاة المباني في المناخ شبه الجاف خلال فترة الصيف. وقد أظهرت النتائج العددية أن هذه الواجهات يمكن أن تقلل بشكل كبير من نقل الحرارة داخل المبنى وبالتالي تقليل أعباء تكييف الهواء.

كما سلطت الدراسة المعيارية الضوء على فعالية الواجهات الخضراء والتي تعتمد بشدة على كثافة الأوراق التي تتميز بمؤشر مساحة الورقة ومعدل التغطية بالإضافة إلى سمك تجويف الهواء.

الكلمات المفتاحية :

الواجهات الخضراء، النمذجة، التبريد السلبي، التحقق التجريبي، الأداء الحراري والطاقي

INTRODUCTION GENERALE

« Le végétal en tant qu'élément constitutif du projet d'architecture ne peut être considéré comme tout autre matériau inerte. Ce composant vivant, organique et d'une riche diversité doit être apprivoisé avec escient. »

(Duréault, 2013)

Le réchauffement climatique constitue le défi majeur auquel est confronté l'humanité en ce qu'il impacte à la fois la biodiversité et les écosystèmes, la santé des populations, le cadre de vie particulièrement dans les zones urbaines à forte concentration démographique ainsi que les rendements agricoles du fait des sécheresses et des inondations annonçant des crises alimentaires sans précédent.

Généré par les émissions de gaz à effet de serre induites par la forte industrialisation, ce phénomène appelle aujourd'hui des stratégies nationales et internationales à même de juguler son expansion dans une optique de modification des modes de vie et de développement.

La transition énergétique est un des leviers des nouvelles politiques dont la doctrine est axée essentiellement sur l'abandon progressif des énergies fossiles pour des alternatives accessibles et moins coûteuses privilégiant essentiellement le recours aux énergies renouvelables. Elle trouve son terrain de prédilection dans le secteur du bâtiment pour être un grand consommateur d'énergie. Nous exposons dans notre étude un des procédés naturels en mesure d'apporter des solutions dans un environnement marqué par de fortes chaleurs en été exacerbé par le réchauffement climatique.

Celui-ci est ainsi amplifié, en période estivale, par l'effet d'îlot de chaleur urbain où les températures mesurées en ville sont supérieures de plusieurs degrés à celles de la campagne environnante. Akbari (2001) et Bozonnet (2003) estiment que le réchauffement de ces zones urbaines augmente l'utilisation de l'énergie de refroidissement et accélère la formation du smog urbain affectant sans doute la santé humaine. L'ICU est majoré par la chaleur anthropique et l'énergie calorifique rejetée par les systèmes de climatisation des bâtiments, en raison de la diminution de l'albédo des surfaces urbaines de plus en plus minéralisées.

Un traitement différent de ces surfaces urbaines peut permettre, en effet, de diminuer ce phénomène. L'importance des surfaces végétalisées dans le milieu urbain est primordiale principalement dans les climats chauds, car les surfaces horizontales et verticales extérieures exposées au rayonnement solaire sont soumises à de grandes variations journalières et annuelles de la température (Givoni, 1994). D'ailleurs, la végétalisation des villes qui est au cœur des enjeux contemporains, est considérée comme une solution efficace pour limiter l'ICU permettant d'augmenter les surfaces évaporatives tout en limitant les dépenses énergétiques pour la climatisation.

En redonnant une place plus grande au végétal, cette stratégie peut également contribuer à une amélioration de la biodiversité, de la qualité de l'air, du cadre de vie et surtout du confort thermique.

Récemment, de nouvelles idées sur l'intégration de l'environnement naturel dans les villes ont relancé le débat sur les opportunités de la végétalisation. L'une d'entre elles consiste à utiliser des éléments de construction extérieurs tels que les toits et les façades comme une bonne alternative au manque des surfaces végétales au sol qui présentent souvent un souci d'espace.

L'intérêt que suscite le rôle positif de la végétation dû essentiellement à la sensibilisation croissante de la société à l'environnement et au mouvement de l'architecture durable, a conduit à de nombreuses recherches sur l'intégration des plantes dans le bâtiment à partir desquelles plusieurs programmes incitatifs à la végétalisation des bâtiments ont vu le jour ces dernières années en Europe, en Asie et en Amérique. Diverses études ont porté sur le rôle des toits végétaux pour l'atténuation de l'effet d'îlot de chaleur urbain et l'amélioration de la performance thermique des bâtiments. Cependant, peu d'études ont été consacrées à la végétation intégrée aux façades des bâtiments. Ceci est d'autant plus remarquable sous le climat contrasté des régions internes de notre pays, telle que la région de Constantine, nécessitant par ailleurs une attention particulière de la part des chercheurs.

Les murs végétalisés peuvent être regroupés en deux catégories principales : les façades vertes et les murs vivants. Ces derniers sont conçus avec des modules verticaux pré-végétalisés ou des jardinières fixées à des structures de soutien verticales. Dans le cas des façades vertes, les plantes sont soit autonomes et poussent directement sur le mur extérieur du bâtiment (façade végétale directe), ou attachées extérieurement à un support,

tels que les treillis ou les câbles, spécialement conçus à cet effet (façade végétale indirecte).

Historiquement conçue comme élément d'agrément dans l'architecture vernaculaire, la façade végétale a connu aujourd'hui un regain d'intérêt à travers ses avantages écologiques qui ne sont plus à démontrer.

En effet, l'utilisation de plantes fixées aux murs du bâtiment est une stratégie de rafraîchissement qui ne cesse de gagner en popularité en raison des performances thermiques et esthétiques qu'elles offrent. Duréault (2013) estime que cette popularité est en étroite relation avec la naissance d'une prise de conscience sur l'environnement marquée par différents événements.

Additionnellement à son effet sur le microclimat urbain, la façade végétalisée peut aussi agir sur l'environnement thermique intérieur des bâtiments et devient par conséquent un composant bioclimatique de l'enveloppe à part entière (Malys, 2009) (Price, 2010) (De Munck, 2013) (Othman & Sahidin, 2016).

En conséquence, cette étude tente de rendre compte du rôle de rafraîchissement passif des façades végétales à la fois sous l'angle des économies d'énergie et du confort des bâtiments. Cette stratégie implique une réflexion sur une question d'actualité et constitue une importante préoccupation pour les architectes, les ingénieurs et les concepteurs de bâtiment afin de développer des solutions énergétiques efficaces vers un environnement urbain plus vert, plus confortable et plus écologique. Il y a lieu, tout d'abord, de poser la problématique et de fixer les objectifs.

Problématique

Le monde actuel est marqué par une crise énergétique majeure et confronté aux défis du réchauffement climatique aux retombées fâcheuses sur l'avenir de l'humanité. De ce constat qui semble faire le plus large consensus, il apparaît évident, voire urgent, de rechercher des alternatives passives à même de réduire le recours à des énergies coûteuses, polluantes et raréfiantes.

Ce postulat, rapporté au secteur du bâtiment, domaine de prédilection aux larges possibilités d'économie d'énergie, suscite l'adhésion sinon l'intérêt de bon nombre de chercheurs. En effet, la réduction des consommations énergétiques liées à l'utilisation du bâtiment constitue une question d'actualité. L'augmentation des exigences de confort dans les bâtiments a conduit à des solutions consommatrices d'énergies contradictoires avec les notions du développement durable.

En Algérie, le secteur du bâtiment représente l'un des secteurs les plus énergivores représentant 42% de la consommation finale. L'énergie électrique utilisée pour la climatisation, représente à elle seule 43,18% de la consommation électrique finale au niveau national due essentiellement à la mauvaise conception de l'enveloppe architecturale (APRUE, 2017). Dans ce contexte, l'amélioration de la performance de l'enveloppe du bâtiment s'impose comme une nécessité à la maîtrise des consommations énergétiques de ce secteur.

Il y a lieu de rappeler que dans un bâtiment, la surface de murs et de toiture est souvent largement élevée à la surface occupée au sol. Les murs représentent en particulier une importante surface constituant une source principale de déperditions de chaleur en hiver et de surchauffe en été. Ces surfaces qui servent d'interface entre l'intérieur et l'extérieur sont souvent soumises à de grandes variations de la température. Leur isolation est une préoccupation majeure et difficile à réaliser correctement.

Le pari est de maîtriser naturellement les confort d'été et d'hiver et d'éviter le recours abusif aux systèmes de conditionnement d'air énergivores en privilégiant des solutions naturelles.

A cet égard, de nombreux procédés sont envisageables. De par son pouvoir rafraichissant, la végétalisation du bâti constitue à la fois un marqueur d'adaptation au

changement climatique et un facteur d'atténuation de l'ICU induisant une réduction de la demande de climatisation (De Munck, 2013).

Par ailleurs, le végétal est considéré comme un élément de composition architecturale, voire même comme matériau de construction. La végétation peut désormais constituer une seconde enveloppe du bâtiment sous forme de toit ou de façade végétale. D'ailleurs, la végétalisation des façades de bâtiments est une caractéristique architecturale traditionnelle depuis l'antiquité. Les murs étaient moins sophistiqués et essentiellement construits avec des plantes autogrimpantes.

La végétation a toujours suscité chez l'homme un sentiment de rapprochement avec la nature et une sorte d'émerveillement, de bien être et de sublimation. Ce phénomène d'attachement psychologique à l'environnement naturel qui nous entoure est profondément enraciné dans l'esprit humain et bien décrit à travers le concept de biophilie inventé par (Wilson, 1984). L'attachement à la nature devient d'autant plus important que de plus en plus de gens vivent dans des villes où l'environnement naturel est remplacé par un environnement artificiel.

Sous le climat contrasté de Constantine, les façades végétales sont souvent utilisées pour maintenir ce lien avec la nature ou pour des raisons esthétiques; leurs effets sur le confort et la consommation énergétique des bâtiments sont souvent méconnus. Qu'elles soient à feuillage caduc ou persistant, collées directement à la façade ou placées à une certaine distance, de nombreuses familles de plantes sont utilisées. Néanmoins, les occupants des bâtiments utilisent ces plantes sans pour autant connaître au préalable leurs caractéristiques.

L'intégration de plantes sur les façades peut être utilisée pour bloquer le rayonnement solaire et contrôler le transfert de chaleur à travers l'enveloppe des bâtiments. Ces effets sont souvent investigués à travers des études expérimentales et peu évalués numériquement du fait de la difficulté de développer des modèles rigoureux et fiables mettant en relation la complexité des phénomènes en jeu entre la plante, la façade et l'environnement. Ce qui rend difficile la modélisation des murs verts par les architectes et les concepteurs de bâtiments.

Suite à ces constats, plusieurs interrogations sont à soulever.

- Quels sont les effets positifs et négatifs des façades végétales en termes de confort et de consommation d'énergie sous le climat semi aride de Constantine?
- Quels sont les paramètres déterminants dans le comportement thermique des façades végétalisées ?
- A partir de quelle distance entre l'écran végétal et la façade constate-on des effets sensibles sur le confort thermique et la consommation d'énergie ?
- L'incorporation d'une couverture végétale sur la façade du bâtiment peut-elle remplacer une isolation thermique conventionnelle ?
- Les façades végétales ont-elles des effets sur les besoins en chauffage ?

A cet effet, nous avons émis, pour répondre à ces interrogations, des hypothèses exposées comme suit :

Hypothèse principale

La façade végétale contribue à la stabilisation de la température ambiante et à la réduction des températures de surface de bâtiments pendant l'été de par l'évapotranspiration et l'ombre qu'elle projette sur le bâtiment. Elle agit comme une couche isolante permettant de limiter les surchauffes de jour comme de nuit contrairement à l'isolation thermique conventionnelle qui bloque les échanges infrarouges entre le mur et le ciel durant la nuit.

Hypothèses secondaires

- La densité foliaire intervient comme un paramètre décisif dans l'amélioration des performances thermiques du bâtiment. Plus la densité végétale augmente, plus l'effet de refroidissement passif est important.
- La distance entre la plante et la façade du bâtiment influe considérablement sur les températures ambiantes et de surface ainsi que sur l'humidité relative. Un effet de refroidissement optimal est obtenu en augmentant cette épaisseur.
- L'orientation de la façade verte joue un rôle important dans la réalisation d'économies d'énergie. Les façades soumises à de grandes variations journalières et annuelles de la

température entraînent une économie d'énergie remarquable pour le rafraîchissement des bâtiments.

Objectifs de la thèse

Cette étude constitue une suite de travaux expérimentaux antérieurs de l'auteur menés à Constantine s'agissant de l'étude de l'impact des plantes grimpantes sur le confort des bâtiments.

Cette suite tend à mettre l'accent sur la prédiction du comportement thermique et énergétique des façades végétalisées afin de réduire le transfert de chaleur à travers l'enveloppe du bâtiment et chercher à faire contribuer ce système à la réduction de la consommation énergétique liée à l'usage de la climatisation. Il s'agit d'évaluer les effets des plantes sur l'enveloppe du bâtiment en développant un modèle mathématique qui pourrait être utilisé dans la conception future d'enveloppes de bâtiment intégrant des murs verts. Ce modèle basé sur le transfert de chaleur à l'échelle de la composante végétale vise à la compréhension des interactions entre la végétation et l'enveloppe architecturale, un sujet qui avait été insuffisamment abordé dans la littérature en Algérie, d'où l'intérêt de cette recherche.

Méthodologie et outils de recherche

Afin de répondre à ces objectifs, l'étude s'attèlera à confirmer ou à infirmer ces hypothèses à travers l'adoption d'une approche méthodologique reposant sur une modélisation numérique et une investigation expérimentale.

La modélisation numérique consiste à établir un modèle mathématique basé sur des bilans énergétiques établis pour les différentes couches de la paroi végétale et a la particularité de reproduire l'effet tampon fourni par la cavité d'air et tout le processus thermique y afférent. Ce modèle est implémenté dans le logiciel TRNSYS qui constitue aujourd'hui un outil de référence au niveau mondial dans le domaine de la simulation dynamique de bâtiments et de systèmes.

Afin de mener à bien les différentes simulations, et vérifier la fiabilité du modèle développé, nous avons procédé à sa validation par la confrontation aux mesures expérimentales effectuées dans un bâtiment réel situé à Constantine. Cette étude est basée

sur une série de relevés de plusieurs grandeurs physiques tels que : la température de l'air, les températures de surface et l'humidité de l'air.

L'analyse de sensibilité permettra également d'identifier les paramètres les plus déterminants dans le comportement thermique de la façade végétalisée. Plusieurs paramètres ont été analysés tels que l'indice de surface foliaire, le taux de couverture, la transmissivité du feuillage et l'épaisseur de la cavité de l'air pour déterminer.

Ce manuscrit s'organise en deux parties principales scindées en cinq chapitres:

Une première partie théorique s'appuie sur un ensemble de connaissances fondamentales relatives à la végétalisation de l'enveloppe et se concentre sur ce qui a déjà été fait dans ce domaine.

Le premier chapitre porte particulièrement sur les concepts liés au mur végétal et son intégration en milieu urbain. Elle constitue une présentation de l'ensemble des typologies des parois végétales ainsi que leur histoire, définition, mode de fonctionnement... etc. Cette étude bibliographique a permis dans une première partie de ce travail de comprendre les principes et les origines des enveloppes végétales.

Le deuxième chapitre présente une revue de la littérature scientifique sur les effets thermiques et énergétiques des murs verts sur les bâtiments. La première partie est dédiée à une analyse synthétique des études expérimentales antérieures menées à travers le monde portant sur les impacts thermiques des façades végétales.

La deuxième partie de ce chapitre a pour objectif d'appréhender les démarches et méthodologies dans le domaine de la modélisation des murs végétalisés pour pouvoir établir un modèle adapté au contexte de cette étude. D'ailleurs, certaines lacunes de recherche identifiées sont mises en évidence.

La lecture de nouvelles références bibliographiques a également permis d'approfondir les connaissances et de se situer par rapport à l'avancement scientifique dans ce domaine. Cette lecture a bien évidemment servi pour l'interprétation des résultats.

Pour la partie analytique de ce travail, elle consiste en l'évaluation des performances thermiques et énergétiques des façades végétales à travers une approche expérimentale et numérique ce qui fera l'objet du troisième, quatrième et cinquième chapitre.

Le troisième chapitre expose la description du modèle mathématique de la paroi végétalisée développée, précédée par la présentation des phénomènes physiques à l'échelle de la façade végétale. Cette partie a fourni des informations et des détails nécessaires à l'élaboration et à la validation du modèle et a permis de comprendre le fonctionnement des plantes et leurs mécanismes de réponse et de régulation.

Le quatrième chapitre portera sur la validation du modèle. Il a pour objectif d'évaluer la fiabilité du modèle développé et sa comparaison avec des mesures in-situ. Cette validation est précédée par la description de l'étude expérimentale où le protocole de mesure et les résultats de la campagne de mesure sont exposés. Au sein de la même partie, une étude de sensibilité est réalisée pour identifier les facteurs clés qui affectent le comportement thermique des façades végétales.

Le cinquième chapitre sera consacré à la simulation en vue d'une optimisation des systèmes de façades végétalisées. Les résultats sont discutés selon les hypothèses émises.

La dernière partie présente la conclusion de la thèse avec un regard sur les recommandations. La limitation et les perspectives de recherches sont également abordées dans cette partie.

CHAPITRE -I-

LA VEGETALISATION DES ENVELOPPES : LES FAÇADES VEGETALES

Introduction

Au cours des dernières années, beaucoup de recherches portant sur les avantages liés à l'utilisation des parois végétales ont été effectuées et de nombreux spécialistes de différentes appartenances disciplinaires (architectes, urbanistes, paysagistes, botanistes) s'y sont intéressés.

L'intégration du végétal dans l'enveloppe du bâtiment demeure une solution pertinente pour la résolution de plusieurs problèmes environnementaux liés aux bâtiments et à l'environnement urbain. Au-delà du fait d'allier l'urbanisation et la nature, cette technique présente des avantages psychologiques et esthétiques pour les individus, participe à l'amélioration du cadre de vie et favorise la biodiversité. La végétalisation de l'enveloppe du bâtiment peut également devenir un élément de paroi à part entière.

Ce chapitre expose dans un premier temps un aperçu général sur les formes végétales en milieu urbain en mettant l'accent sur les enveloppes végétales particulièrement la végétalisation verticale et ses typologies. Il a pour objectif de fournir une analyse documentaire sur les différents dispositifs de murs verts et leur mise en œuvre. En outre, il s'agit d'établir une synthèse de l'évolution de la notion de végétalisation verticale en ville. Un historique retracera d'ailleurs l'origine des premières formes de murs végétalisés et leur développement afin de mieux cerner toute la pertinence de leur implantation et leur application en milieu urbain.

1. Formes végétales en milieu urbain

La variété des solutions végétales pour le milieu urbain est très vaste. En effet, la végétation en milieu urbain revêt différentes formes et les typologies les plus fréquemment rencontrées sont les suivantes : arbres d'alignement, bois, parcs, squares, terrain de jeux et de sport, friches, surfaces enherbées, jardins familiaux, et plus récemment les enveloppes végétales des bâtiments (telles que les toitures et les façades végétalisées) (Figure I.1).



Figure I. 1 : Formes végétales en milieu urbain

2. L'enveloppe végétale

Le végétal est considéré comme le nouveau matériau de l'architecture (Duréault, 2013). A l'échelle du bâtiment, l'intégration du végétal peut être utilisée sur plusieurs parois tels que les toits, les façades, les terrasses et l'utilisation de plantes d'intérieur dans les atriums, comme le montre la figure I.2.

Paris (2012) définit l'enveloppe végétale comme étant un élément vertical (façade ou mur) ou horizontal (toit) constitué de *végétaux vivants* et éventuellement d'un *substrat de croissance*, d'un *système d'irrigation* et d'un *support* servant d'appui à la végétation. Lorsque la pente est inférieure à 35%, on parle de toiture végétalisée et lorsque la pente est supérieure à 35%, il s'agit d'un mur végétalisé. Nous nous intéressons dans cette recherche à la végétalisation verticale.

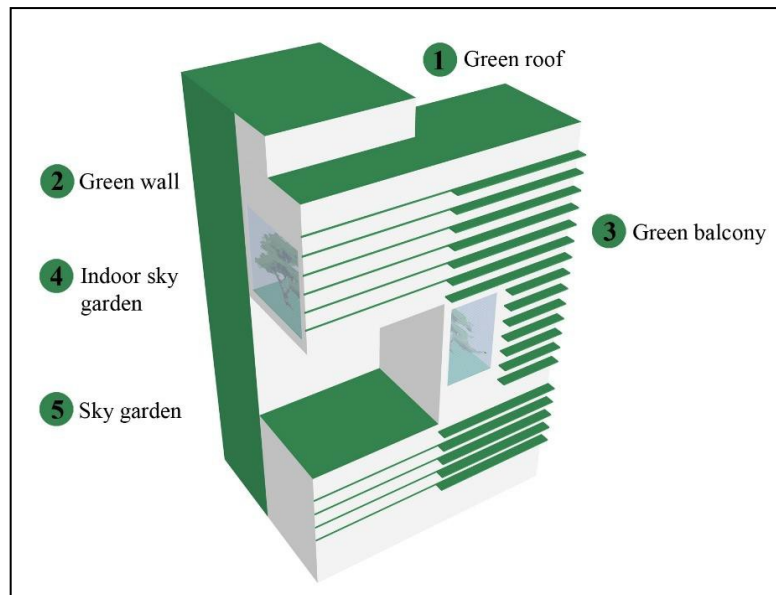


Figure I. 2 : Enveloppes végétales

(Raji, et al., 2015)

3. La végétalisation verticale

Le terme de végétalisation verticale regroupe plusieurs formes de dispositifs qui du point de vue composition, n'ont pas les mêmes effets sur le bâtiment et l'environnement extérieur (De Munck, 2013). En effet, plusieurs appellations ont été utilisées dans la littérature, tels que BIO-SHADER (Lam, et al., 2005), MUR VIVANT, FAÇADE VERTE (Köhler, 2008), VERDISSAGE VERTICAL (Chiang & Tan, 2009), MUR VERT (Alexandri & Jones, 2008), JARDIN VERTICAL (Blanc, 2008) et BIOFACADE (Rahman, et al., 2011) (Sunakorn & Yimprayoon, 2011). Chaque terme correspond à un système bien précis et chacun clairement distingué, avec des systèmes de construction différents.

Cependant, on retient qu'un mur vert, aussi communément appelé jardin vertical, est un terme descriptif qui est utilisé pour faire référence à toutes les formes de surfaces

végétalisées verticales. Par conséquent, une classification est plus que nécessaire pour clarifier les différents concepts et pouvoir étudier individuellement leur pertinence en tant que systèmes de rafraîchissement passif des bâtiments.

4. Historique et évolution de la végétalisation verticale

La place de la végétation en milieu urbain a évolué au fil du temps et de nouvelles formes de végétalisation se développent. Il est à rappeler que « Enveloppe végétale » est le terme commun utilisé pour désigner toutes les formes de surfaces végétales intégrées au bâti.

4.1. Le mur vert en tant que matériau

Bien que les enveloppes végétales connaissent actuellement un certain regain d'intérêt, ils ne sont pas nouveaux. En effet, l'élément végétal fut utilisé dans la construction depuis des temps très anciens. Il correspond au premier matériau de construction de l'homme pour construire la cabane primitive (Figure I.3).



Figure I. 3 : La cabane primitive.

(Viollet-le-Duc, 1875)

4.2. Le mur vert comme élément d'agrément

Depuis la plus haute Antiquité, les hommes ont fait pousser des plantes auto-grimpantes sur les murs et les façades de leur maison. Les jardins suspendus et légendaires de Babylone, construits vers 600 (VIe) av J.-C, par le roi Nabuchodonosor II, nous renseigne quant à eux, sur la façon dont l'homme s'intéressait à la végétation. En effet, ces jardins abritaient une végétation variée plantés essentiellement d'arbres exotiques,

d'arbustes et de plantes de Mésopotamie (tulipes, lis, iris et roses) (Figure I.4). Duréault (2013) précise que les murs du Ziggourat de Nanna, construits autour de 2100 avant J-C, étaient également couverts d'arbres et de buissons.

Les jardins verticaux et horizontaux étaient également connus dans l'Empire romain. A Pompéi, les marchands cultivaient la vigne sur leurs balcons et les sommets des mausolées étaient plantés d'arbres. En Scandinavie, les Vikings (1000 après J-C) recouvraient aussi leurs maisons de tourbe (Bass, et al., 2001) (Peck, et al., 1999). Il est à noter que la végétalisation à cette époque répondait surtout à des soucis d'ordre esthétique (Heyraud, et al., 2009).



Figure I. 4 : Les jardins de Babylone

<https://www.echologia.com/>

4.3. Le mur vert scénique

Le mur végétal continue bien à exister au moyen-âge et à la renaissance (14-16^{ème} siècle), dont témoignent des gravures et dessins de l'époque. Bien que l'on ne connaisse pas précisément les techniques employées (probablement des plantes grimpantes), le mur végétal est surtout un élément de décor scénique, une curiosité et une attraction pour des fêtes ou pour amuser la cour (Figure I.5). Cette notion de jardins verticaux qui souligne l'aspect décoratif et évènementiel perdure encore aujourd'hui.



Emilie dans son jardin- Bértélemy d'Eyck Filippo Gagliardi Giovanni Battista Ferrari

Figure I. 5 : Scènes de murs végétalisés

<http://www.encyclopedie-universelle.net/abbaye-jardins-hortus-conclusus3a.html>. 1st-Art-Gallery.com

D'autres exemples de jardins verticaux suspendus ont été utilisés dans le Mexique précolombien, en Inde et dans les maisons espagnoles du Mexique des XVI^e et XVII^e siècles. De même en Russie, dans certains pays qui faisaient autrefois partie de l'union soviétique et en France (Bass & Baskaran, 2001) (Duréault, 2013).

Depuis les XVII^e et XVIII^e siècles, principalement en Grande-Bretagne et en Europe centrale, l'utilisation de plantes grimpantes pour couvrir les murs du bâtiment a proliféré (Newton, et al., 2007). Au 19^e siècle, les grimpeurs ligneux étaient fréquemment utilisés comme éléments ornementaux de l'enveloppe des bâtiments dans les villes européennes et nord-américaines (Dunnet & Kingsbury, 2008).

A la fin du 19^{ème} siècle, Ebenezer Howard a été une source d'inspiration pour beaucoup de personnes avec son concept de cité jardin et a marqué la reproduction de la nature en ville au Royaume Uni. Ainsi, le mouvement Jugendstil allemand (Art Nouveau) du début du 20^{ème} siècle a encouragé l'intégration de la maison dans un paysage végétalisé.

4.4. Le mur végétal du XX^{ème} siècle né de l'observation des falaises végétales

Au XX^{ème} siècle, certains architectes modernes comme Le Corbusier, Frank Lloyd Wright et Roberto Burle Marx incorporent des jardins, notamment sur les toits, dans leur design malgré le rejet de l'habillage de la forme typique de l'époque. D'ailleurs, dans les années 50, les premiers murs végétaux modernes et innovants ont été réalisés par l'architecte paysagiste Roberto Burle-Marx à Sao Paulo (Figure I.6). Il va même jusqu'à habiller des immeubles et des villas de luxe de plantes indigènes (orchidées, broméliacées,

etc.) qui possèdent des qualités esthétiques. Leurs succès donneront des idées ensuite un peu partout dans le monde. En 1930, le même architecte en collaboration avec Lucio Costa et Le Corbusier ont conçu un mur végétal pour le ministère de la santé et de l'éducation à Rio de Janeiro où les jardins n'avaient pas accès au sol naturel (Ottelé, 2011).



Figure I. 6 : Mur végétal moderne à Sao Paulo – Roberto Burle-Marx

<https://www.pinterest.fr/pin/241153755019736664/?lp=true>.

Au début des années soixante-dix, un nouveau mouvement appelé «architecture verte» a été développé, qui imitait les idées de Frank Lloyd Wright et contrastait avec les développements modernes de cette époque. L'intérêt de ce mouvement était de mettre l'accent sur les aspects écologiques dans les villes (Lambertini, 2007). Il est à préciser que les premières recherches portant sur les façades vertes se sont concentrés particulièrement sur des aspects botaniques.

Cependant, depuis les années 1980, une nouvelle idée des façades vertes s'est produite comme contributeurs à l'écologie urbaine. C'est à Vienne, avec les réalisations de l'architecte peintre Friedensreich Hundertwasser que la végétalisation du bâtiment s'est vulgarisée. Il a pu assurer une intégration symbiotique de la vie végétale et de la construction à travers ses façades, dont témoigne la maison Hundertwasser (Figure I.7). La végétalisation du bâtiment représente pour lui la réconciliation de l'art, de la technologie et de la nature.

A la même époque, la végétalisation du bâtiment s'est notamment popularisée en Europe et plusieurs programmes incitatifs pour l'installation de façades vertes ont émergé. En fait, Berlin en est un exemple important, où environ 245.584 m² de façades vertes ont été installés de 1983 à 1997 (Kohler, 2008).



Figure I. 7 : La maison Hundertwasser à Vienne

<https://maison-monde.com/hundertwasserhaus-a-vienne/>

4.5. Le mur vert comme image

Dans la logique des murs scéniques, les murs végétaux ont connu un véritable engouement à la fin du XXe siècle avec la prise de conscience écologique marquée par différents événements. Cette époque fut un tournant en matière d'amélioration des technologies pour les murs végétaux. La végétalisation des façades autrefois ornementale, s'est transformée en une composante architecturale à part entière qui peut offrir de multiples avantages d'ordre esthétique, thermique, écologique et environnemental.

Ces murs considérés comme des éléments urbains, présentent avant tout une démarche artistique intégrée en tant qu'élément d'architecture (Prazeres, 2015). Duréault (2013) les décrits comme étant le reflet d'une image de marque.

D'ailleurs, plusieurs villes européennes l'ont adopté. En France par exemple, de grandes commandes sur des projets très médiatisés se font : le musée du quai Branly à Paris, les halles du centre ville d'Avignon etc... (Figure I.8). Cette méthode a été modernisée par le botaniste Patrick Blanc qui a permis de développer des jardins verticaux sans terre, en plaçant les racines dans une doublure géotextile offrant des compositions de textures et de couleurs très agréables.

Il a mis au point cette nouvelle technique de culture en s'inspirant des plantes épiphytes qui poussent dans les forêts tropicales. Ces plantes se nourrissent de feuilles mortes ou de mousses ou d'algues sans avoir besoin de lumière pour leur croissance en hauteur (Lambertini, 2007).



Figure I. 8 : Mur végétal du musée du Quai Branly (à gauche), les Halles d'Avignon (à droite) (Patrick Blanc)

https://fr.wikipedia.org/wiki/Mur_v%C3%A9g%C3%A9talis%C3%A9

4.6. L'émergence des murs vivants actifs

Depuis quelques années, les jardins verticaux semblent substituer au manque d'espaces verts dans les zones urbaines. Le mur végétal n'est plus seulement perçu comme une amélioration d'image, mais aussi comme un moyen efficace pour réduire la pollution urbaine et pour améliorer l'ambiance thermique d'un lieu (Figure I.9). Les fonctions de rééquilibrage de la biodiversité et d'amélioration des essences sont également prises en compte. Ainsi, plusieurs projets dans le monde sont des témoins d'un réel engouement pour l'association du végétal à l'architecture contemporaine.



Figure I. 9 : Murs dépolluants à la gare de Perrache à Lyon (à gauche) et à l'entrée de Villeurbanne (à droite)

<https://arrosagegoutteagoutte.wordpress.com/category/murs-vegetal/>

En plus de ces murs de plus en plus utiles, pensés dans une globalité par des architectes et des paysagistes, les murs végétaux sont également en passe de devenir des lieux de production de nourriture dont témoignent les projets futuristes de Vincent Callebaut (Figure I.10). Les besoins de nourrir la population, associé au développement urbain font que l'agriculture urbaine qui a déjà conquis les toits terrasses, s'intéresse de plus en plus aux espaces verticaux.



Figure I. 10 : Projets de Callebaut Vincent

<https://vincent.callebaut.org/category/projects/>

5. Typologies de murs verts

Compte tenu du fait que la présente recherche analyse l'incidence des façades vertes sur la performance thermique et énergétique du bâtiment, il est utile de décrire cette technique et de clarifier la mise en œuvre de certains murs verts typiques. En effet, il existe plusieurs formes de murs verts, on en retiendra les plus importantes:

Heyraud (2009) ont établi une simple classification des techniques de végétalisation de l'enveloppe du bâtiment en deux grandes typologies :

- **La végétalisation "directe"**, ne nécessitant aucun support supplémentaire de type câblages ou palissage. Elle se fait soit par la mise en place de plantes grimpantes au pied d'un mur/d'une façade s'accrochant seules à la paroi avec leurs crampons, soit par la plantation directe de plantes non grimpantes;
- **La végétalisation "indirecte"** : les plantes volubiles et à palisser s'aideront de support pour se développer au pied du mur ou de la façade (Figure I.11).

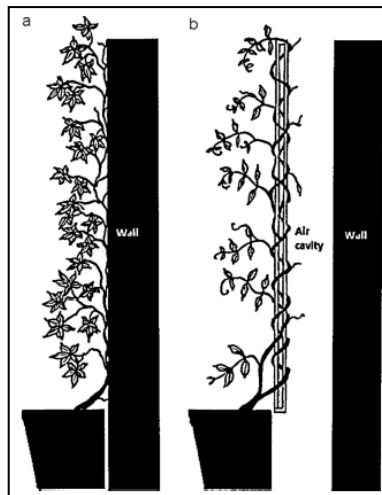


Figure I. 11 : La végétalisation "directe "a" et indirecte "b"

(Hunter, et al., 2014)

Une classification plus détaillée en fonction du rôle thermique des éléments de végétation a été proposée par (Malys, 2009), il est possible d'en distinguer 3 :

- Celle des *revêtements de façade* (Figure I.12.a),
- Celle des *brises-soleil* (Figure I.12.b),
- Et celle des *éléments de paroi* (Figure I.12.c) (qui ressemblent aux dispositifs mis en œuvre pour les toitures végétalisées extensives).

La différence entre les deux premières familles de façades végétalisées réside principalement dans la couche d'air formée entre la végétation et le mur. Dans le cas du brise soleil, le support de la façade végétale est écarté des murs.

Pour les éléments de paroi, une couche verticale de sol artificiel avec un support de culture pour la végétation s'ajoute aux propriétés thermiques du dispositif. Elle a un effet important sur l'isolation et le stockage thermique du dispositif. Il s'agit ici d'une technique de culture hors sol.

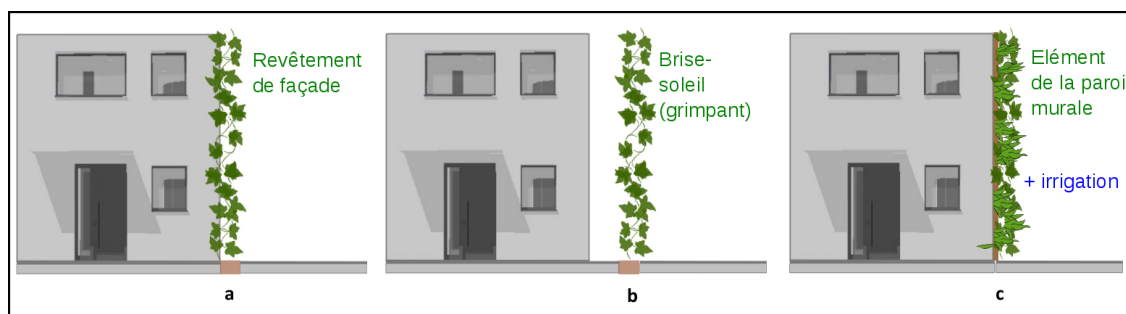





Figure I. 12 : Différents types de façades végétalisées

(Heyraud, et al., 2009)

De Munck (2013) précise que les trois types de façades végétalisées sus-cités n'ont pas les mêmes effets sur le bâtiment et l'environnement extérieur et ne se modélisent pas de la même façon. Leurs effets thermiques sont résumés dans le tableau I.1.

Tableau I. 1 : Le rôle thermique des murs végétaux

(Musy & Bozonnet, 2011)

Revêtement	Brise-soleil	Elément de paroi
		
<ul style="list-style-type: none"> - Protection des parois opaques en fonction de la densité foliaire - Pas d'inertie - Limitation des transferts convectifs - Evaporation du feuillage 	<ul style="list-style-type: none"> - Protection des ouvertures en fonction de la densité foliaire - Couche de protection par une cavité d'air - Evaporation du feuillage 	<ul style="list-style-type: none"> - Protection solaire complète des parois opaques - Résistance thermique dépendant et possibilité d'ajout d'isolation - Inertie - Limitation des transferts convectifs - Evaporation du feuillage et du substrat

S'inspirant de (Malys, 2009), (Pommier, et al., 2014) regroupent la végétation comme revêtement et brise soleil en un seul dispositif. Ce dernier concerne les systèmes de façades recouvertes de plantes grimpantes ou qui poussent sur un support proche de la paroi. Ces parois peuvent être constituées de plantes qui s'attachent directement à la paroi ou bien qui s'enroulent autour d'un treillage ou de câbles supports. Cette classification se fait sur la base des dispositifs d'implantation des végétaux et de la distance entre la végétation et la paroi du bâti (Figure I.13).

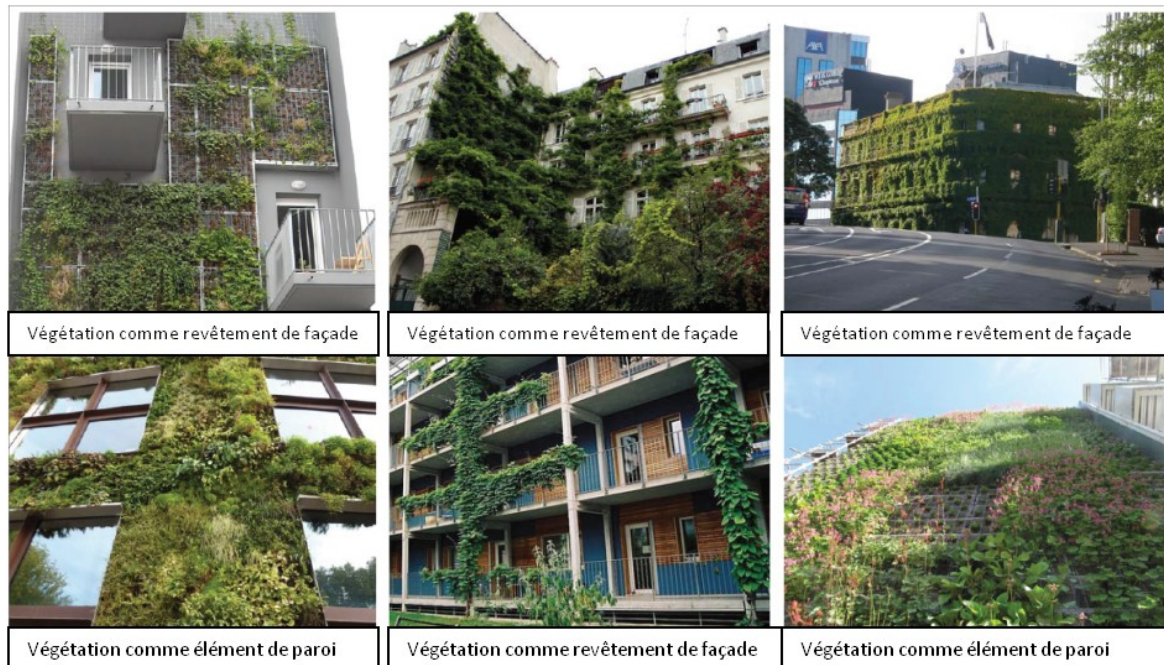


Figure I. 13 : Typologies de murs verts

(Pommier, et al., 2014)

Quant à (Ottelé, 2011), (Perez, 2014) et (Wong & Baldwin, 2016), ils classent les façades vertes en trois principales catégories (Figure I.14) en fonction des supports comme énumérées ci-dessous :

(A) Façades vertes traditionnelles : il s'agit des façades végétales les plus répandues dans lesquelles, les plantes grimpantes utilisent les matériaux de façade comme support et s'attachent directement au mur du bâtiment. Les plantes sont principalement enracinées dans des bacs ou des planteurs.

(B) les façades vertes double peau (rideau vert) : sont des systèmes comprenant une structure de support permettant aux plantes grimpantes de pousser verticalement, créant ainsi une couche d'air isolante entre le feuillage et le mur du bâtiment. Ce type peut être adapté pour les bâtiments de grande hauteur.

(C) les façades à pots de fleurs (mur de jardinières) sont des façades vertes où des arbustes suspendus sont cultivés autour du bâtiment. Il s'agit de pots traditionnels remplis de substrats traditionnels où les plantes y poussent et fixés à une structure métallique elle-même ancrée dans le mur porteur.

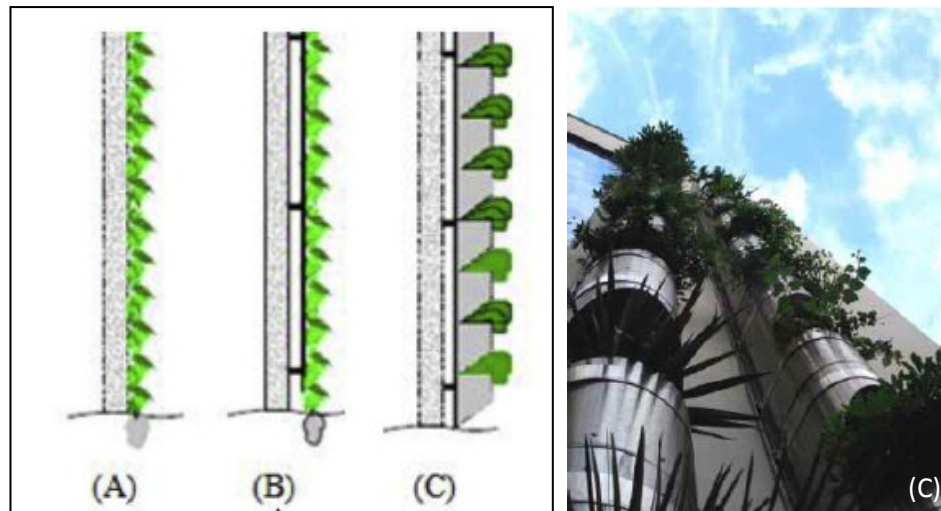


Figure I. 14 : Les différents types de murs végétaux

(Ottelé, 2011)

(Kontoleon & Eumorfopoulou, 2010), (Perez et al 2011) et (Manso & Castro-Gomes, 2015) ont proposé une classification des systèmes de murs verts en deux catégories principales réparties en façades vertes ou végétales et murs vivants et on en retiendra celle là (Figure I.15). Ces typologies de murs végétaux sont illustrées par la figure I.18 et décrites ci-dessous.



Figure I. 15 : Façade végétale directe (a), Façade végétale indirecte (b), mur vivant(c) et mur vivant modulaire (d)

(Manso & Castro-Gomes, 2015)

5.1. Les façades végétales

Les façades vertes sont un type de murs verts dans lesquels les plantes grimpantes ou suspendues sont développées parallèlement au mur de manière dirigée, pour couvrir la zone souhaitée. Elles peuvent être classées comme directes ou indirectes.

5.1.1. Les façades végétales directes sont celles dans lesquelles les plantes grimpantes (feuilles persistantes ou caduques) poussent à même la façade. Il s'agit du système le plus simple et le plus archaïque qui permet de coloniser toute la façade.

5.1.2. Les façades végétales indirectes comprennent une structure de support fixée au mur afin de diriger la végétation et couvrir la zone souhaitée. Ainsi, les plantes peuvent être enracinées à la base de ces structures, dans le sol, dans des planteurs intermédiaires ou même sur les toits. Ce système fournit un espace d'air entre la façade et la couche verte.

5.2. Les murs vivants

Les murs vivants sont constitués de panneaux modulaires généralement pré-cultivés et/ou de systèmes de tissus intégrés utilisant le feutre géotextile ou les mousses comme support pour les plantes (Pulesell & al, 2014) (Haggag et al, 2014).

(Safikhani & al, 2014) soulignent que l'emplacement des milieux de culture joue un rôle important dans ce type de classification (Figure I.16).

5.2.1. Le système de feutre tissé

Il s'agit en fait d'une culture hydroponique dans laquelle le support de culture ou substrat est installé verticalement. Les plantes poussent dans un tissu végétal, sur laine minérale ou organique (tourbe, mousse végétale et fibre de coco) contenant une solution nutritive. Ce tissu est maintenu verticalement par une armature métallique fixée au mur porteur.

5.2.2. Le système de panneaux

Ce système est composé de panneaux perforés (en plastique, métal, béton, etc) qui sont fixés directement à un mur ou à un cadre, permettant de retenir le substrat de croissance et les plantes (Yuksel & Nil Turkeri, 2017). Chaque panneau contient son propre milieu de culture (sol, feutre, perlite, etc.) et un système d'irrigation avec des solutions nutritives équilibrées nécessaires à la survie de la plante.

Il y a lieu de préciser que les deux systèmes ont également une couche imperméable pour éviter la pénétration de l'humidité et comprennent un grand nombre d'espèces végétales. Cependant, en raison de cette diversité végétale, les murs vivants nécessitent un entretien plus intensif que les façades vertes.



Figure I. 16 : Les systèmes feutre tissé et de panneaux

(Madre & Vergnes, 2018)

En outre, les systèmes verts verticaux peuvent également être différenciés en systèmes extensifs et intensifs comme les toitures végétalisées. (Perez et al, 2011) rappellent que les systèmes extensifs sont faciles à construire avec un entretien minimal tandis que les systèmes intensifs ont une implantation plus complexe et nécessitent un niveau élevé d'entretien ultérieur.

Une autre typologie de murs verts a été abordée par (Afrin, 2009), il s'agit des bio-murs ou murs biologiques (Figure I.17). Ce sont des systèmes verts d'intérieur qui sont utilisés principalement pour la filtration de l'air intérieur et l'amélioration des valeurs esthétiques de l'environnement intérieur en particulier dans les espaces de bureau. Ils peuvent purifier l'air passivement par convection naturelle ou en utilisant un ventilateur pour faciliter la circulation de l'air et améliorer son efficacité.

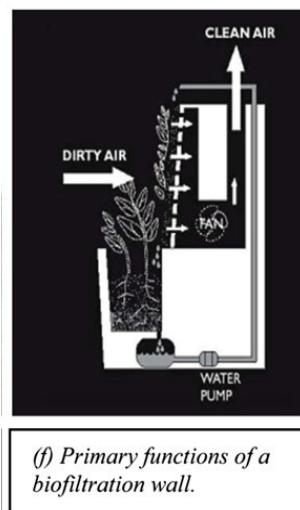


Figure I. 17 : Les systèmes de murs biologiques

(Kontoleon & Eumorfopoulou, 2010)

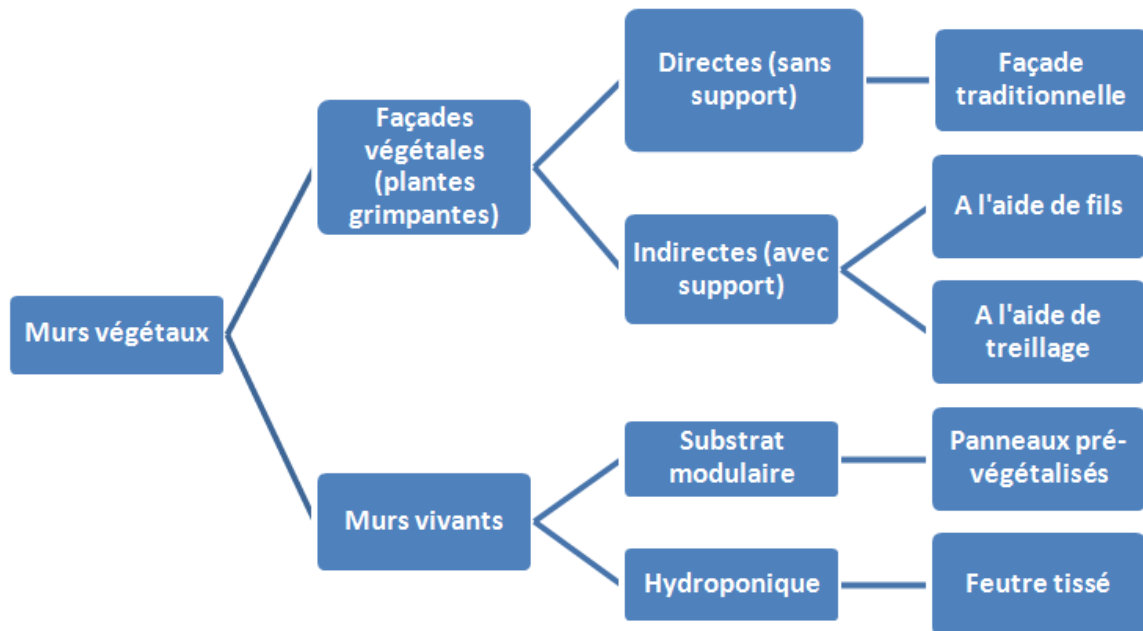


Figure I. 18 : Types de murs végétaux

Comparés aux autres typologies de murs verts, les façades vertes directes sont une solution plus durable et plus économique. Ce système reste le moyen le moins coûteux avec un faible impact sur l'environnement étant donné qu'il n'utilise pas de matériaux et nécessite peu d'entretien.

6. Choix des typologies végétales

Pour une performance optimale, (Wong, et al., 2010) rapportent qu'une sélection minutieuse des plantes adaptées aux conditions climatiques et aux types particuliers de murs verts est primordiale. À cet égard, les espèces végétales locales adaptées au climat local, sont généralement sélectionnées.

Ces espèces sont habituellement choisies en fonction de leur tolérance à l'égard des conditions environnementales propres au site, du système de croissance, de la texture, du taux de couverture et des systèmes racinaires. Elles varient également selon la rusticité et l'orientation (Afrin, 2009).

Hunter et al (2014) rappellent que dans les pays à hivers froids, le choix est porté sur des plantes grimpantes caduques, avec peu de branchage afin que les murs exposés au soleil puissent capter le maximum de rayonnement et réduire l'ombrage pendant les autres

saisons, lorsque le gain solaire est souhaité. Cela permet d'offrir une ambiance végétale attrayante par le changement de couleurs et de textures (Figure I.19).

Par ailleurs, le choix de la plante aura également une incidence sur la conception du système de support. Par exemple, une plante à croissance plus dense et plus rapide aura besoin d'un plus grand espace entre les supports que les espèces moins agressives, ce qui permet de réduire les intervalles entre les supports. La densité de la végétation aura d'autres implications pour la structure sous-jacente. Plus la surface foliaire est grande, plus la neige et la pluie auront d'impact sur le poids du système (Gonchar, 2007).



Figure I. 19 : ambiance végétale estivale et automnale de la vigne vierge vraie du bâtiment Consorcio à Santiago au Chili (Architecte : Enrique Brown)

(Dugué, 2013)

De plus, les plantes utilisées pour les murs extérieurs sont exposées à des conditions climatiques plus rudes que celles qui se trouvent à l'intérieur. Par conséquent, les espèces rustiques devraient être sélectionnées pour atteindre de grandes hauteurs. De même, les grimpants ayant une tolérance au vent, au gel et à la chaleur devraient être sélectionnés pour des projets dans des climats rudes. Selon (Knowles, 2005), les plantes grimpantes enracinées à la base d'une façade verte, peuvent prendre de 3 à 5 ans pour atteindre une couverture complète. Elles peuvent se distinguer en fonction de leurs modes d'attaches et de fixation (tableau I.2):

- Les plantes grimpantes utilisées pour **les façades végétales directes** sont autonomes et autoportantes, qui adhèrent à l'extérieur du bâtiment au moyen de racines adventives (ventouses adhésives) et crampons (par ex. Hedera helix) ou de vrilles (par ex. Parthenocissus quinquifolia).
- Pour **les façades végétales indirectes**, les lianes ou les plantes volubiles sont utilisées avec une structure portante pour faciliter leur implantation et guider leur trajectoire.
- Quand **aux murs vivants**, ils sont composés d'une variété de plantes en panneaux pré-végétalisés cultivés dans des serres et assemblés quatre à six mois plus tard sur un cadre fixé à un support (Afrin, 2009). Ces panneaux soutiennent des fougères, de petits arbustes, des fleurs vivaces et même des plantes comestibles.

Tableau I. 2 : Types de plantes grimpantes

(Neuchâtel, 2009)

Typologie de plantes grimpantes	Variétés	Caractéristiques
Les Crampons	(lierre, hortensia grim pant)	racines aériennes qui apparaissent le long des tiges
Les plantes volubiles	(glycine, chèvrefeuille, jasmin)	tiges qui décrivent des spirales pour s'enrouler autour d'un support
Les ventouses	(vrilles adhésives : vigne vierge)	tiges sur lesquelles se développent des ramilles au bout desquelles se trouvent des ventouses
Les vrilles	(clématite, vigne, passiflore)	organes de fixation qui se développent indépendamment des feuilles le long des tiges
Aucun système particulier	(rosier, jasmin d'hiver, plumbago)	

7. Types de supports pour les façades végétales

Duréault (2003) souligne que le rôle du support n'est pas seulement pour faire pousser de la végétation, mais plutôt pour créer un jardin tout entier. Ce support autrefois naturel (saule, osier) devient rapidement artificiel, ce qui permettra de créer des formes de plus en plus originales.

Dernièrement, les innovations technologiques ont entraîné le développement de nouveaux treillis, panneaux rigides et des systèmes de câbles pour soutenir les plantes grimpantes, tout en les gardant loin des murs et autres surfaces de construction.

Selon (Afrin, 2009), il existe deux principaux types de supports : les treillis modulaires et les câbles.

(a) Les systèmes de treillis modulaires (Figure I.20.b) sont des modules de treillis métalliques légers et rigides montés sur le mur de bâtiment ou sur des structures indépendantes, qui constituent un support pour les plantes grimpantes et guident leur trajectoire. Ce système est destiné à recevoir les matières végétales de telle sorte qu'elles ne s'attachent pas à l'enveloppe du bâtiment pour former une façade végétale. Cette armature peut exister en bois, avec une durée de vie d'environ 25 ans, ou alors en métal, avec une durée de vie plus longue, mais qui capte plus facilement la chaleur et dessèche les végétaux.

Ces modules peuvent également être utilisés sur les bâtiments de grande hauteur en combinaison avec des jardinières intermédiaires ou sur les toits. Ces jardinières sont nécessaires lorsque la croissance des plantes grimpantes est physiquement restreinte.

(b) Les systèmes de câbles et de fils de fer utilisent un système de câbles en acier, ancrages, séparateurs, et d'autres éléments supplémentaires qui constituent une structure à maille légère servant de support pour les plantes grimpantes. Ils utilisent soit des câbles d'acier à haute résistance et/ou un treillis métallique (Figure I.20.c). Les câbles sont utilisés sur les façades vertes qui sont conçus pour soutenir les plantes grimpantes à croissance rapide avec un feuillage dense.

D'autre part, les fils de fer sont souvent utilisés pour soutenir les plantes à croissance plus lente qui nécessitent l'ajout du support à mailles plus rapprochées (Kontoleon & Eumorfopoulou, 2010). Les structures filaires forment un système de treillis souple et flexible de dimensions et de motifs variés.

Pour couvrir de grandes surfaces, les filets en acier inoxydable peuvent être montés sur des cadres flexibles ou rigides.

Dans le cas des façades vertes double peau, les systèmes utilisés sont les treillis modulaires, fil de fer ou des structures de maillage en acier inoxydable/ PEHD pour faciliter la croissance vers le haut d'une plus grande variété de plantes grimpantes (Hunter, et al., 2014).

Pour le cas des murs vivants, les panneaux et les feutres géotextiles apportent un support à la végétation formée par le rembourrage de plantes. Ces panneaux sont de différentes tailles, avec des trous dans lesquels le substrat et les plantes sont fixés au mur (Kontoleon & Eumorfopoulou, 2010). Ils peuvent être réalisés de différents types de matériaux et supportent une grande variété d'espèces végétales.

Ces murs vivants requièrent l'installation d'une structure métallique, d'une membrane imperméable de PVC expansé et d'une nappe d'irrigation :

- **Le cadre métallique** : est chevillé au mur ou fixé à l'aide de rails en laissant un vide de quelques centimètres. Ce vide assure l'isolation contre le froid et la chaleur et protège la façade des intempéries.
- **La couche de PVC expansé de 10 mm d'épaisseur** : assure l'étanchéité, la rigidité et l'homogénéité de la surface à végétaliser.
- **La nappe d'irrigation** : pour imbiber le tissu. Elle est faite de deux feutres en polyamide qui peuvent absorber, faire circuler par capillarité et retenir une certaine quantité d'eau. La couche externe de géotextiles est percée pour former des «poches» qui contiennent des plants de végétaux. La face exposée de la couche externe est recouverte spontanément de mousses et d'une microflore qui aident à garder l'humidité. Ce système est alimenté par une pompe électrique qui fonctionne par intermittence où les quantités d'eau sont régulées par un programmeur. L'arrosage peut ainsi se faire de façon manuelle.



Figure I. 20 : Supports de façades vertes.

(Kontoleon & Eumorfopoulou, 2010)

8. Impacts de la végétalisation verticale des enveloppes:

Au-delà des propriétés thermiques et de gestion de l'énergie, beaucoup de chercheurs ont souligné les nombreux impacts des murs végétalisés tels que l'absorption de la poussière et des particules, la réduction du bruit, la gestion des eaux de pluie et l'amélioration de l'environnement visuel.

8.1. Impact esthétique et psychologique

La végétation a toujours suscité chez l'homme un sentiment de rapprochement avec la nature et une sorte d'émerveillement et de sublimation poussant les architectes à concevoir des enveloppes vivantes. Il est démontré que la simple vue sur un paysage verdoyant procure chez l'individu, une sensation de détente et de bien être, évacuant par la même le stress et favorisant la décontraction et la contemplation.

Des théories dites évolutionnistes rapportent que la propension des humains pour une adaptabilité à l'environnement naturel contraste fortement avec les artifices urbains dont ils se sont entourés générant un impact agréable et réconfortant sur les habitants.

L'enveloppe végétale du bâtiment permet en outre de dissimuler des murs hideux disgracieux et corriger des vues déplaisantes améliorant ainsi la qualité visuelle et spatiale des paysages urbains.

8.2. Impact social

Nul doute que l'impact social du végétal est tangible. Les murs verts donnant sur l'espace public contribuent positivement à la qualité du cadre de vie. Leurs différentes configurations suscitent souvent l'attrait des personnes et favorisent des contacts entre eux voire même des affinités. Il n'est pas rare que l'observation d'un végétal, l'admiration qu'il inspire et les questionnements sur sa culture qu'il appelle incitent au regroupement des personnes et à l'échange mêlant, à la fois, initiés et néophytes, créant une ambiance de convivialité et de sérénité et un moment d'extase pour certains et de curiosité pour d'autres.

8.3. Impact sur la qualité de l'air et la séquestration des polluants

Outre leur valeur esthétique, les murs végétalisés ont le potentiel de diminuer les problèmes liés à la qualité de l'air en réduisant les gaz à effet de serre (Marchi, et al., 2015), mais aussi ceux liés à la qualité de l'eau (Bass et Baskaran, 2001). Ils améliorent la qualité de l'air par la transformation du CO₂ en oxygène (photosynthèse) et la fixation et la filtration des particules fines en suspension dans leurs tissus. 1 m² de lierre est capable de retenir les particules de diamètre < à 2.5 et 1 µ avec un rendement de 2.9.10¹⁰ particules/m² de lierre (Bernier, 2011).

D'après (Labouze, 1993), le lierre et la Sanseveria absorbent le benzène (10µg/cm² de feuille), ainsi que la formaldéhyde (2 à 3 µg/cm² de feuille).

Par ailleurs, les murs végétalisés peuvent contribuer à diminuer les problèmes de santé de type respiratoire mais également à augmenter la durée de vie des façades des bâtiments en luttant contre la corrosion due à la pollution. Ils peuvent même être exploités pour les pratiques agricoles urbaines (Sternberg et al., 2011) (Kenai, 2016).

8.4. Impact pour la biodiversité

Les murs végétalisés offrent également d'autres avantages intéressants en milieu urbain en créant des corridors écologiques. Ils contribuent à la réintroduction de la nature

en ville assurant l'équilibre écologique et le bien-être des habitants et constituent par conséquent, des espaces d'accueil pour la biodiversité.

Abris, nichoirs et ruches peuvent être déposés sur les façades où une variété de faune peut y trouver refuge. Les plantes grimpantes semblent favoriser la présence des coléoptères (Coccinelles, Scarabées, etc.) (Clergeau, et al., 2018) (Madre & Vergnes, 2018).

8.5. Impact acoustique

Plusieurs études ont démontré la contribution des murs végétalisés dans la réduction des nuisances sonores en ville. D'une manière générale, le mur végétalisé permet de réduire le bruit de 10 dB grâce à son pouvoir d'absorption et de diffusion (Wong, et al., 2010).

Une autre étude fait état d'une atténuation du bruit ambiant pouvant atteindre jusqu'à 20 dB selon la nature et la disposition de la végétation. L'accent étant mis sur le rôle essentiel joué par le feuillage et la composition du substrat dans l'absorption acoustique de parois végétalisées. Ce pouvoir isolant des plantes dépend notamment de l'épaisseur du feuillage et de la densité foliaire. Plus, ces paramètres augmentent, plus importante sera l'absorption acoustique par les végétaux (Attal, et al., 2016) (Kenai, 2016). 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 les bâtiments à proximité d'activités bruyantes.

8.6. Impact économique

L'aspect d'économie d'énergie des murs végétalisés pourrait être très bénéfique lorsqu'une baisse de demande de refroidissement et de chauffage requise pour le bâtiment est enregistrée. Un mur vert peut réduire de 25 % la demande de chauffage (Peck, et al., 1999) et jusqu'à 70% la charge de climatisation (Wong, et al., 2009) (Basdogan & Çiğ, 2016).

8.7. Impact thermique

L'effet d'îlot de chaleur urbain induit des températures plus élevées dans les zones urbaines par rapport aux zones rurales. Ce phénomène contribue à l'augmentation du stress

thermique des citadins et à l'augmentation de la consommation d'énergie pour la climatisation en été.

La végétation urbaine, en particulier les arbres et les surfaces à haute réflectivité, a été adoptée comme stratégie contre l'ICU (Akbari, et al., 2001). Dans les zones urbaines compactes, le manque d'espace au niveau du sol pour la végétalisation limite ses avantages en matière de refroidissement. D'autre part, les toits verts et les murs verts pourraient être considérés comme une forme d'écologisation intégrée aux bâtiments qui peut mobiliser cette ressource autrement inutilisée.

Les surfaces étendues des toits et des murs des bâtiments offrent un potentiel de rafraîchissement passif. Les bâtiments consomment une grande partie de l'énergie d'une ville et génèrent d'importantes quantités de chaleur. La végétalisation de l'enveloppe du bâtiment pourrait par conséquent contribuer à réduire le rayonnement intra-urbain et la chaleur causée par les surfaces du bâtiment atténuant ainsi les impacts environnementaux considérables des zones bâties (Lee & Jim, 2017).

Additionnellement à son action efficace sur le microclimat urbain, la façade végétalisée peut aussi agir sur les ambiances intérieures des bâtiments et devient par conséquent un composant bioclimatique de l'enveloppe à part entière. Cet effet sera traité en détail dans le prochain chapitre.

Les avantages et les inconvénients des différentes typologies de murs végétalisés sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau I. 3 : Avantages et inconvénients des murs végétalisés

Typologie de murs végétalisés	Avantages	Inconvénients
Façades végétales directes	<ul style="list-style-type: none"> - Les plantes grimpanes s'accrochent seules à la paroi et non pas besoin d'y être attachées. - L'isolation contre le froid en hiver et la chaleur en été; un effet coupe-son; la protection des structures contre les rayons UV qui accélèrent leur détérioration; - Elles ne sont pas limitées par la charge et les autres problèmes structurels - Elles sont peu coûteuses et ne nécessitent pas beaucoup d'expérience 	<ul style="list-style-type: none"> - Le choix réduit de plantes, la demande d'un certain contrôle autour des portes et fenêtres et la difficulté d'entretien du mur (pour la peinture ou la brique, par exemple) - Les plantes accélèrent la détérioration des matériaux de façade et rendent la maintenance plus difficile. - Les plantes grimpanes peuvent difficilement atteindre 25 m sans structure de soutien et cela prend beaucoup de temps.
Façades végétales indirectes	<ul style="list-style-type: none"> - Les avantages des plantes sur treillis sont les mêmes que pour les grimpanes, en plus d'un choix de plantes plus diversifié et d'un entretien du mur facilité. - Augmentation des propriétés d'isolation des murs verts en introduisant une couche d'air stagnante entre le mur et la couche verte. - Le support aide la plante à pousser plus vite. 	<ul style="list-style-type: none"> - La préparation du treillis nécessitant un certain temps et entraînant un coût parfois considérable; - le besoin d'entretien et de contrôle, car les plantes volubiles poussent très rapidement. - Ces plantes peuvent endommager les parois et/ou provoquer des difficultés pour l'entretien des bâtiments.
Murs vivants	<ul style="list-style-type: none"> - L'isolation du froid, de la chaleur et du son; - Le peu d'espace nécessaire; - Le potentiel dépolluant et de rétention d'eau. - La variété de plantes utilisables est très intéressante du point de vue esthétique. - La structure modulaire facilite le remplacement des plantes. - La culture de plantes nécessite moins de temps que les façades vertes et si une plante est endommagée, il est possible de changer seulement ce module au lieu de la façade entière. 	<ul style="list-style-type: none"> - Le besoin d'une pompe et de tuyauterie pour l'irrigation de la surface verticale, donc d'un entretien élevé. - Il s'agit d'un procédé très coûteux. - Les bâtiments végétalisés de cette façon sont plutôt institutionnels ou commerciaux, car le coût ainsi que l'entretien nécessaires sont trop importants pour les constructions privées. - Ces systèmes sont plus chers que les façades vertes.

Conclusion

La place de la végétation urbaine a évolué au cours des années et de nouvelles formes de végétalisation se développent parmi lesquelles les enveloppes végétales entre autres les murs verts. D'ailleurs, ce concept est ancien, avec des exemples dans l'histoire architecturale remontant à la période préhistorique et aux Babyloniens avec les célèbres jardins suspendus de Babylone. Tout au long de l'histoire, l'intérêt de la végétalisation des enveloppes varie suivant les époques ; pour des soucis d'ordre esthétique en Mésopotamie et à Rome, un élément de décor scénique au Moyen-âge et à la Renaissance et le reflet d'une image de marque dans les années 90. Pour le XXI^e siècle, c'est plutôt la tendance des murs vivants plus utiles sur le plan thermique et écologique.

Force est de constater qu'en Algérie, ces parois végétales sont souvent conçues pour agrémenter les façades ou pour des raisons d'intimité. Tandis que pour les pays occidentaux, la technologie de la façade verte s'est transformée en une composante architecturale qui peut offrir de multiples avantages d'ordre esthétique, thermique, écologique et environnemental.

Une recherche bibliographique des murs verts a ainsi permis d'identifier et de caractériser les différents systèmes de parois vertes disponibles. En effet, la littérature évoque plusieurs classifications de murs végétaux. On en retiendra ceux qui sont recouverts de plantes grimpantes (façades végétales directes et indirectes) et ceux communément appelés murs vivants (modulaires ou hydroponiques). Un aperçu sur les avantages et les inconvénients de ces systèmes a été abordé.

Les systèmes de façades végétales et de murs vivants ont des caractéristiques différentes qui peuvent avoir une influence sur certains avantages comme le refroidissement et les propriétés isolantes. Le premier type nécessite un temps considérable pour couvrir une zone spécifique de la façade et n'est pas capable de se développer jusqu'à des hauteurs importantes du bâtiment. Le deuxième demande plus d'entretien et requiert un coût plus élevé pour l'installation et la maintenance.

En plus de leur rôle positif dans la réduction de l'îlot de chaleur urbain, de l'amélioration de la qualité de l'air et de l'augmentation de la biodiversité en ville, les façades végétales ont également un impact sur la performance thermique et énergétique des bâtiments. Cet effet sera traité en détail dans le prochain chapitre.

CHAPITRE –II-

**ETAT DE L'ART :
ETUDES EXPERIMENTALES
ET NUMERIQUES**

Introduction

La présente étude bibliographique met en lumière les différentes méthodologies recueillies dans le domaine des performances thermiques et énergétiques des façades végétales. Toutefois, avant d'entreprendre cette analyse bibliographique, il est important de préciser que contrairement aux toits végétaux qui sont dûment documentés, les murs végétalisés ont fait l'objet d'un nombre limité d'études particulièrement numériques. Par ailleurs, les recherches menées sur les façades végétales cherchent plutôt à évaluer leur rôle sur le microclimat urbain que sur les ambiances intérieures et la consommation énergétique des bâtiments. La réponse thermique des murs verts est plus fréquemment évaluée avec des mesures in situ à travers des plateformes expérimentales sous différents climats.

Basé sur une revue de la littérature scientifique, ce chapitre a donc pour objectif d'explorer la question de l'incidence thermique et énergétique des façades végétalisées à travers des études expérimentales et numériques. Il s'agit en effet de mettre l'accent sur les différentes méthodes empiriques et les modèles de parois végétales développés sous différents climats.

I. Etudes expérimentales

Les effets de refroidissement des murs végétalisés impliquent plusieurs mécanismes à savoir : l'interception et l'absorption du rayonnement solaire par la végétation (effet d'ombre et d'isolation), la chaleur latente de la plante (effet de refroidissement par évapotranspiration) et la variation de l'effet du vent.

I.1. Performance de rafraîchissement par isolation

Le rôle de l'isolation est de ralentir le transfert de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment qui est fonction de la différence entre les températures intérieures et extérieures (Bernier, 2011). Les propriétés géométriques et thermo-physiques des matériaux de construction, ainsi que la position ou la répartition de l'isolation au niveau de la maçonnerie ont un effet très important sur le comportement thermique de l'espace intérieur. L'isolation appliquée à l'extérieur des bâtiments s'avère beaucoup plus efficace que l'isolation intérieure. Elle diminue le transfert de chaleur vers l'intérieur en été, et vers l'extérieur en hiver sous les climats froids, humides et subhumides (Peck, et al., 1999) (Medjelekh, 2010).

De nombreux chercheurs ont abordé l'effet isolant des murs végétaux. Les systèmes de murs vivants et des façades vertes ont des caractéristiques différentes qui peuvent avoir une influence sur le refroidissement et les propriétés isolantes du bâtiment.

Les plantes grimpantes peuvent considérablement réduire les températures maximales d'un bâtiment en protégeant ses murs du rayonnement direct dans les zones à été chaud. La fluctuation journalière de la chaleur peut être réduite jusqu'à 50%. Cette propriété isolante est due particulièrement au total des surfaces ombrées plutôt qu'à l'épaisseur des plantes grimpantes (Dunnett & Kingsbury, 2008).

D'après (Peck, et al., 1999), une façade nue peut chauffer jusqu'à 60°C et ensuite refroidir à moins 10°C ; tandis qu'avec l'effet isolant de la végétation, les températures à la surface du mur ne fluctueront qu'entre 30° et 5°C.

Dans les conditions climatiques méditerranéennes de la partie nord de la Grèce, (Eumorfopoulou & Kontoleon, 2009) ont exploré les effets de la végétation grimpante sur le comportement thermique de la façade Est d'un bâtiment résidentiel de cinq étages avec une surface vitrée égale à 15% de la surface au sol. Une comparaison entre les sections de murs nus et végétalisés a été effectuée dont plusieurs paramètres ont été mesurés pendant l'été à savoir : les températures de surface extérieures et intérieures, les températures de l'air ambiant et celles de feuillage.

Les résultats de mesure indiquent clairement l'effet isolant causé par la végétation. Les réductions des pics de température sur la face extérieure du mur végétalisé varient de 1,9°C à 8,3°C (moyenne de 5,7°C) comparées à celles de la façade nue avec une différence d'environ 1°C enregistrée sur la face intérieure. La baisse de l'amplitude des fluctuations est accompagnée par une réduction du flux thermique traversant la paroi végétalisée.

Toujours en Grèce, (Tsoumarakis, 2008) a mené une campagne expérimentale dans une pièce isolée pendant quatre mois. La façade ouest de cette salle a été partiellement recouverte de plante grimpante, l'autre partie étant claire. L'analyse des températures surfaciques intérieures et extérieures des parties végétalisées et claires des façades a révélé des aspects très intéressants du potentiel de refroidissement passif des plantes. La couche d'air isolante sous le feuillage de la plante, aide à réduire les pics de température et à garder des températures (T_{si}) plus basses que celles de la partie claire durant toute la journée avec une différence de l'ordre de 1,5°C (figure II.1). Les mesures d'humidité relative de l'environnement intérieur et extérieur, n'ont pas montré d'augmentations significatives.

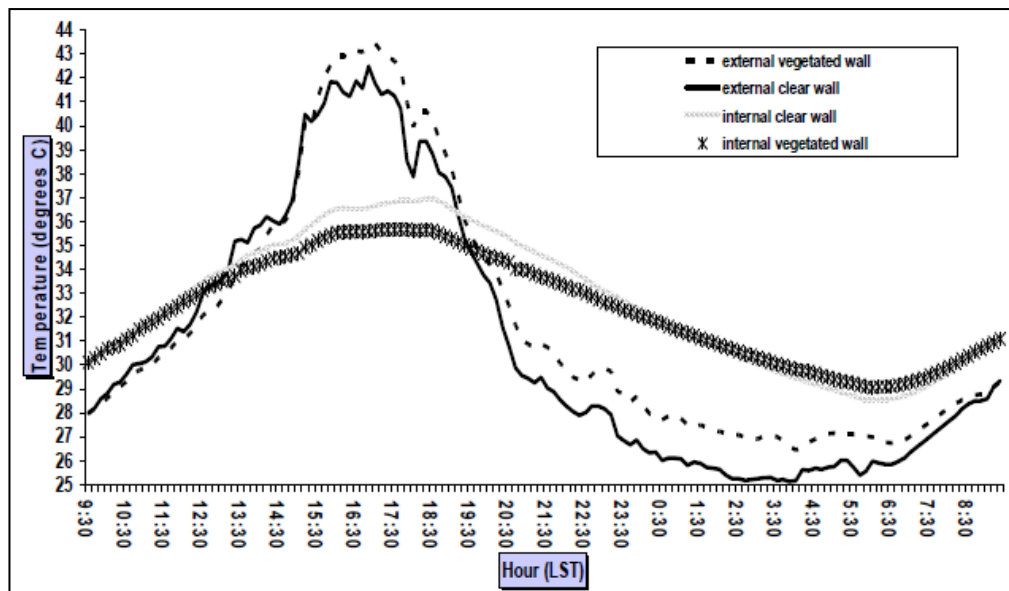


Figure II.1 : Comparaison des températures de surface pour les parties claires et végétalisées

(Tsoumarakis et al, 2008)

Afin de quantifier le comportement thermique des murs végétalisés, (Ottelé & Perini, 2017) ont mis au point un dispositif expérimental pour mesurer le gradient de température à travers des chambres climatiques. Cette recherche décrit un protocole de mesures de transfert de chaleur à travers la comparaison de trois systèmes de murs végétaux différents : façade végétale directe recouverte de lierre et deux systèmes de murs vivants l'un avec laine minérale et l'autre avec jardinières. La configuration du mur nu sert bien évidemment de référence.

Ces auteurs ont constaté que les systèmes de végétalisation influencent positivement l'évolution de la température à travers la façade, ce qui permet d'améliorer la résistance thermique du bâtiment. Les résultats montrent des écarts de température entre le mur nu et les différents systèmes de murs verts analysés en été; atteignant jusqu'à 1,7°C pour la façade végétale directe, 8,4°C pour le mur vivant avec jardinières et 5,8°C pour le mur vivant avec laine minérale (figure II.2). En hiver, les températures sont plus chaudes en raison de la présence de la végétation, ce qui signifie que la couche végétale ralentit la vitesse du flux thermique à travers la façade, améliorant ainsi sa résistance thermique (R).

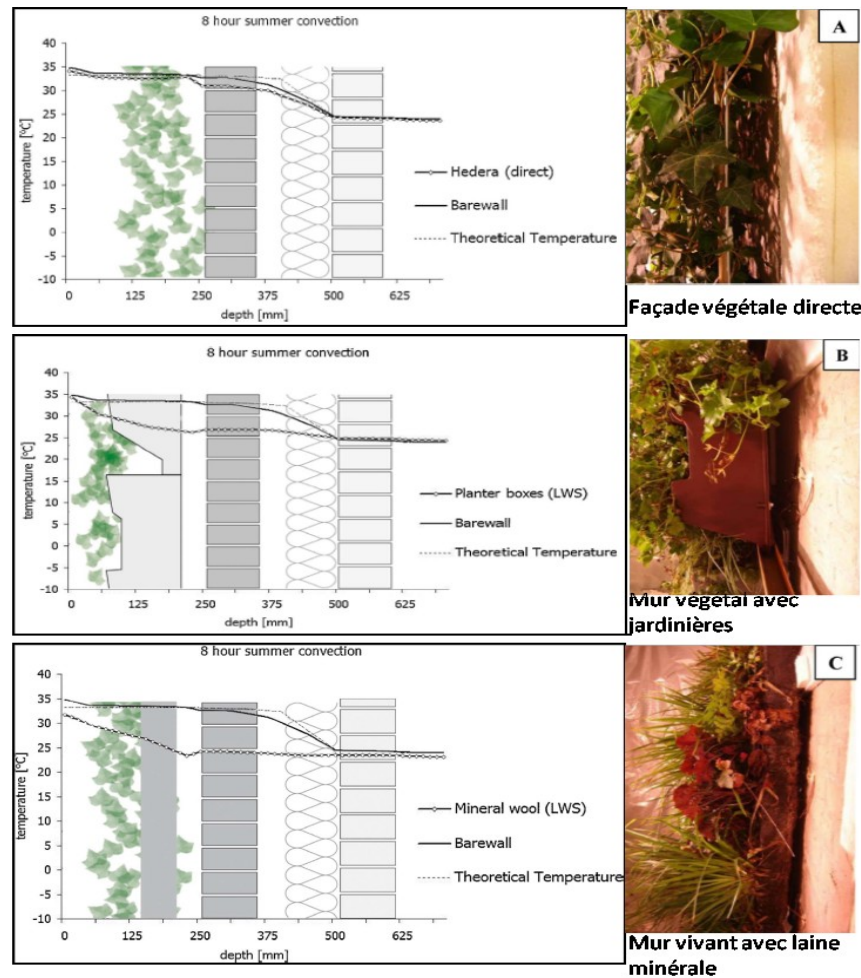


Figure II. 2 : Les systèmes de végétalisation verticale (a) façade verte directe, (b) Murs vivants à base de jardinières, (c) Murs vivants à base de laine minérale

(Ottelé & Perini, 2017)

Par ailleurs, l'expérience de (Susorova, 2013) a démontré qu'une couche végétale peut effectivement réduire les fluctuations de température ambiante et le gradient de température de la paroi extérieure procurant par conséquent, autant d'isolation thermique supplémentaire à la façade qu'une couche de 2,5 cm d'isolation en polystyrène expansé.

La plante a de meilleures performances quant à la réduction du transfert de chaleur par rapport à l'isolation classique qui a toujours pris au piège la chaleur durant la nuit. Outre ses performances pour réduire le transfert de chaleur au bâtiment, la couche de plante grimpante et selon sa densité a plus d'avantages que l'isolation, en réduisant la température de l'air et l'énergie pour la climatisation (Ganji, et al., 2013).

Toutefois, (Eumorfopoulou & Kontoleon, 2009) affirment que la contribution de l'isolation thermique est essentielle même si une couche végétale est considérée.

I.1.1. Effet isolant de la cavité d'air (Propriétés d'isolation des façades végétales dues à la réduction de la vitesse du vent)

La circulation de l'air peut affecter considérablement la température intérieure, ambiante et de surface. Cet effet, dépend principalement de la vitesse et de la direction du vent, des dimensions de l'écran et de la densité du feuillage (Perez, et al., 2011) (Safikhani, et al., 2014).

Les façades végétales indirectes entre autre les façades vertes double peau peuvent ainsi produire des changements dans les conditions ambiantes (température et humidité) de l'espace entre l'écran vert et le mur du bâtiment. Cet espace doit être bien étudié afin de ne pas obstruer la ventilation en été, et ne pas favoriser les courants d'air en hiver (Ochoa, 1999). Il est à rappeler que les études traitant les effets des murs verts sur la vitesse du vent affirment que le feuillage des plantes réduit sensiblement la vitesse du vent et crée une couche d'air stagnante (Eumorfopoulou & Kontoleon, 2009).

Selon (Pérez, et al., 2011), cette couche d'air peut fournir un effet isolant intéressant. Elle a pour rôle de ralentir le taux de transfert de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur d'un bâtiment. Il faut tenir compte du renouvellement de l'air dans cet espace, de la densité du feuillage et de la conception des ouvertures de la façade. Pour les parois vivantes, la capacité d'isolation peut dépendre de l'épaisseur du substrat et de sa densité.

Le taux de renouvellement d'air dans cette cavité est important pour la fonction de refroidissement, car la vitesse du vent influence fortement le transfert de chaleur convective à la surface d'un mur de bâtiment (Ottelé, 2011). Cela peut réduire le transfert d'énergie de 0,24 kWh/m² (Hoyano, 1988).

D'autre part, il a été démontré qu'une couche d'air de 4 cm, emprisonnée entre un mur isolé et une couverture de 16 cm de plantes pourrait améliorer la valeur U de ce mur d'au moins 30%. Si le mur est bien-isolé, cette réduction est moins significative (Facer, 2005).

Selon les études effectuées dans ce domaine, aucune d'entre elle n'a précisé l'épaisseur optimale de la cavité d'air. Ces recherches ont abordé des épaisseurs variant de 8 mm à 1500 mm. Ce paramètre a malheureusement reçu peu d'attention de la part des chercheurs. (Lee & Jim, 2017) ont mis en évidence les avantages de la cavité d'air en termes de refroidissement dans les régions climatiques subtropicales. Ils recommandent d'incorporer des vides d'air profonds sans pour autant préciser la distance optimale.

Sous les conditions tropicales de Bangkok, (Laopanitchakul & al, 2008) ont testé l'effet de la distance entre l'écran végétal et le mur. A cet effet, plusieurs distances ont été testées et des mesures de températures et d'humidité relative ont été effectuées. Par conséquent, il a été démontré que la température de la paroi couverte de plantes grimpantes peut être réduite de $7,03^{\circ}\text{C}$ par rapport au mur nu (figure II.3). De plus, le vide entre le mur et la plante a pour rôle de réduire la stagnation de l'humidité. Le panneau de la plante grimpante avec un rapport de couverture de 85-95% et d'épaisseur moyenne de 10 à 25 cm, installé à une distance de 15 cm du mur est efficace pour réduire le transfert de chaleur à travers l'enveloppe du bâtiment presque comme l'installation à 0 cm, mais émet mieux de la chaleur et réduit l'humidité relative intérieure.

Sous le même climat, (Safikhani, et al., 2014) ont observé une réduction de 8°C et $6,5^{\circ}\text{C}$ de la température d'une cavité de 5cm d'épaisseur pour le mur vivant et la façade végétale indirecte respectivement. Bien que la façade verte soit capable de laisser passer l'air à travers le feuillage et de ventiler la cavité d'air, l'ombre fournie par le mur végétal réduit plus efficacement les températures. Cependant, l'humidité intérieure enregistrée sous l'effet du mur vivant était plus élevée que celle de la façade végétale.

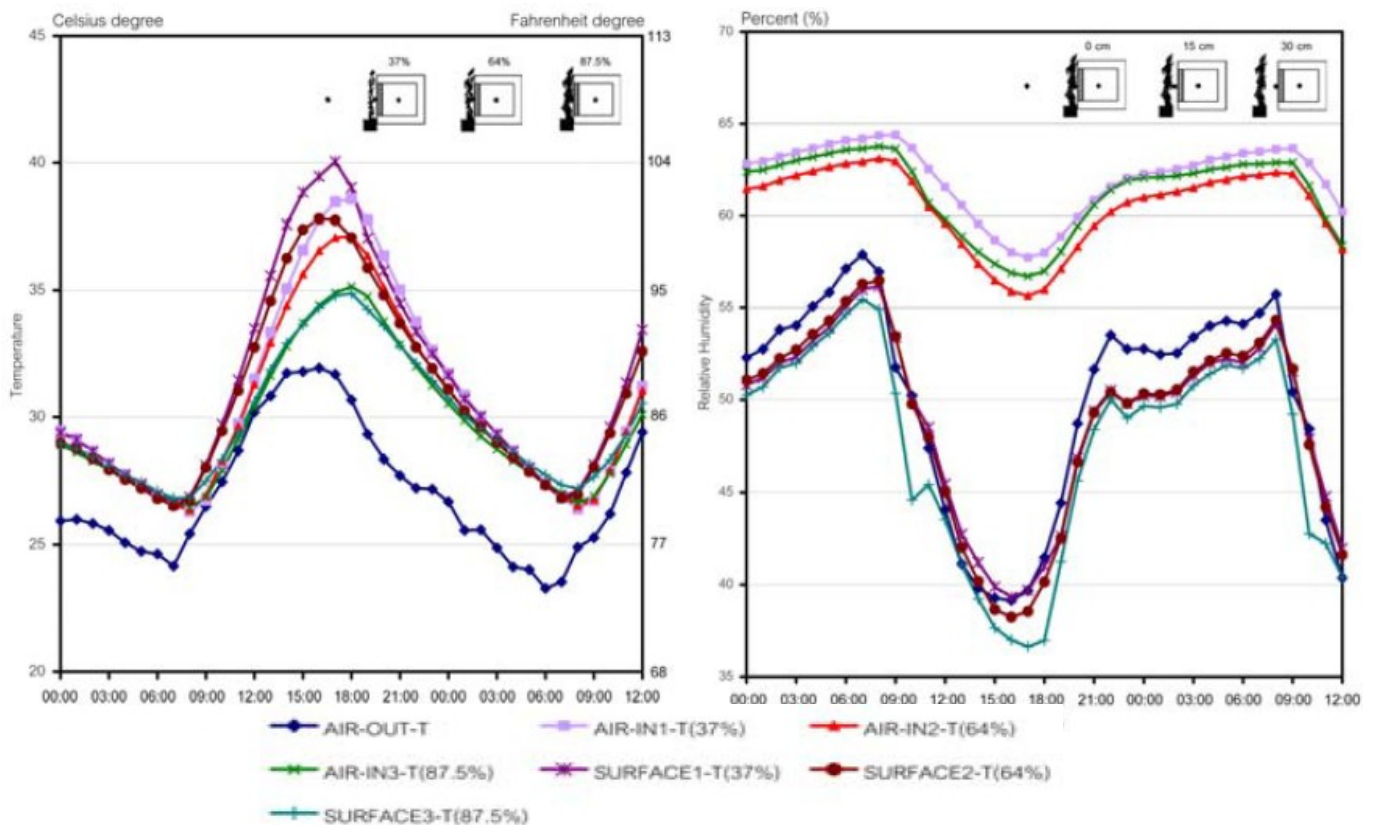


Figure II. 3 : Comparaison des performances hygrothermiques des différentes configurations (Laopanitchakul & al, 2008)

De leur côté, (Sunakorn & Yimprayoon, 2011) ont étudié les performances thermiques des façades végétalisées associées à la ventilation naturelle dans le climat tropical de Bangkok. Leur expérience s'est concentrée sur la différence entre la température de l'air intérieur et extérieur et l'effet de la vitesse du vent sur l'effet de rafraîchissement de l'écran végétalisé. Pour cela, deux scénarios de ventilation ont été appliqués : avec ventilation naturelle et sans ventilation afin de comparer deux pièces orientées à l'ouest, l'une, avec une façade végétale indirecte (couverture de 90% et F=4-5) et l'autre comme pièce témoin.

Les résultats ont montré que les écrans végétalisés augmentaient en fait la vitesse de l'air grâce à la ventilation naturelle. Les meilleurs résultats sont obtenus lorsque la vitesse de l'air est la plus élevée, car l'air refroidi par les plantes à l'intérieur est aspiré à un débit plus élevé. En effet, les feuilles n'obstruent pas le vent lorsque la vitesse de l'air est supérieure à 0,5 m/s, ce qui augmente même la vitesse de l'air de façon inattendue. La différence maximale entre la température extérieure et la température intérieure est de 9,93°C, et une différence maximale de 5°C entre la température intérieure de la pièce de référence et celle végétalisée est obtenue (figure II.4). Les auteurs recommandent d'utiliser la façade végétale comme moyen de pré-refroidissement de l'air extérieur. La nuit, au contraire, cette façade n'a pas beaucoup aidé à diminuer la température, car elle peut obstruer la dissipation de la chaleur. Cependant, la ventilation pourrait aider à résoudre ce problème.

L'augmentation de l'humidité relative de l'air des plantes se fait sentir au cours de la journée, alors que l'humidité relative de l'air ambiant est la plus faible. L'augmentation de l'humidité relative n'est pas significative (maximum de 6,8 %) avec un effet faible sur le confort thermique. La nuit, lorsque l'humidité relative de l'air extérieur est la plus élevée, l'humidité relative de la pièce de référence était plus élevée que celle de la pièce végétalisée.

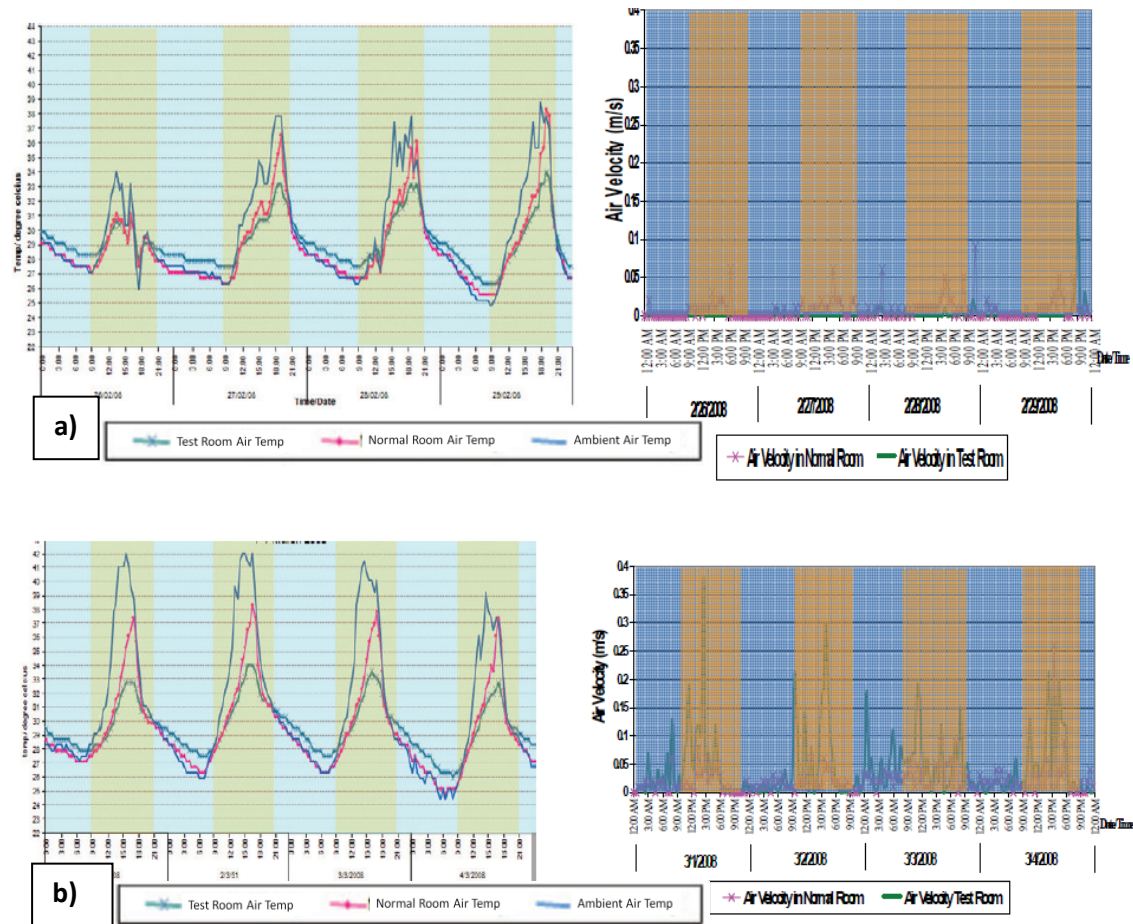


Figure II. 4 : Comparaison de la température et de la vitesse de l'air a) sans ventilation
b) avec ventilation naturelle.

(Sunakorn & Yimprayoon, 2011)

Sous le climat tempéré des Pays Bas, (Perini, et al., 2011) ont mis en place une approche expérimentale mesurant la température (air et surface) et la vitesse de l'air pour différents murs verts. Une étude comparative entre trois systèmes de murs verts et de façade nue a été effectuée au début de l'automne. Ces systèmes comprenaient un système direct de façade Nord-Ouest couverte de lierre, un système indirect (Nord-Est) et un mur vivant modulaire orienté ouest.

Les résultats confirment le rôle isolant de l'espace d'air créé entre la couche végétale et la façade. La température de surface de la façade végétalisée est inférieure à celle de la façade nue d'une moyenne de $1,2^{\circ}\text{C}$ pour la façade recouverte de lierre, de $2,7^{\circ}\text{C}$ pour le système indirect et de $3,9^{\circ}\text{C}$ pour le mur vivant. Les parois vertes ont réduit la vitesse du vent à proximité des murs extérieurs de $0,43\text{ m/s}$ pour la façade recouverte de lierre, de $0,55\text{ m/s}$ pour le système indirecte et de $0,46\text{ m/s}$ pour le mur vivant. La vitesse

du vent maximale a été enregistrée à l'intérieur de la cavité d'air de 20cm d'épaisseur du système vert indirecte (figure II.5). Cette étude recommandait soit une croissance directe du mur, soit une épaisseur variant de 400 à 600 mm comme distance optimale par rapport à la surface du mur pour créer une couche d'air plus stagnante et améliorer par conséquent la performance du mur vert extérieur. Par ailleurs, (Susorova, 2013) affirme que selon les lois de la physique du bâtiment, 50 mm de cavité d'air agit comme 0,5 mm de matériau d'isolation.

Toutefois, dans un climat chaud humide, l'effet global d'un écran végétal sur le confort, peut être négatif, dû à la réduction de la vitesse d'air intérieur (Givoni, 1998). L'épaisseur de la cavité d'air présente alors une grande importance.

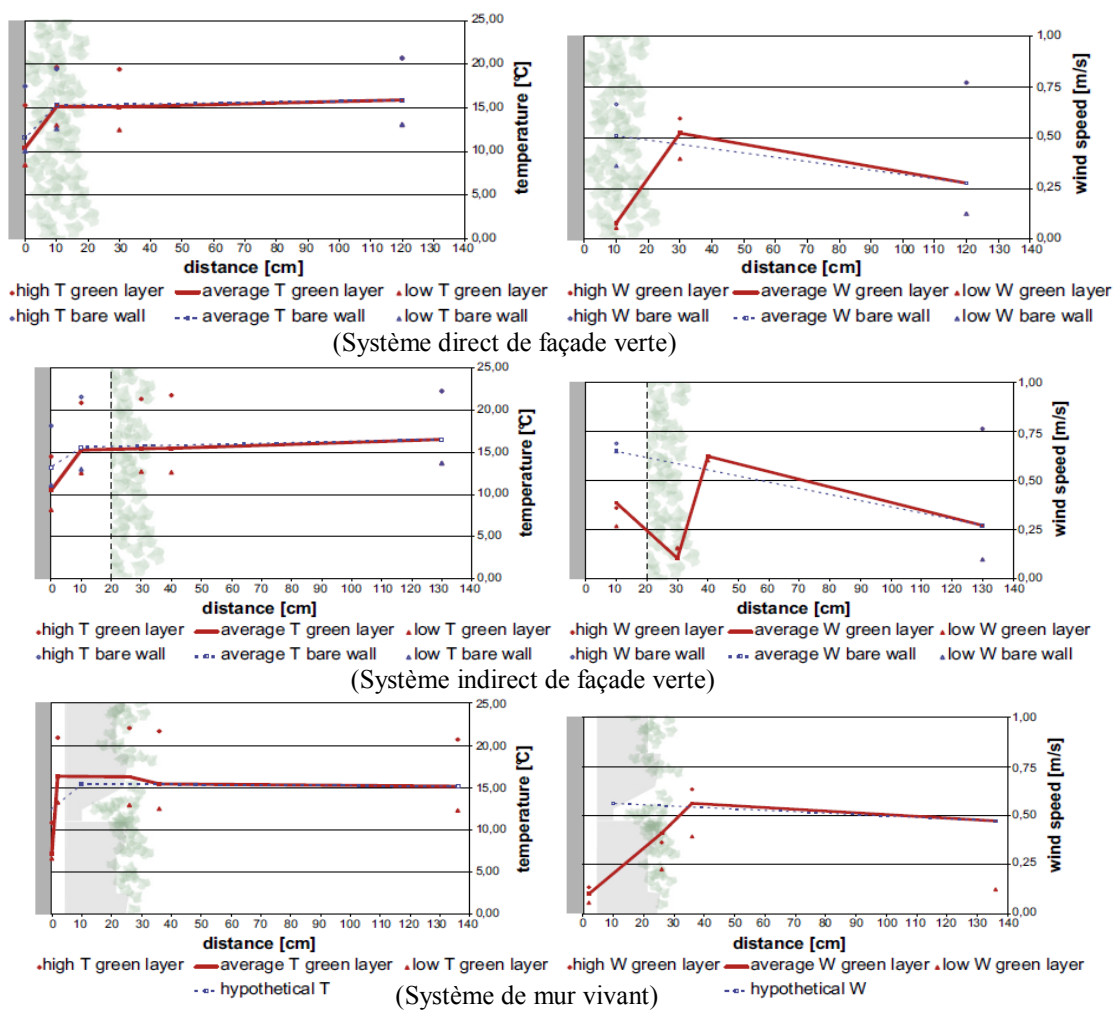


Figure II. 5 : Profils de température et de vitesse de l'air dans les 3 systèmes végétalisés

(Perini, et al., 2011)

I.2. Performance de rafraîchissement par effet d'ombre :

Pérez et al (2017) estiment que l'effet d'ombre fourni par les façades végétales est le paramètre le plus important à prendre en considération. Une des façons de le caractériser est de calculer la densité des plantes à travers de l'indice de surface foliaire.

En effet, de nombreux chercheurs ont évalué l'effet d'ombrage des murs végétalisés en analysant la corrélation entre l'interception du rayonnement solaire par les plantes grimpantes et les caractéristiques spécifiques des plantes. Parmi lesquelles ; l'indice de surface foliaire, le coefficient d'ombrage et la distance entre le mur et les plantes (Hoyano, 1988 ; Wong et al., 2009 ; Ip et al., 2010 ; Susorova et al., 2014).

Hoyano (1988) a entrepris plusieurs études expérimentales sous le tropical du Japon testant l'impact des plantes sur la réduction des gains de chaleur dans les bâtiments. Il a envisagé l'utilisation d'arbustes à feuillage persistant et de plantes grimpantes sur les bâtiments et les pergolas. L'une de ces expériences concerne un écran de vigne installé devant une véranda orientée sud-ouest puis comparé à une véranda non couverte de la même orientation. La figure II.6 indique que grâce à l'effet d'ombre, l'écran végétal a pu réduire sensiblement les gains de chaleur à l'intérieur de la véranda couverte (Avec écran: 25%, sans écran: 40%) accompagné d'une différence de 1-3°C des températures de l'air.

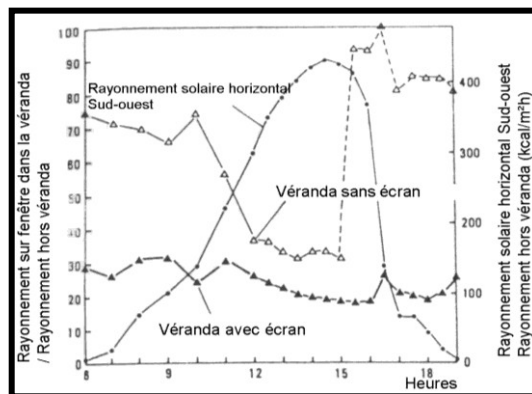


Figure II. 6: Variations journalières du rayonnement solaire incident sur les vérandas testées

(Hoyano.A, 1988)

Dans leur expérience menée à Los Angeles, (Sandifer & Givoni, 2002) ont exploré les effets thermiques des vignes sur les températures de surface du bâtiment. Pour cela, des vignes de 30-35 cm d'épaisseur ont été placées sur une armature devant un mur en brique

orienté Sud. La différence entre la température des surfaces exposées et ombragées était approximativement 20°C. Les températures de l'air dans le feuillage et au-dessous de la vigne ont été réduites de 7-10°C grâce à l'effet d'ombrage de la vigne.

Au même emplacement de la pergola, un mur en stuc orienté ouest partiellement recouvert par une combinaison de plantes (Caffra de *Grewia* et kawakami de *Pyrus*) cultivées en espalier avec 20 à 35 cm d'épaisseur de feuillage, fut également examiné. Les résultats ont révélé que la surface ombragée par l'espalier avait une température plus basse que celle de la surface exposée enregistrant un écart maximal de 29°C.

Tous ces essais prouvent que pendant les jours chauds d'été, les vignes de 30-35cm d'épaisseur peuvent éliminer l'effet de la couleur extérieure et fournir un espace extérieur plus confortable à côté des bâtiments. Il en résulte aussi de ces expériences, que la distance entre les plantes et la façade du bâtiment, la couverture et l'épaisseur du feuillage influent considérablement sur les températures de l'air et de surface.

Afin d'évaluer l'effet de rafraîchissement des façades végétalisées dans les conditions semi arides de Constantine, (Benhalilou, 2009) a mené une investigation sur cas réel de quatre maisons individuelles « A », « B », « C » et « D ». La première ayant une couverture de 100% de vigne vierge de 20 à 30cm d'épaisseur, la deuxième ne possédant aucune protection solaire (mur nu), la troisième est couverte de vigne vierge d'une faible épaisseur et de faible densité avec un rapport de couverture de 80% et la dernière recouverte d'un écran de vigne.

Cette étude a révélé que les plus faibles valeurs de température de l'air et celles de surface ont été enregistrées dans la maison "A". La plus grande réduction de température de l'air intérieur est enregistrée l'après midi lorsque les températures extérieures sont élevées. La réduction maximale des températures est de 4.4°C 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" (figure II.7). Ces écarts sont dus essentiellement à l'effet d'ombrage et d'évapotranspiration. Ces résultats, révèlent également que l'épaisseur et le rapport de couverture de la végétation 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. Des résultats semblables ont été obtenus par (Yuksel & Nil Turkeri, 2017).

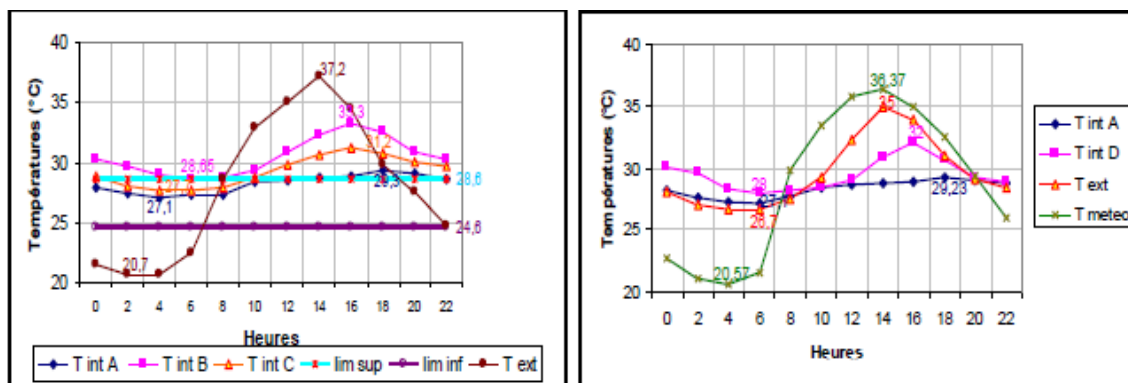


Figure II. 7 : Variation des températures de l'air dans les maisons testées

(Benhalilou, 2009)

Selon (Cheng, et al., 2010), la différence de température est uniquement tributaire de l'effet d'ombrage plutôt que de la masse thermique du mur vert. Ce dernier aurait un double effet d'économies d'énergie et de réduction de flux de chaleur pénétrant à l'intérieur grâce à l'effet d'ombrage et d'évaporation. La végétation peut en effet, réduire considérablement les températures maximales d'un bâtiment en ombrageant les murs ; les fluctuations de température quotidiennes étant réduites de 50%. L'étude a ainsi révélé que la différence entre la température à la surface du mur nu et celle du mur végétalisé était d'environ 14 °C.

Pour étudier le coefficient d'ombrage d'une façade végétale, (Ip, et al., 2010) ont établi une expérience " Bioshader "¹, réalisée sous le climat tempéré du Royaume-Uni. Dans le cadre de cette expérience, un bureau dont la façade vitrée sud-ouest recouverte de plantes grimpantes à feuilles caduques, a été comparé à un autre bureau sans plantes. Cette expérience prend en considération la surface végétalisée, le nombre de couches de feuilles ainsi que le facteur de transmission solaire. Un traitement d'image est utilisé pour déterminer le taux de couverture des feuilles. Des réductions de températures intérieures de 3.5°C à 5.6°C, ont été obtenues. La transmission solaire à travers le feuillage varie de 0,45 avec une couche de feuilles, jusqu'à 0,12 pour cinq couches de feuilles (figure II.8). Cela correspond à une réduction de 37% du rayonnement solaire traversant les plantes avec une couche de feuilles et jusqu'à 86% avec cinq couches de feuilles.

¹ Dispositif végétal pour remplacer les dispositifs d'ombrage artificiels

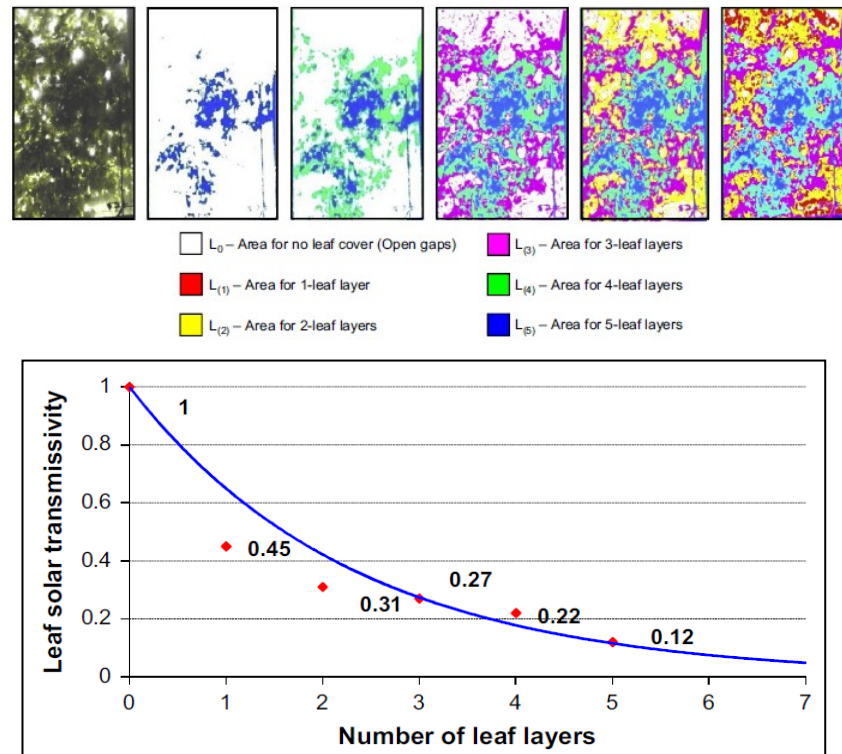


Figure II. 8: Transmission solaire des feuilles en fonction du nombre de couches de feuilles.

(Ip, et al., 2010)

Pérez et al (2011) ont examiné le comportement d'une façade verte double peau dans un climat méditerranéen continental sec en Espagne pendant le printemps et l'été. Pour cette étude, ils ont utilisé une structure en treillis modulaire de glycine placée parallèlement aux façades d'un bâtiment public, à 0,8 m des façades nord-ouest et sud-ouest, et à 1,5 m de la façade sud-est. Les mesures d'éclairement, de l'humidité relative, de la température de l'air et de surface ont été prises dans l'espace intermédiaire entre le bâtiment et le mur vert. Le facteur d'ombre² a été également calculé. Les résultats de cette étude ont montré que la façade verte est plus efficace en été en créant un microclimat dans l'espace intermédiaire, soumis à des températures plus basses et à une humidité relative plus élevée. Cette étude fait état d'une réduction de 5,5°C de température des surfaces comparé à la façade exposée au soleil en raison du refroidissement par évaporation et de l'ombrage de la façade (figure II.9). Ainsi, le facteur de transmission solaire le plus faible était de 0,04 en période de croissance des feuilles.

² Le rapport entre l'éclairement de l'espace intermédiaire et l'éclairement extérieur. Cette valeur varie de 0 à 1

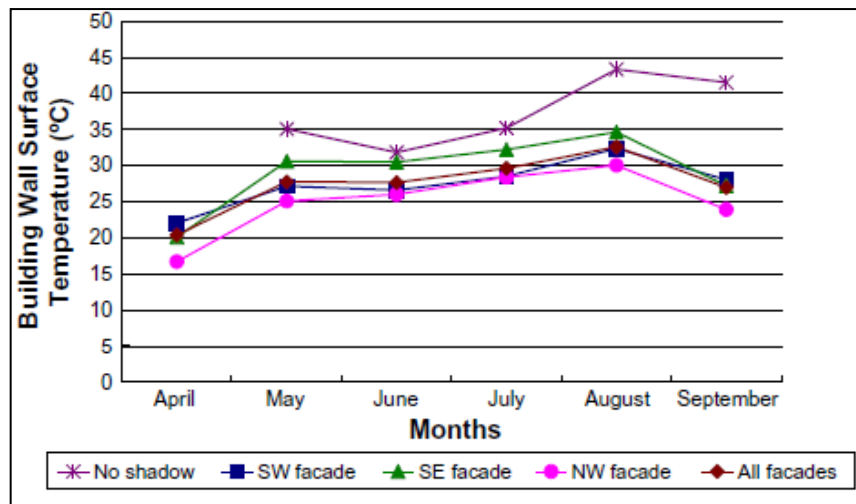


Figure II. 9 : Evolution des températures de surfaces

(Peréz et al, 2011)

D'autre part, (Wong, et al., 2010) ont réalisé une étude comparative entre 8 systèmes de murs verts dans un parc à Singapour dont l'objectif étant d'étudier les impacts thermiques de ces systèmes sur les températures ambiantes extérieures et de surface. L'accent étant mis sur l'impact de murs végétaux sur l'environnement proche. Le dispositif est composé de 7 types de murs vivants différenciés par le type de végétation et par les caractéristiques du substrat et d'un mur couvert de plantes grimpantes (indirecte) en plus d'un mur témoin sans végétation (figure II.10).

Par conséquent, les mesures de température réalisées à différentes distances des murs montrent les avantages thermiques des murs végétaux pour la réduction de la température de surface des façades de bâtiments dans le climat tropical. Une réduction moyenne de 4,36°C de la température de surface est obtenue pour le système de FVI comparé au mur nu. Néanmoins, les murs vivants (constitués de panneaux modulaires et de substrat) ont montré une meilleure capacité à abaisser la température de surface du mur comparé au mur couvert de plantes grimpantes. Ces systèmes ont également montré une bonne capacité à réduire la température de l'air ambiant dont l'effet est ressenti jusqu'à 0,60m. Ceci est probablement causé par l'effet d'ombrage et d'évapotranspiration dû à l'irrigation constante de la végétation.

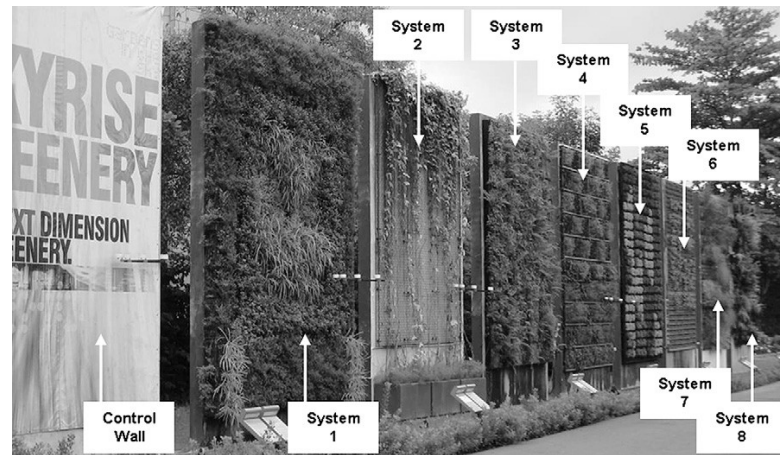


Figure II. 10 : les 8 systèmes végétaux verticaux testés à Hortpark à Singapour

(Wong et al, 2010)

En 2012, (Tilley, et al) ont présenté les résultats d'une analyse des propriétés thermiques des façades végétales sous un climat humide subtropical. L'expérience a porté sur quatre petits bâtiments à ossature en bois léger construits dans le but de mesurer un certain nombre de variables thermiques (figure II.11). Des façades vertes orientées Est, Sud et Ouest et un bâtiment sans végétation ont servi à l'étude. Les résultats obtenus indiquent que les murs verts ont réduit de 43 % le flux thermique à travers l'enveloppe des bâtiments d'essai. Cela s'est traduit par une réduction moyenne de 4°C de la température de l'air ambiant. La température de surface du mur végétalisé pouvait être jusqu'à 14 °C plus fraîche que le mur nu (figure II-12).



Figure II. 11 : Bâtiments expérimentaux situés sur une plate-forme de béton à Clarksville.

(Tilley, et al., 2012)

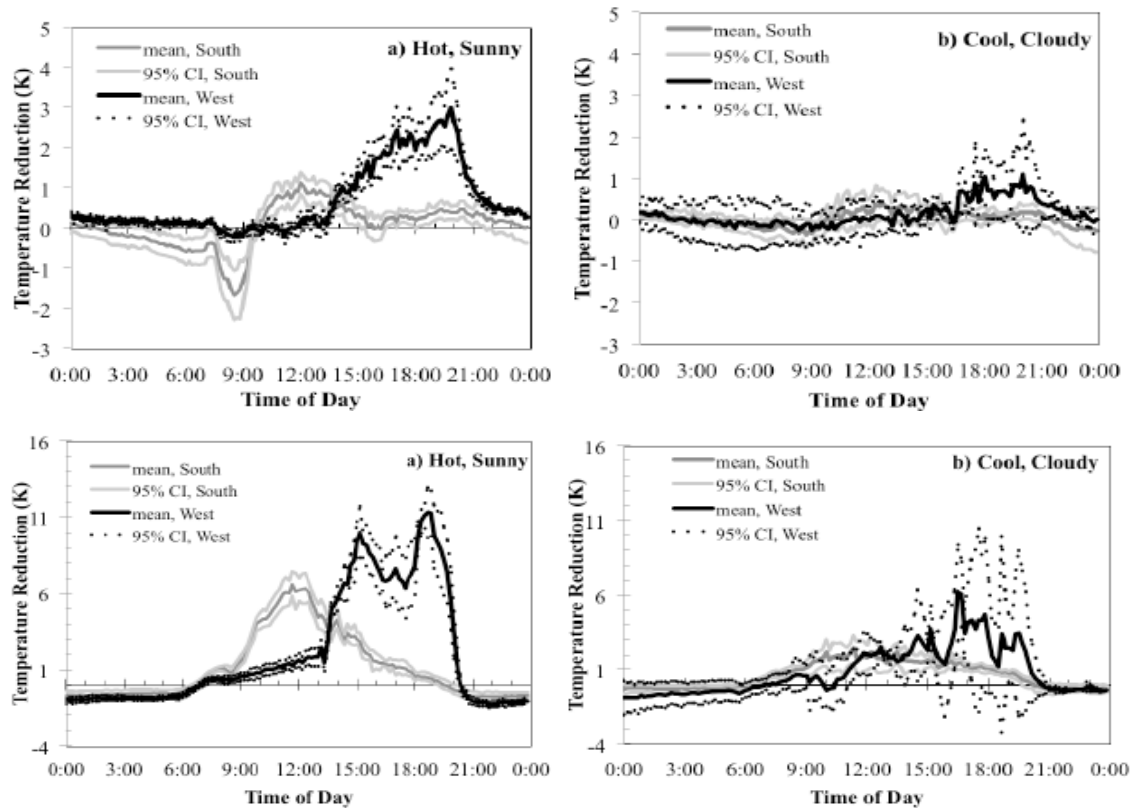


Figure II. 12 : Evolution des températures de l'air ambiant et de surface extérieure.

(Tilley, et al., 2012)

La baisse de l'amplitude des fluctuations est accompagnée par une réduction du flux thermique traversant la paroi végétalisée. En effet, la couche de végétation ombrage la façade au cours de la journée et réduit l'éclairement solaire reçu par la paroi considérée. Les déperditions thermiques sont ainsi atténuées par cette couche foliaire. Ce dernier effet est mieux perceptible au cours de la nuit où l'échange thermique par rayonnement GLO, qui s'établit entre la paroi et son environnement, est réduit par les feuilles dont la température avoisine celle de l'air ambiant (Djedjig, 2013).

L'étude menée par (Hoelscher, et al., 2016) quantifie les effets de refroidissement des façades vertes en comparant les effets de transpiration, d'ombrage et d'isolation. Cette expérience a été menée pendant les périodes chaudes de l'été sur trois façades de bâtiments à Berlin (figure II.13). Les auteurs ont déterminé les taux de transpiration et les températures de surface des parois vertes et nues ainsi que celles des feuilles des plantes grimpantes. La température de l'air, l'humidité relative et le rayonnement à courtes longueurs d'ondes ont été également mesurés.

Hoelscher et al (2016) confirment que les systèmes directs ou indirects de façades végétales sont à privilégier. L'effet rafraîchissant des façades végétales durant les journées chaudes d'été dépendait principalement de l'ombrage, alors qu'une plus faible partie était due à la transpiration. Les températures de surface extérieures des murs végétalisés étaient jusqu'à 15,5°C inférieures à celles des murs nus, alors qu'elles étaient jusqu'à 1,7°C pour la face intérieure durant la nuit (figure II.14). Bien que les températures de surface des murs extérieurs et intérieurs du bâtiment aient été nettement réduites par l'écran végétal, aucune différence évidente dans la température de l'air ambiant n'a pu être mesurée. Les façades végétales pourraient également atténuer le stress thermique nocturne si les plantes sont suffisamment irriguées.

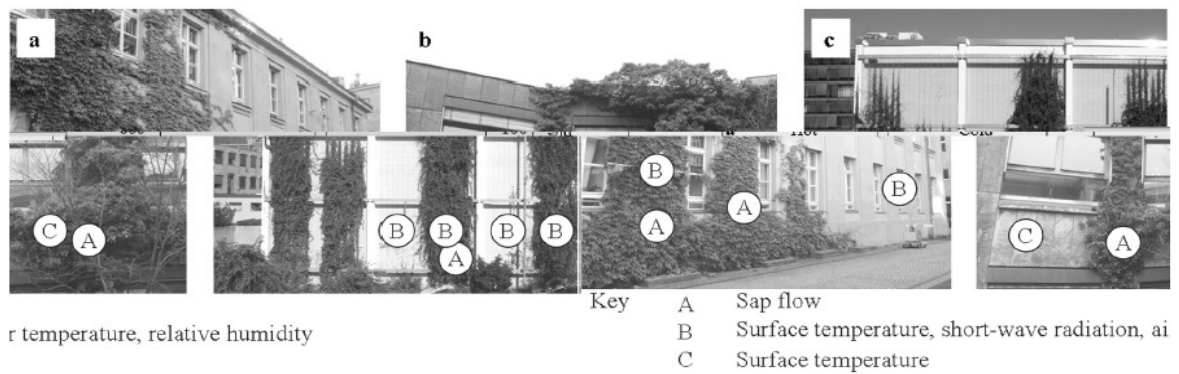


Figure II. 13 : Les bâtiments testés: a) façade recouverte de *Parthenocissus tricuspidata* (sud-sud-ouest) b) façade recouverte de *Hedera helix* (Est) et (c) façade recouverte de *Fallopia baldschuanica* (Ouest)

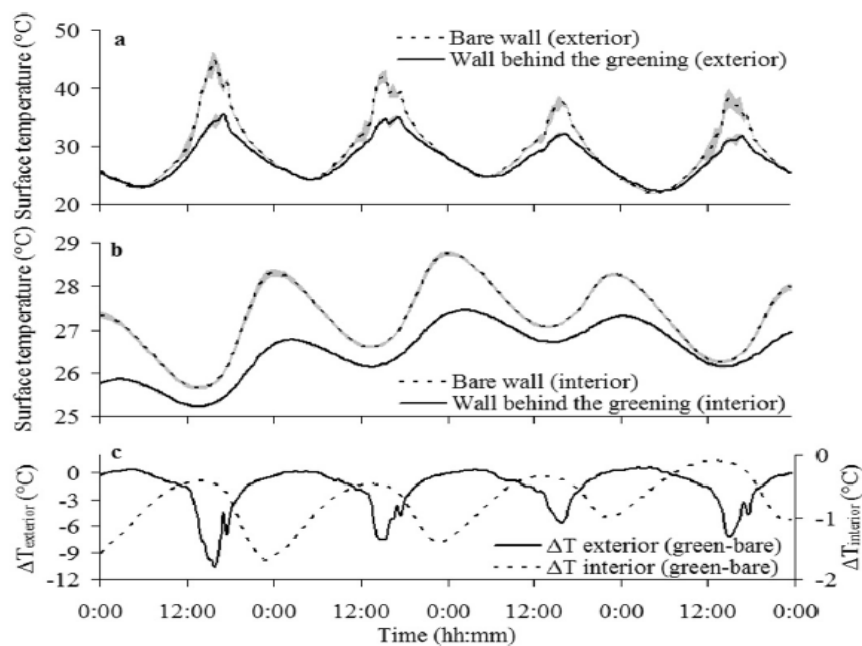


Figure II. 14 : Températures moyennes de surface du bâtiment nu et végétalisé (Hoelscher et al, 2016)

A travers leur étude expérimentale menée sous le climat méditerranéen, (Pérez, et al., 2017) ont comparé une façade verte double peau et une façade de référence. Plusieurs orientations et plusieurs indices de surface foliaires ont été testés. Les résultats ont révélé des économies d'énergie de refroidissement allant jusqu'à 34 % pour un indice de surface foliaire égale à 3,5-4. En outre, il a été confirmé que ces économies d'énergie réalisées dépendent de l'orientation de la façade verte. L'effet d'ombre des façades vertes orientées Est, Ouest et Sud est très représentatif et devrait être pris en compte dans la stratégie de conception architecturale. La façade verte orientée à l'est a enregistré une réduction de 15°C de la température de surface du bâtiment, maintenus en dessous de 23°C tout au long de la journée avec une réduction de 16°C pour l'orientation Sud et 16,4°C pour l'orientation Ouest (figure II.15). (Pan, et al., 2018) ont obtenu des résultats similaires sous le climat subtropical avec une réduction de 6,1°C pour l'orientation ouest.

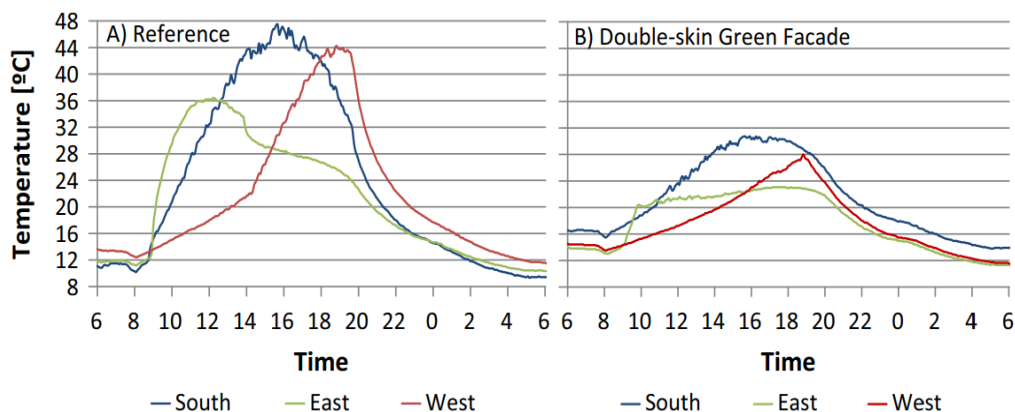


Figure II. 15 : Evolution des températures de surface externes pour différentes orientations (Pérez, et al., 2017)

Yin et al (2017) ont procédé à une nouvelle méthode utilisant des données infrarouges thermiques (TIR) et des nuages de points tridimensionnels (3DPC) de la végétation afin d'évaluer l'effet de refroidissement des façades végétales. L'étude fut menée dans un bâtiment de bureaux à l'Université de Nanjing, en Chine. Les résultats montrent que la température moyenne quotidienne de surface de la FV orientée sud est nettement inférieure à la température moyenne de surface du mur nu, avec une réduction maximale de 4,67°C (figure II.16). L'effet de refroidissement le plus prononcé a été observé au milieu de la journée (11:00 h - 16:00 h), et il a été significativement réduit la nuit. Sous le même climat et pour la même orientation, (Jim & He, 2011) et (Koyama, et al., 2013) ont obtenu des réductions de 5°C et de 3.7-11.7°C respectivement.

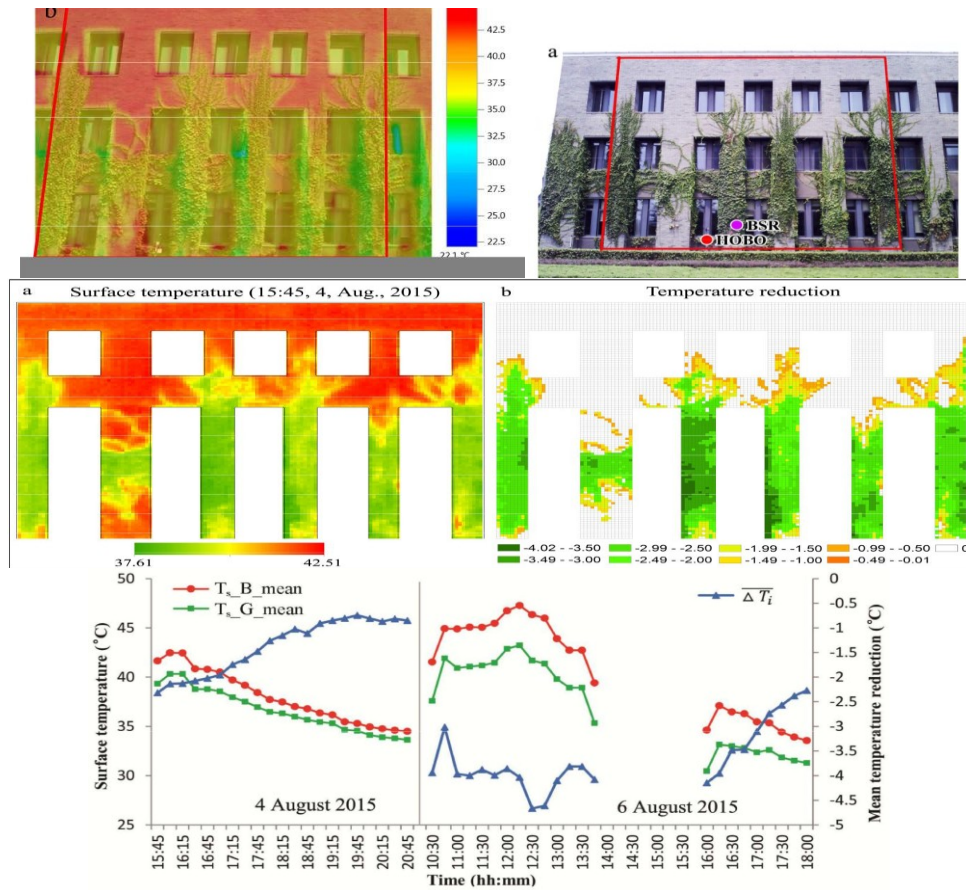


Figure II. 16 : Bâtiment testé et évolution de la température moyenne de surface.

(Yin, et al., 2017)

Li et al (2019) ont examiné l'effet de l'orientation sur la performance thermique des façades vertes orientés au sud et à l'est sous le climat chaud et humide de Suzhou à travers des mesures in situ. Les résultats montrent que les façades vertes ont un effet d'ombrage notable par rapport au mur nu en réduisant efficacement les pics de température pendant la journée. Par rapport aux façades vertes orientées Est, les façades vertes du sud ont de meilleures performances thermiques de jour comme de nuit enregistrant un écart maximal de $3,95^{\circ}\text{C}$ par rapport au mur nu (figure II.17) accompagné d'une augmentation significative de l'humidité relative sous la couche de feuilles.

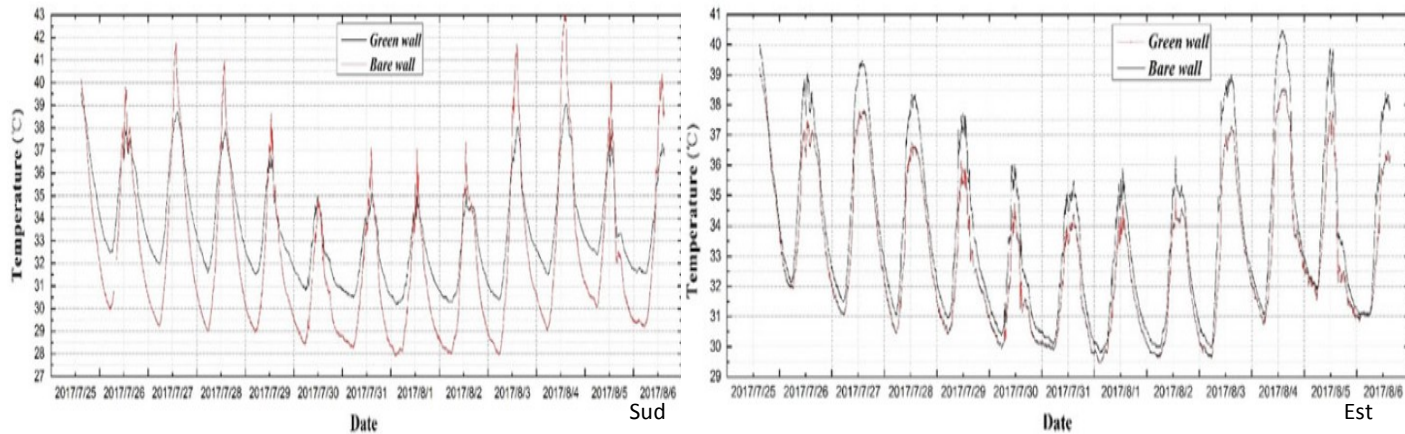


Figure II. 17: Evolution des températures de surface extérieures pour les façades vertes et nues (Est et sud)

(Li, et al., 2019)

I.3. Performance de rafraîchissement par évapotranspiration

A travers le phénomène d'évapotranspiration, de grandes quantités de rayonnement solaire peuvent être converties en chaleur latente, ce qui permet d'abaisser la température de l'air. Il a été noté que le refroidissement par évapotranspiration d'une paroi verte peut réduire considérablement les températures maximales d'un bâtiment, où les fluctuations quotidiennes de température sont réduites de 50% (Dunnett & Kingsbury, 2008).

La réduction des températures de surface par rapport aux températures de l'air ambiant est due essentiellement à l'évapotranspiration des plantes. Plus le feuillage est dense, plus grand est le phénomène d'évapotranspiration (Sandifer & Givoni, 2002). (Sunakorn & Yimprayoon, 2011) rajoutent que les feuilles plus petites et plus denses peuvent fournir un meilleur effet thermique en augmentant la surface pour l'évapotranspiration. En revanche, peu d'études se sont penchées sur l'effet de refroidissement par transpiration des façades végétalisées.

Cet effet dépend notamment des espèces de plantes. La capacité de refroidissement des Fuchsia, Jasminum et Lonicera étant plus performants que le lierre et le prunus. Le Fuchsia favorisait le refroidissement par évapotranspiration, tandis que le refroidissement par l'ombre était plus important chez le Jasminum et le Lonicera (Cameron, et al., 2014).

En été, une façade entièrement couverte de végétation peut réfléchir ou absorber entre 40% et 80% du rayonnement reçu, selon la quantité et le type de végétation. Les

environnements secs ou humides et l'effet du vent peuvent également augmenter l'évapotranspiration des plantes (Perez, et al., 2011).

Di & Wang (1999) ont choisi la bibliothèque de Tsinghua à Pékin pour explorer l'effet de refroidissement du lierre et les mécanismes de transfert thermique entre les plantes et le mur. Ce bâtiment à deux étages a servi pour l'étude, dont les murs externes orientés ouest et sud sont couverts de lierre épais. A cet effet, des mesures de température, de rayonnement solaire, de flux de chaleur, de vitesse du vent ont été effectuées à plusieurs points à la même hauteur et à différentes distances du mur. Une comparaison avec un mur nu témoin a été effectuée en adoptant le même système de mesure.

Par conséquent, il a été constaté que la température moyenne des feuilles était inférieure à celle du mur nu enregistrant un écart de 4.5°C. Pour la couche de feuille, l'évaporation et la convection thermique des deux côtés ont participé à la réduction de la température des feuilles, la rendant inférieure à celle du mur exposé.

Par ailleurs, dans leur expérience citée en haut, (Wong, et al., 2010) confirment que le meilleur effet de refroidissement a été mesuré à proximité des murs végétalisés avec une réduction de température de l'air de 3,3°C et 1,6°C à une distance de 15 et 30 cm respectivement du mur végétal. Au-delà de 60 cm, tous les systèmes de murs verts n'ont plus d'influence sur la température ambiante.

Ceci indique qu'une façade verte reste moins chaude qu'un mur nu, ce qui permet non seulement d'émettre moins de chaleur, mais aussi de refroidir l'environnement ambiant par évapotranspiration. Grâce aux propriétés thermiques des plantes (albédo et émissivité) et au phénomène d'évapotranspiration, la température à la surface reste plus basse et les échanges par convection sont donc limités. Par conséquent, ces températures peuvent se traduire par une diminution de la charge de refroidissement du bâtiment.

I.4. Synthèse

Les études expérimentales revues couvrent plusieurs contextes climatiques. La majorité d'entre elles a été effectuée dans les zones climatiques océaniques, méditerranéennes, tropicales et subtropicales. Les climats continental et semi aride ont été malheureusement peu investigués. Ces études ont ciblé particulièrement l'effet de rafraichissement des façades végétales.

Ces recherches ont porté sur la comparaison de parties nues et de parties végétalisées soit de murs, de boxs expérimentaux ou carrément de bâtiments où plusieurs paramètres physiques sont mesurés. L'humidité relative est rarement considérée. Bien que les résultats obtenus varient d'une étude à l'autre, la quasi-totalité des recherches confirment l'effet positif des parois végétales. L'analyse documentaire réalisée souligne des améliorations significatives de la performance thermique de l'enveloppe des bâtiments sous l'effet de ces parois. La température de la surface de la façade a diminué en moyenne de 8°C et la température ambiante intérieure de 3°C en moyenne. Cette diminution est due essentiellement aux effets d'ombrage, d'évapotranspiration et d'isolation.

L'effet de refroidissement des façades vertes dépend fortement des espèces végétales et de leurs caractéristiques en plus des paramètres météorologiques par ordre d'importance décroissante: le rayonnement solaire, la vitesse du vent, l'humidité relative et la température de l'air extérieur.

En outre, la typologie et la physiologie des plantes ainsi que la morphologie des feuilles doivent être prises en compte lors de la sélection des espèces afin de maximiser le refroidissement des murs verts. L'indice de surface foliaire et le pourcentage de couverture sont les paramètres clés pour caractériser la densité foliaire et le comportement thermique des façades végétales, en raison de leur grande influence sur l'effet d'ombre.

Toutefois, on constate un manque d'études relatives aux effets de l'épaisseur de la cavité d'air et de l'orientation de la façade végétale dans la contribution aux économies d'énergie et à l'amélioration du confort thermique.

Le tableau II.1 présente une récapitulation des études expérimentales citées plus haut concernant les performances thermiques des façades végétales comme suit :

Tableau II. 1 : Synthèse des études expérimentales revues

Climat	Auteur Année	Lieu Climat (Koppen)	Type de mur vert/plante	Effet d'ombrage	Effet d'évapotranspiration	Effet d'isolement	Méthode/ Paramètres mesurés/période de mesures	Orientati on	Réduction T int (°C)	Réduction Ts ext (°C)	Réduction Ts int (°C)
Subtropical	(Hoyano, 1988)	Fukuoka (Japan) "Cfa"	FVO Vigne (incliné à 35% vers le soleil) sur un balcon	X			Véranda avec et sans écran solaire de vigne (Tair, Ts, Tf, Rs) Eté	SO	1-3	13-15	
	(Jim, et al., 2011)	Hong Kong, (China) "Cwa"	FVD Parthenocissus Tricuspidata				Mur avec et sans végétation (Tair, Tsint-ext, Vv, Q, Rst). Eté	O		10	11
	(Koyama, et al., 2013)	Chikusa (Japon) "Cfa"	FVI Cinq espèces de vigne grimpantes	X	X		(Tamb, Ts _s , Tsint-ext, HR, Rs, Q). Eté	E S O N S		5 5 1-2 1-2 3.7-11.3	
	(Tilley, et al., 2012)	Clarksville (USA) "Cfa"	FVD Vigne vierge	X			(Tint, Tsext, Q)	E S O	4	14	
	(Yin, et al., 2017)	Nanjing (Chine) "Cfa"	FVD Vigne vierge	X	X		Eté	S		4.67	
	(Li, et al., 2019)	Suzhou (Chine) "Cwa"	FVD				(Ts, Tamb, HR) Eté	S E		3.95	
	(Laopantle hakul & al., 2008)	Bangkok (Thaïlande) "Aw"	FVD et FVI Mann Bali (espèce locale)	X	X		Comparaison entre * Rapport de couverture 37%, 64% et 87,5% * Distance de décalage à 0, 15 et 30 cm * plante grimpante et isolation (Tair, Ts, HR, Rs). Décembre, Janvier, février, Mars			0.15-2	
	(Wong, et al., 2010)	Singapour "Af"	Différents types de murs vivants et FVI	X			(Tair, Ts ext, HR à 0.15m /0.30/ 0.60 / 1.00m, Vv, Tsub) (3 jours)			4.36	1.1-11.6
	(Sunakorn & Yimngoon, 2011)	Bangkok (Thaïlande) "Aw"	FVI Vigne	X		X	Tint-ext, HR, V air Taux de couverture = 90%, F=3.5-4	O	5		
	(Safikhani, et al., 2014)	Skudai (Malaisie) "Af"	FVI et mur vivant Blue Trumpet Vine Epr= 20cm	X	X		Comparaison entre FVI et mur vivant (Tint, Hinf, Tsint-ext, Tamd int-ext, HRamb int-ext). Eté . 3 jours Ep cavité=5cm	O	3 4		
Tropical											

Climat	Auteur Année	Lieu Climat (Koppen)	Type de mur vert/plante	Effet d'ombrage	Effet d'évapotranspiration	Effet d'isolation	Méthode/ Paramètres mesurés/période de mesures	Orientation	Reduction T int (°C)	Reduction T s ext (°C)	Reduction T s int (°C)
	(Köhler, 2008)	Berlin (Allemagne) "Cfb"	FVD Parthenocissus tricuspidata	X			(T s ext) Eté/ hiver				
	(Ip, Lam, & Miller, 2010)	Brighton (Angleterre) "Cfb"	FVD Vigne vierge vraie	X			Façade vitrée (Tint, Tf, Rs, Q)	SO	3.5, 5.6		
	(Stemberg et al., 2011)	England "Cfb"	FVD Lierre Epr= 10-45cm	X			(T s ext, Tamb, Tair, HR), Eté	SO		1.7-9.5	
	(Perini, et al., 2011)	Delft (Pays bas) "Cfb"	1. FVD(Lierre) 2. FVI (Lierre, Vigne, Clematis, jasmin et Pyracantha) 3. Mur vivant Epr= 20cm	X	X		(Tair, Ts, Vv à 10cm et à 1m du mur, au milieu feuillage et la cavité d'air) Automne (1 mois)	NO NE O	0.12 1.2 2.7 5		
	(Perini, et al., 2011)	Rotterdam (Pays bas) "Cfb"	Lierre, Vigne, Clematis, jasmin et Pyracantha) Epr= 10cm				Automne. Epaisseur cavité=20cm		2.7		
	(Cameron, et al., 2014)	Sheffield, London, "Cfb"	FVI Lierre Fuchsia, Jasminum Lonicera	X	X		(T s ext, Tf, Tamb, V a), Eté	N S		3.6-7.3	
	(Hoelscher, et al., 2016)	Allemagne Berlin "Cfb"	FVD Parthenocissus tricuspidata, Lierre et Fallopia baldschuanica	X	X	X	(Tair, T s int-ext, HR, RCLQ)	S SO E O		15.5	1.7
	(Ottolè, et al., 2017)	Pays bas (Delft) "Cfb"	FVD (Lierre) Mur jardinière Mur vivant	X	X		(Tint, T s int-ext, T r, T ext), Eté / hiver				1.7 8.4 5.8

Océanique

Climat	Auteur Année	Lieu Climat (Koppen)	Type de mur vert / plante	Effet d'ombrage	Effet d'évapotranspiration	Effet d'isolation	Méthode/ Paramètres mesurés/période de mesures	Orientation	Reduction T int (°C)	Reduction Ts ext (°C)	Reduction Ts int (°C)
Méditerranéen	(Sandifer & Givoni, 2002)	Los Angeles "Csa"	Veranda Vigne	X	X		Mur en brique Epr= 30-35 cm. (Ts, Tf, Tair)	S		20	
	(Tsoumatakis, et al., 2008)	Grèce	FVD Caffra de Grewia et kawakami de Pynus	X			Mur en stuc Epr= 20-35 cm (Ts, Tair)	O		29	
	(Eumorfopoulou & Kontoleon, 2009)	Grèce	FVD Parthenocissus tricuspidata Epr=25cm	X	X	X	Paroi ouest partiellement couverte. l'autre partie est claire. mur en brique 21cm (Tair, HR) 4 mois (Août - Décembre)	O	1.5		
	(Perez, et al., 2011)	Lleida (Espagne) "Csa"	Façade verte double peau (Glycine, Lierre Chèvrefeuille, Vigne vierge, Clématites) Epr=20cm	X			Comparaison entre les sections de murs nues (brique) et végétales (Tint, Ts int-ext, Tf, Text, HR, Va, Rs). Été Printemps, été	E	2	8.3	1
	(Pérez, et al., 2017)	Espagne "Csa"	Façade verte double peau Parthenocissus tricuspidata	X			Cavité d'air=50-70 (Ecl ext et intermédiaire, Text et intermédiaire, Hr ext et intermédiaire, Ts, Va ext) Printemps, été	NO SO SE			5.5
	(Susorova, 2013)	Chicago USA "Dfa"	FVD Lierre de Boston Vigne vierge	X	X		Comparaison entre façade verte double peau et façade de référence (Tsext, Rs)	E S O	4	15 16 16.4	
	(Susorova, et al., 2014)	Constantine (Algérie)	FVD Parthenocissus tricuspidata Epr=20cm	X	X		(Ts int-ext, Tf, Tamb, RH, Va, Rs, Q). Été (4 jours)	S	13.1	0.7	2
	(Benhalilou, 2009)	Constantine (Algérie)	FVD Vigne vierge	X	X		(Tint, Tsint-ext, Tamb, HR, Va, Rs, Q)	N E S O			12.6
				X	X		(Tint, Ts int-ext, Tf, Text, HR, Va)	SO	4.4	6.3	4.2
	Continental										
Semi aride											

II. Etudes numériques : Modélisation des façades végétalisées

Ayant des paramètres très variables, les plantes sont des êtres vivants qui répondent d'une manière très complexe aux conditions environnementales, ce qui n'est pas simple à prévoir et qui constitue aujourd'hui un champ ouvert pour la recherche. Les premières tentatives d'inclure les plantes dans les simulations de bâtiments se sont contentées de leurs effets d'ombrage à travers l'atténuation du rayonnement solaire atteignant le mur ou leurs effets sur le microclimat. Sachant que, l'effet de rafraîchissement des plantes est causé également par la transpiration des feuilles, dont la quantification n'est pas simple.

Quelques contributions à la modélisation thermique des façades vertes ont été publiées au cours des dernières années. Parmi les approches utilisées dans ce domaine, on compte la modélisation empirique, alors que peu d'études ont été réalisées par modélisation analytique.

Il est à noter que les logiciels disponibles pour la simulation thermique transitoire des bâtiments n'incluent pas un module spécifique pour les enveloppes végétales. Pour cela, un modèle mathématique simulant les performances thermiques et énergétiques de ce genre de parois est indispensable.

Les premières recherches concernant la simulation thermique des effets de la végétation sur la performance énergétique des bâtiments ont ciblé particulièrement les arbres (Huang, et al., 1987) (Mcpherson, et al., 1988) (Laparé, 2013). Cette recherche s'attèlera principalement sur les façades végétalisées.

II.1. Modélisation des façades végétales sous climat subtropical

En Afrique du Sud, (Holm, 1989) a adopté un modèle informatique dynamique, DEROB, simulant l'effet thermique d'une couverture végétale à feuilles caduques et à feuilles persistantes sur les murs extérieurs. Bien que son étude exclue la prise en compte du refroidissement par évaporation, Holm tient compte de tous les autres paramètres pertinents relatifs à l'effet thermique des murs végétalisés et a validé son modèle avec un coefficient de corrélation supérieur à 0,93. Ce modèle de végétation grimpante a été appliqué à de diverses orientations et masses de bâtiment, climats et saisons. Par conséquent, l'effet thermique bénéfique le plus prononcé est obtenu par les murs verts de faible masse orientés nord sous un climat chaud. En effet, une amélioration thermique significative des conditions intérieures estivales a été enregistrée d'où une réduction de

près de 5°C de température comparé à un mur nu. Au delà d'une épaisseur de 200 mm, les plantes sélectionnées ont tendance à avoir les mêmes propriétés optiques et thermiques.

Dans le but de définir le comportement thermique des parois couvertes de lierre dans les conditions subtropicales de Hong Kong, un modèle mathématique intégré à un programme CFD a été, alors, simplifié par (Zaiyi & Niu, 1999) (figure II.18).

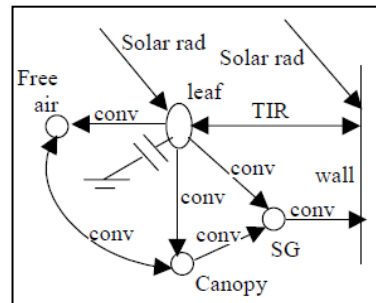


Figure II. 18 : Modèle du mur végétal

(Zaiyi & Niu, 1999)

D'ailleurs, une série d'analyse paramétrique a été effectuée pour identifier les principaux facteurs affectant le potentiel des écrans de lierre. Cette étude considère l'air dans la canopée végétale, l'air dans la cavité de la grille de support et l'air extérieur. Par conséquent, les conclusions de cette recherche mettent l'accent sur l'importance de la densité de feuillage et le rapport de couverture.

En effet, pour un certain niveau de densité verte (d), le flux de chaleur (HF) dépend considérablement de H . Plus la hauteur de la grille (H) est grande, plus le flux de chaleur est élevé, ce qui augmente alternativement la convection thermique de l'air au mur.

Ainsi, lorsque le rapport de couverture (r) est moins de 30%, le flux de chaleur (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. Un mur couvert à 100% a pu réduire les gains solaires jusqu'à 37%. Le lierre transforme plus de 70% de l'énergie solaire absorbée via la photosynthèse, sans augmenter considérablement sa température. 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.

Pour évaluer les effets des murs couverts de grimpants sur la performance thermique d'un bâtiment sous le climat de Tokyo, une simulation a été menée par (Yoshimi & Altan, 2011). Pour cela, un modèle thermique de lierre a été développé en utilisant le logiciel ECOTECT et a été validé par les résultats d'une étude de terrain menée par Nojima, et al (1993). L'étude a porté sur la comparaison de deux bâtiments, l'un étant lourd (béton armé) et l'autre léger (ossature bois) en mesurant les températures intérieures, les gains et les pertes de chaleur et les charges de chauffage et de climatisation.

Les résultats ont montré que le couvert végétal améliore le confort thermique intérieur en été comme en hiver, et réduit les gains et les pertes de chaleur à travers le mur. Cela s'est traduit par une baisse des charges d'énergie annuelles pour le chauffage et la climatisation, avec des effets plus importants dans le cas des bâtiments légers végétalisés (figure II.19).

	Exposed	SW Vegetated	Fully Vegetated
Heating	3366	2466	1946
Cooling	499	383	350
Total	3865	2849	2296
Savings		1016 (26.3%)	2296 (40.6%)

Modèle léger

	Exposed	SW Vegetated	Fully Vegetated
Heating	1746	1519	1353
Cooling	227	202	184
Total	1973	1721	1537
Savings		252 (12.8%)	436 (22.1%)

Modèle lourd

Figure II. 19 : Les charges annuelles d'énergie de chauffage et de climatisation pour les deux bâtiments

(Yoshimi & Altan, 2011)

La couche végétale couvrant la surface Sud ouest a permis une réduction de 0,9°C de la température intérieure maximale du modèle léger durant la journée la plus chaude et une augmentation de 1,7°C de la température minimale pendant le jour le plus froid. Dans le cas du modèle lourd, la température maximale a été réduite de 0,5°C et la température minimale a été augmentée de 0,4°C (figure II.20). Les murs verts orientés sud ouest semblent être les plus efficaces pour diminuer la température ambiante intérieure diurne en été. Par temps froid, le feuillage a augmenté la température minimale des murs orientés nord ouest. En revanche, la végétation peut aussi avoir des effets négatifs tels que l'augmentation des températures intérieures nocturnes en été et entraver le chauffage solaire pendant la journée en hiver.

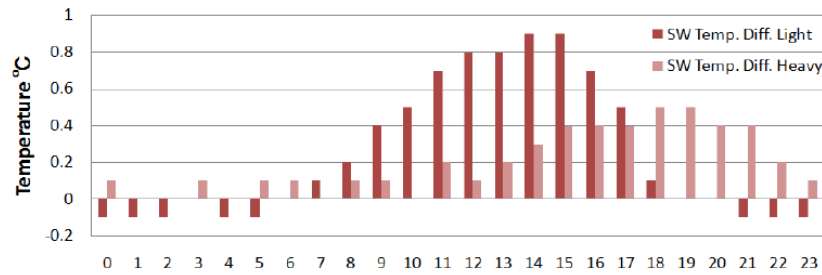


Figure 7

Hourly indoor temperature differences of Zone SW on the hottest day (Lightweight and Heavyweight)

$$T_{\text{exposed}} - T_{\text{vegetated}}$$

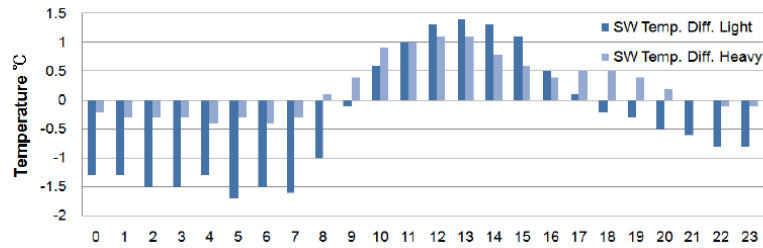


Figure 8

Hourly indoor temperature differences of Zone SW on the coldest day (Lightweight and Heavyweight)

$$T_{\text{exposed}} - T_{\text{vegetated}}$$

Figure II. 20 : les écarts de températures entre le mur végétal et le mur nu

(Yoshimi & Altan, 2011)

Afin d'évaluer la performance thermique des murs vivants, (Kalani, et al., 2017) ont développé un modèle mathématique implémenté dans le logiciel de simulation EnergyPlus et validé par des études expérimentales. Le modèle s'appuie sur le bilan thermique de la couche foliaire et du substrat qui tient compte de l'effet d'ombrage, de l'effet d'isolation et de l'effet d'évapotranspiration créé par le feuillage (figure II.21).

Les résultats de cette recherche montrent que les murs végétalisés peuvent réduire significativement la température de surface des façades de bâtiments, ce qui est bénéfique en période estivale. Une réduction maximale de 26°C de la température de surface extérieure de la façade et une réduction de 3% de la consommation annuelle d'énergie de refroidissement sont obtenues pendant cette période. Toutefois, pendant la saison hivernale, l'effet d'isolation du mur végétalisé provoque une augmentation de la demande de chauffage du bâtiment.

Les simulations suggèrent que les avantages énergétiques passifs des murs végétalisés sont prometteurs pendant les périodes estivales, mais peuvent être désavantageux pendant les périodes hivernales. Cependant, les auteurs estiment que les économies d'énergie pendant la saison estivale peuvent compenser l'augmentation de la

consommation d'énergie de chauffage pendant la saison hivernale tout en produisant un effet d'économie d'énergie.

Par conséquent, vu les avantages énergétiques enregistrés, ce procédé est vivement recommandé en tant que revêtement vert durable dans des climats chauds.

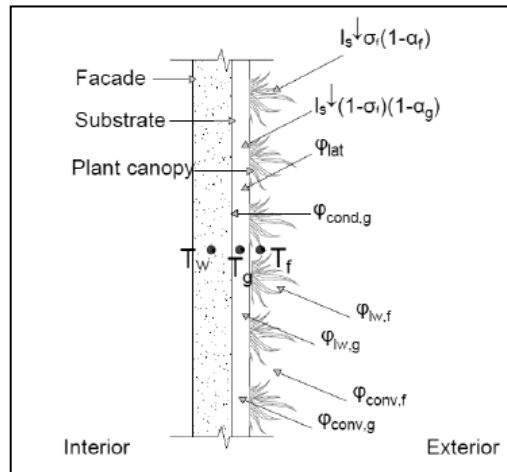


Figure II. 21 : Flux de chaleur à travers la paroi végétale
(Kalani, et al., 2017)

II.2. Modélisation des façades végétales sous climat tropical

Pour modéliser et explorer les effets thermiques des plantes sur les bâtiments dans les conditions tropicales de Singapour, (Yan & Ong, 2001) ont développé un modèle végétal VBFRED-IVY. Ce programme de simulation écrit en Visual Basic est basé sur FRED-AIR et FRED-IVY. Le premier est développé initialement pour étudier les gains solaires passifs dans les bâtiments et le deuxième est développé et écrit en QBasic pour calculer le comportement thermique des plantes grimpantes pour différentes orientations de façades.

En FRED-IVY, les échanges thermiques de la plante ont été calculés dans un sous-programme appelé FOLIAGE à l'aide d'une solution algébrique. Quatre nœuds thermiques primaires ont été considérés: la plante grimpante, l'air à l'intérieur du feuillage, l'air extérieur et le mur qui a été subdivisé en 7 nœuds pour mieux représenter le flux de chaleur (Figure II.22). Le mur est supposé être relié à un espace intérieur maintenu à une température constante à 20°C. Les auteurs considèrent ce modèle de simulation comme

satisfaisant vu le coefficient de corrélation obtenu qui est égale à 0,96. Toutefois, peu de détails concernant les résultats de simulation ont été soulevés dans cette recherche.

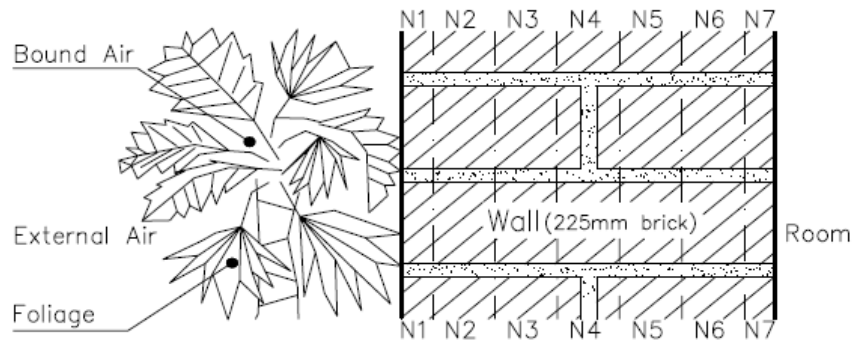


Figure II. 22 : Nœuds thermiques pour un mur végétalisé

(Yan & Ong, 2001)

Wong et al (2009) ont établi une étude comparative de plusieurs scénarios afin de déterminer les effets des murs végétaux sur la température radiante intérieure et la consommation d'énergie. En effet, les chercheurs ont utilisé le logiciel de simulation TAS pour modéliser l'effet d'ombrage d'un bâtiment végétalisé de 10 étages sous le climat tropical de Singapour. L'étude a permis de calculer le coefficient d'ombrage, l'indice de surface foliaire et la valeur de transfert thermique de l'enveloppe (ETTV³).

Les résultats soulignent que les avantages thermiques et la réduction de la charge de climatisation des murs végétaux dans l'environnement tropical sont prometteurs. Ils ont démontré que les plantes recouvrant les façades réduisent significativement la température radiante moyenne intérieure.

Par conséquent, l'étude a démontré que la végétation réduit considérablement le transfert de chaleur par conduction à travers la façade du bâtiment, mais ne réduit que légèrement le transfert de chaleur radiative. Les meilleurs résultats ont été obtenus lorsque la façade vitrée est entièrement couverte, le coefficient d'ombrage de la plante est bas et l'indice de surface foliaire est élevé. Un coefficient d'ombrage bas signifie une végétation plus dense, menant à une plus grande isolation thermique et une meilleure efficacité. Une couverture végétale de 50% et un coefficient d'ombrage de 0.041 permettent de réduire de 40.68% l'ETTV d'un bâtiment vitré.

De plus, cette étude a permis de tracer une corrélation linéaire entre le coefficient d'ombrage et l'indice foliaire (figure II.23). Cela signifie qu'une valeur élevée de cet indice

³ Envelope Thermal Transfer Value

peut se traduire par une faible transmission solaire, d'où des performances thermiques plus élevées pour le bâtiment. L'ombrage produit par les murs verts conduit à une réduction de la température de surface externe et du flux de chaleur entrant qui en résulte à travers l'enveloppe du bâtiment. La plus grande baisse de température a eu lieu dans les parties à végétation dense.

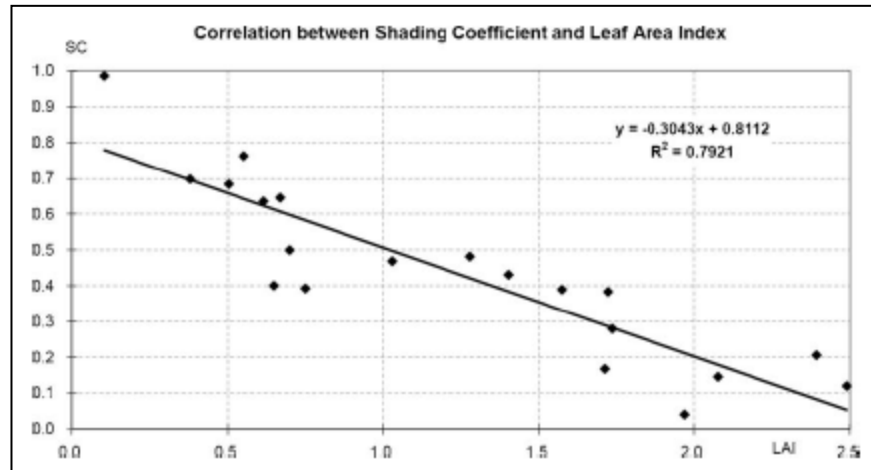


Figure II. 23 : Corrélation entre le coefficient d'ombrage (SC) et l'indice de surface foliaire (LAI)

(Wong et al, 2009)

II.3. Modélisation des façades végétales sous climat océanique

Stec et al (2005) ont développé un modèle de façade verte double peau qui a été validé avec des données expérimentales obtenues dans un laboratoire d'essai. Le modèle proposé est basé sur l'analogie électrothermique⁴ calculée avec le logiciel SimulinkTM, considérant que la chaleur latente dégagée par la plante était proportionnelle au rayonnement absorbé (figure II.24). Ce modèle thermique a permis de comparer l'effet des stores (le dispositif d'ombrage généralement utilisé) et celui des plantes sur la performance thermique d'une façade double peau (figure II.25). Il a été conclu que les plantes grimpances peuvent fournir un effet d'ombrage plus efficace par rapport aux stores. Pour le même rayonnement solaire incident, la température des plantes était à peu près la moitié de celle des stores. La température de surface des plantes ne dépasse pas 35°C, tandis que celle des stores, elle peut atteindre jusqu'à 55°C. Ainsi, environ 20% de la charge de

⁴ Les courants représentent des flux de chaleur, les tensions représentent des températures

rafraîchissement peut être économisée grâce à l'introduction des plantes. L'importance de cet effet dépend surtout de la densité du feuillage.

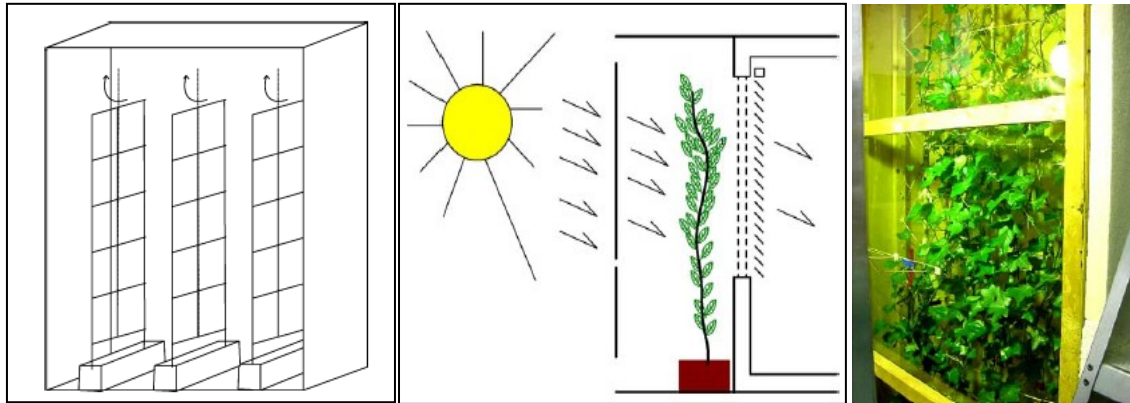


Figure II. 24 : Installation des plantes et des stores dans la cavité de la façade.

(Stec, et al., 2005)

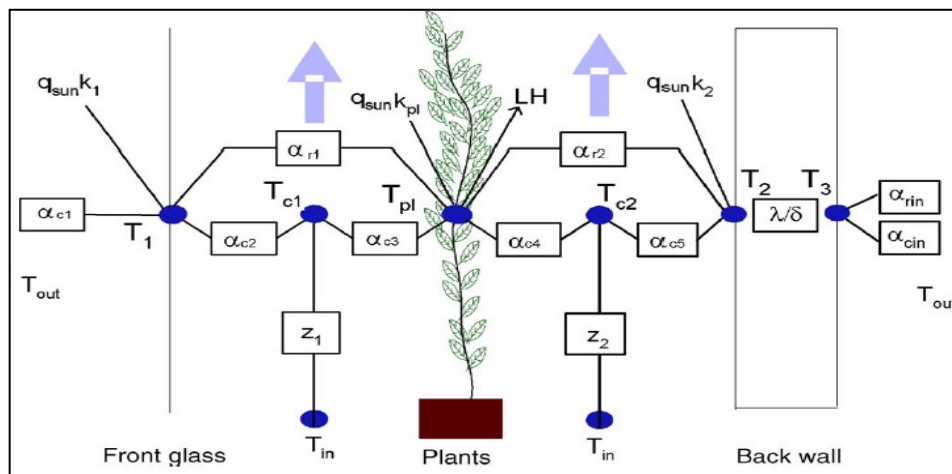


Figure II. 25 : Echanges de chaleur dans la façade verte double peau.

(Stec, et al., 2005)

Djedjig (2013) a développé un modèle physique pour décrire les mécanismes de transferts couplés de chaleur et de masse (hydrique) au sein d'un mur vivant. L'implémentation de ce modèle dans un code de simulation thermique dynamique (TRNSYS) permet de prédire l'impact de la végétalisation sur les performances thermiques et énergétiques des bâtiments. La fiabilité du modèle est vérifiée par comparaisons expérimentales (maquette urbaine à échelle réduite) au cours d'une période d'été (figure II.26). Il est basé sur les principaux flux de chaleur à l'intérieur de la couverture foliaire comprenant le rayonnement de grandes et courtes longueurs d'ondes, le flux de chaleur

sensible et le flux de chaleur latente. Il considère le couvert végétal comme étant une couche semi-transparente au rayonnement solaire et prend en compte l'inertie thermique de la paroi végétalisée.

Les résultats des simulations mettent en évidence les avantages thermiques du mur vert. En effet, la végétalisation des façades Est et Ouest réduit de 50% la charge de climatisation pour un climat océanique (La Rochelle) et de 37% pour un climat méditerranéen (Athènes). De même, la charge de chauffage est réduite de 12% pour le climat océanique et de 9% pour le climat méditerranéen. En termes de confort thermique, il a été montré que la végétalisation atténue de 4°C le pic de la température opérative ce qui améliore le confort thermique d'été. Ainsi, l'analyse des différents mécanismes de transfert montre que l'ombrage du feuillage réduit la variation de la température de surface alors que l'évapotranspiration assure un refroidissement passif lorsque la quantité d'eau disponible est suffisante.

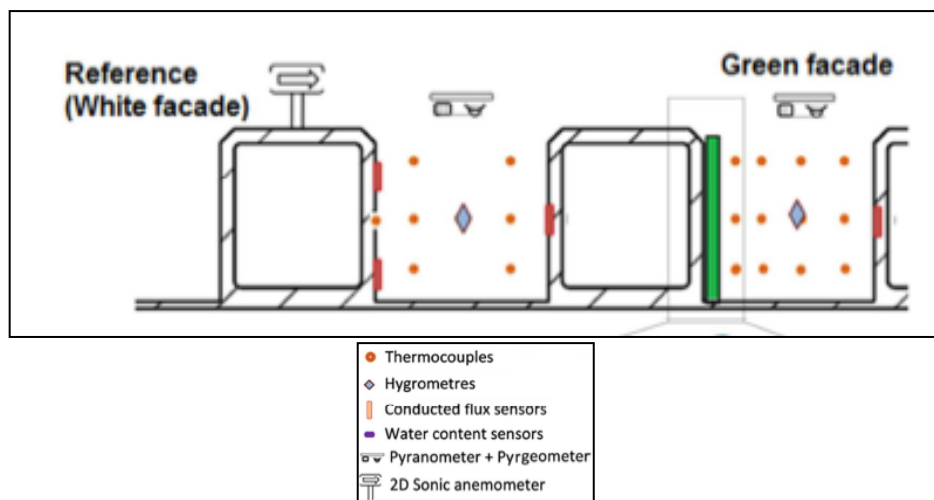


Figure II. 26 : Bâtiment utilisé pour la validation numérique du modèle.

(Djedjig, 2013)

Inspirés du modèle de (Stec, et al., 2005), (Flores Larsen, et al., 2015) ont développé un modèle simplifié pour prédire le comportement thermique d'une façade verte double peau orientée Ouest dans la ville de Salta (Argentine). Le modèle prend en compte le transfert de chaleur radiative entre la façade verte et l'environnement, et fournit une estimation approximative de la température du feuillage et de la résistance thermique équivalente de la façade verte (figure II.27). Il est comparé à un autre modèle d'ombrage

dans le logiciel EnergyPlus qui remplace le mur végétalisé par une couche fictive non opaque, aux propriétés optiques modifiées et à très faible résistance thermique. Il permet ainsi, de calculer les températures et les gains/pertes de chaleur à travers le vitrage. Les auteurs ont démontré que le gain de chaleur d'une fenêtre orientée vers l'ouest est d'environ $6,8 \text{ MJ/m}^2$ par jour et que sa perte de chaleur est de $0,8 \text{ MJ/m}^2$ par jour. Couvrir la fenêtre d'une couche végétale, cela diminuerait le gain de chaleur de la fenêtre à $2,1 \text{ MJ/m}^2$ par jour et la perte de chaleur à $0,5 \text{ MJ/m}^2$ par jour. Par conséquent, les auteurs estiment que le modèle est plus précis dans des conditions humides et pour de faibles vitesses de vent.

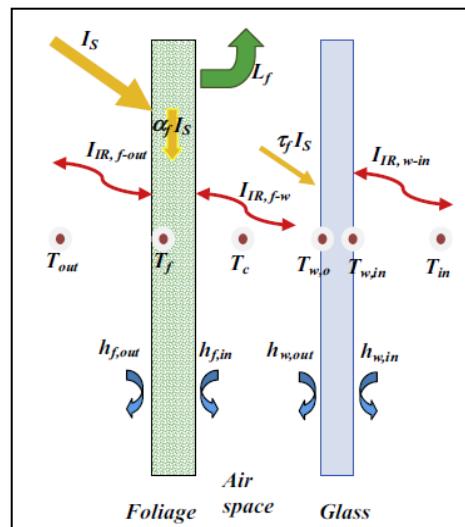


Figure II. 27 : Echanges de chaleur entre les différentes couches de la façade verte double peau.

(Flores Larsen, et al., 2015)

Afin de tester l'incidence thermique des murs végétalisés sous un climat tempéré, (Kenai, 2016) a développé un premier modèle basé sur des équations de bilan des échanges thermiques entre la paroi à occultation variable et son environnement. Ce modèle confronté aux résultats fournis par l'expérimentation a permis de valider les approches théoriques au niveau des transferts radiatifs et convectifs (figure II.28). Par la suite, il a été adapté à une occultation végétale (lierre ou vigne vierge) puis validé expérimentalement et implémenté dans un code de simulation thermique dynamique (TRNSYS).

Les résultats des simulations confirment l'intérêt thermique positif des murs végétalisés en période estivale à travers les réductions significatives des variations des températures de surfaces et de la consommation énergétique. Des écarts de températures allant jusqu'à $37,5^\circ\text{C}$ et une baisse de la demande énergétique allant jusqu'à $80,6\%$ ont été

enregistrés comparativement à une maison non végétalisée. Les végétaux ont ainsi permis une augmentation de la résistance thermique globale des parois en béton cellulaire. En revanche, la présence des plantes à feuilles persistantes a un impact négatif sur la demande énergétique hivernale.

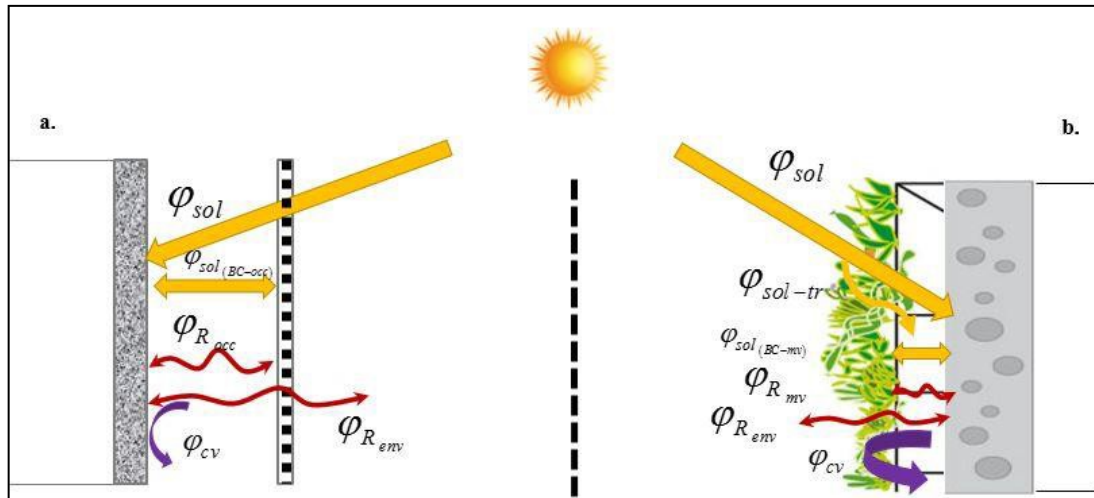


Figure II. 28 : Eléments du bilan énergétique des occultations artificielle et végétale
(Kenai, 2016)

Suklje et al (2006) ont élaboré une analyse paramétrique concernant la réponse thermique des façades végétalisées. Le modèle mathématique validé suppose un transfert de chaleur unidimensionnel, en tenant compte des propriétés des façades végétales déterminées expérimentalement à savoir la transmittivité et la densité du feuillage (figure II.29). En se basant sur la comparaison des températures de l'air et des températures de surface de la canopée verte, les auteurs ont supposé que cette dernière pourrait être modélisée comme une couche homogène imperméable sans résistance thermique. Ainsi, la capacité thermique de la façade végétalisée à une et deux couches est supposée être égale à une couche d'eau de 2 mm et à une couche d'eau de 4 mm d'épaisseur, respectivement.

Il a été constaté que la façade végétale constitue un procédé de rafraîchissement efficace pour les bâtiments moins isolés. Les pics de flux de chaleur à la surface intérieure des façades végétales peuvent être réduits de 77%.

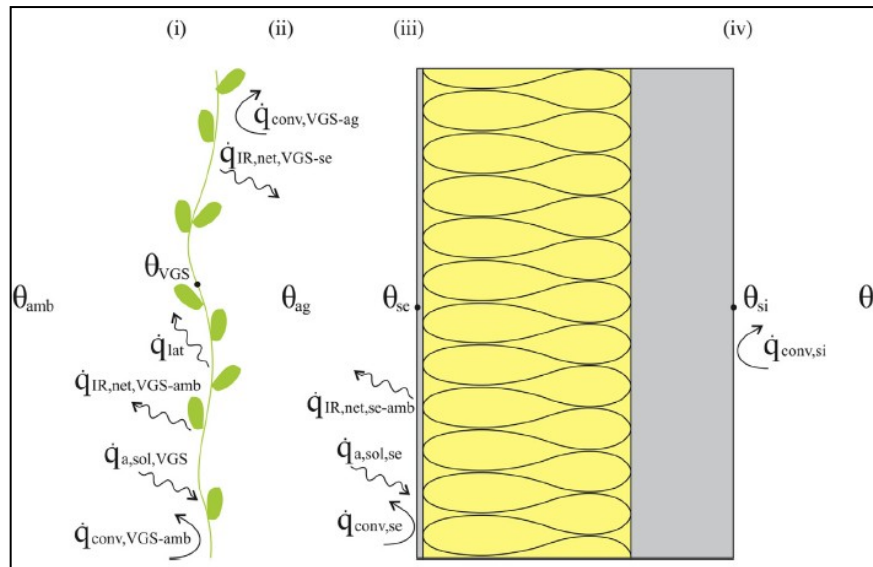


Figure II. 29 : Les processus de transfert de chaleur à travers une façade végétale.

(Suklje, et al., 2016)

II.4. Modélisation des façades végétales sous climat méditerranéen

Kontoleon & Eumorfopoulou (2010) ont mis au point un modèle de mur vert afin de tester le comportement thermique d'une façade verte traditionnelle en Grèce. Ce modèle de réseau thermique simule les mécanismes combinés de conduction, de convection et de rayonnement à travers l'enveloppe du bâtiment (modèle du mur), et le feuillage (modèle du feuillage). C'est une démarche analogue à celle utilisée dans les lois électriques où les courants correspondent à des températures et à des flux de chaleur en considérant la surface extérieure avec une couche d'absorption semblable à une couverture de feuille (figure II.30). De plus, les interactions entre le rayonnement solaire incident à courtes longueurs d'ondes et la végétation ont été grandement simplifiées. Toutefois, l'évapotranspiration n'a pas été abordée dans cette recherche.

La couche verte été divisée en plusieurs espaces d'air ventilés d'environ 5cm de largeur (modèle multicouche), chacun d'eux ayant un taux de renouvellement d'air différent, et les équations obtenues ont été résolues numériquement. La modélisation de cette couche prend en compte la masse thermique du feuillage de la plante recouvrant le mur. Plus précisément, l'étude a examiné l'influence de l'orientation de la couverture foliaire sur le comportement thermique des bâtiments. Le modèle a été validé par les résultats expérimentaux où plusieurs paramètres ont été mesurés à savoir : les températures extérieures et intérieures de l'air ambiant, la température superficielle de la végétation, la

température de surface de la façade, la température de surface intérieure de la pièce et les économies de la charge de climatisation.

Enfin, les résultats ont montré que l'utilisation de la végétation sur les murs mal orientés en climat méditerranéen peut compenser leur mauvaise conception et réduire efficacement les besoins des charges de climatisation. Les températures de surface les plus faibles ont été enregistrées pour la façade verte. L'écart de température était particulièrement important dans les façades Ouest et Est (16.85°C - 10.53°C) comparé aux façades Sud et Nord (6.46°C - 1.73°C) respectivement. Environ 20 % de l'énergie solaire était réfléchi tandis que les 80 % restants étaient considérés comme absorbés et dissipés par le mécanisme biologique de la plante.

De plus, l'utilisation d'une couche foliaire sur le mur orienté au nord provoque une diminution moyenne de 4,6% des besoins énergétiques, comparé à 7,6% pour le mur sud, 18,2% pour le mur orienté Est et à 20,1% pour le mur orienté à l'ouest.

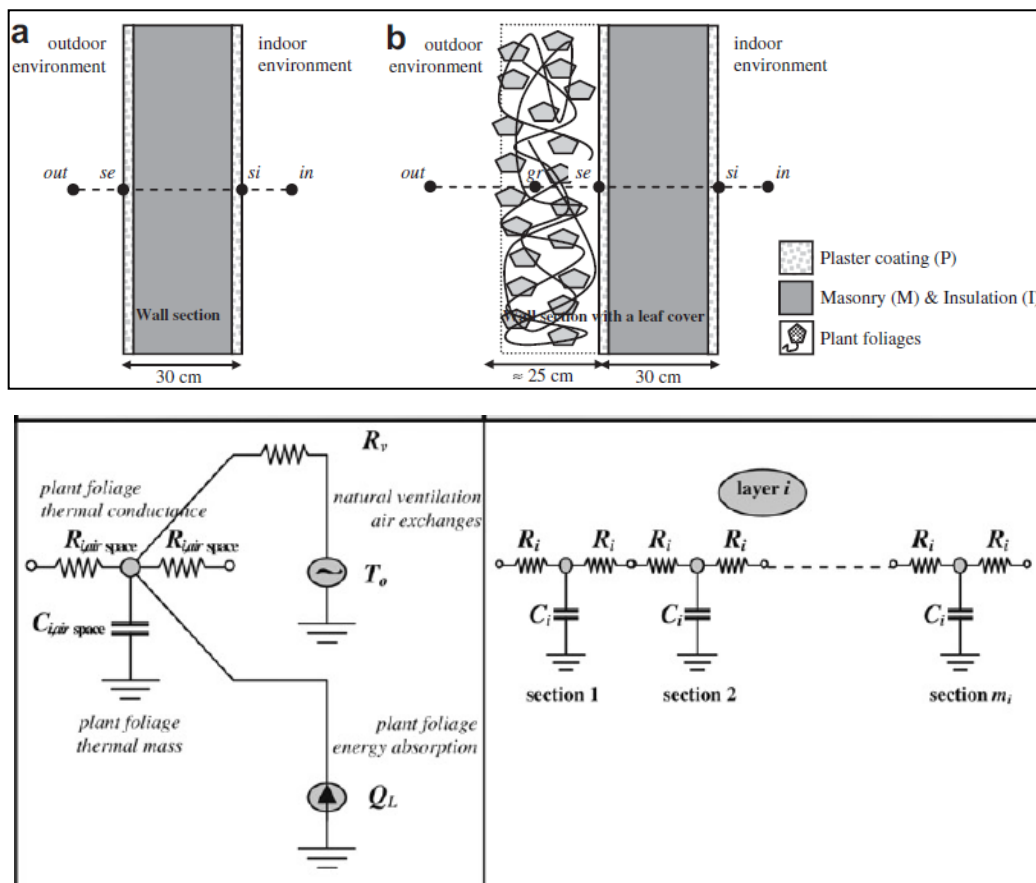


Figure II. 30 : Modèles du mur nu et du mur végétal.

(Kontoleon & Eumorfopoulou, 2010)

II.5. Modélisation des façades végétales sous climat continental

Un modèle similaire à celui de (Kontoleon & Eumorfopoulou, 2010) a été proposé par (Susorova, 2013). Ce modèle établi sous Excel et implémenté dans ECOTECT a été vérifié à l'aide d'un ensemble d'expériences menées dans un bâtiment éducatif à Chicago, en Illinois pour des journées ensoleillées. Il permet d'analyser l'effet des paramètres physiologiques des plantes tels que l'indice de surface foliaire, la dimension moyenne des feuilles et l'absorptivité des feuilles sur l'amélioration de la performance thermique de la façade. Une comparaison entre un mur nu et un mur couvert de plantes grimpantes a été effectuée en prenant en considération l'ensemble des échanges de chaleur (radiatif, convectif et enthalpie latente) (figure II.31).

Les bilans énergétiques sont calculés à l'aide du logiciel R, utilisant de multiples paramètres d'entrée connus ou calculés. Le flux de chaleur latente a été pris en compte avec une relation empirique pour la température de feuillage, sur la base des propriétés végétales disponibles dans la littérature. L'auteur suppose que la température des feuilles est la même que celle de l'air et les paramètres des plantes, y compris l'absorptivité des feuilles, la dimension des feuilles et l'indice de surface foliaire des plantes sont constants.

En conséquence, les résultats montrent qu'une couche végétale ajoutée à la façade peut réduire jusqu'à 13°C sa température de surface et améliorer sa résistance thermique effective de 0,71 W/m².K.

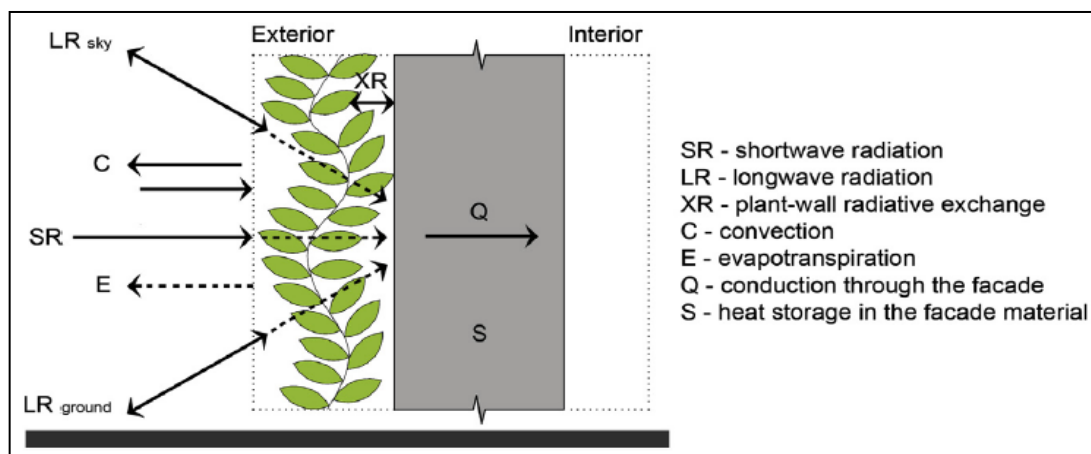


Figure II. 31 : Le modèle développé par

(Susorova, 2013)

Di & Wang (1999) ont développé un modèle mathématique où plusieurs formules relatives au mur de lierre et au mur nu ont été employées afin de calculer les transferts d'énergie dans le système à savoir : le rayonnement GLO, la chaleur latente, et le transfert de chaleur de convection (figure II.32). En outre, les effets de transfert thermique diurne et nocturne ont été considérés pour évaluer l'effet du mur vert sur l'environnement intérieur.

Les résultats ont révélé que le flux de chaleur traversant le mur vert représentait la moitié de celui du mur nu accompagnée d'une baisse sensible de la charge de climatisation estimée à 28% provoquée par l'écran de lierre. D'autre part, 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 GLO à l'environnement.

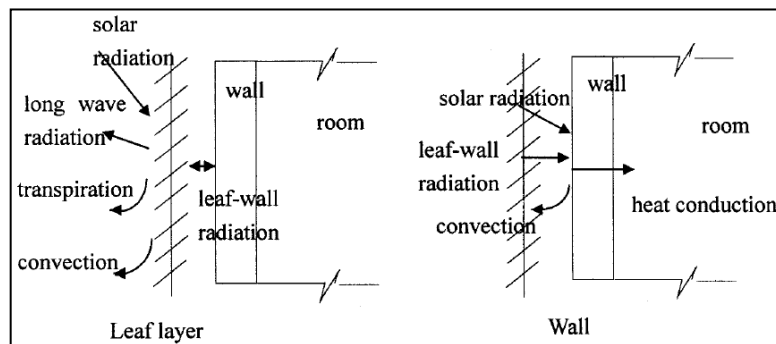


Figure II. 32 : Mécanismes de flux de chaleur à la surface du mur et de la couche végétale

(Di & Wang, 1999)

II.6. Modélisation des façades végétales sous climat désertique

Ganji et al (2013) ont réalisé des simulations à l'aide du logiciel Energyplus dans quatre climats différents de l'Iran, et validées par des mesures expérimentales par caméra infrarouge. Cinq zones thermiques sont considérées : "Mur végétal bas LAI=0.5", $E_{p_f}=10\text{cm}$, "Mur végétal moyen LAI=3", $E_{p_f}=30\text{cm}$, "Mur végétal élevé LAI=5", $E_{p_f}=40\text{cm}$. Aucun scénario d'occupation n'a été considéré (l'activité, le nombre d'occupants, les heures de travail, l'éclairage, la ventilation, etc) afin de simplifier les simulations et de ne déceler que l'effet énergétique des murs verts.

L'écart de température enregistré entre la surface de brique et celle du mur végétal est de $27,3^\circ\text{C}$, dû essentiellement à l'évapotranspiration et à l'effet d'ombrage des plantes.

En termes de réduction de charge de refroidissement, les murs verts à végétation moyenne et très dense sont plus efficaces que l'isolation thermique. La réduction de ces charges dans la zone à paroi verte avec LAI bas, moyen et élevé par rapport à la zone à paroi simple est de 34.74, 46.78 et 55.67% respectivement. En augmentant la densité de la végétation, la réduction des charges énergétiques du bâtiment va augmenter. Plus l'indice de surface foliaire est élevé, plus le rayonnement solaire et les charges de refroidissement seront diminués. L'isolation thermique est toutefois plus efficace pour réduire les charges de chauffage que tous les murs végétalisés (figure II.33).

Bien que le rôle de l'isolation thermique soit toujours fixe et défini, l'impact de la végétalisation des murs sur la réduction de la consommation d'énergie est un élément variable qui dépend du temps nécessaire à la croissance de la plante. Il est très important de considérer le rôle vital de la croissance de la plante.

En raison de l'évapotranspiration et de l'effet d'ombrage des plantes, plus le climat est sec, plus la charge de refroidissement est affectée par la végétation verticale. Ces résultats sont semblables à ceux de (Alexandri & Jones, 2008).

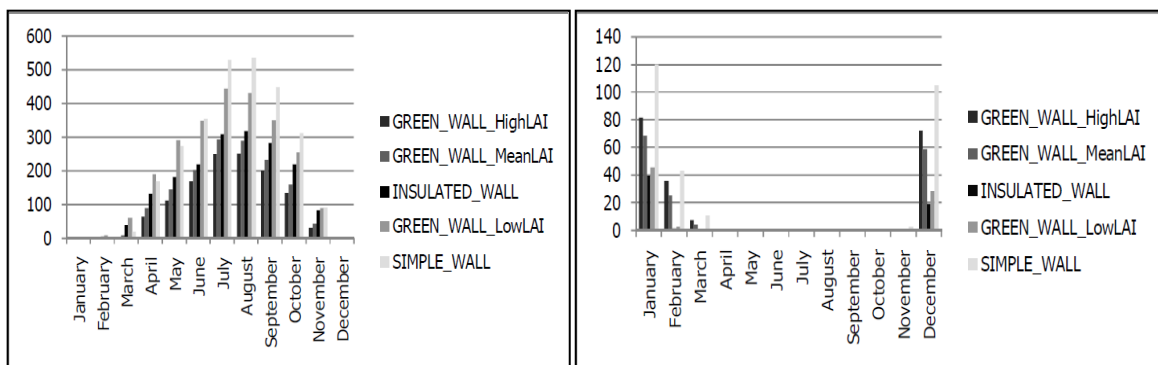


Figure II. 33 : Charges de refroidissement des cinq zones

(Ganji, et al., 2013)

II.7. Synthèse :

La modélisation des parois végétales est très complexe. Cela est dû aux paramètres liés aux caractéristiques de la plante qui sont difficiles à déterminer.

Plusieurs contextes climatiques ont été couverts dans les études numériques à savoir le climat tropical, subtropical, océanique et continental. Les climats méditerranéen et désertique sont peu fréquents avec un manque incontestable de ce genre de travaux en climat semi aride.

Cet aperçu des études de modélisation de parois végétales nous mène à conclure que la plupart d'entre elles sont validées à l'aide de données expérimentales. Et des études très citées de (Alexandri & Jones, 2008), (Wong, et al., 2009) et (Zaiyi & Niu, 1999) ne sont pas du tout validées.

Le rayonnement solaire, le rayonnement infrarouge, le transfert de chaleur par convection et l'évapotranspiration sont les principaux mécanismes de transfert de chaleur à prendre en considération dans la modélisation d'une façade verte. Les modèles de façades végétalisées ainsi utilisés et développés, considèrent ces parois comme étant une seule grande feuille homogène de densité ρ_f , de chaleur spécifique constante $c_{p,f}$, d'épaisseur e_f et d'une surface effective A_f (Di & Wang, 1999), (Yoshimi & Altan, 2011) (Suklje, et al., 2016). Cette surface est la dimension de la surface verticale couverte par les feuilles ayant un échange de chaleur radiative et convective avec l'environnement et qui évapore l'eau de sa surface (le transfert de chaleur par conduction étant insignifiant). Toutefois, (Bonan, 2008) a démontré que le modèle "grande feuille" ne prend pas en compte le flux d'air horizontal à travers la couche végétale. Ces modèles sont donc plus ou moins simples et souvent imprécis donnant l'impression que les façades vertes peuvent être mises en œuvre de façon générique, sans tenir compte de variables comme les tolérances environnementales des plantes et le microclimat.

Le modèle développé par (Kontoleon & Eumorfopoulou, 2010) par exemple, suppose que 80 à 90 % du rayonnement solaire total incident sur un mur végétal serait absorbé par les plantes (pour la photosynthèse, la respiration et l'évapotranspiration) peu importe la saison, les conditions climatiques et les caractéristiques des plantes. De même, le modèle élaboré par (Susorova, et., al 2013) suppose que les paramètres des plantes sont constants et ne varient pas en fonction des changements environnementaux et saisonniers. Ainsi, les espèces végétales utilisées ne sont pas clairement identifiées.

Stec et al (2005) et Wong et al (2009) ont modélisé les murs végétalisés en tenant compte de leur effet d'ombrage uniquement à travers les coefficients d'ombre et l'indice de surface foliaire. D'ailleurs, ces chercheurs considèrent les plantes comme un dispositif d'ombrage conventionnel tel qu'un store ou une fenêtre à double vitrage sans tenir compte de l'effet d'évapotranspiration et des autres effets biophysiques des plantes, ce qui est peu réaliste. A noter que l'évapotranspiration est un effet clé qui doit être pris en compte pour une compréhension plus précise du comportement thermique des façades vertes. D'autre

part, le modèle de (Stec, et al., 2005) s'appuie sur l'absorption du rayonnement solaire par les plantes et les coefficients de réflexion des cultures agricoles.

Le couplage des modèles végétaux analytiques, avec les programmes de simulation énergétique des bâtiments comme ceux proposés par (Djedjig, 2013), (Kenai, 2016) (Kalani, et al., 2017) est plus précis et plus réaliste. Basé sur des hypothèses simples, il offre la possibilité de simuler des environnements de bâtiment complexes et de simuler tous les mécanismes physiques associés. En revanche, peu de modèles considèrent l'effet tampon de la cavité d'air.

Par ailleurs, (Hunter, et al., 2014) précise que la modélisation des façades vertes est limitée par l'absence de données empiriques de nombreux paramètres tels que les coefficients de transfert de chaleur par convection propres aux surfaces végétalisées verticales, ce qui rend difficile la modélisation de ce type de parois. Ajouter à cela, dans certains cas, les paramètres d'entrée et de sortie des modèles ne sont pas clairement distingués, et les hypothèses des modèles ne sont pas toujours identifiées.

La figure II.34 résume les résultats des différentes recherches concernant les diminutions des charges de climatisation des bâtiments dues à l'effet des murs végétalisés.

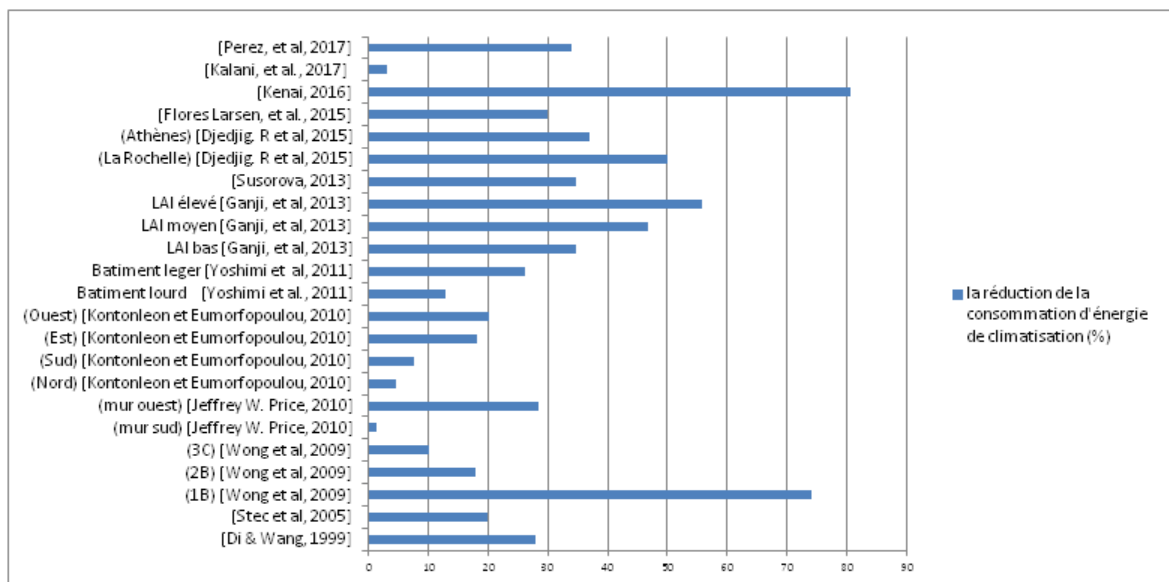


Figure II. 34 : Diminutions des charges de climatisation des bâtiments sous l'effet de la végétation (Auteur)

Le tableau ci-dessous synthétise les modèles de parois végétalisées disponibles dans la littérature.

Tableau II. 2 : Récapitulatif des modèles analysés

Climat	Auteur Année	Lieu Climat (Koppen)	Type de mur vert / plante	Logiciel utilisé	Comparaison	Effet d'isolation	Effet d'évapotranspiration	Effet d'ombrage	Orientation	DT _{in} (°C)	DT _s (°C)	Economies d'énergie de refroidissement (%)	Validation expérimentale	Détails du modèle et/ou hypothèses
Subtropical	(Holm, 1989)	Pretoria (Afrique du Sud) "Cwa"	Façade végétale traditionnelle (vigne)	Modèle thermique dynamique DEROB	bâtiment léger bâtiment lourd	X O	X		N 2-5 O 1-4 N 1 O 1				X	Les propriétés des plantes n'ont pas été considérées
	(Zayzi, et al., 2000)	Hong Kong "Cwa"	Façade végétale traditionnelle (lierre)	Modèle mathématique intégré à un programme CFD		X	X							
	(Yoshimi, et al., 2011)	Tokyo (Japon) "Cha"	Façade végétale traditionnelle (lierre)	ECOTECT	bâtiment léger bâtiment lourd	SO NO				0.9		26.3 12.8	X	Les plantes consistaient en plusieurs composants tels que des feuilles, des tiges ligneuses, lame d'air et de vapeur d'eau qui est semblable au lierre
	(Kalani, et al., 2017)	Hong Kong "Cwa"	Mur vivant	Energy plus		X	X	X			26	3	X	
Tropical	(Yan, et al., 2001)	Singapour "Af"	Façade verte traditionnelle	FRED-IWY									X	
	(Wong, et al., 2009)	Singapour "Af"	Façade verte traditionnelle	TAS	BI 100% vég BI 50% vitré 50% vég BI 100% vitré 100% vég	X				8.73 0.58 2.53		74.2 10.5 17.9		
Continental	(Susorova, et al., 2013)	Chicago (USA) "Dfa"	Façade végétale traditionnelle Lierre Vigne vierge	Modèle mathématique+ ECOTECT		X	X		S		13	34.6	X	Plusieurs paramètres pris en compte sur la base des propriétés végétales disponibles dans la littérature
Continental humide	(Di & Wang, 1999)	Chine (Pekin) "Dwa"	FVD Lierre E _{pv} = 10cm	Modèle mathématique		X	X		O		16	28	X	Température de feuille uniforme le lierre a une capacité thermique négligeable

Climat	Auteur	Lieu	Type de mur vert/plante	Logiciel utilisé	Comparaison	Effet d'ombrage	Effet d'évapotranspiration	Effet d'isolation	Orientation	DTint DTs (°C)	DTint DTs (°C)	Economies d'énergie de refroidissement (%)	Validation expérimentale	Détails du modèle/hypothèse
Océanique	(Sec, et al., 2005)	Pays bas "CFB"	Façade verte double peau	Simulink	Hedera helix Stores	X	X	X		20	20	20	Mesures labo	Modèle basé sur l'analogie électrothermique
	(Djedjig, 2013)	La Rochelle (France) "CFB"	Mur vivant	TRNSYS		X	X	X	E, O	1.5	50	37	X	
	(Flores Larsen, et al., 2015)	Salta (Argentine) "CWB"	Façade verte double peau	Energy plus		X	X	X	O	1.3	30	X	X	
	(K enai, 2016)	Lille (France) "CFB"	Façade végétale traditionnelle	TRNSYS		X	X	X		37.5	80.6	X	X	Le modèle considère le couvent comme une couche transparente rayonnement solaire. Prise en compte de l'inertie thermique de la paroi végétalisée.
Méditerranéen	(Suklje, et al., 2016)	Ljubljana, (Slovenie) "CFB"	Façade végétale traditionnelle	Modèle mathématique		X	X	X	S	29	X	X	X	Le modèle fournit une estimation approximative de la température plante et de la résistance thermique équivalente de la façade.
	(Kontoleon, et al., 2010)	(Grèce)	Façade végétale traditionnelle	Modèle de réseau thermique		X	X	X	N	1.73	4.65	X	X	Les flux verticaux de chaleur et d'humidité sont proportionnels aux différences verticales de température et d'humidité dans la canopée végétale.
Désertique	(G anji, et al., 2013)	(Iran) Yazd "Bwh"	Façade végétale traditionnelle	Energy plus	Façade végétale avec isolation (ep=2.5qm)	X	X	X	S	27.3	3474	X	X	
		Bandarabbas Tabriz "Bsk" Rasht "Cfa"	LAI=0.5 LAI=3 LAI=5		Façade de référence					10.5	18.17	55.67		

Conclusion

Cette revue de la littérature ayant trait à la performance thermique des façades végétales montre que ces recherches ont tendance à se concentrer sur les températures de surface internes et externes des murs, les températures ambiantes, les flux de chaleur entrants et sortants et la conservation de l'énergie associée. Elles couvrent différentes zones climatiques, allant des régions tempérées aux régions méditerranéennes et tropicales avec un manque incontestable des travaux similaires dans les climats semi-arides. Elles incluent des études expérimentales et numériques impliquant principalement des façades végétales et des murs vivants, l'accent étant mis sur la saison chaude.

Bien que les résultats expérimentaux obtenus varient d'une étude à l'autre, la quasi-totalité des recherches confirment les effets thermiques positifs des murs végétalisés. Ces études ont fait état de réductions sensibles de températures de l'air et de surfaces en période estivale. L'écran végétal réduit le flux de chaleur entrant au bâtiment ce qui améliore sensiblement le confort à l'intérieur du bâtiment. Ces performances thermiques peuvent varier en fonction du climat sous lequel ils sont implantés. Elles sont aussi liées à un ensemble de paramètres comprenant la densité, le rapport de couverture, la typologie végétale et la distance de décalage par rapport à la façade.

Ainsi, les murs végétalisés obéissent fondamentalement à quatre mécanismes fondamentaux lorsqu'ils sont utilisés comme système de rafraîchissement passif. Ces mécanismes sont l'interception et l'absorption du rayonnement solaire par l'effet de l'ombre produite par la végétation, l'isolation thermique fournie par la végétation, le substrat et la cavité d'air, le refroidissement par évaporation qui se produit par évapotranspiration des plantes et du substrat, et enfin, par la variation de l'effet du vent sur le bâtiment.

D'autre part, la modélisation des effets des murs végétalisés sur le bâtiment a fait l'objet de bon nombre d'études à partir des années quatre vingt. Mais elles restent limitées comparées à celles des toits verts. Pour les logiciels conçus pour la simulation thermique transitoire des bâtiments, il n'existe pas encore de fonctionnalité permettant d'intégrer le mur végétalisé. Par conséquent, des modèles mathématiques sont nécessaires pour présenter les performances thermiques et énergétiques de telles parois.

Toutefois, la plupart des recherches ayant abordé la simulation des murs verts confirment les difficultés rencontrées quant à la détermination des propriétés de la plante. Ainsi, la propagation de la chaleur à travers une couverture végétale est très complexe et

multiforme. Sachant que les processus de transfert de chaleur à travers une façade végétale diffèrent de ceux rencontrés dans le cas d'un mur vivant à cause de la présence du substrat.

Par ailleurs, les modèles développés dans la littérature diffèrent selon les hypothèses et l'approche de modélisation. Pour la plupart d'entre eux, il s'agit d'établir un bilan énergétique pour chaque composant de la paroi végétalisée représentant la végétation et le substrat (pour les murs vivants). Un composant important est souvent négligé, il s'agit de la cavité d'air. Elle est soit considérée comme un mélange d'air à proportions constantes aux températures du feuillage, du substrat et de l'air ambiant ou carrément comme une couche quasi-stationnaire.

Suite à cette analyse documentaire plus ou moins exhaustive, il est nécessaire de développer des modèles capables d'évaluer le comportement thermique de la cavité d'air sous diverses configurations ; ce qui fera l'objet du prochain chapitre.

CHAPITRE -III-

TRANSFERTS THERMIQUES A

L'ECHELLE

DE LA FAÇADE VEGETALE :

PRESENTATION DU MODELE

Introduction

Les recherches antérieures revues dans le chapitre précédent supposent que la modélisation des façades végétalisées requiert l'élaboration d'un modèle numérique de paroi végétale avec un support d'aide à la décision. L'objectif principal du présent chapitre est de développer un modèle mathématique pour le calcul du bilan thermique et énergétique qui représente au mieux la paroi végétalisée où différentes formules sont utilisées.

Dans un premier temps, ce chapitre fournit une description plus ou moins exhaustive des caractéristiques de la végétation et des principaux phénomènes de transfert de chaleur y afférents. Ensuite, un modèle développé dans le cadre de ce travail reproduisant les interactions entre les phénomènes thermiques et physiques que le bâtiment et la paroi végétale entretiennent avec l'environnement est établi et détaillé tels que les paramètres radiatifs, les échanges thermiques infrarouges, ...etc.

I. Interactions de la végétation avec le bâtiment

Avant d'introduire le modèle théorique de la paroi végétalisée développé, il est nécessaire de mettre en lumière les différents paramètres et phénomènes de transfert thermique intervenant dans le bilan énergétique à l'échelle de la façade végétale et du bâtiment.

1. Caractéristiques du rayonnement solaire intercepté par la paroi végétale

Tous les corps quelque soit leur état : solide, liquide ou gazeux, émettent, d'une façon continue, le 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 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 net est donc obtenu à partir du bilan radiatif de la surface exposée. Il est généralement décomposé suivant deux bandes spectrales ; rayonnement du type "onde courte" alors que celui des objets terrestres est du type "onde longue". La longueur de ces ondes est exprimée en nanomètres (μm) :

- Les échanges de courtes longueurs d'onde (CLO): 0.4 – 4 μm visible (VIS), proche infrarouge (PIR) et moyen infrarouge (MIR), où l'éclairement solaire est prépondérant.
- Les échanges de longues longueurs d'onde (GLO): 3–100 μm infrarouge (IR). Tous les corps sont caractérisés par leur température et leur émissivité. ils émettent sur l'ensemble du spectre, un rayonnement thermique qui suit la loi de Stephan-Boltzman (Belot, 2007) (Jones & Rotenberg, 2001).

1.1. Propriétés spectrales des feuilles

L'interception du rayonnement solaire est le principal moteur de fonctionnement foliaire (Belot, 2007). La composition spectrale des rayonnements solaires dans le domaine végétal dépend des propriétés optiques des feuilles. Les plantes sont sensibles au même spectre de longueurs d'ondes perçu par les humains pour accomplir les fonctions biologiques. D'après (Djedjig, 2013), les feuilles sont semi-transparentes au rayonnement de courtes longueurs d'onde. L'absorptivité des feuilles est élevée dans les longueurs d'onde visibles ou photosynthétiquement actives. Elles absorbent le bleu (445 à 500 nm) et le rouge (620 à 700 nm). Quant à la réflectivité et la transmissivité, elles sont importantes dans le domaine du rouge et proche infrarouge (PIR) (Bonhomme, 1994). Ainsi, les plantes peuvent être traitées comme des éléments opaques dans le domaine infrarouge. Elles reflètent le vert (500 à 575 nm) d'où la couleur verte des plantes (figure III.1) (Tousignant & Delorme, 2006). Les propriétés optiques des feuilles varient en fonction du stress hydrique et de l'âge des feuilles. Elles prennent la couleur jaune lorsque la chlorophylle diminue (Malys, 2009).

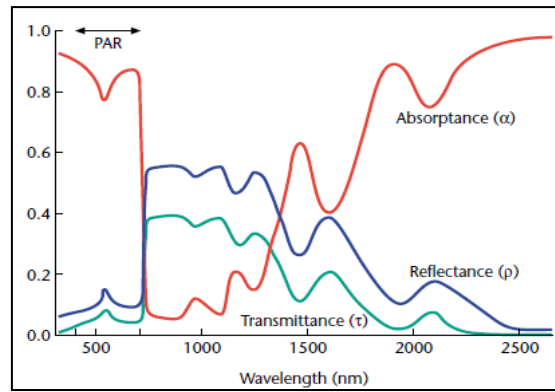


Figure III. 1 : Propriétés spectrales des plantes sur les longueurs d'onde du visible et du proche infrarouge

(Jones & Rotenberg, 2001)

1.2. Répartition de l'énergie incidente

Le rayonnement solaire total atteignant un mur vert dépend des caractéristiques physiques de la couverture végétale. Une partie $\phi_\lambda \rho_{\lambda T}$ de l'énergie incidente est réfléchi dans l'atmosphère, une autre partie $\phi_\lambda \alpha_{\lambda T}$ est absorbée par le feuillage qui s'échauffe et le reste $\phi_\lambda \tau_{\lambda T}$ est transmis par les feuilles et continue son chemin (Jannot, 2002). Quand un rayon incident d'énergie ϕ_λ frappe un corps à la température T, on a :

$$\phi_\lambda = \phi_\lambda \rho_{\lambda T} + \phi_\lambda \alpha_{\lambda T} + \phi_\lambda \tau_{\lambda T} \quad (1)$$

d'où : $\rho_{\lambda T} + \alpha_{\lambda T} + \tau_{\lambda T} = 1$

1.2.1. Le flux solaire réfléchi

Il dépend du facteur de réflexion solaire de la surface ou du matériau de la paroi, et de son albédo. 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 incidente (Mazria, 1980).

1.2.2. Le flux solaire transmis

La capacité d'un matériau opaque à absorber le rayonnement solaire est caractérisée par ses propriétés de surface : le coefficient d'absorption et la réflectivité. Dans le cas des matériaux semi-transparents, une partie de l'énergie solaire peut être transmise à travers un corps caractérisée par le coefficient de transmission qui est égal à 1 pour un corps totalement transparent et 0 pour une surface opaque (Kenai, 2016). Dans le cas de la paroi

végétalisée, le flux de chaleur transmis à l'intérieur du bâtiment diminue en présence de la végétation.

1.2.3. Le flux solaire absorbé

Le rayonnement solaire absorbé correspond au rayonnement incident auquel on retire ce qui réfléchi et transmis à travers la végétation et auquel on ajoute la réflexion primaire sur le sol. Le rayonnement solaire absorbé par la paroi se transforme en chaleur et élève la température de surface de la paroi dépendant du facteur d'absorption solaire de cette surface.

1.3. Bilan d'énergie

Selon (Jannot, 2002), le principe de la thermodynamique pour établir le bilan d'énergie d'un système repose sur la comptabilisation des énergies reçues, cédées et stockées par le système considéré selon la formule suivante :

$$\phi_e + \phi_g = \phi_s + \phi_{st} \quad (2)$$

ϕ_{st} : flux de chaleur stocké

ϕ_g : flux de chaleur généré

ϕ_e : flux de chaleur entrant

ϕ_s : flux de chaleur sortant

2. Phénomènes physiques à l'échelle de la paroi végétale

Les parois végétales sont le siège d'importants transferts d'énergie et de masse relativement complexes qui sont de types radiatif, convectif, conductif et de changements de phase. Le bilan énergétique se traduit par la contribution des termes énergétiques des radiations solaires émises et absorbées (grandes et courtes longueurs d'ondes), de chaleur latente, de chaleur sensible.

Ouldboukhitine (2012) explique les principaux flux de chaleur qui interviennent dans les équations de bilan énergétique au niveau de la toiture végétalisée qui sont les mêmes que ceux pour la façade végétale (Figure III.2) :

- Le flux du rayonnement solaire global incident (rayonnement de courtes longueurs d'ondes) qui est la somme de deux composantes : le rayonnement solaire direct et le rayonnement solaire diffus.

- Le flux du rayonnement thermique infrarouge incident (rayonnement de grandes longueurs d'ondes) issu de la voûte céleste.
- Le flux issu des rayonnements de courtes longueurs d'onde qui est réfléchi par la surface de la façade végétalisée.
- Le flux issu du rayonnement de grandes longueurs d'onde réémis par la façade.
- Le flux de chaleur perdu par convection (flux de chaleur sensible).
- Le flux de chaleur latente issu du phénomène d'évapotranspiration.
- Le flux de chaleur par conduction avec le bâtiment (positif ou négatif).

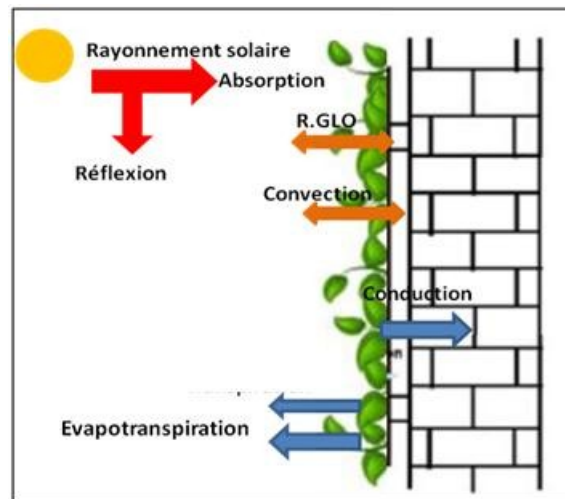


Figure III. 2 : Phénomènes physiques mis en jeu dans une paroi végétale

(Kontoleon, et al., 2010) (Ottelé, 2011) (Tilley, et al., 2012) apportent plus de détails concernant les phénomènes engendrés lors des transferts à l'échelle de la façade végétale et à l'échelle du bâtiment. Ils estiment que le rayonnement solaire total incident sur une paroi végétale dépend des caractéristiques physiques de la couverture végétale. Il est réfléchi dans l'atmosphère, absorbé par la canopée ou transmis par les feuilles.

En effet, environ 80 à 90% de la radiation de courtes longueurs d'ondes qui affectent la surface de la paroi végétale sont absorbés par les plantes pour leur croissance et leurs fonctions biologiques, alors que seulement 15% sont réfléchis. Cela est dû principalement à la photosynthèse, au cours de laquelle environ 682 kcal sont nécessaires pour la production de particules de glucose; à l'évaporation, au cours de laquelle environ 530 kcal sont utilisés pour chaque litre d'eau; à la transpiration et à la respiration. La partie restante du rayonnement solaire (5 à 30%) est transmise à travers les feuilles et affecte l'ambiance du bâtiment par effet de convection, de rayonnement et de conduction (figure

III.3). Surtout dans les zones urbaines denses et pavées, l'évapotranspiration et l'ombrage des plantes peuvent réduire considérablement la quantité de chaleur qui serait rayonnée par les façades et autres surfaces dures.

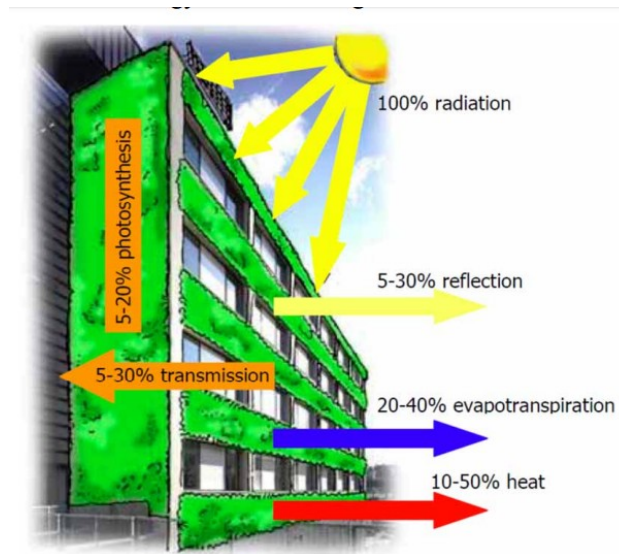


Figure III. 3 : Interactions bâti/végétation

(Ottelé, 2011)

3. Grandeurs du transfert thermique

La chaleur est une forme de transmission d'énergie. Tout objet peut transmettre ou recevoir de l'énergie sous forme de chaleur. Il en existe deux formes:

3.1. La chaleur sensible :

La chaleur sensible représente le changement de température sans changement d'état de la matière. Pour exprimer la capacité d'absorption de chaleur par un matériau, on définit sa chaleur massique, qui représente la quantité de chaleur absorbée ou fournie par une unité de masse qui s'élève ou s'abaisse de 1°C. Elle est proportionnelle à la quantité de la matière et à la différence de température (ΔT) (Lavigne & al, 1994).

Pour les plantes, la chaleur sensible représente l'énergie transférée entre la surface des feuilles et l'atmosphère. Le transfert de chaleur sensible au niveau de la paroi végétale est fonction du coefficient de transfert de chaleur convective de cette dernière et de la différence de température entre l'air extérieur et la couche végétale.

Si la température de la surface est plus importante que celle de l'atmosphère, un flux d'énergie se produit vers l'environnement par convection. La chaleur stockée dans les

matériaux est généralement libérée dans l'air ambiant pendant la nuit sous forme de chaleur sensible (Azos Diaz, 2011).

3.2. La chaleur latente

La chaleur latente concerne les changements d'état de la matière sans variation de température. Elle représente la quantité de chaleur requise pour transformer un gramme de liquide en vapeur, sans changement de température (Chaleur totale = Chaleur sensible + Chaleur latente).

Au niveau de la façade végétalisée, le flux de chaleur latente est plus communément appelé évapotranspiration. Il est régi par les processus de l'évaporation de l'eau à la surface des feuilles mais aussi de la transpiration foliaire (Luquet, 2002) (David & Jennifer, 2005). Ces deux phénomènes sont souvent difficiles à évaluer séparément.

La transpiration est le processus par lequel une plante transporte l'eau du sol à ses feuilles pour la photosynthèse. Ce processus régule la quantité d'eau qui passe de la phase liquide à la phase vapeur, affectant l'équilibre énergétique de la couche des feuilles. En effet, la transpiration est le moteur des flux de sève (Ouldboukhitine, 2012). La résistance impliquée dans les flux de vapeur varie en fonction de la biologie de la plante, de son état physiologique et les conditions atmosphériques. Les flux hydriques dans le système de la paroi végétale jouent donc un rôle important dans les phénomènes d'échange de chaleur, on parle alors d'évapotranspiration.

Le bilan hydrique met en jeu les transferts d'eau sous forme liquide et vapeur, ce qui induit des phénomènes diffusifs (Jones & Rotenberg, 2001). Autrement dit, lorsqu'il y a condensation, une certaine quantité de vapeur d'eau est rejetée à l'air. Les effets thermiques liés au changement de phase de l'eau de l'état vapeur à l'état liquide sont également pris en compte en ajoutant un terme source dans l'équation de l'énergie qui est proportionnel à la masse d'eau condensée (Kontoleon & Eumorfopoulou, 2010).

Cette évapotranspiration permet à la plante la dissipation de l'excès de chaleur à travers les feuilles et varie au cours de l'année en fonction des paramètres liés aux caractéristiques de la végétation et des conditions environnementales (Guyot, 1997).

En effet, (Dimoudi & Nikolopoulou, 2003) affirment que le taux d'évapotranspiration augmente en fonction de la température jusqu'au seuil proche de 25°C (Figure III.4). il est minimal pour des vitesses de vent faibles et plus élevé pour des grandes vitesses de vent lorsque les températures sont supérieures à 25°C, mais plus élevé

pour les petites vitesses lorsque la température est en dessous de 25°C. Lorsque la vitesse du vent augmente, la température des feuilles baisse vers une température proche de celle de l'air. (Jim & Tsang, 2010) rajoutent que les pertes par chaleur latente sont plus importantes lorsque qu'il y a du soleil et peu d'humidité dans l'atmosphère.

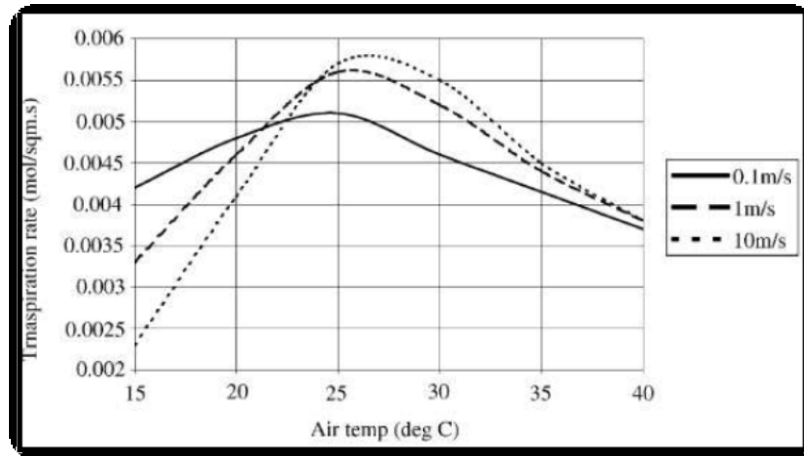


Figure III. 4 : Variation du taux de transpiration des feuilles et des températures de l'air pour différentes vitesses du vent

(Dimoudi & Nikolopoulou, 2003)

4. Modes de transfert de chaleur

Le transfert thermique est un transfert d'énergie irréversible. La paroi végétale échange de la chaleur avec son environnement suivant les trois modes fondamentaux d'échanges :

- Par conduction ;
- Par convection avec l'air environnant ;
- Par rayonnement vers les parois voisines.

4.1. Transfert de chaleur par conduction

La conduction est définie comme la transmission d'énergie calorifique à travers un corps sans déplacement de matière. C'est un phénomène de diffusion qui permet à la chaleur de se propager à l'intérieur d'un corps solide (Marty, 2012).

Ce type d'échange a lieu principalement dans les solides. La conduction s'effectue donc par contact direct et la chaleur se déplace naturellement de l'endroit le plus chaud vers l'endroit le plus froid. Le flux de chaleur traversant une paroi est proportionnel au

gradient de température. Cette proportionnalité est liée à une grandeur thermique intrinsèque propre à chaque type de matériau, appelée conductivité thermique.

La quantité de chaleur transmise par conduction est exprimée par la formule suivante :

$$\Phi = -\lambda S \frac{\delta T}{\delta x} \quad (3)$$

Où :

Φ : Flux de chaleur transmis par conduction (W)

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

λ : Conductivité thermique du matériau (W.m⁻¹.K⁻¹)

S : la surface à travers laquelle s'écoule la chaleur (m²)

Dans le cas de la façade végétalisée, la conductivité thermique globale est donnée par la combinaison des conductivités thermiques des différentes couches composant cette paroi (plante, air ou substrat) (Ouldboukhitine, 2012). La végétation peut en effet avoir un effet d'isolation et de stockage thermique. Selon (Hoyano, 1988), le transfert de chaleur peut être réduit d'environ 0,25 kWhm⁻², pour un mur de béton recouvert d'une couche de végétation. La capacité isolante des murs végétalisés dépend également de l'épaisseur du substrat, de la densité du feuillage et des propriétés des couches d'air intermédiaires.

4.2. Transfert de chaleur par convection

La convection est un phénomène se produisant dans un fluide en mouvement, ou entre un fluide en mouvement et un solide. La circulation du fluide ou du gaz peut transporter une certaine quantité d'énergie thermique (Marty, 2012). 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 ou lorsque la vitesse de l'air en contact avec la surface est élevée.

Quelque soit le type de convection (libre ou forcée) et quelque soit le régime d'écoulement du fluide, ce mécanisme de transfert est régi par la loi de NEWTON :

$$\Phi = h S (t_s - t_r) \quad (4)$$

Où :

Φ : Flux de chaleur transmis par convection (W)

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection (W.m⁻².°C)

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

T_r : Température du fluide (°C)

S : Aire de la surface d'échange (m²)

Le coefficient de convection est une fonction complexe de la vitesse du vent, des propriétés du fluide et des caractéristiques de la surface sur laquelle se produit l'écoulement. Les plantes ont pour rôle de limiter les transferts convectifs sur la surface extérieure du mur. (Azos Diaz, 2011) affirme que le flux convectif et le flux par rayonnement font augmenter la transpiration des feuilles à condition que la quantité de flux d'énergie ne dépasse pas le seuil où les stomates se ferment (la structure du stomate est schématisée dans la figure III.5). Il existe cependant, des espèces où les stomates se ferment lorsque le déficit de pression de vapeur est très élevé, faisant augmenter la température des feuilles. Ceci est un système de contrôle qui permet à la plante de modérer les pertes d'eau vers l'atmosphère. Les façades végétales peuvent agir comme pare-vent et cet impact peut dépendre de la densité du feuillage, de l'orientation de la façade, de la direction et de la vitesse du vent.

Kenai (2016) rajoute que, plus le flux de chaleur convectif est important, plus un effet de rafraîchissement est présent et les températures de surfaces seront davantage diminuées. Le flux de chaleur convectif permet de dissiper la quantité de chaleur importante issue des flux radiatifs de CLO. La sousévaluation des flux convectifs donne lieu par conséquent à des températures théoriques supérieures aux températures mesurées.

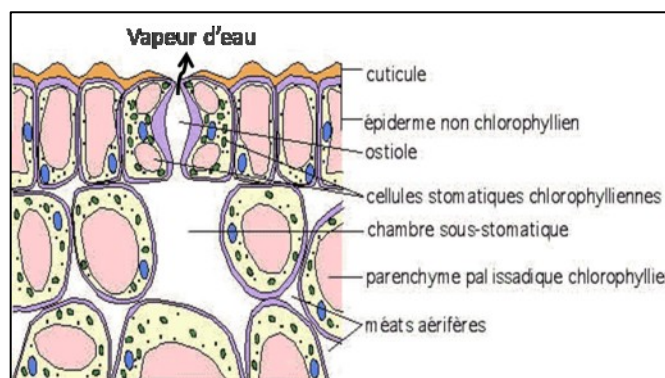


Figure III. 5 : Coupe schématique d'un stomate

(<http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/gaz/stomate.htm>)

4.3. Transfert de chaleur par rayonnement

Le bilan radiatif d'un système est la différence entre le rayonnement incident qu'il absorbe et le rayonnement thermique qu'il émet. L'énergie est transportée par des ondes électromagnétiques, se propage dans toutes les directions, et se transfère à un corps solide en contact avec ce dernier. Le corps absorbe cette énergie, 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.

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.

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 :

$$\Phi = \sigma \varepsilon S (T_{ir}^4 - T_s^4) \quad (5)$$

Φ : Flux de chaleur transmis par rayonnement (W)

σ : Constante de Stephan ($5,67.10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$)

ε : Facteur d'émission de la surface

T_s : Température de la surface (K)

T_{ir} : Température radiante moyenne des surfaces environnantes (K)

S : Aire de la surface d'échange (m^2)

Le transfert de chaleur radiative des parois végétalisées dépend du type de la plante utilisée, notamment de sa couleur, de sa densité et du type de construction et de l'orientation des bâtiments et leur environnement (Susorova, 2013).

5. Les propriétés thermiques et physiques des plantes

5.1. L'indice de surface foliaire (LAI ou F)

La quantité de l'énergie solaire incidente absorbée par les feuilles est proportionnelle à la surface du feuillage recouvrant le mur. La densité foliaire est le plus souvent évaluée à l'aide d'un indice, qui est défini comme une surface totale unilatérale de feuilles projetée sur un plan horizontal. L'indice foliaire est une grandeur sans dimension qui représente une densité surfacique pour caractériser les végétaux et varie selon le type et la quantité de croissance de plantes utilisées. Il varie de 0 pour le sol nu à 8 pour une forêt tempérée dense (Allen, et al., 2001) (Ganji, et al., 2013). Pour la façade végétalisée, cette densité peut être évaluée par une projection des feuilles sur un plan vertical.

L'indice foliaire est un paramètre nécessaire aux modèles thermiques afin de représenter le phénomène d'évapotranspiration et le comportement de la couverture

végétale avec l'atmosphère. Il dépend fortement du nombre de feuilles et de leur surface. D'un point de vue thermique, le LAI a une influence significative sur la température des façades. La couche foliaire peut aussi affecter le flux de chaleur sensible qui modifie le transfert de chaleur radiatif et convectif (Frankenstein & Koenig, 2004).

5.2. Le taux de couverture de feuillage σ_f

Le taux de couverture de feuillage est défini comme le rapport entre la surface couverte par les feuilles et la surface totale. Il varie entre 0 et 1 et dépend du type de végétation et des saisons. Il permet ainsi de mieux prendre en compte la répartition de la couverture végétale. Le taux de couverture de feuillage est calculé en utilisant la méthode développée par (Ramirez et Senarath, 2000) exprimée par l'équation suivante (Ouldboukhitine, 2012) :

$$\sigma_f = 1 - \exp(-0.75 \text{ LAI}) \quad (6)$$

En revanche, (Malys, 2009) estime qu'il n'y a pas de relation directe entre l'indice foliaire et le taux de couverture mais ils sont complémentaires.

5.3. Le Déficit de Pression de Vapeur (VPD)

Azoz Diaz (2011) définit le VPD comme étant la différence entre la pression de vapeur partielle et la pression de vapeur saturante e_{sat} pour une température donnée.

Le déficit de pression de vapeur caractérise la capacité de l'air à retenir de la vapeur d'eau avant le point de rosée (saturation). Un VPD élevé désigne une capacité élevée de l'air à contenir de l'eau (sous forme de vapeur) ; cette condition permet de stimuler les transferts de vapeur d'eau dans l'air sous des conditions de basse humidité relative. Par conséquent, un VPD bas indique que l'air est proche de la saturation (HR élevée) et qu'il n'a pas la capacité de recevoir de la vapeur d'eau provenant des feuilles ou des surfaces. Le VPD permet de tenir compte de l'humidité relative de l'air ainsi que de la température. A travers des mesures hygrométriques réalisées dans la lame d'air, (Djedjig, 2013) affirme que le déficit de pression de vapeur à l'intérieur de la lame d'air est quasiment proportionnel au déficit de vapeur de l'air ambiant.

5.4. La réflectivité du feuillage (Albédo)

La réflectivité de la surface des murs reflète la façon dont le bâtiment réagit au rayonnement solaire. Elle permet de mesurer le rayonnement solaire réfléchi par rapport au rayonnement solaire incident. En général, plus la réflectivité de la surface est faible, plus la surface du récepteur est foncée et plus il absorbe de chaleur. Par exemple, la réflectivité d'une surface peinte en blanc, de brique rouge et de béton noir est respectivement de 0,7, 0,3 et 0,1.

Pour la végétation, ce paramètre représente la fraction du rayonnement solaire incident réfléchi par les surfaces de chaque feuille. Ces valeurs sont comprises entre Les valeurs moyennes de l'albédo pour la végétation varient entre 0.2 et 0.3. Pour les espèces végétales se trouvant dans des climats secs et chauds, la valeur moyenne de l'albédo est généralement la plus élevée. La valeur de ce paramètre varie en fonction de l'espèce, de l'âge, de la santé des feuilles et de la saison en raison de la couleur des feuilles (Azos Diaz, 2011).

5.5. L'émissivité du feuillage (ϵ)

L'émissivité d'un corps naturel est le rapport entre la luminance qu'il émet (par émission thermique GLO) et celle provenant d'un corps noir à la même température. Ce paramètre est utilisé pour le calcul de l'échange radiant de grande longueur d'onde à la surface des feuilles.⁵ (Azos Diaz, 2011) affirme que les valeurs de l'émissivité de la végétation sont très élevées. Elles sont comprises entre 0,8 et 0.995. (Vinet, 1999) propose des valeurs d'émissivité et de réflectivité pour plusieurs typologies végétales présentées au tableau III.1.

Tableau III. 1 : Emissivité et réflectivité de la végétation

(Vinet, 1999)

	<i>Solar albedo</i>	<i>Emissivity</i>
<i>Leaves</i>	0.20	0.95
<i>Trunk</i>	0.15	0.90
<i>Grass (short)</i>	0.26	0.95
<i>Forest Deciduous</i>	0.15 - 0.20	0.97 - 0.98
<i>Forest Coniferous</i>	0.05 - 0.15	0.97 - 0.99

⁵ <http://www.batisim.net/aide/index.html?greenroof.htm>

5.6. La transmissivité du feuillage (τ_f)

La transmissivité est le rapport entre l'énergie transmise et l'énergie incidente, à la traversée d'un milieu. Selon (Azos Diaz, 2011), ce paramètre représente aussi l'effet de la végétation sur la transmission de la lumière du soleil et varie selon la saison. Sa valeur détermine l'effet de l'ombre sur les surfaces du bâtiment et sur le sol.

Plus l'indice de surface foliaire est élevé, plus la transmission est faible et plus l'inclinaison des feuilles est importante (Chen, et al., 2019).

5.7. L'absorptivité des feuilles (α_f)

L'absorptivité des feuilles est la fraction du rayonnement solaire incident absorbée par une surface. Elle dépend de la couleur et de la texture des feuilles, ainsi que de l'âge de la plante. L'absorptivité moyenne des plantes varie de 0,4-0,6 (Susorova, 2013).

L'absorptivité et la transmissivité dépendent de l'indice de surface foliaire (Djedjig, 2013).

5.8. La résistance stomatique et la résistance aérodynamique

La résistance stomatique est un paramètre biophysique représentant la résistance des plantes au transport d'humidité. Elle influe directement sur le taux de transpiration de la plante et traduit la capacité de la plante à réguler sa transpiration. Cette résistance dépend du type de plantes, de l'état hydrique du sol et de l'atmosphère. Elle est proportionnelle à la résistance stomatique minimale, et inversement proportionnelle à l'indice de surface foliaire LAI (Ouldboukhitine, 2012). Les plantes présentant des valeurs faibles de résistance stomatique offrent des taux d'évapotranspiration plus élevés que les plantes présentant une résistance forte.⁶

Quant à la résistance aérodynamique, elle dépend principalement de la vitesse du vent dans la canopée, de la rugosité de la surface du feuillage et de la stabilité des conditions atmosphériques.

⁶ <http://www.batisim.net/aide/index.html?greenroof.htm>

II. Description du modèle de la paroi végétale développé

La revue de la littérature effectuée dans le chapitre précédent a facilité l'élaboration d'un nouveau modèle mathématique pour le présent travail. Ce modèle a été développé en collaboration avec Dr Djedjig Rabah dans le cadre d'un stage académique de courte durée effectué au laboratoire LERMAB à l'institut Henri Poincaré Longwy. Il représente une couche de plantes poussant contre le mur extérieur d'un bâtiment sans utiliser de sol ni de substrat. Il tient compte du comportement de la cavité d'air entre la couche foliaire et la façade du bâtiment et réparti le bilan énergétique en plusieurs parties ; au niveau de la surface du feuillage et au niveau de la cavité d'air. La figure III.6 illustre ces transferts thermiques qui sont de 4 types :

- l'absorption du rayonnement solaire ;
- l'échange de chaleur sensible par convection entre le feuillage, la cavité d'air et l'air ambiant ;
- l'échange d'énergie infrarouge entre le feuillage et l'environnement ;
- et la chaleur latente dégagée par la plante par transpiration.

Le bilan thermique de la composante végétale a été établi en introduisant les caractéristiques des plantes et les conditions météo. Ensuite, le modèle proposé est utilisé pour dériver les propriétés thermiques de la paroi végétale qui sera inclus dans le logiciel TRNSYS.

La couche végétale est considérée comme un élément vertical intervenant dans le bilan énergétique du mur du bâtiment. Une résolution des équations du bilan énergétique a été alors effectuée. Le modèle développé résout les équations du bilan énergétique de la façade par rapport au flux thermique résultant qui se traduit par la contribution de rayonnement solaire émis et absorbé (grandes et courtes longueurs d'ondes), de chaleur sensible et de chaleur latente. Il est à noter que le flux de chaleur transmis par conduction est évalué directement aux limites de la paroi dans le Type56.

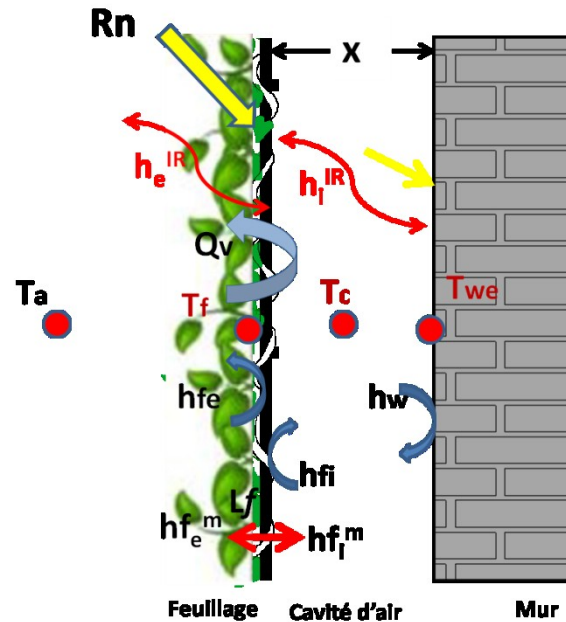


Figure III. 6 : Représentation schématique des échanges de chaleur modélisés dans la façade végétale

Tous les termes du bilan énergétique sont dépendants de la température des feuilles. Cette température est une fonction complexe de multiples facteurs, tels que le rayonnement solaire, l'humidité de l'air et la vitesse du vent. Cette température est déterminée à l'aide des calculs dans le modèle développé. La température à l'intérieur de la cavité d'air et celle de l'air intérieur sont ainsi calculées.

D'ailleurs, l'ensemble des équations composant le bilan énergétique de la façade végétale fait intervenir des termes non linéaires en fonction de la température de feuillage (T_f) et celle de la cavité d'air (T_c) (fait intervenir la température à la quatrième puissance) (eq 7).

$$Q = \varepsilon \sigma (T_c^4 - T_f^4) \quad (7)$$

Pour cela, il est impératif de simplifier ces équations en une formulation linéaire et les réécrire sous la forme matricielle. Cette équation fait intervenir également la constante de Stephan-Boltzmann (σ) et l'émissivité (ε).

Pour l'écriture des différentes équations, une unité de Type 62 a été utilisée. D'ailleurs, le modèle a été programmé sous le même logiciel en faisant appel à ce « Type » ayant pour rôle de créer un lien avec Excel pour un transfert rapide des données. Il détermine le nombre d'entrées et de sorties. Ces entrées sont transférées dans les cellules de

la feuille de calcul Excel et les sorties sont calculées à partir des entrées à l'aide d'une fonction avancée suivant un nombre précis de variables. Dans ce modèle, trois entrées et trois sorties sont affectées à des cellules pour lesquelles des noms ont été définis.

Ce modèle permet de résoudre l'ensemble d'équations sans recourir à des langages de programmation tels que FORTRAN ou autre. Les équations sont écrites dans un format algébrique au lieu d'un format de langage de programmation.

Il s'agit par la suite de définir dans l'interface graphique « Simulation Studio », les interconnexions entre cette composante et les autres « Types » et transmettre les paramètres d'entrée aux différents composants TRNSYS utilisés (figure III.7).

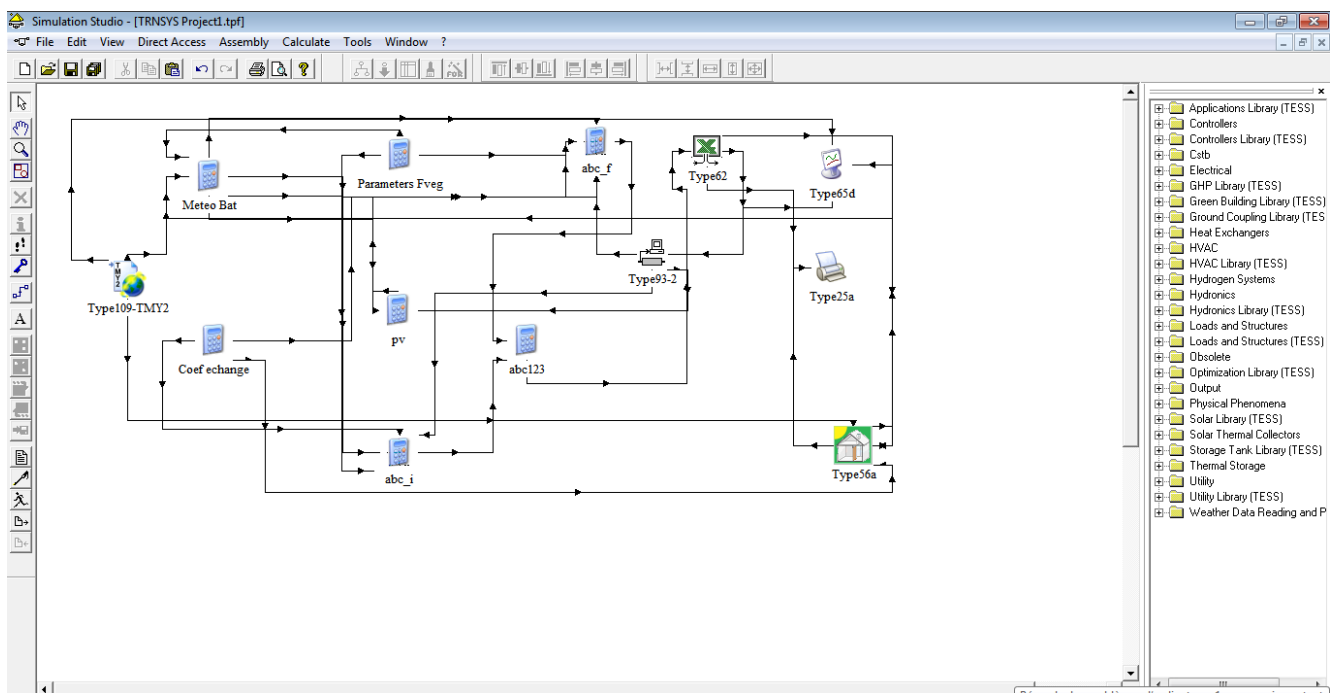


Figure III. 7 : Interconnexions des différents composants du modèle dans l'interface TRNSYS

Les équations du bilan énergétique inclus dans le modèle de la paroi végétalisée sont résolues pour déterminer la température de la cavité de l'air et celle du feuillage. En effet, le modèle récupère la température de l'air et de feuillage (au pas de temps $(k+1)$) en fonction de la température à l'étape précédente (au pas de temps précédent (k)). Il utilise de multiples paramètres d'entrée connus ou calculés à l'aide du logiciel TRNSYS. Les paramètres météorologiques sont tirés du fichier de données météorologiques de la ville de

Constantine. Ces données sont basculées vers le « Type 56 » (figure III.8), il suffit par la suite de spécifier l'orientation selon laquelle on souhaite installer la paroi végétalisée.

Afin de simplifier le calcul, le modèle prend en compte les feuilles de la plante uniquement sans les racines, les branches et le support dont la résistance thermique est négligeable.

Les équations du modèle sont décrites ci-dessous en détail.

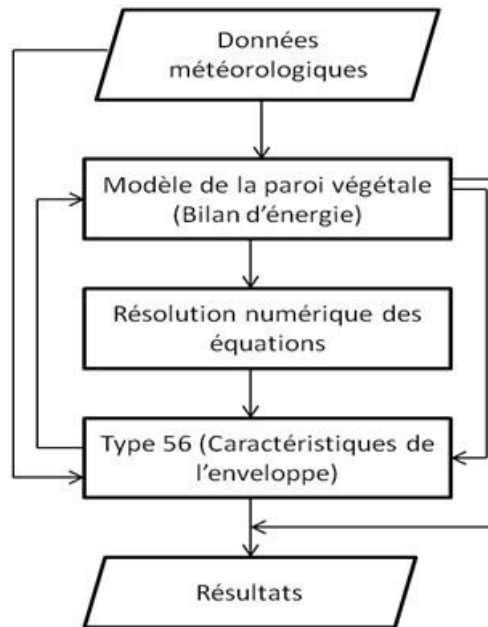


Figure III. 8 : Schéma de résolution

1. Description du logiciel TRNSYS

Le logiciel utilisé pour effectuer les différentes simulations est « TRNSYS » : TRaNsient SYstem Simulation program. C'est un programme de simulation de systèmes transitoires à structure modulaire avec 50 modules environ. Cette particularité, lui confère une grande flexibilité et facilité d'implémentation de nouveaux modèles dans la bibliothèque TRNSYS standard. TRNSYS permet de simuler en régime dynamique le comportement énergétique d'un bâtiment et de ses équipements (chauffage, climatisation) en fonction de son emplacement, des matériaux utilisés, de son architecture, du concept énergétique choisi, y compris les plus complexes tels que les systèmes solaires innovants. En effet, le logiciel permet d'intégrer toutes les caractéristiques d'un bâtiment pour mener une étude mono ou multizone détaillée de son comportement thermique.

La simulation des systèmes complexes sous TRNSYS est basée sur des interactions entre des modules dans l'interface graphique Studio où chacun d'eux est représenté par une composante (TYPE) (Figure III.9). L'exécution de chaque (TYPE) fait appel à une librairie de liens dynamiques (DLL) et contient un code pré-implémenté pour sa modélisation. Il existe des modules qui permettent de modéliser des phénomènes physiques particuliers, de lire les données météorologiques ou autres données d'entrée ou conditions aux limites ou simplement de tracer les résultats. D'autres modules permettent même de faire appel à des logiciels externes (Excel,...). Ces composantes liées les unes des autres doivent être définies par un certain nombre de paramètres, d'entrées et de sorties que le programme résout au pas de temps choisi et selon les hypothèses de l'étude. La sortie d'une composante constitue une entrée pour une ou plusieurs autres de façon à former un système cohérent.

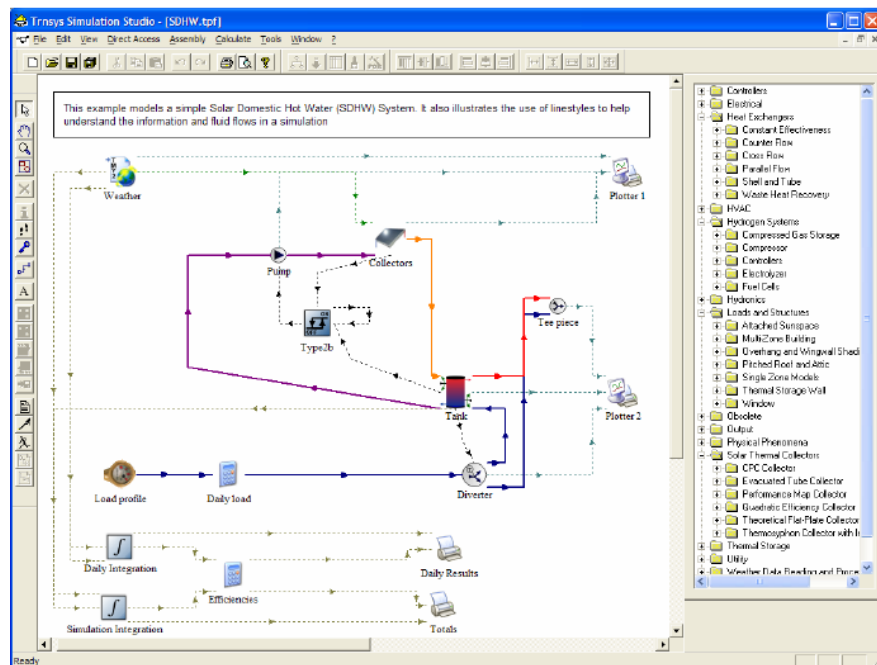


Figure III. 9 : Interface graphique Simulation Studio TRNSYS
(Manuel de TRNSYS)

La simulation des bâtiments a été réalisée via le modèle de bâtiment (Type 56). En raison de la complexité du bâtiment multizone, les paramètres du TYPE 56 ne sont pas définis directement dans le fichier d'entrée TRNSYS. Ce « Type » fait alors appel à un

programme externe (TRNBuild) (anciennement appelé PREBID) qui fournit une description détaillée du bâtiment.

A partir des données de base du projet, l'utilisateur décrit chaque zone thermique en définissant la géométrie du bâtiment, le nombre de zones thermiques à modéliser et les parois multicouches de matériaux divers répertoriés dans des bases de données spécifiques. Il permet ainsi, de définir le taux d'infiltration d'air et de ventilation, et de contrôler les températures de consignes pour les systèmes de chauffage et de climatisation de spécifier les gains internes et de gérer les scénarii d'occupation. Les parois doivent être définies comme étant des murs externes (en identifiant l'orientation) ou murs internes adjacents à une zone thermique définie.

Le Type 56 nécessite un certain nombre de paramètres météorologiques en entrée fournies par le Type 109 permettant de lire des fichiers météorologiques au format TMY2 et de calculer l'éclairement solaire selon la position géographique et l'orientation du bâtiment. D'autres composantes peuvent être interposés entre les sorties du fichier météo et les entrées du « Type 56 » pour la température fictive du ciel et aux éventuels masques solaires lointains à travers le « Type 69 » et le « Type 67 » respectivement.

Après avoir établi la liaison entre le « Type 56 » et le « Type 109 », les simulations annuelles pour différentes zones thermiques ou pour l'ensemble du bâtiment peuvent être entamées. Par conséquent, l'utilisateur pourra analyser les variations des températures d'air au niveau de chaque zone thermique et les variations des températures de surfaces extérieures et intérieures de chaque paroi. Il pourra par ailleurs et en fonction des consignes de confort imposées, évaluer les besoins en énergie de chauffage et/ou de climatisation, et établir des bilans énergétiques détaillés pour le bâtiment.

Une fois les sorties souhaitées sont sélectionnées, toutes les données saisies sont enregistrées dans le fichier de construction (*.BUI), qui constitue un fichier très pratique pour vérifier les données saisies dans TRNBuild. Ce model de simulation thermique basé sur l'établissement des équations de bilan énergétique pour chaque zone thermique. Pour cela, il prend en considération plusieurs phénomènes à savoir (figure III.10):

- Les échanges convectifs avec les surfaces intérieures des parois ($Q_{surf,i}$),
- Les apports ou déperditions liés aux infiltrations de l'air extérieur ($Q_{inf,i}$),
- Les apports ou déperditions par la ventilation ($Q_{vent,i}$),

- Les gains sensibles convectifs internes dus aux occupants, aux appareils et à l'éclairage artificiel ($\dot{Q}_{g,c,i}$),
- Les échanges convectifs aérauliques avec les zones adjacentes ($\dot{Q}_{cplg,,i}$) (Kenai, 2016)

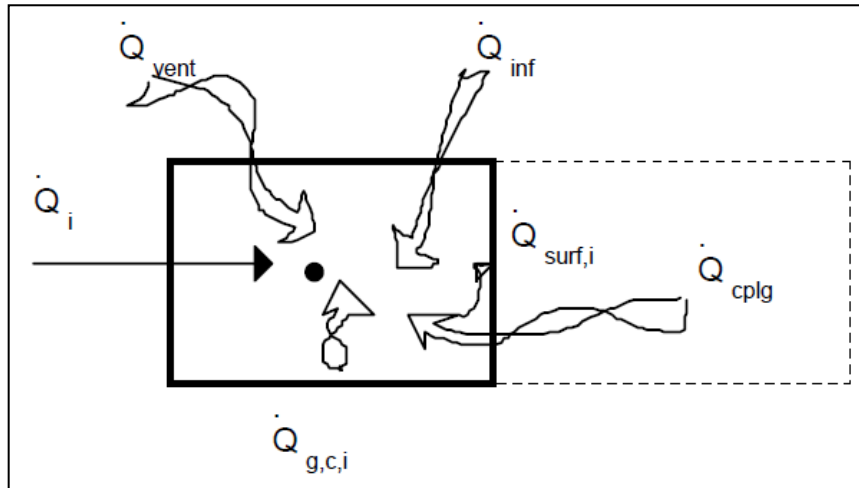


Figure III. 10 : Bilan énergétique dans une zone thermique
(Manuel de TRNSYS)

L'équation du bilan radiatif à l'intérieur d'une zone thermique est obtenue par la somme des termes suivants :

- Sources de rayonnement internes
- Rayonnement solaire transmis par les vitrages
- Echanges thermiques infrarouges avec les autres parois de la zone
- Apports thermiques radiatifs définis par l'utilisateur.

Chaque zone thermique est ensuite considérée comme un nœud d'air dont la température est approximée soit par une méthode standard (méthode par défaut sur TRNSYS) en combinant les flux radiatifs et convectifs selon un réseau en étoile (Seem, 1987), soit en utilisant un modèle de transfert détaillé (Gebhart, 1961, 1971), avec lequel les flux radiatifs et convectifs sont traités séparément (figure III.11). En ce qui concerne le transfert thermique par conduction à travers les murs, il est modélisé par la méthode des facteurs de pondération sous forme de séries temporelles de températures de surfaces et de flux de chaleur (Mitalas, 1972; Stephenson and Mitalas, 1971).

La différence entre le modèle standard et celui détaillé, est que le premier utilise une température fictive qui combine les échanges convectifs et radiatifs entre les parois de la zone. Tandis que le deuxième, traite les échanges convectifs et radiatifs séparément. En termes des résultats, les bilans énergétiques évalués avec le modèle standard sont très similaires à ceux qui sont évalués par la méthode de calcul détaillée (Holst, 1993). La similarité est d'autant plus confirmée dans les cas des bâtiments multizones. Pour un cas d'étude ayant une seule zone thermique, la méthode détaillée est à privilégier (Voit et al., 1994). De plus amples informations sur les différents modèles utilisés sont disponibles dans les manuels de TRNSYS (Kenai, 2016).

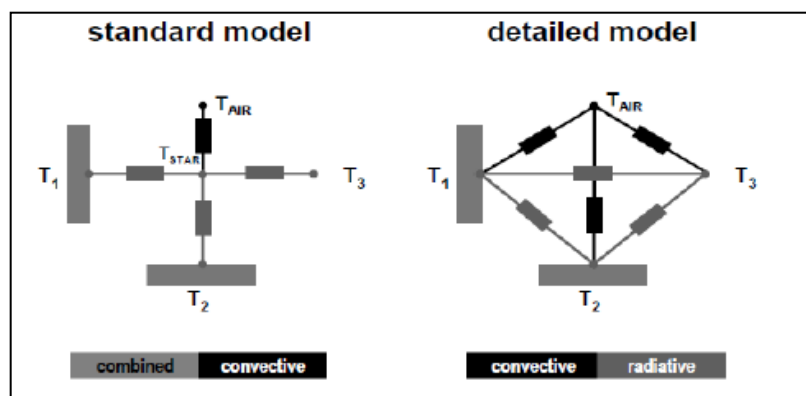


Figure III. 11 : Les deux modèles de transferts radiatifs standard et détaillé
(Manuel de TRNSYS)

Les entrées principales requises par le programme sont les suivantes:

- les éléments géométriques du bâtiment ;
- les paramètres météorologiques (température ambiante, humidité relative, rayonnement solaire, vitesse du vent) ;
- les gains internes et le scénario d'occupation ;
- l'infiltration du bâtiment, la ventilation, ... etc.

2- Bilan énergétique de la façade végétale

Le bilan énergétique de la façade végétale peut être réparti sur la couche végétale et sur la cavité d'air.

2.1. Bilan énergétique au niveau de la couche végétale

Le bilan énergétique de la couverture végétale est établi à partir de la combinaison du flux radiatif (l'éclairement CLO absorbé et du rayonnement GLO échangé avec la surface du mur, le ciel et les parois environnantes) ainsi que l'énergie absorbée par le feuillage qui est dissipée sous forme de chaleur sensible échangée avec l'air de la cavité et l'air environnant et sous forme de chaleur latente due à l'évapotranspiration de la plante. L'équation du bilan d'énergie, sous sa forme simplifiée, correspond à :

$$(\rho C_p)_f d_f F \frac{\delta T_f}{\delta t} = R_n - H_f - L_f \quad (8)$$

Où $(\rho c_p)_f$, (d_f) et (T_f) sont respectivement la capacité thermique spécifique, l'épaisseur moyenne et la température des feuilles. Ils représentent la variation de l'énergie thermique stockée par le feuillage. La densité de la végétation est prise en compte par l'indice de surface foliaire (F). R_n , H_f et L_f (W/m²) représentent respectivement le flux radiatif net absorbé par la couche végétale, le flux thermique sensible et le flux thermique latent à la surface du feuillage.

(Kontoleon & Eumorfopoulou, 2010) rappellent que seul 12,8% de la totalité de l'énergie solaire incidente est transmise à travers la surface externe des feuilles, tandis que les énergies absorbée et réfléchie sont de l'ordre de 15,6% et 71,6%, respectivement.

Considérons alors la couverture végétale comme une couche semi-transparente, la fraction d'énergie stockée par la végétation représente une fraction égale à $(1 - \tau_f - \rho_s)$ de l'éclairement solaire (Q_s) reçu sur la couche végétale. Une partie du rayonnement solaire incident est transmise à travers la végétation et atteint l'enveloppe du bâtiment. Par conséquent, le rayonnement solaire absorbé par le feuillage (R_{n_f} [W.m⁻²]) (représentant les échanges radiatifs de CLO) s'exprime ainsi :

$$R_n = \sigma_f [(1 - \tau_f - \rho_s) (1 + \tau_f \rho_w)] Q_s \quad (9)$$

Où (τ_f) et (ρ_s) sont la transmissivité et la réflectivité solaire du couvert végétal, (ρ_w) est la réflectivité solaire du mur et (σ_f) désigne le taux de couverture végétale. Ces paramètres sont supposés constants.

2.1.1. Le flux du rayonnement infrarouge

Le flux du rayonnement infrarouge (rayonnement de GLO) représente la somme des échanges entre la couverture végétale et l'environnement et entre le feuillage et le mur. Il est exprimé par l'équation suivante :

$$\sigma_f h_e^{IR} (T_{env} - T_f^{(k+1)}) + \sigma_f h_i^{IR} (T_w - T_f^{(k+1)}) \quad (10)$$

(T_w) représente la température de surface extérieure du mur, (T_{env}) est la température de l'environnement extérieur, et (T_f) la température du feuillage. h_e^{IR} et h_i^{IR} désignent les coefficients d'échange par rayonnement. On suppose que ces deux paramètres sont égaux. (h^{IR}) est calculé à partir de la formule suivante :

$$h^{IR} = 4 \sigma T_a^3 \varepsilon \quad (11)$$

(σ) désigne la constante de Stefan-Boltzmann, (ε) l'émissivité de la couche végétale, (T_a) est la température de l'air.

2.1.2. Le bilan de chaleur sensible Hf

L'échange de chaleur sensible par convection entre le feuillage, l'air extérieur et la lame d'air peut être exprimé comme suit:

$$H_f = h_{fe} F (T_f^{(k+1)} - T_a) + h_{fi} F (T_f^{(k+1)} - T_c^{(k+1)}) \quad (12)$$

Le flux de chaleur échangé par convection H_f (W/m^2) est donné, en fonction de l'écart de température du feuillage (T_f) et la température de l'air (T_a) et la température de la lame d'air (T_c) (situé entre le mur et la couche végétale). (h_{fe}) et (h_{fi}) représentent les coefficients de transfert convectif. Ces coefficients font intervenir la résistance aérodynamique et la résistance au transfert thermique sensible au sein du feuillage.

2.1.3. Le bilan de chaleur latente Lf

L'équation du bilan de chaleur latente dégagée par la plante par transpiration peut être exprimée par:

$$L_f = h_{fe}^m F (p_{v_{f,sat}} - p_{va}) + h_{fi}^m F (p_{v_{f,sat}} - p_{va}) \quad (13)$$

Le flux de chaleur latente est estimé en fonction du déficit de pression de vapeur d'eau par rapport à la couverture végétale ($p_{v_{f,sat}} - p_{va}$) [Pa]. (h_{fe}^m) et (h_{fi}^m) représentent les coefficients de transfert massique.

L'équation du bilan de chaleur latente s'écrit alors sous la forme suivante :

$$L_f = (h_{fe}^m + h_{fi}^m) F p_{va} + [p_{vf}^{sat}]^{(k)} - \frac{\delta p_v^{sat}}{\delta T} \Big|_{(k)} T_f^{(k)} [-F(h_{fe}^m + h_{fi}^m)] \quad (14)$$

La modélisation du flux latent d'évaporation dépend du déficit de pression de vapeur saturante obtenu à partir de l'équation suivante :

$$[p_{vf}^{sat}]^{(k+1)} = [p_{vf}^{sat}]^{(k)} + \frac{\delta p_v^{sat}}{\delta T} \Big|_{(k)} (T_f^{(k+1)} - T_f^{(k)})$$

$$[p_{vf}^{sat}]^{(k+1)} = \frac{\delta p_v^{sat}}{\delta T} \Big|_{(k)} (T_f^{(k+1)} + [p_{vf}^{sat}]^{(k)} - \frac{p_{vf}^{sat}}{\delta T} \Big|_{(k)} T_f^{(k)}) \quad (15)$$

Le terme de pression de vapeur saturante d'eau peut être calculé à partir des équations suivantes données par (Djedjig, 2013) :

$$p_{vf}^{sat} = 101325 * \exp \frac{[13.7-5120]}{[Tf+273]} \quad (16)$$

$$dPvsatdT = 2454000/(461.53 * (Tf + 273.15) ** 2) * Pvf_sat \quad (17)$$

$$p_{va} = HR/100 * p_{va_sat} / p_{va_sat} = 101325 * \exp(13.7-5120./(Ta+273.)) \quad (18)$$

Où (p_{vf}^{sat}) dépend particulièrement de la température de feuillage (T_f) et (p_{va}) dépend de la température de l'air (T_a) et de l'humidité relative (HR).

Par conséquent, le bilan de la paroi végétale est obtenu par l'équation (19) :

$$(\rho C_p) f df F \frac{T_f^{(k+1)} - T_f^{(k)}}{\Delta t} = \sigma_f [(1 - \tau_f - \rho_s) (1 + \tau_f \rho_w)] Q_s - h_{fe} F (T_f^{(k+1)} - T_a) - h_{fi} F (T_f^{(k+1)} - T_c^{(k+1)}) - h_{fe}^m F (p_{vf_{sat}} - p_{va}) - h_{fi}^m F (p_{vf_{sat}} - p_{va}) + \sigma_f h_e^{IR} (T_{env} - T_f^{(k+1)}) + \sigma_f h_i^{IR} (T_w - T_f^{(k+1)}) \quad (19)$$

L'indice (k) présente les valeurs de température de T_f et T_c dans le pas de temps précédent.

2.2. Bilan énergétique de la cavité d'air

Le bilan énergétique de la cavité d'air est estimé en fonction de l'échange de chaleur sensible, du renouvellement d'air et de l'épaisseur de la cavité d'air.

$$(\rho C_p)_{\text{air}} \times \frac{\delta T_c}{\delta t} = H_c + Q_v \quad (20)$$

Où (ρ_{air}) et (C_{pair}) sont la masse volumique et la chaleur massique de l'air respectivement, (x) est l'épaisseur de la lame d'air ou la distance entre la couche végétale et la façade. H_c est l'échange de chaleur sensible par convection entre le feuillage, la lame d'air et le mur.

$$H_c = h_{fi} F (T_f^{(k+1)} - T_c^{(k+1)}) + h_w (T_w - T_c^{(k+1)}) \quad (21)$$

Où (h_{fi}) et (h_w) représentent le coefficient de transfert convectif de la cavité d'air et de la paroi respectivement. (T_c) est la température de la cavité d'air.

Le débit volumique de renouvellement d'air dépend de la différence de température entre l'air extérieur et la lame d'air $(T_a - T_c)$.

$$Q_c = (\rho C_p)_{\text{air}} Q_v (T_a - T_c^{(k+1)}) \quad (22)$$

Par conséquent, le bilan de la cavité d'air peut être exprimé ainsi :

$$(\rho C_p)_{\text{air}} \times \frac{T_c^{(k+1)} - T_c^{(k)}}{\Delta t} = h_{fi} F (T_f^{(k+1)} - T_c^{(k+1)}) + h_w (T_w - T_c^{(k+1)}) + (\rho C_p)_{\text{air}} Q_v (T_a - T_c^{(k+1)}) \quad (23)$$

2.3. Equations finales

Après linéarisation, on aboutit à un système d'équations final :

$$a_1 T_f + b_1 T_c = c_1$$

(24)

$$a_2 T_f + b_2 T_c = c_2$$

Ce système d'équations peut se mettre sous la forme matricielle et qui s'écrit comme suit :

$$\begin{cases} a1 & b1 \\ a2 & b2 \end{cases} \begin{matrix} T_f \\ T_c \end{matrix} = \begin{cases} c1 \\ c2 \end{cases}$$

Un système à 2 équations et 2 inconnues où T_f et T_c sont des inconnus

$$\mathbf{T}_f = \frac{\begin{vmatrix} c1 & b1 \\ c2 & b2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a1 & b1 \\ a2 & b2 \end{vmatrix}} \quad \mathbf{T}_c = \frac{\begin{vmatrix} a1 & c1 \\ a2 & c2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a1 & b1 \\ a2 & b2 \end{vmatrix}}$$

A partir des équations (19) et (23), une expression pour les différentes constantes est établie :

$$a_1 = \frac{(\rho C_p)_f d_f F + h_{fe} F + h_{fi} F + (h_{fe}^m + h_{fi}^m) F \left. \frac{\delta p_v^{sat}}{\delta T} \right|_{(k)}}{\Delta t} + \sigma_f (h_e^{IR} + h_e^{IR})$$

$$b_1 = - h_{fi} F$$

$$c_1 = \frac{(\rho C_p)_f d_f F}{\Delta t} T_f^{(k)} + \sigma_f [(1 - \tau_f - \rho_s) (1 + \tau_f \rho_w)] Q_s + h_{fe} F T_a + \sigma_f h_e^{IR} T_{env} + \sigma_f h_i^{IR} T_w + (h_{fe}^m + h_{fi}^m) F p_{va} + [(p_{vf}^{sat})^{(k)} - \left. \frac{\delta p_v^{sat}}{\delta T} \right|_{(k)} T_f^{(k)}] (-F(h_{fe}^m + h_{fi}^m))$$

$$a_2 = - h_{fi} F$$

$$b_2 = \frac{(\rho C_p)_{air} x}{\Delta t} + h_{fi} F + h_w + (\rho C_p)_{air} Q_v$$

$$c_2 = \frac{(\rho C_p)_{air} x T_c^{(k)}}{\Delta t} + h_w T_w + (\rho C_p)_{air} Q_v T_a$$

Où la température du feuillage (T_f) est calculée à partir de (a1), (b1), (c1) et la température de la cavité d'air (T_c) est calculée à partir de (a2), (b2), (c2). Le modèle récupère la température de feuillage et celle de la cavité d'air actuelle (au pas de temps (k+1)) en fonction de la température à l'étape précédente (au pas de temps précédent (k)).

Conclusion :

La meilleure méthode pour modéliser les effets thermiques réels des parois végétalisées est d'inclure les modèles mathématiques dans un outil de simulation thermo dynamique (voir chapitre II). Ce modèle devrait tenir compte des interactions entre la végétation et le bâtiment.

La première partie de ce chapitre a fourni un aperçu du comportement des plantes en fonction des différents paramètres environnementaux et a permis par conséquent la compréhension de l'interaction entre la végétation et le bâtiment. Il en ressort que la façade végétale échange en permanence de la chaleur et de l'eau avec le bâtiment et son environnement. Le rayonnement solaire, le rayonnement infrarouge, le transfert de chaleur par convection et l'évapotranspiration sont les principaux mécanismes de transfert de chaleur dans une façade végétale. Tous ces paramètres doivent être pris en compte dans le calcul du bilan énergétique lors de la modélisation des transferts thermiques à travers la façade végétale. Leur quantification varie pendant la journée, en fonction des saisons, des conditions climatiques et des propriétés végétales.

Les connaissances acquises dans la première partie ont permis de développer un modèle de paroi végétale. En effet, la deuxième partie de ce chapitre est dédiée au modèle mathématique développé reposant sur des hypothèses. Ce modèle construit à l'origine dans Microsoft Excel et intégré dans le logiciel de simulation thermo dynamique transitoire TRNSYS tient compte des interactions entre le bâtiment, la cavité d'air, la plante et l'environnement. Il repose sur le calcul du bilan énergétique basé sur un ensemble d'équations intégrant les processus d'échanges thermiques entre les différentes composantes de cette paroi.

Le modèle ainsi développé permet le calcul de plusieurs paramètres physiques tels que: la température de la cavité de l'air, la températures du feuillage, la température ambiante ... Il prend en considération les conditions météorologiques (température, humidité, radiations solaires, vitesse du vent), les caractéristiques des plantes, l'apport solaire, les échanges de chaleur sensible et latente entre le feuillage et l'air ambiant et l'échange par rayonnement infrarouge entre le feuillage et l'environnement. Le système d'équations obtenu est résolu et simplifié après linéarisation.

La pertinence de ce modèle numérique doit être vérifiée et validée par la confrontation aux résultats expérimentaux ce qui fera l'objet du prochain chapitre.

CHAPITRE –IV–

EXPERIMENTATION ET VALIDATION DU MODELE

Introduction

Afin de mener à bien les différentes simulations, et vérifier la fiabilité du modèle mathématique développé et décrit dans le chapitre précédent, nous avons procédé à sa validation par le biais de mesures expérimentales. Pour ce faire, les développements qui suivent abordent à la fois l'identification du climat de la ville de Constantine, le descriptif du cas d'étude, la méthodologie ainsi que les résultats du travail expérimental. La deuxième partie concerne particulièrement la validation des résultats du modèle par confrontation avec l'expérimentation. L'évolution de l'ensemble des paramètres climatiques simulés est présentée et comparée aux valeurs expérimentales.

Enfin, la troisième partie est dédiée à l'analyse de sensibilité qui permettra dans un premier temps d'identifier les paramètres les plus déterminants dans le comportement thermique de la façade végétalisée.

I. Etude expérimentale

Avant de procéder à la validation du modèle, une description de l'étude expérimentale menée à Constantine pendant la période estivale est présentée ci-dessous. Cette partie de la recherche a pour objectif de quantifier la réponse thermique de la façade végétalisée sous le climat semi-aride.

I.1. Situation et contexte climatique de la ville de Constantine

La ville de Constantine est située au nord-est de l'Algérie (latitude 36°17'N, longitude 6°37'E, altitude 694 m). Son climat est semi-aride caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers froids et humides. Les précipitations atteignent une moyenne annuelle de 470 mm avec un pic au mois de décembre. Les températures moyennes à Constantine oscillent entre 7,15°C au mois de Janvier (le mois le plus froid) et 26,8°C durant le mois le plus chaud en Juillet avec une moyenne annuelle de 15,5°C et une amplitude moyenne de 19,65°C. La durée d'insolation moyenne est importante de l'ordre de 234,5 h.

Par ailleurs, l'humidité relative moyenne est de 49,7% enregistrée durant le mois de juillet et 73,3% en décembre avec une moyenne annuelle de 68% (figure IV.1). La vitesse moyenne du vent est de 2,6 m/s variant entre 2,1 m/s au mois de septembre et 2,9m/s au mois de décembre (Voir plus de détails en annexe D).

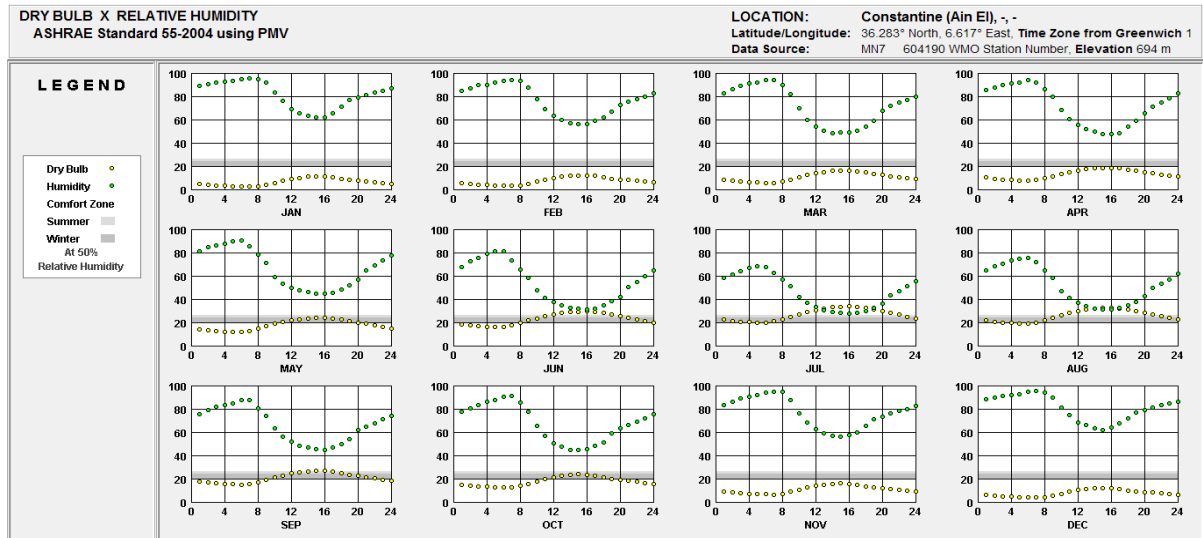


Figure IV. 1 : Profils des températures et des humidités de la ville de Constantine
(Climate Consultant 6.0)

L'analyse bioclimatique de la ville de Constantine indique aussi que durant la période estivale, il est nécessaire de contrôler efficacement les gains solaires par effet de masse accompagné d'une ventilation nocturne. Pendant l'épisode caniculaire (juillet et août), il est recommandé d'opter pour des systèmes de refroidissement par évaporation tel que indiqué par la figure IV.2.

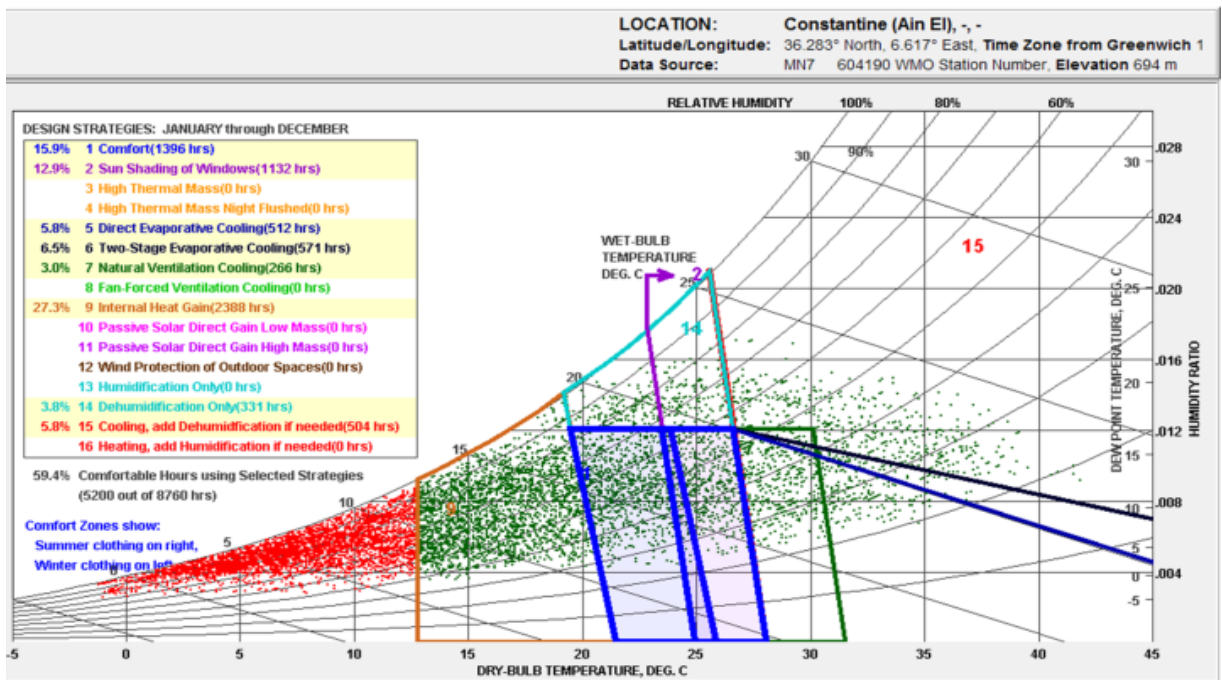


Figure IV. 2 : Diagramme psychrométrique de la ville de Constantine
(Climate Consultant 6.0)

I.2. Description de l'étude expérimentale :

I.2.1. Présentation du cas d'étude

1.2.1.1. Site et situation

L'étude s'est déroulée dans un site urbain situé dans la partie sud-ouest de la ville de Constantine près de l'axe routier de la RN 05. Il s'agit d'une zone d'extension à la périphérie de la cité Abdelhafid Boussouf dans un quartier résidentiel à caractère collectif. Il s'agit de bâtiments sous forme de barre en R+5, disposant de deux ou trois façades selon la configuration (figure IV.3).



Figure IV. 3 : Site d'investigation
(Google earth)

1.2.1.2. Description du bâtiment objet d'étude

Le bâtiment objet d'étude est orienté vers le nord, l'est et l'ouest. La façade nord donne sur la voie mécanique principale, la façade Est sur une cour et la façade ouest donne sur une voie tertiaire.

Ainsi, la présente expérience a eu lieu dans deux appartements situés à des étages intermédiaires dont la façade ouest est partiellement recouverte de plante et dans lesquels deux espaces identiques ont été sélectionnés pour faire l'objet d'investigation. Le mur extérieur du premier espace est recouvert de plante grimpante de type caduc (vigne vierge) et celui du deuxième espace est dépourvu de tout système d'ombrage pour la paroi opaque (figures IV.4 et IV.5).



Figure IV. 4 : Bâtiment objet d'étude



Figure IV. 5 : Vue en plan (étage courant) du bâtiment objet d'étude

1.2.1.3. Configuration des espaces testés

La structure porteuse est constituée de voiles et une partie de l'enveloppe est réalisée en maçonnerie. Les caractéristiques thermophysiques des pièces objet d'étude sont résumées dans le tableau IV.1.

Tableau IV. 1 : Caractéristiques thermophysiques du bâtiment objet d'étude

Type de paroi		Caractéristiques			
Détails	Surface (pièce testé)	Matériaux	Epaisseur (cm)	Conductivité thermique (W/m °C)	Résistance thermique (m ² °C/W)
Mur extérieur	3.60 m × 4.36 × 2.73 m (H)	Enduit de ciment	2	1,4	0,0014
		Béton	15	1.75	0.085
		Enduit de plâtre	2	0.35	0.057
Parois intérieures		Enduit de plâtre	2	0.35	0.057
		Béton	15	1.75	0.085
		Enduit de plâtre	2	0.35	0.057
		Brique creuse	10	0.48	0.208
Fenêtres	1.24* 1.24	Fenêtre en bois avec persienne simple vitrage clair	0.3	0.9	
Plancher intermédiaire	Dalle pleine 3.60 m × 4.36 m	Revêtement du sol	2	1.3	
		Chape de mortier	3	0.95	
		Béton	15	1.75	0.085
		Enduit de plâtre	2	0.35	0.057
Végétation		Vigne vierge	20-30		

I.2.2. Protocole de mesure et scenario d'occupation

Les mesures in situ de plusieurs paramètres physiques ont servi pour l'évaluation du comportement thermique de la façade végétalisée à savoir : la température et l'humidité ambiante intérieure, les températures de surface interne et externe des murs, la température et l'humidité de feuillage, la température et l'humidité de l'air extérieur. Ces données ont été enregistrées simultanément pour chaque espace à intervalle de 10 minutes pendant trois jours consécutifs (5-7) durant le mois d'août caractérisés par un temps clair et ensoleillé. Les températures de surface et celles extérieures ont été prises à intervalle d'une heure.

Les deux pièces testées ont une forme rectangulaire dont les murs sont peints en blanc. Elles possèdent une fenêtre et deux portes, une qui donne sur le couloir et l'autre sur une autre pièce.

Le matin à partir de 9h00, les portes et la fenêtre sont grandes ouvertes afin de permettre la ventilation matinale. Durant l'après midi, à partir de 12h00, la persienne et la fenêtre sont maintenus fermés, afin de minimiser les apports solaires entrant à l'intérieur. A partir de 18h00, quand les températures extérieures commencent à diminuer, ils sont ouverts à nouveau, restant ainsi toute la soirée pour l'évacuation de la chaleur accumulée à l'intérieur. A partir de 23h00, la fenêtre et la persienne sont à nouveau fermés.

I.2.3. Instruments de mesures utilisés:

Dans cette étude, un certain nombre d'instruments a été utilisé pour les mesures in situ de températures de l'air, les températures surfaciques et les humidités relatives :

- **DATA LOGGER USB PCE-HT 71N** : C'est des lecteurs USB pour la mesure prolongée de la température de l'air et de l'humidité avec un pas de mesure réglable (2s... 24h). Ils fonctionnent avec un enregistreur autonome qui enregistre les valeurs climatologiques des laps de temps désirés (temps de démarrage et final, date et pas de mesure). La plage de mesure est de 0 à 100% pour l'humidité relative et -40 à +70 °C pour la température de l'air (figure IV.6). Le degré de précision est $\pm 3.5\%$ et $\pm 1^\circ\text{C}$.
- Pour les mesures intérieures, deux lecteurs ont été placés au centre des espaces testés à une hauteur de 1.1m au niveau du plancher. Un lecteur a été placé sous les feuilles et un autre à l'extérieur pour les mesures microclimatiques.



Figure IV. 6 : Data logger USB PCE-HT71

- **Thermomètres Infrarouges :** avec pointeur Laser MODELE IR400 (figure IV.7) utilisés pour mesurer les températures de surface des parois où le pointeur laser est orienté directement vers la surface interne ou externe du mur extérieur. Le degré de précision est indiqué dans l'annexe C.



Figure IV. 7 : Thermomètre Infrarouge

I.3. Interprétation et discussion des résultats

I.3.1. Evolution des températures de l'air intérieur (Tint)

La figure IV.8 indique la variation des températures de l'air intérieur des deux espaces testés en comparaison avec les températures de l'air ambiant extérieur. La lecture du graphe montre que la courbe des températures de l'air ambiant dans la pièce végétalisée croît lentement et d'une manière uniforme contrairement à celle de la pièce non végétalisée qui évolue dans le même sens que les températures extérieures. Ces dernières varient entre 20 et 39,1°C avec une moyenne journalière de l'ordre de 29.3°C.

Pendant la journée, la pièce végétalisée a enregistré une fluctuation de température plus faible par rapport à l'air extérieur et à la pièce témoin. Les températures de cette dernière oscillent entre 27,3°C et 32.9°C, tandis que celles de la pièce végétalisée varient de 25,5°C et 28,4°C. La plus forte réduction de température de l'air intérieur est observée entre 13h et 16h avec une différence maximale de 5,7°C enregistrant un écart moyen de l'ordre de 3,7°C. Cela est dû à la présence de la plante et de sa densité élevée. La végétation a un effet significatif sur l'atténuation de la surchauffe et la régulation de la température ambiante qui est toujours inférieure à la température environnante pendant la journée.

La nuit, les températures de l'air intérieur enregistrées dans la pièce végétalisée se rapprochent de celles de la pièce témoin et sont supérieures aux températures extérieures à cause du manque de ventilation transversale (l'espace reste fermé durant toute la nuit).

En comparant les valeurs enregistrées avec les plages de confort de Humphrey, on remarque que la majeure partie de la courbe de température de l'espace végétalisé se situe dans la plage de confort avec une augmentation maximale de 0.5°C entre 16h et 18h par rapport à la limite supérieure de confort. Contrairement à l'espace témoin, où toute la courbe est hors zone de confort. Cependant, les températures nocturnes de la pièce végétalisée restent éloignées de la limite inférieure de confort avec un écart maximal de 4,5°C. (Les limites de confort sont calculées à partir de la température neutre (voir annexe D)).

Là encore, il devient clair que la couche végétale intégrée à la façade a favorisé la réduction du flux de chaleur entrant au bâtiment réduisant et stabilisant ainsi la température intérieure maximale de la pièce testée durant la journée ce qui améliore sensiblement le confort à l'intérieur du bâtiment. Et contribue à maintenir des températures légèrement

élevées pendant la nuit tout en restant dans la marge du confort concordant avec les résultats de (Sulaiman, et al., 2013).

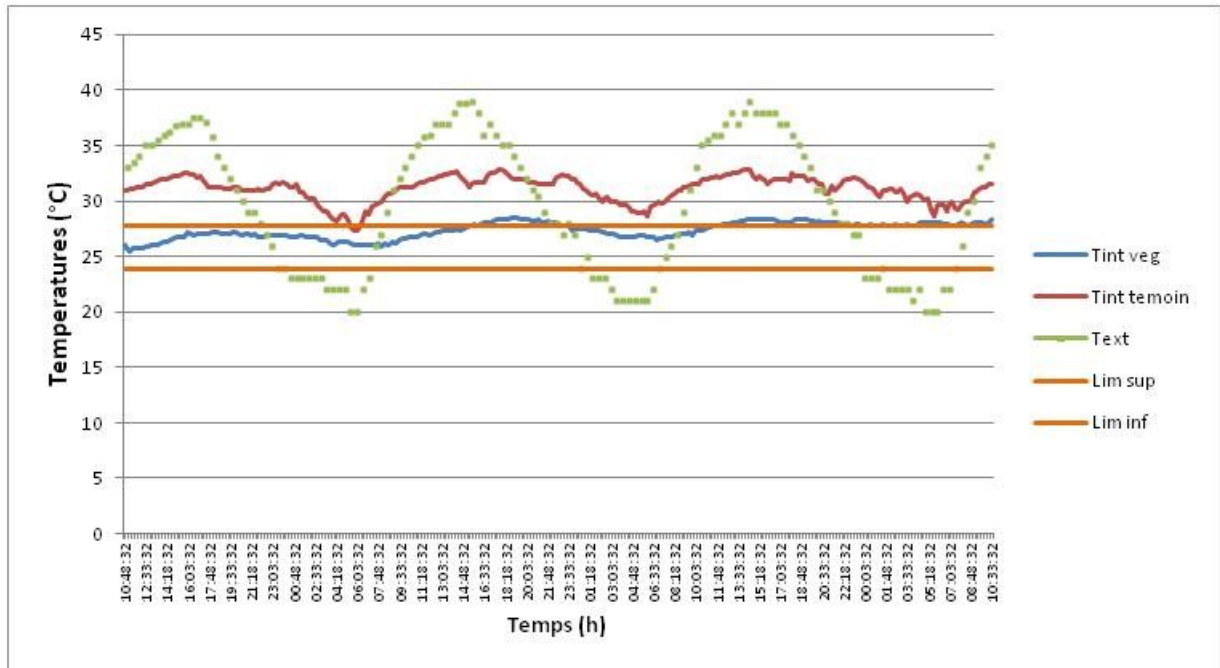


Figure IV. 8 : Variation des températures intérieures et extérieures

I.3.2. Evolution des températures de surface (Tsi, Tso)

Les températures surfaciques internes et externes de la pièce végétalisée et de la pièce témoin sont représentées dans la figure IV.9. La lecture des courbes indique que les fluctuations des températures de surface pour la FV sont plus stables et inférieures que celles du mur témoin. La couche végétale réduit de manière significative les températures maximales de surface externe du mur. La différence maximale entre les deux surfaces est de l'ordre de 15,8°C. Cette différence est accentuée durant la journée. La température maximale de surface externe du mur témoin atteint jusqu'à 46,8°C à 18h00, tandis que celle de la paroi végétale n'est que de l'ordre de 31,7°C en raison de l'ombrage procuré par le feuillage réduisant ainsi la variation de la température de surface de la façade ouest.

En effet, les plantes réduisent la transmission du rayonnement solaire à la surface de la façade à travers l'effet d'ombrage entraînant par voie de conséquence une baisse considérable de la température de la surface extérieure de la façade.

D'autre part, des résultats intéressants peuvent être observés sur le profil de température de surface intérieure de la pièce végétalisée presque identique à celui des températures de l'air intérieur, ce qui génère des températures plus ou moins stables. La

végétation provoque une diminution des températures sur la surface intérieure de la paroi. La différence de T_{si} entre le mur nu et le mur couvert de plantes est en moyenne de l'ordre de $3,5^{\circ}\text{C}$.

Les réductions de température à la surface externe et interne attestent des avantages de la façade végétale. Cette dernière intercepte une grande quantité de rayonnement solaire et ombrage la façade du bâtiment diminuant ainsi la quantité de transfert de flux de chaleur vers l'environnement intérieur.

On constate aussi que les températures de surface intérieures sont sensiblement liées à la température de l'air intérieur. Par contre, les températures de surface extérieures sont liées à la température de l'air extérieur. L'ombrage produit par la façade végétale conduit à une réduction de la température de surface externe et du flux de chaleur entrant qui en résulte à travers l'enveloppe du bâtiment.

Tout cela confirme l'hypothèse selon laquelle la façade végétale contribue à la stabilisation de la température ambiante et à la réduction des températures de surface de par l'évapotranspiration et l'ombre qu'elles projettent sur le bâtiment. Des résultats similaires ont été rapportés par (Tsoumarakis, et al., 2008), (Eumorfopoulou & Kontoleon., 2009) (Pérez, et al., 2017) et (Benhalilou, 2009) sous les climats méditerranéen et semi aride.

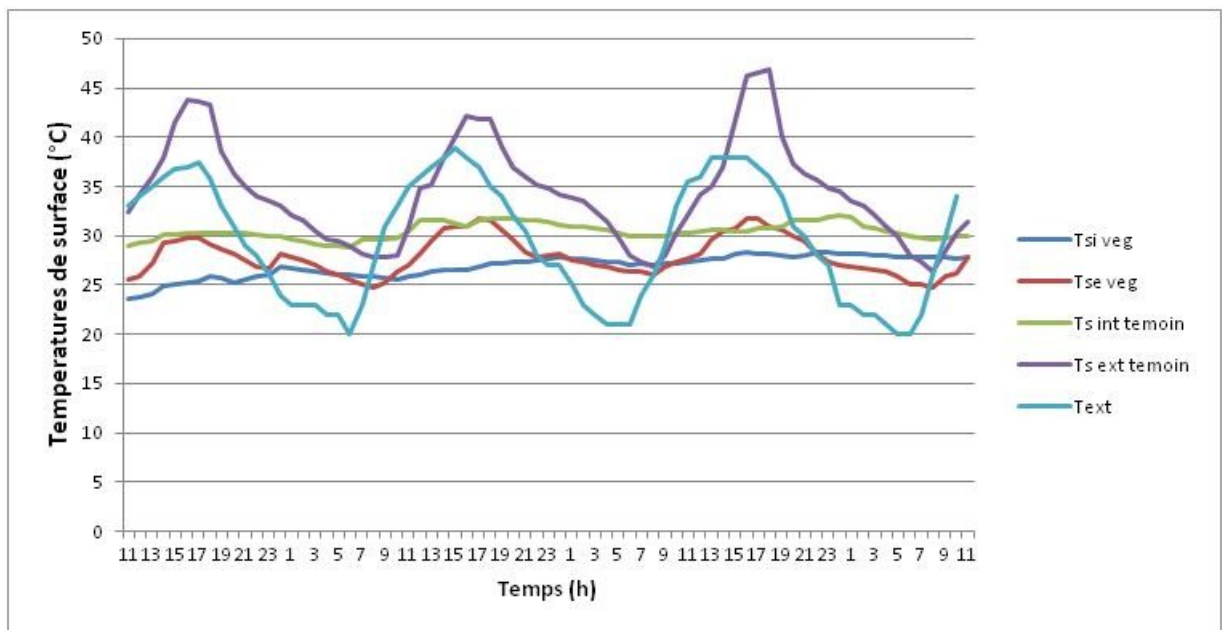


Figure IV. 9 : Variation des températures de surface internes et externes

I.3.3. Evolution des températures de feuillage (Tf)

La figure IV.10 montre la variation des températures des feuilles et celles extérieures. Le graphe indique que les deux courbes ont la même allure et se rapprochent avec une légère diminution pour les températures de la plante pendant la journée. Ces températures oscillent entre 22,1°C à 37,7°C avec une moyenne de l'ordre 28,27°C.

La température des feuilles est en moyenne inférieure de 4,5°C par rapport à la température de l'air extérieur pendant la période la plus chaude de la journée (entre 13h et 17h). Les plantes évaporent l'eau de leurs feuilles, ce qui refroidit la surface des feuilles et l'air autour de la couche végétale diminuant ainsi la température de la surface extérieure de la façade derrière la couche végétale.

En plus de l'effet d'ombrage, la plante se maintient dans une certaine plage de température grâce au processus d'évapotranspiration. Les feuilles absorbent une grande partie du rayonnement solaire incident atteignant le mur qui sera convertie en chaleur latente. Ces feuilles parviennent à maintenir des températures plus basses que l'air extérieur en évaporant de grandes quantités d'eau par transpiration, ce qui a été confirmé par de multiples études tels que celles de (Susorova, 2013) et (Ip, et al., 2010).

En revanche, la nuit, cette influence est très faible en comparaison avec le jour. La température des feuilles était en moyenne supérieure de 1,7°C à la température de l'air.

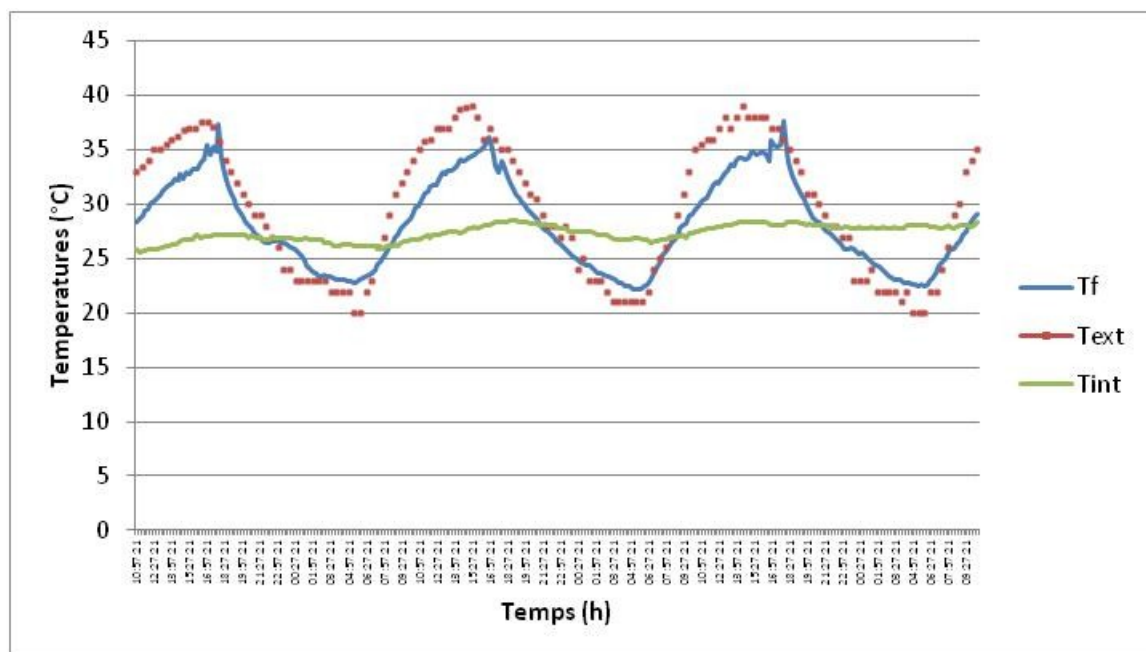


Figure IV. 10 : Variation des températures de feuillage

I.3.4. Evolution des humidités relatives (HR)

La comparaison des profils de l'humidité relative dans les deux pièces avec celles extérieures montre que l'humidité relative mesurée dans la pièce végétalisée est constamment supérieure à celle mesurée dans la pièce témoin enregistrant un écart moyen de l'ordre de 15.4% (figure IV.11). L'augmentation de l'humidité relative de la pièce végétalisée est très significative (maximum de 26.8%) avec un effet important sur le confort thermique. Elle varie entre 39.5% et 59.2%. L'augmentation de l'humidité relative se fait sentir au cours de la journée lorsque l'humidité relative extérieure est la plus faible. Cette dernière oscille entre 13.2% et 29.7%.

La nuit, lorsque l'humidité relative de l'air extérieur est la plus élevée, l'humidité relative de la pièce végétalisée était aussi plus élevée que celle de la pièce de référence. Cette dernière varie entre 29,6% et 39,7%. Les valeurs d'HR enregistrées dans les deux pièces se situent dans la marge fixée par le standard ASHRAE (30-60%).

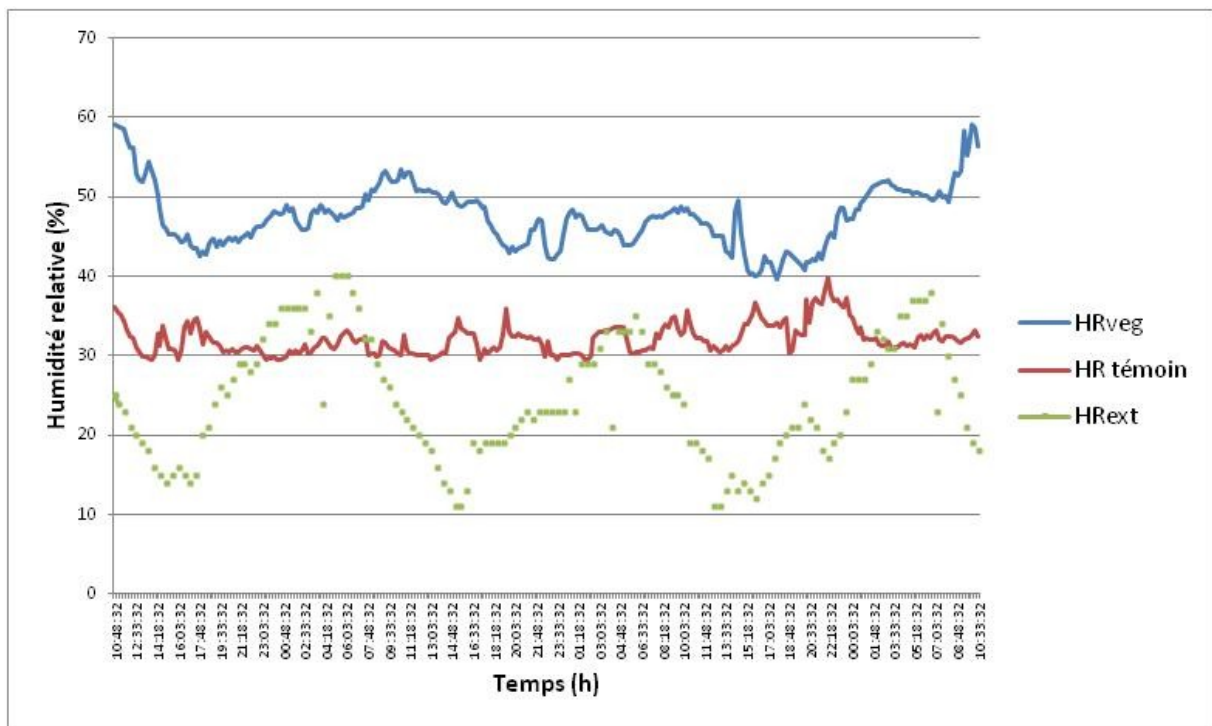


Figure IV. 11 : Variation des humidités relatives

II. Validation du modèle

Afin de valider la méthode de résolution numérique des équations du modèle et vérifier sa pertinence, une comparaison entre les températures calculées et celles mesurées a été alors effectuée. La validation du modèle a été réalisée en utilisant les mesures in situ réalisées sous les conditions climatiques estivales de Constantine.

Cette analyse a concerné la réponse de la température ambiante et la température de feuillage.

La période de simulation est compatible avec la durée de l'expérience. Elle a été effectuée sur une période de trois jours en prenant en considération les conditions environnementales et les paramètres de la conception du bâtiment testé expérimentalement. Les calculs sont effectués, pour un pas de temps égal à une (1) heure.

Les données microclimatiques de la ville de Constantine introduites dans le programme sont : la température de l'air et l'humidité relative. En raison de manque d'équipement, le rayonnement solaire et la vitesse du vent n'ont pu être mesurés. Ces paramètres ont été modélisés en utilisant les données générées par METEONORM. Les paramètres simulés sont prédéfinis avec des profils horaires de températures comme dans l'étude expérimentale.

Deux méthodes d'analyse ont été adoptées pour vérifier la performance du modèle développé; l'analyse des courbes et l'analyse de corrélation.

II.1. L'analyse des courbes

Cette méthode empirique a démontré une similitude dans l'allure des courbes. Les températures de l'air calculées avec le modèle de végétation sont légèrement inférieures à celles mesurées. Cette différence pourrait s'expliquer par le fait que les données du fichier météo généré par meteonorm sont inférieures à celles dans la réalité. La différence est plus prononcée dans les premières heures du matin avec un écart maximal de 0.8°C (figure IV.12). Il est à noter que les écarts entre les températures calculées et celles mesurées sont inférieurs à 0.5°C sur plus de 90% des valeurs. Par conséquent, on constate une représentation satisfaisante des variations de T_{int} .

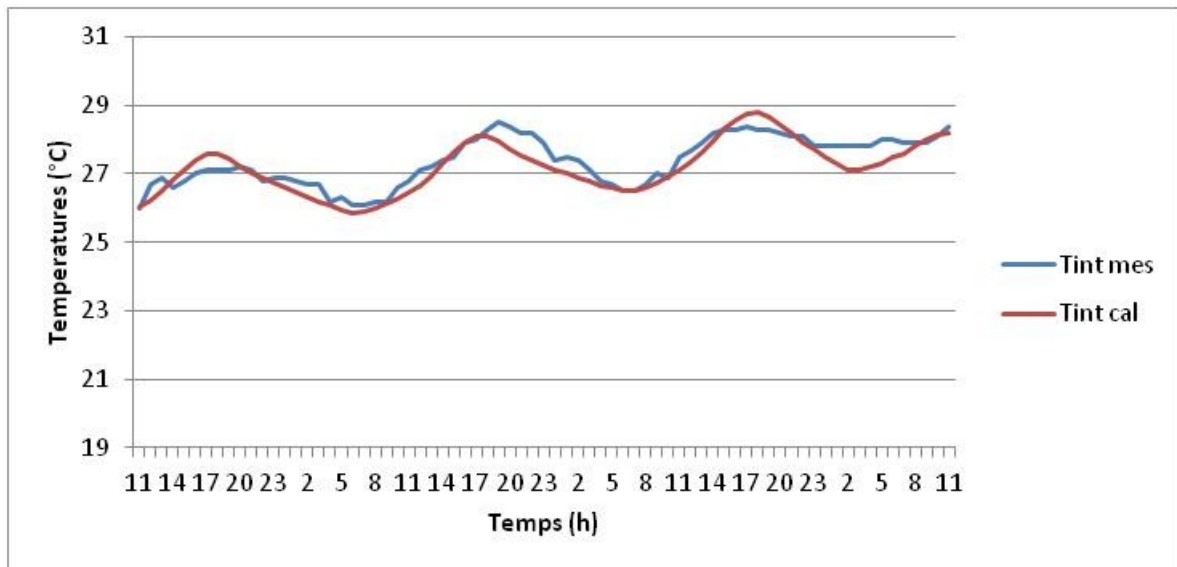


Figure IV. 12 : Comparaison des températures ambiantes calculées et mesurées

La représentation de T_f montre aussi une bonne concordance avec les données expérimentales enregistrant un écart moyen de 0.86°C . L'écart maximal obtenu entre la courbe théorique de la température de feuillage et la courbe expérimentale était de 2.43°C (figure IV.13). Certaines températures des feuilles mesurées avaient des valeurs plus élevées que celles calculées, car dans l'expérience réelle, les enregistreurs étaient situés à des endroits qui seraient exposés à la lumière du soleil à certains moments, alors que dans la simulation, le modèle a montré que la surface des feuilles était toujours uniformément ombragée. Suite à cela, la performance du modèle est considérée satisfaisante.

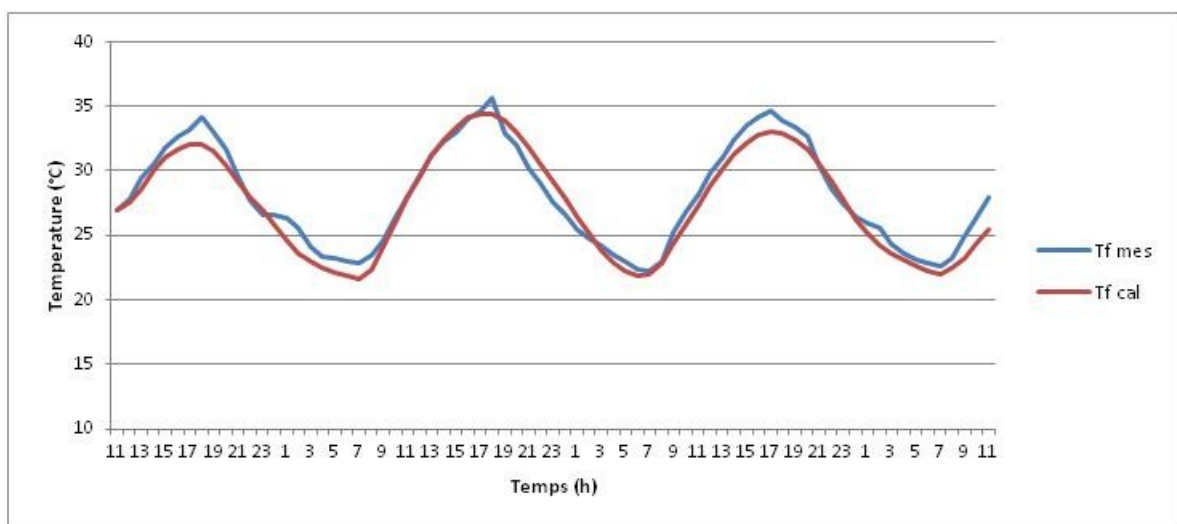


Figure IV. 13 : Comparaison des températures de feuillage calculées et mesurées

II.2. L'analyse de corrélation

L'analyse de corrélation ou d'incertitude est couramment utilisée pour vérifier la concordance des résultats de simulation avec les données expérimentales. Elle aide à mieux comprendre le fonctionnement du modèle. Elle est déterminée à l'aide de paramètres statistiques tels que: le coefficient de corrélation, le coefficient de détermination, l'erreur moyenne et l'erreur quadratique moyenne. Les résultats sont présentés ci-dessous.

II.2.1. Le coefficient de détermination R^2 et le coefficient de corrélation r

L'équation 1 donne la formule du coefficient de corrélation r (Ruiz & Bandera, 2017). Après calcul, les corrélations mesurées et modélisées étaient légèrement plus faibles pour les températures de l'air que pour les températures de feuillage. Les valeurs r vont de 0,91 à 0,97, respectivement pour la température de l'air intérieur et la température de feuillage.

$$r = \frac{n \sum_i^n (m_i - \bar{m})(s_i - \bar{s})}{\sqrt{n(\sum_i^n m_i^2) - (\sum_i^n m_i)^2} \sqrt{n(\sum_i^n s_i^2) - (\sum_i^n s_i)^2}} \dots (1)$$

Le coefficient de détermination R^2 (équation 2) est le plus souvent considéré comme un nombre compris entre 0 et 1. Une valeur proche de 1 indique un parfait accord entre la valeur mesurée et calculée. Les valeurs R^2 entre les températures de l'air et celles de feuillage mesurées et modélisées étaient respectivement de 0,83 et 0,95.

$$R^2 = \frac{\sum_i^n (m_i - \bar{m})(s_i - \bar{s})}{\sum_i^n (m_i - \bar{m})^2} \dots (2)$$

Dans tous les cas, les coefficients de corrélation et de détermination approchent 1. Cela suggère que les valeurs mesurées et modélisées pour les températures de l'air ambiant et celles de feuillage étaient étroitement corrélées.

II.2.2. L'erreur de biais moyen (MBE) et l'erreur Quadratique Moyenne RMSE

Pour plus de précision, nous avons eu recours à d'autres formules statistiques, telles que les indicateurs MBE et MRSE qui peuvent être calculés en utilisant les équations (3) et (4), pour les valeurs mesurées et simulées.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)}{n} \dots (3)$$

Où (m_i) représente les valeurs mesurées, (s_i) est la valeurs simulées et (n) le nombre de données mesurées. Dans cette étude, n est égale à 74.

Les valeurs obtenues pour le MBE sont de l'ordre de 0.16 pour Tamb et 0.54 pour Tf. Des valeurs positives de l'erreur moyenne signifient que le modèle sous-estime les données mesurées et des valeurs négatives signifient une surestimation. Cet indice est toutefois sujet à des erreurs d'annulation où la somme des valeurs positives et négatives pourrait réduire la valeur de MBE. L'utilisation de MBE seul n'est pas recommandée. (ASHRAE Guidelines, 14-2002) propose alors une normalisation de l'indice MBE qui est utilisé pour mettre à l'échelle les résultats de MBE, les rendant comparables selon l'équation 4.

$$NMBE (\%) = 100 \frac{\sum_{i=1}^n (mi-si)}{\sum_{i=1}^n (mi)} \dots\dots\dots (4)$$

Les résultats obtenus sont inférieurs à 10% : NMBE=1.08 % pour Tamb et 3.09% pour Tf.

Afin de garantir la qualité du modèle utilisé, il y a lieu de calculer le RMSE et le (CVRMSE) (Equation 5 et 6) qui représentent au mieux la fiabilité du modèle. Plus la valeur de RMSE est petite, plus le modèle s'approche des résultats de mesures.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (mi-si)^2}{n}} \dots\dots\dots (5)$$

Où (n) représente le nombre total de mesures.

Dans les deux cas, les valeurs de RMSE sont très proches de zéro, variant de 0,35 pour Tamb et 1,02 pour Tf à respectivement, ce qui indique que les valeurs prévues pour le modèle proposé correspondent bien aux données expérimentales.

Le coefficient de variation de l'erreur moyenne quadratique (CVRMSE) mesure la variabilité des erreurs entre les valeurs mesurées et simulées. Il n'est pas sujet à des erreurs d'annulation, et par conséquent, (ASHRAE Guidelines, 14-2002) l'utilisent avec NMBE pour vérifier l'exactitude des modèles.

$$CVRMSE (\%) = 100 \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (mi-si)^2}{n}}}{\bar{m}} \dots\dots\dots (6)$$

Où (\bar{m}) représente la moyenne des valeurs mesurées.

Le calcul a donné des valeurs très faibles de CVRMSE de l'ordre de 1.25% et 3.63% pour (Tamb) et (Tf) respectivement indiquant une bonne conformité avec les données mesurées.

Toutes les valeurs statistiques obtenues sont résumées dans le tableau IV.2. En considérant les résultats dans leur globalité, il est clair que le modèle développé produit des résultats corrects pour quantifier l'effet thermique généré par la façade végétalisée. Les résultats de simulation sont jugés suffisamment proches de ceux obtenus expérimentalement. Cette bonne similitude a permis de bien valider le modèle de la paroi végétale. Par conséquent, le modèle numérique a reproduit assez fidèlement l'expérimentation et servira bien évidemment à la modélisation du comportement de façades végétalisées.

Tableau IV. 2 : valeurs statistiques obtenues

Paramètres	r	R ²	MBE	RMSE	NMBE	CVRMSE
Normes	(0-1) Proche de 1		La plus faible possible ou s'approchant de 0		≤10% Modèle calibré sur une base horaire	≤25%
Températures ambiantes	0.91	0.83	0.16	0.35	1.08	1.25
Températures de feuillage	0.97	0.95	0.54	1.02	3.09	3.63

Les paramètres du modèle ont été choisis pour correspondre au mieux aux propriétés de la façade végétalisée expérimentée. Certains d'entre eux sont tirés de la littérature (Ouldboukhitine, 2012 ; Djedig, 2013, Kenai, 2016; Kalani, 2017). Quelques paramètres utilisés et retenus dans la simulation sont résumés dans le tableau IV.3.

Tableau IV. 3: Paramètres retenus pour la validation du modèle

Paramètres	Description	Valeur
F	Indice de surface foliaire	4
Df	Épaisseur moyenne des feuilles	0.
Cpf	Capacité thermique massique du feuillage	4180
Cpair	Capacité thermique massique de l'air	1008
Pf	La masse volumique du feuillage	1000
Ps	Réfectivité solaire du feuillage	0.3
Pw	Réfectivité solaire du mur	0.3
Pair	La masse volumique de l'air	1.2
Tf	Transmissivité du feuillage	0.1
Σf	Taux de couverture végétale	1
ε	Emissivité de la couche végétale	0.95
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	5.67.10 ⁻⁸

III. Etude de sensibilité

Selon (Kenai, 2016), l'analyse de sensibilité, peut jouer un rôle très précieux pour la vérification d'une représentation correcte de chacun des phénomènes étudiés par un modèle fidèle dans sa globalité.

Pour cela, et afin de tester la sensibilité du modèle développé aux paramètres de la plante, une simulation a été réalisée pour la période estivale. Seules quelques recherches ont précisé les paramètres spécifiques de la végétation verticale et leurs effets sur le refroidissement des bâtiments telles que celles de (Perini, et al., 2011), (Djedjig, 2013) et (Susorova, 2013).

Toujours dans le contexte climatique de Constantine, nous avons procédé à une étude de sensibilité afin de déceler les paramètres influents sur le comportement thermique des façades végétalisées. Pour cela, plusieurs simulations ont été effectuées selon les conditions météorologiques de Constantine portant sur la variation de l'indice de surface foliaire (F), le taux de couverture (σ_f), la transmissivité (τ_f) et de l'épaisseur de la cavité d'air (x). La période sélectionnée correspond également à la période de validation du modèle théorique.

Il s'agit de comparer les profils des températures obtenus pour différentes valeurs des paramètres cités en haut. Quelques valeurs attribuées à ces paramètres ont été sélectionnées en se référant à la littérature (Hoyano, 1988) (Holm, 1989) (Djedjig, 2013) (Ip, et al., 2010) (Kenai, 2016) (Ouldboukhitine, 2012) suivant le tableau IV.4. Les autres paramètres ont été fixés dans les mêmes conditions qu'auparavant.

Tableau IV. 4 : Les différents paramètres étudiés et leurs valeurs respectives

Paramètres	Valeurs
Indice de surface foliaire (F)	1 - 2 - 3 - 4 - 5
Taux de couverture (σ_f)	0.5 - 0.6 - 0.7 - 0.8 - 0.9 - 1
Transmissivité (τ_f)	0,1- 0,22- 0,27- 0,31- 0,45
Epaisseur de la cavité d'air (X)	0 -0,1- 1- 3- 5- 10 - 15 - 20 - 30- 35

III.1. Evaluation de l'impact de l'indice de surface foliaire

Les valeurs de l'indice foliaire considérées dans cette étude varient de 1 à 5. La figure IV.13 illustre l'évolution des températures de surface extérieures pour chacune des valeurs d'indice de surface foliaire. L'effet thermique le plus prononcé est enregistré pendant la journée, l'augmentation de l'indice (F) conduit à une baisse des températures de surface générant un effet de rafraîchissement. Des écarts maximaux de température de $0,93^{\circ}\text{C}$, $2,69^{\circ}\text{C}$, $3,6^{\circ}\text{C}$ et $4,15^{\circ}\text{C}$ ont été enregistrés entre ($F=1,F=2$), ($F=2,F=3$), ($F=3,F=4$) et ($F=4,F=5$) respectivement. L'écart entre $F1$ et $F5$ étant de $10,51^{\circ}\text{C}$. Ces écarts sont intimement liés à l'effet d'ombrage et d'évapotranspiration de la végétation.

L'indice foliaire a un effet direct sur la transpiration de la végétation et influence de ce fait le flux de chaleur entrant dans le bâtiment. Les plantes avec des feuilles plus denses et une couverture plus large réalisent les meilleures performances thermiques en augmentant la surface pour l'évapotranspiration (Wong, et al., 2009) (Sunakorn & Yimprayoon, 2011) (Hui & Zheng, 2013). Durant la nuit, les températures sont pratiquement égales pour les différents niveaux d'indice foliaire coïncidant avec les résultats de (Djedjig, 2013) et (Kenai, 2016).

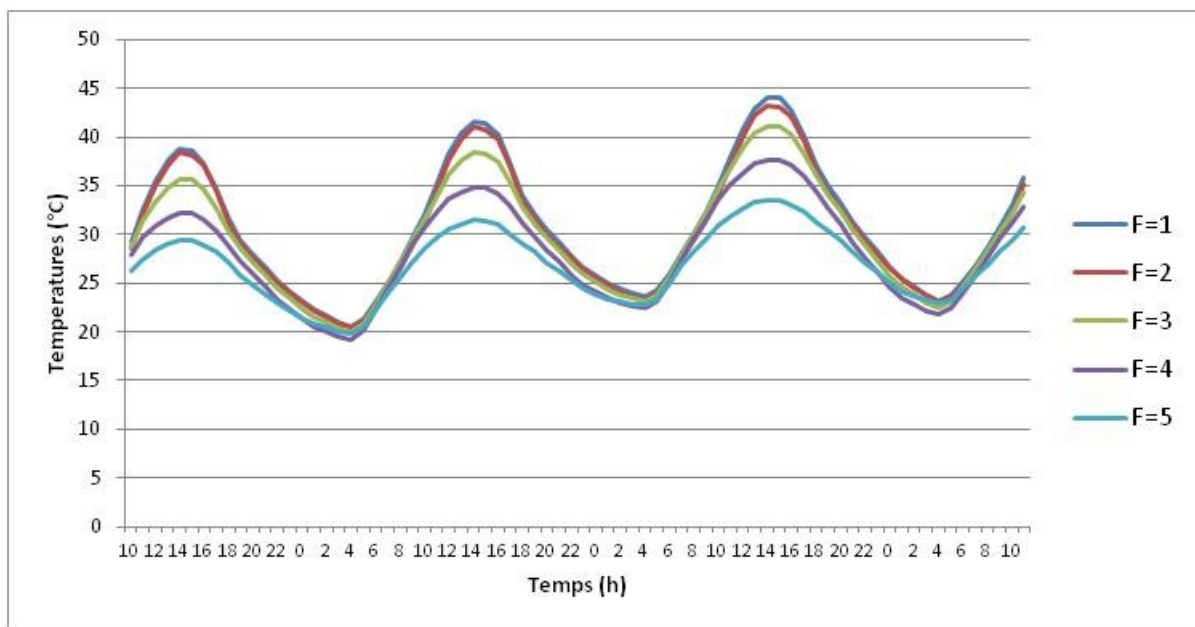


Figure IV. 14 : Evolution de la température de surface pour différentes valeurs de (F)

III.2. Evaluation de l'impact du taux de couverture végétale

Sur la base de clichés photos pris tous les mois de l'année, (Kenai, 2016) a évalué les taux de couverture de murs végétalisés composés de lierre ou de vigne vierge avec des valeurs allant de 0.5 à 1 (figure IV.14). Les mêmes valeurs ont été proposées par (Djedjig, 2013); (0.5) correspond à une couverture végétale à moitié et (1) correspond à la couverture totale de végétation.

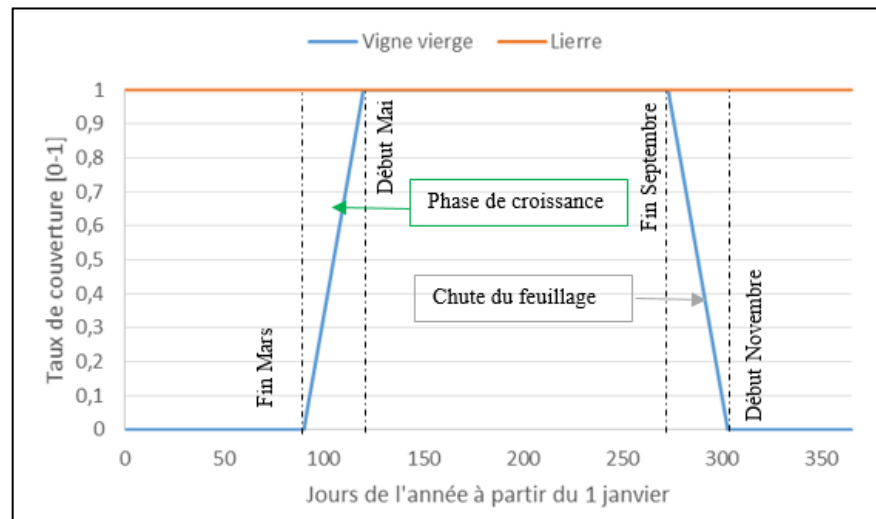


Figure IV. 15 : Cycle de croissance des plantes suivant leur taux de couverture (Kenai, 2016)

La figure IV.15 permet de comparer l'évolution des températures de surface extérieure pour chacune des valeurs du taux de couverture végétale. Durant la journée, une baisse des températures maximales est enregistrée pour les grands taux de couverture végétale. En effet, la couverture des feuilles à 1 peut réduire la température maximale de surface jusqu'à 9,69°C par rapport à la couverture de feuilles à 0.5.

D'après ces résultats, nous pouvons conclure qu'un faible taux de couverture des feuilles permet d'émettre un flux de chaleur plus élevé qu'un taux de couverture élevé. Plus, le taux de couverture augmente, plus la baisse des températures est considérable et plus les effets d'ombrage et de rafraîchissement sont importants coïncidant avec les résultats de (Kontoleon & Eumorfopoulou, 2010).

(Ouldboukhite, 2012) précise aussi que l'indice foliaire et le taux de couverture sont les termes les plus importants dans l'équation du bilan énergétique au niveau d'une couche végétale.

Par conséquent, vu les résultats enregistrés dans cette étude, le taux de couverture et l'indice de surface foliaire ont une incidence considérable sur le comportement thermique de la paroi végétalisée. Plus ces paramètres sont importants, plus grande sera la performance thermique de la façade végétalisée. Il est important de noter que le taux de couverture végétale modifie substantiellement les températures de surface extérieure. Des résultats similaires ont été vérifiés par (Flores Larsen, et al., 2015) et (Widiastuti, et al., 2018).

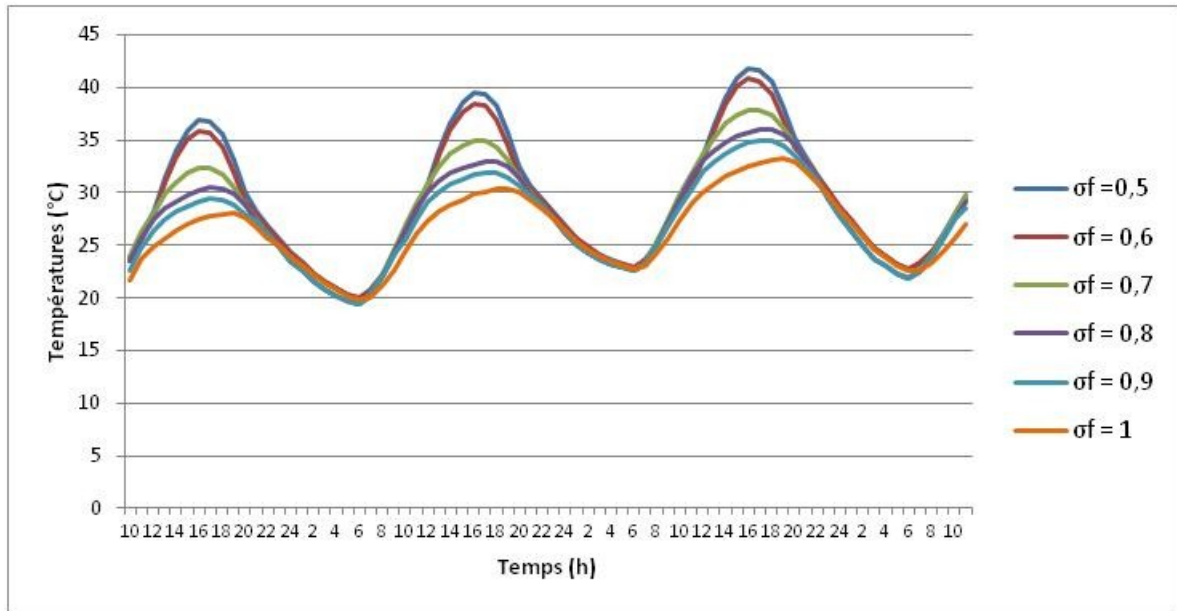


Figure IV. 16 : Evolution de la température de surface pour différentes valeurs de (σ_f)

III.3. Evaluation de l'impact de la transmissivité des feuilles

La transmissivité est estimée sur la base d'une étude expérimentale menée par (Ip, et al., 2010). Les valeurs de transmissivité des feuilles d'une plante grimpante obtenues au cours de la saison de croissance, variaient de 0,45 à 0,1 correspondant à un (1) jusqu'à cinq couches de feuilles respectivement.

L'évaluation de ce paramètre a permis de constater que l'effet de la transmissivité est légèrement perçu durant la journée et négligeable pendant la nuit. Les températures de surface sont d'autant plus basses que la transmissivité (τ_f) est faible (figure IV.16). Une transmissivité de 0,1 entraîne la plus grande baisse de température à la surface extérieure de la paroi enregistrant respectivement des différences maximales de l'ordre de 0,58°C, 1,03°C, 1,35°C, 1,61°C avec les couvertures végétales dont les taux de transmissivité sont de 0,22, 0,27, 0,31, 0,45. L'effet de la transmissivité reste insignifiant comparé à celui de la densité foliaire.

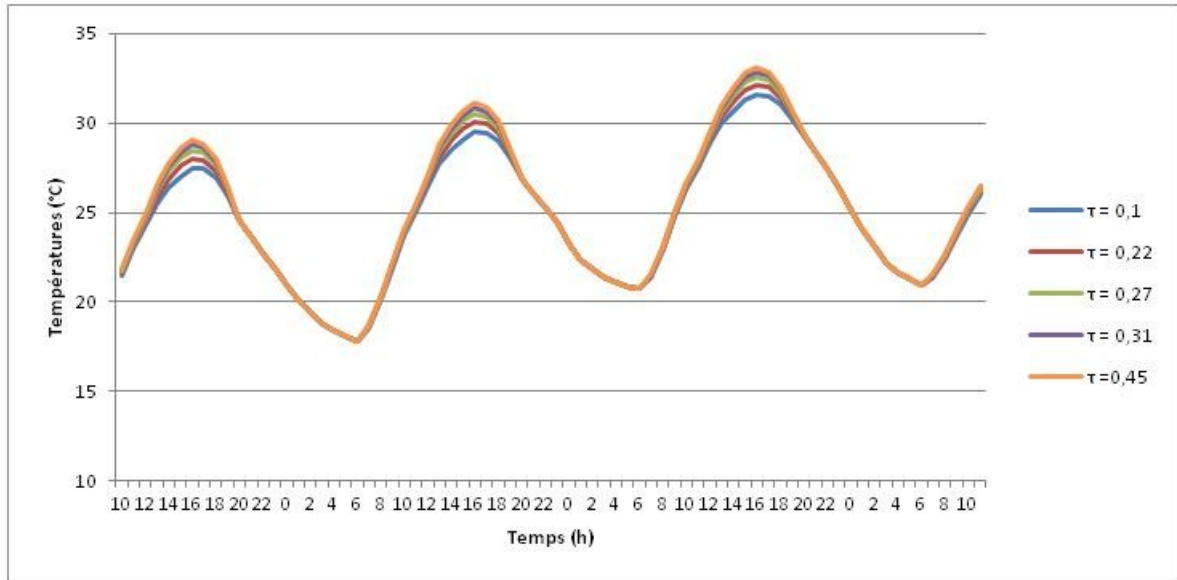


Figure IV. 17 : Evolution de la température de surface pour différentes valeurs de (τ_f)

III.4. Evaluation de l'impact de l'épaisseur de la cavité d'air (x)

Il s'agit ici d'étudier le comportement hygrothermique de la façade végétale en fonction de la cavité d'air en augmentant à chaque fois son épaisseur. Pour évaluer l'effet de cette cavité d'air sur les conditions thermiques au niveau de l'espace choisi, plusieurs scénarii ont été proposés dans le but de déduire les températures opératives, celles de la cavité d'air et l'humidité relative intérieure.

Le modèle suppose de multiples distances entre le mur végétal et le bâtiment. Plusieurs essais ont été effectués et seules quelques valeurs ont été retenues. Plusieurs d'entre elles sont proposées par (Laopanitchakul, 2008), (Kontoleon & Eumorfopoulou, 2010) (Chen, et al., 2013) et (Flores Larsen, et al., 2015).

III.4.1. Variation de (T_c)

Le tableau IV.5 exprime les résultats de calcul des températures de la cavité d'air en fonction de ses différentes épaisseurs.

La variation des températures dans la cavité d'air indique une différence insignifiante entre les points X0, X1 et X2 où toutes les courbes sont pratiquement confondues. En effet, la variation de (X) de 0 à 1cm a provoqué une baisse négligeable de la température moyenne de la cavité d'air de l'ordre de 0°C (X0-X1) et 0.07°C (X0-X2) respectivement. A noter que, X1 et X0 ont enregistré les mêmes valeurs.

La cavité d'air à 5cm (X4) présente une réduction de température maximale de 0,23°C et moyenne de 0.32°C par rapport à X0. Lorsque (X) varie de 5 à 10cm, la diminution est de l'ordre de 0.36°C (maximale) et 0.61°C (moyenne).

Ainsi, la cavité d'air de 15cm d'épaisseur (X6) a permis de réduire la température de cavité moyenne et maximale de 0.68°C et 0.50°C respectivement. La plupart du temps, elle est inférieure à la température de l'air extérieur en raison de l'effet d'ombrage du feuillage et de l'évapotranspiration. Dans le cas d'une cavité de 20 cm (X7), l'effet thermique de la FV devient de moins en moins important. Pour cette distance, les températures maximales enregistrent une faible baisse de l'ordre de 0.04°C par rapport à X=15cm accompagné d'une stagnation de la température diurne pour X8 et X9.

En revanche, durant la nuit, la différence de températures est plus importante que celles des températures diurnes. Cela est d'autant plus bas que l'épaisseur augmente.

Par conséquent, la FV avec une épaisseur de cavité de 5 cm à 15cm offre une plus grande diminution de chaleur que les autres épaisseurs, suggérant un effet de refroidissement plus important. Au delà 15cm d'épaisseur de cavité, la baisse de la température diurne est insignifiante contrairement aux températures nocturnes qui diminuent d'une manière significative.

Ces résultats nous permettent ainsi de confirmer que l'épaisseur de la cavité d'air a un effet direct sur les échanges convectifs avec le mur et a pour rôle de ralentir le mouvement vertical de la chaleur. Plus (X) est petit, plus les transferts convectifs avec la paroi sont limités, meilleur est l'effet de refroidissement de la FV. Ce qui rejoint les résultats de (Malys, 2009) et (Chen, et al., 2013).

Tableau IV. 5 : Variation des températures de la cavité d'air selon son épaisseur

	X0	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
FVD	0 (cm)	0.1	1	3	5	10	15	20	30	35
T c min (°C)	23,92	23,92	23,79	23,65	23,58	23,10	22,66	22,20	22,12	22,06
T c moy	27,51	27,51	27,44	27,35	27,19	26,90	26,83	26,72	26,71	26,70
T c max	31,74	31,74	31,65	31,59	31,51	31,38	31,24	31,20	31,20	31,20

Le calcul des températures de surface extérieures n'a pas été exposé dans cette partie de l'étude car une tendance similaire aux résultats des températures de cavité a été observée.

III.4.2. Variation de (Top)

S'agissant des températures opératives, de faibles fluctuations ont été enregistrées pour les petites épaisseurs (tableau IV.6). Ces températures n'ont montré aucune différence pour les épaisseurs inférieures à 1cm.

Il est important de noter que l'épaisseur de la cavité d'air modifie légèrement les températures opératives moyennes. Les faibles valeurs de X (1 à 3cm), n'assurent pas une différence notable en matière de réduction de Top.

L'effet de la cavité d'air se fait sentir à partir d'une épaisseur de 5 cm jusqu'à 15cm se traduisant par une diminution maximale de la température opérative de l'ordre de 0.23°C (entre X0 et X4), 0.40°C (entre X0 et X5) et 0.49°C (entre X0 et X6) respectivement. Pour les températures minimales, la diminution est de l'ordre de 0.79°C (entre X0 et X4), 0.92°C (entre X0 et X5) et 0.99°C (entre X0 et X6).

L'augmentation de l'épaisseur de la cavité d'air à 20cm et 35cm fait légèrement baisser les températures moyennes et maximales. Au delà de 15cm, l'effet positif de la cavité est perçu durant la nuit et devient négligeable durant la journée. Les températures enregistrées pour les épaisseurs de la cavité supérieures à 5cm se situent dans la plage de confort (23.8°C et 27.8°C). Le rôle de cette couche d'air est de ralentir le taux de transfert de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment participant à l'isolation du mur.

Tableau IV. 6 : Variation des températures opératives selon l'épaisseur de la cavité

	X0	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
FVD	0	0.1	1	3	5	10	15	20	30	35
(cm)										
Top min (°C)	25,80	25,80	25,71	25,53	25,01	24,88	24,81	24,77	24,71	24,64
Top moy	26,97	26,97	26,95	26,84	26,55	26,19	25,90	25,87	25,76	25,74
Top max	28,01	28,01	28,01	27,91	27,78	27,61	27,52	27,49	27,48	27,48

III.4.3. Variation de (HRint)

Le tableau IV.7 montre les valeurs minimales, moyennes et maximales de l'humidité relative intérieure suivant les différentes épaisseurs de cavité. On remarque qu'au fur et à mesure que l'épaisseur de la cavité augmente, les humidités relatives diminuent.

Les épaisseurs inférieures à 3cm (X1, X2) entraînent des humidités relatives très proches à X0 durant toute la journée où une réduction moyenne de 0.04% est enregistrée. La réduction moyenne de HR reste insignifiante pour les épaisseurs inférieures à 5cm ($\Delta HR (X3-X0) = 1.57\%$). Alors qu'une épaisseur de 5cm enregistre un écart moyen de 2.95% (X4-X0).

Lorsque l'épaisseur passe de 5cm à 10cm, la réduction moyenne de l'humidité relative est de 5,36% (X5-X0). Pour X6 (15 cm), les niveaux d'humidités relatives enregistrées sont également plus bas avec un écart moyen de 7.06% ($\Delta HR (X6-X0)$). De même pour (X7 -X0) (20cm) où l'écart moyen est de 10.262%. Une épaisseur de cavité de 30cm (X8) montre aussi une réduction moyenne de 11.26%. Ces réductions sont encore accentuées pour (X9), qui conduit à une réduction de 12.82%. Pour les valeurs de (x) supérieures à 5cm, l'air s'écoule à travers la cavité d'air et réduit le stockage de l'humidité. A noter que les valeurs d'humidité relatives enregistrées pour les différentes épaisseurs de la cavité se situent dans la marge fixée par le standard ASHRAE (30-60%).

(Chen, et al., 2013) (Safikhani, et al., 2014) (Flores Larsen, et al., 2015) ont rapporté que l'augmentation de l'épaisseur de la cavité d'air est plus efficace dans l'abaissement de l'humidité relative.

A travers cette étude paramétrique, nous pouvons conclure que 5-15cm de cavité d'air permet de refroidir la surface du mur et réduire l'humidité à travers l'enveloppe du bâtiment. L'augmentation de l'épaisseur de la cavité d'air à plus de 20cm n'apporte pas d'amélioration réelle pour la diminution de la température.

Par conséquent, les performances thermiques les plus optimales ont été obtenues avec une épaisseur variant de 5-15cm où l'effet de refroidissement de la FV est accentué et l'humidité relative intérieure est réduite. Cette épaisseur semble suffisante par rapport aux études réalisées par d'autres chercheurs (Laopanitchakul, 2008) (Chen, et al., 2013) (voir chapitre II).

La cavité d'air fournit une isolation thermique supplémentaire pour la façade du bâtiment et influe directement sur l'absorption du rayonnement solaire par le feuillage et par conséquent sur son effet d'ombrage contrôlant ainsi le flux de chaleur pénétrant à l'espace intérieur. Indépendamment de la densité de feuillage, qui intervient comme un paramètre décisif dans l'amélioration des performances thermiques du bâtiment, la capacité isolante de la FV dépend également des propriétés de la couche d'air intermédiaire.

Dans les climats méditerranéens, les façades vertes indirectes réduisent non seulement la chaleur, mais aussi la température de la cavité d'air située entre la couche végétale et la surface du mur impliquant le renforcement de l'isolation de l'enveloppe (Pérez, et al., 2011). Ce vide entre le mur et la plante a également pour rôle de réduire la stagnation de l'humidité, ce qui rejoint les résultats de (Laopanitchakul, 2008). La couche d'air affecte la réponse hygrothermique de la FV. Son effet isolant est perçu durant la journée et devient important pendant la nuit.

Tableau IV. 7 : Variation des humidités relatives intérieures selon l'épaisseur de la cavité d'air

	X0	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
FVD	0 (cm)	0.1	1	3	5	10	15	20	30	35
HR min (%)	40,05	40,05	39,89	38,41	36,92	34,16	32,2	31,12	30,38	29,89
HR moy	47,84	47,84	47,80	46,27	44,89	42,48	40,78	37,58	36,58	35,02
HR max	58,57	58,57	58,06	57,28	56,36	55,13	53,94	52,96	50,16	48,42

Conclusion

Afin de tester la pertinence du modèle développé, de le valider et d'évaluer la performance thermique des façades végétalisées sous un climat semi-aride, nous avons procédé à la comparaison des résultats numériques aux données expérimentales.

Les résultats de l'étude expérimentale menée à Constantine dans deux pièces, l'une végétalisée et l'autre témoin ont révélé que la façade végétale a considérablement réduit la température de la surface extérieure et la température de l'air intérieur du bâtiment par temps chaud et ensoleillé. Elle offre donc les meilleures performances thermiques grâce à l'effet d'ombrage et d'évapotranspiration durant le jour. Cependant, la FV peut entraver la dissipation de la chaleur ; la ventilation pourrait alors aider à résoudre ce problème.

Pour la validation du modèle, deux méthodes d'analyse ont été adoptées ; l'analyse des courbes et l'analyse d'incertitude. Cette validation a permis de vérifier la précision et la concordance des caractéristiques thermiques et constructives du bâtiment réel avec celles représentées dans le modèle. Les résultats numériques sont proches de ceux obtenus dans l'expérimentation et attestent par conséquent de la bonne performance du modèle développé.

L'analyse de sensibilité quant à elle, a permis de mettre en lumière les paramètres qui influent sur le comportement thermique des façades végétales. Les résultats de cette étude préliminaire ont révélé que la variation de l'indice foliaire, du taux de couverture et de la transmissivité du feuillage a une influence directe sur la variation des températures.

Plus les niveaux d'indice foliaire et du taux de couverture sont élevés, plus l'effet de rafraîchissement est présent et plus les températures de surfaces seront diminuées. Toutefois, cet effet de rafraîchissement est d'autant plus important pour les faibles valeurs de transmissivité.

Le vide d'air formé entre la façade végétale et le bâtiment compte également parmi les facteurs affectant la performance thermique du bâtiment. L'ajout d'une couche d'air entre la couverture végétale et le mur extérieur a pour rôle de réduire le transfert de chaleur et l'humidité relative. Il faut toutefois souligner que les paramètres testés dans cette partie de l'étude ne sont pas les seuls à avoir une incidence sur le comportement thermique des FV. D'autres paramètres tels que l'orientation de la FV sont à investiguer ce qui fera l'objet du prochain chapitre.

CHAPITRE –V-

EFFETS DES FAÇADES VEGETALES SUR LES BESOINS ENERGETIQUES DES BATIMENTS

Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons souligné la convergence des résultats numériques et des données expérimentales ainsi que l'influence de plusieurs paramètres sur la performance thermique des façades végétalisées. A partir de ces éléments et en guise d'application du modèle développé et afin de vérifier les hypothèses émises au départ et concrétiser l'objectif de cette recherche qui rappelons-le, consiste en la modélisation et l'étude du comportement thermique et énergétique des façades végétalisées, une série de simulations numériques à l'aide du logiciel TRNSYS a été alors effectuée.

Il s'agit de tester l'effet de plusieurs configurations de FV. La première simulation concerne la comparaison entre l'effet de l'isolation thermique et celui de la façade végétale et la deuxième porte sur l'évaluation des performances thermiques et énergétiques d'un bâtiment selon différentes orientations de FV. Les résultats de cette partie de l'étude sont présentés sous forme de profils de consommation d'énergie et de grandeurs physiques tels que les températures opératives et de surface.

I. Comparaison entre les performances thermiques et énergétiques d'une façade végétale et d'une façade avec isolation classique

L'enveloppe du bâtiment agit de manière différente si elle est dotée d'un isolant ou pas. Plusieurs chercheurs tels que (Medjelekh, 2010) (Cabeza, et al., 2010) (Nait, 2011) (Mansouri, 2018) et (Belili & Abdou, 2020) ont testé l'effet de l'isolation sur le confort thermique et la demande énergétique du bâtiment, où plusieurs aspects ont été examinés tels que le type de l'isolant, son épaisseur et son emplacement. Ces chercheurs confirment que l'isolation thermique extérieure de l'enveloppe du bâtiment est la solution la plus efficace permettant des économies d'énergie et un déphasage du transfert de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur, ou inversement.

Plusieurs matériaux d'isolation ont été proposés dans ces études à savoir : le polystyrène expansé, le polystyrène extrudé, le polyuréthane et la laine de verre. Pour le climat semi aride, l'isolant le plus performant étant le polyuréthane (Nait, 2011) (Cabeza, et al., 2010) (Belili & Abdou, 2020).

L'épaisseur d'isolation optimale à recommander est de 5 à 8 cm accompagnée d'une faible conductivité thermique. Cela a été confirmé par d'autres chercheurs sous le climat humide (Mansouri, 2018), le climat aride (Nezzar & Gourdache, 2004), sub-humide (Medjelekh, 2010) et le climat semi-aride (Nait, 2011).

Jaffal et al (2012) affirment qu'un toit végétalisé contribue à la protection thermique du bâtiment sans toutefois remplacer une couche d'isolant. La contribution de l'isolation thermique du toit est essentielle même si une couche végétale est considérée. Il convient alors de vérifier si cet effet est également valable pour les murs verts. La façade végétale peut-elle remplacer une isolation thermique standard? La question à laquelle, nous essayons d'apporter des éléments de réponse.

Dans cette partie de l'étude et dans l'objectif d'évaluer l'effet isolant de la façade végétale, une comparaison entre le potentiel thermique et énergétique de la couverture végétale et celui d'une isolation thermique conventionnelle a été effectuée (un bâtiment dont la façade est recouverte de végétation ou dotée d'une isolation thermique extérieure). Un bâtiment de référence fera bien évidemment l'objet de comparaison.

I.1. Scénarii de simulation

Plusieurs scénarii ont été proposés pour l'étude. L'espace simulé correspond à celui testé expérimentalement possédant une seule façade orientée ouest. Les autres parois étant mitoyennes pour éviter les disparités quand à l'exposition des différentes orientations. Les effets du microclimat ne sont pas pris en considération dans cette partie de l'étude et les autres paramètres n'ont pas été changés pour la simulation.

Le cas 1 représente le cas de référence dont le mur extérieur est en béton armé sans aucune isolation thermique avec une fenêtre à simple vitrage et occultation.

Le cas 2 représente les mêmes caractéristiques que le cas de référence en plus d'une isolation thermique en polyuréthane (Fisolée).

Le cas 3 représente les mêmes caractéristiques que le cas de référence en plus d'une couche foliaire persistante collée directement au mur extérieur (FVD).

Le cas 4 représente les mêmes caractéristiques que le cas 3 sauf que la couche foliaire est décalée du mur extérieur (FVI).

Le cas 5 représente les mêmes caractéristiques que le cas 2 en plus d'une couche foliaire collée directement à l'isolation thermique du mur extérieur (FVisolée).

Les caractéristiques thermo-physiques du mur extérieur des différents cas sont présentées dans le tableau V.1.

La valeur d'albédo du mur utilisée pour la simulation est de 0.3. Les résultats de cette simulation sont présentés ci-après sous forme de profils de températures opératives et de consommation d'énergie pour la climatisation et le chauffage.

Tableau V.1 : Les caractéristiques thermo-physiques des murs extérieurs des différents cas étudiés

Type de paroi		Caractéristiques			
		Matériaux	Épaisseur (cm)	Conductivité thermique (W/m°C)	Résistance thermique (m ² °C/W)
Cas 1	Mur extérieur sans isolation ou couverture végétale (témoin)	Enduit de ciment	2	1,4	0,014
		Béton	15	1,75	0,085
		Enduit de plâtre	2	0,35	0,057
Cas 2	Mur extérieur avec isolation thermique (Fisolee)	Isolant (polyuréthane)	5	0,035	3,84
		Enduit de ciment	2	1,4	0,014
		Béton	15	1,75	0,085
Cas 3	Mur extérieur avec couverture végétale (FVD)	Enduit de plâtre	2	0,35	0,057
		Enduit de ciment	2	1,4	0,014
		Béton	15	1,75	0,085
Cas 4	Mur extérieur avec couverture végétale (FVI)	Couche végétale	20		
		Cavité d'air	5		
		Enduit de ciment	2	1,4	0,014
Cas 5	Mur extérieur avec couverture végétale et isolation thermique (FVisolee)	Béton	15	1,75	0,085
		Enduit de plâtre	2	0,35	0,057
		Isolant (polyuréthane)	5	0,035	3,84
		Enduit de ciment	2	1,4	0,014

I.2. Présentation du fichier météo

Afin de réaliser les différentes simulations, un fichier météo de la ville de Constantine a été généré à partir du programme METEONRM permettant de disposer pour TRNSYS, des données climatiques fiables chaque heure et chaque mois. Il est à noter que TRNSYS utilise des fichiers météorologiques au format TMY2. Ce fichier comprend les données horaires des températures de l'air, de l'humidité relative, de la vitesse du vent et du rayonnement solaire.

Les simulations du comportement thermique et énergétique du bâtiment ont été effectuées avec un pas de temps d'une heure sous les conditions semi-arides de Constantine.

I.3. Comparaison des effets thermiques et énergétiques des différents scénarii

I.3.1. Comparaison des effets thermiques des différents scénarii

La figure V.1 indique les résultats numériques de la variation des températures opératives pour les différents scénarii pour une journée type durant la saison estivale.

Il en ressort de cette simulation, que durant la journée, les températures opératives calculées dans le bâtiment témoin (cas 1) sont nettement plus élevées par rapport aux autres cas enregistrant des écarts maximaux de 4,34°C, 3,97°C, 4,53°C et 3,73°C pour les cas 2, 3, 4 et 5 respectivement. Les écarts moyens sont de l'ordre de 0,23°C, 0,66°C, 1,35°C et 0,21°C.

La FVD permet un abaissement de la température opérative maximale légèrement inférieur à l'isolation thermique. Comparé à la FVI, la mise en place de l'isolant thermique sur la surface extérieure de la maçonnerie entraîne une faible baisse des variations de températures opératives durant la journée. L'introduction de la cavité d'air et de la couverture végétale (FVI) ralentit davantage le transfert de chaleur à travers la paroi, réduisant ainsi, la température opérative maximale et la chaleur emmagasinée dans la masse de la construction.

Ainsi, la température maximale dans le bâtiment isolé, se produit deux heures plus tard que dans le bâtiment végétalisé (FVD et FVI). La FVD diminue également l'oscillation de la température opérative, et un environnement thermique plus stable peut être obtenu. Son effet de rafraîchissement est plus accentué pendant la journée.

Durant la nuit, le cas 2 et le cas5, enregistrent les températures opératives les plus élevées comparées aux autres cas dépassant les températures extérieurs. Des écarts moyens de 1.84°C et 2.35°C sont obtenus respectivement entre ces deux cas et le bâtiment témoin. Cela montre que la chaleur stockée pendant la journée n'est pas complètement restituée à l'extérieur et reste piégée à l'intérieur à cause de l'isolation extérieure du mur.

A partir des résultats ci-dessus, il en résulte que la température opérative du cas 2, est légèrement inférieure que celle avec la couverture végétale (cas 3) dans la journée mais affecté à une température supérieure pendant la nuit. La plante a de meilleures performances quant à la réduction du transfert de chaleur par rapport à l'isolation classique qui piège la chaleur durant la nuit. Ces résultats sont en accord avec ceux de (Laopanitchakul, 2008) et (Ganji, et al., 2013) (voir chapitre II).

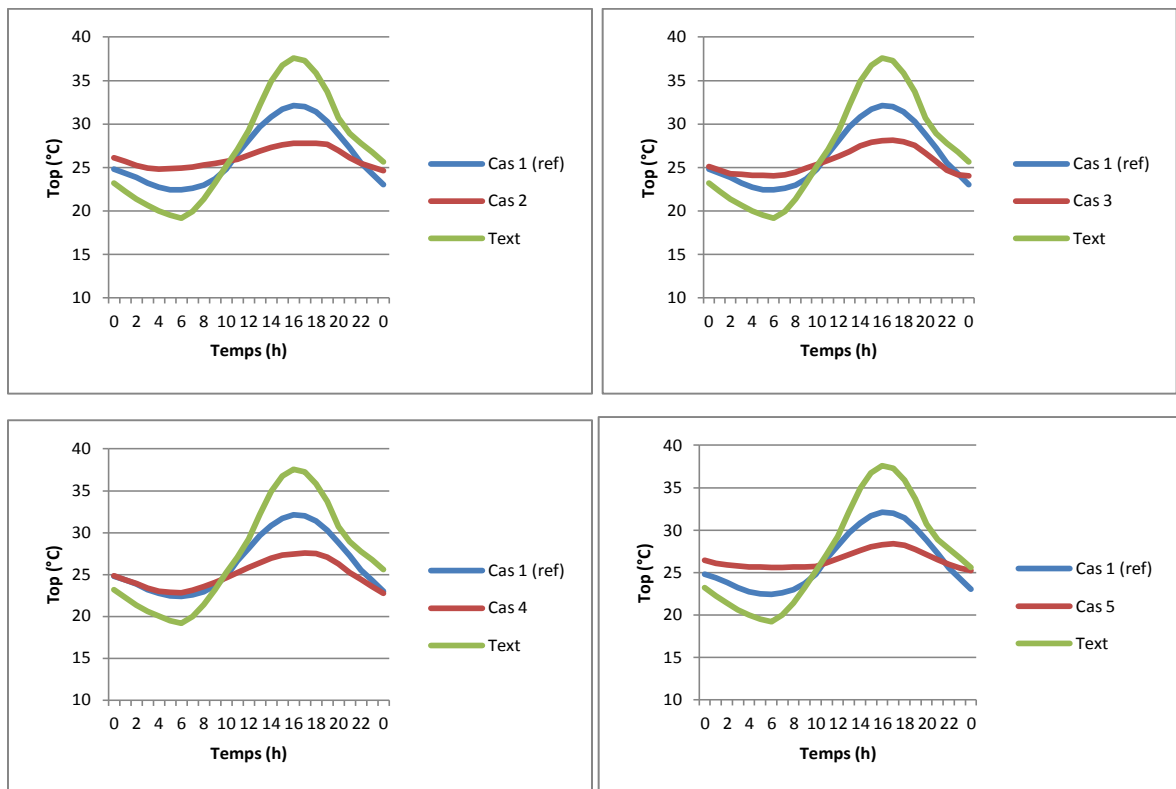


Figure V. 1 : Evolution de la température opérative pour les différents cas

Par ailleurs, l'effet de rafraîchissement des FV est plus accentué dans les bâtiments végétalisés non isolés. D'ailleurs, (Price, 2010), (Kontoleon & Eumorfopoulou, 2010), (Ganji, et al, 2013), (Kenai, 2016) et (Kumar, et al., 2020) recommandent d'adopter les façades végétales pour les bâtiments mal isolés plutôt que pour ceux qui sont bien isolés.

Afin d'améliorer les performances estivales de l'isolation thermique extérieure, (Belili & Abdou, 2020) suggèrent que cette dernière doit être associée à une ventilation nocturne. Elle permet en outre l'évacuation de la chaleur stockée à l'intérieur contribuant efficacement à la réduction de la température intérieure. Ceci démontre qu'une ventilation nocturne est indispensable afin d'assurer le confort thermique. Ces résultats semblent aussi être en accord avec les résultats d'étude menée par (Kontoleon & Eumorfopoulou, 2010).

La FVD offre certes des performances thermiques satisfaisantes pour réduire le transfert de chaleur à travers l'enveloppe du bâtiment à cause de l'évapotranspiration et de l'ombrage du feuillage. Mais c'est la façade végétale indirecte qui permet une meilleure régulation thermique du bâtiment et aide à libérer de la chaleur durant la nuit. La cavité d'air formée entre la couverture végétale et le mur produit une isolation thermique supplémentaire pour la façade du bâtiment et contrôle le transfert de chaleur vers l'espace intérieur en été. Elle permet de renforcer l'isolation thermique de l'enveloppe diminuant ainsi les températures diurnes et nocturnes. D'après (Bekkouche et al, 2012), la résistance d'une cavité d'air peut être équivalente à une couche d'isolation thermique conventionnelle dépendant de l'émissivité thermique du matériau de construction utilisé.

I.3.2. Comparaison des besoins énergétiques des différents scénarii

Pour le calcul des charges d'énergie, le bâtiment est simulé sous une température de consigne de 27°C (l'été) et 19°C (l'hiver).

La figure V.2 illustre l'effet de la couverture végétale et de l'isolant sur la demande annuelle en énergie pour les différents cas. En termes de charges de climatisation, c'est le bâtiment témoin qui affiche les besoins les plus importants enregistrant un besoin total de 29.51 kWh/m² suivie du cas 5 (28.06 kWh/m²) puis le cas 2 (28.29 kWh/m²) et le cas 3 avec (21.76 kWh/m²). Les charges de refroidissement les plus faibles de l'ordre de 18.09kWh/m² sont enregistrées pour le cas 4 où la couverture végétale est décalée du mur entraînant une économie allant jusqu'à 38.7%. Ceci est dû essentiellement à la faible chaleur emmagasinée dans la masse de la construction. Une économie d'énergie de 26.26%

est obtenue pour le cas3, contrairement au cas 2 et au cas 5 où les économies d'énergies sont très faibles de l'ordre de 4.91% et 4.13% respectivement.

Une telle différence est due à la réduction des températures opératives enregistrées dans le bâtiment végétalisé (FVD et FVI) durant toute la journée qui pourrait effectivement contribuer aux économies d'énergie. La couche de végétation ralentit le flux de chaleur à travers la façade, ce qui se traduit par des économies d'énergies.

Le taux de charge de refroidissement enregistré dans le bâtiment isolé est dû essentiellement à l'étanchéité à l'air de l'enveloppe et le manque de ventilation nocturne. L'accumulation de chaleur à l'intérieur de l'espace ne peut pas être facilement dissipée vers l'extérieur.

Les bâtiments très isolés et étanches à l'air (cas 5) sous le climat semi aride peuvent également entraîner un risque de surchauffe et une demande de refroidissement supplémentaire pendant la période estivale. Toutefois, en utilisant la ventilation naturelle, une économie de 25,35% des charges de refroidissement pourrait être obtenue.

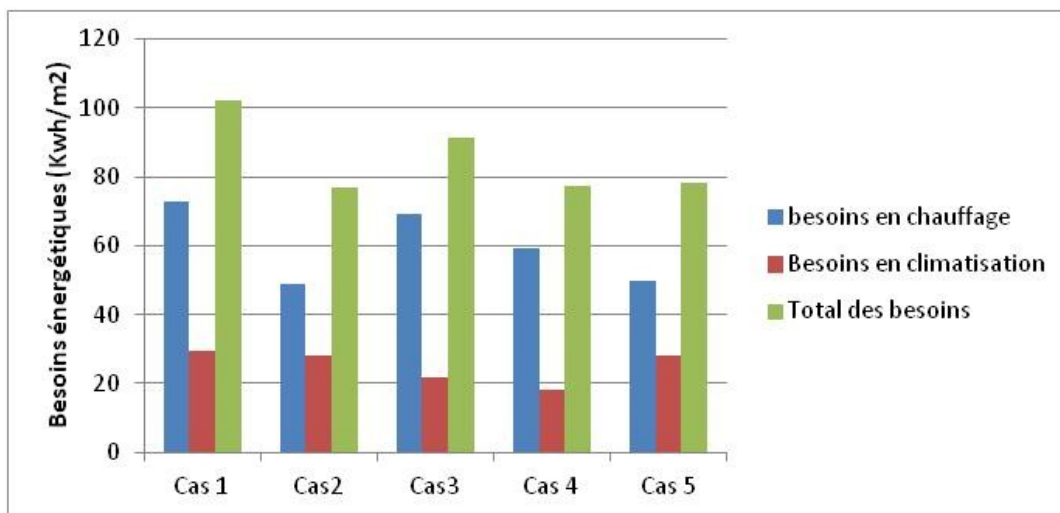


Figure V. 2 : Besoins énergétiques pour les différents scenarii

Contrairement aux besoins en climatisation, le cas 2 (bâtiment isolé) entraîne une baisse considérable des besoins en chauffage (figure V.5). Ce bâtiment enregistre les besoins les plus bas avec une réduction de 32.93% comparé au bâtiment témoin qui affiche les charges les plus élevées enregistrant une consommation de (72.64kWh/m²). De même pour le cas 5, où de fortes économies en chauffage sont enregistrées (31.37%).

La même figure indique par ailleurs une très faible diminution de la consommation de chauffage sous l'effet des FV. Les FVD et FVI ont enregistré une diminution de 4.47%

et 18.61% respectivement. À cet égard, la couverture végétale ne pouvait pas améliorer l'environnement intérieur en hiver et ne permet pas d'avoir de meilleures performances ; ce qui rejoint les résultats de (Kenai, 2016) et (Libessart, 2018). Ces derniers rapportent que les FV peuvent même augmenter les besoins en énergie de chauffage pendant les journées ensoleillées en raison de la limitation des apports solaires par les végétaux. Cependant, (Kalani, et al, 2017) estiment que les économies d'énergie pendant la saison estivale pourraient compenser l'augmentation de la consommation d'énergie de chauffage pendant la saison hivernale dans les conditions subtropicales.

D'après les résultats obtenus dans cette partie de l'étude, un bâtiment doté d'une isolation thermique par l'extérieur et dont l'étanchéité à l'air est maximale, minimiserait les pertes de chaleur augmentant ainsi l'efficacité du bâtiment en hiver. Cependant, en été, cette isolation peut entraîner des problèmes de surchauffe, ce qui rejoint les résultats de (Gupta, et al., 2011).

Par ailleurs, les résultats numériques obtenus révèlent aussi que le bâtiment témoin affiche les charges annuelles les plus importantes avec 102.15 kWh/m². La mise en place de l'isolation sur la surface extérieure de la maçonnerie entraîne une baisse non négligeable des besoins annuels en énergie qui sont de l'ordre de 76.78 kWh/m² suivie de la FVisolée (78.14 kWh/m²) puis la FVI (77.21 kWh/m²) et enfin la FVD avec (91.15kWh/m²). Il est important de noter qu'à Constantine, la saison froide est plus importante que la saison chaude où les degrés jours de chaud (3034) sont plus importants que les degrés jours de froid (1499). Un récapitulatif des résultats des Top et des besoins énergétiques obtenus dans cette partie de l'étude est présenté dans le tableau V.2.

Tableau V. 2 : Résultats des besoins énergétiques

Configuration de bâtiment	Top max	Top moy	Top min	Besoins en climatisation (kWh/m ²)	Besoins en chauffage (kWh/m ²)	Economie d'énergie en climatisation (%)	Economie d'énergie chauffage (%)
Cas 1 (réf)	32.12	26.23	22.41	29.51	72.64		
Cas 2 (Fisol)	27.78	26	24.62	28.06	48.72	4.91	32.93
Cas 3 (FVD)	28.15	25.57	24.01	21.76	69.39	26.26	4.47
Cas 4 (FVI)	27.59	24.88	22.72	18.09	59.12	38.7	18.61
Cas 5 (FVisol)	28.39	26.44	25.22	28.29	49.85	4.13	31.37

A partir des températures opératives et des besoins en climatisation calculés pour les différents cas, il en ressort que le pouvoir isolant de la couverture végétale demeure assez intéressant comparé à celui de l'isolation en polyuréthane qui bloque les échanges infrarouges durant la nuit, ce qui vient confirmer l'hypothèse principale de ce travail. Comparées aux façades avec isolants thermiques conventionnels, la FVI offre les meilleures performances thermiques en réduisant les échanges de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment durant la saison estivale. La cavité d'air ajoutée à la couche végétale participe ainsi à la diminution de la consommation d'énergie liée à la climatisation.

En termes d'économie d'énergie en chauffage, l'influence est très faible en comparaison avec les besoins en climatisation, la façade végétale peut diminuer légèrement cette consommation. L'impact des FVD sur les besoins en chauffage est moins important que l'effet de l'isolation. Les performances énergétiques de la façade végétale indirecte sont bonnes mais n'équivalent pas celles des isolants thermiques en période hivernale.

(Hoelscher, et al., 2016) affirment par ailleurs que les systèmes directs ou indirects de façades végétales sont à privilégier sous les climats océaniques. Pour le climat semi-aride, les FVI à feuillage caduc sont plus efficaces laissant le soleil réchauffer l'intérieur en hiver. Leur effet rafraîchissant dépend principalement de l'ombrage et de l'évapotranspiration de la couverture végétale.

II. Evaluation du comportement thermique et énergétique des FV en fonction de leurs orientations

Afin d'évaluer la performance thermique et énergétique du bâtiment selon l'orientation de la façade végétale, plusieurs simulations ont été effectuées. A noter que l'orientation de la façade joue un rôle important dans le comportement thermique d'une enveloppe de bâtiment car les murs reçoivent une quantité différente de rayonnement solaire en fonction de leur orientation. Pour cela, quatre orientations principales de façades végétales ont été testées en l'occurrence le Sud, Est, Ouest et Nord où les températures opératives et de surface ainsi que les charges de refroidissement et de chauffage du bâtiment ont été calculées.

II.1. Déroulement des simulations

Un bâtiment de deux niveaux (RDC+1) mesurant 5 m de longueur par 5 m de largeur et 6 m de hauteur sous les conditions climatiques semi arides de Constantine est choisi comme modèle pour cette étude numérique. L'enveloppe verticale du bâtiment est en béton et d'enduit de plâtre interne et d'enduit de ciment externe. Afin d'accomplir les différents calculs, le rez de chaussée est choisi dans le but de tester la paroi verticale et d'éliminer l'effet de la toiture. La surface vitrée représente 5% de la surface du plancher pour chaque niveau avec occultation afin de limiter les surchauffes par le vitrage. La Figure V.3 illustre les différentes configurations proposées pour la simulation.

- a) Le premier cas représente le bâtiment de référence décrit en haut.
- b) Le deuxième cas représente les mêmes caractéristiques que le bâtiment de référence et n'a pas de dispositifs d'ombrage à l'exception de la couverture végétale et l'occultation des fenêtres. A chaque fois, la végétation est attribuée à une orientation de façade bien précise (Nord, Est, Sud ou Ouest).
- c) Une autre configuration a été proposée dans cette partie de l'étude pour le même bâtiment où toutes les façades sont supposées végétalisées. Le type de végétation proposé pour les cas (b) et (c) est de type persistant ayant les paramètres suivants : $F=4$, $\sigma=1$, $\tau=0.1$ et une épaisseur de feuillage de 10cm.

Les différentes configurations de bâtiments proposés sont soumises aux mêmes conditions thermiques. Aucun gain interne n'est considéré afin de déterminer purement les effets des façades végétales sur les températures et les charges d'énergie. Le taux de

renouvellement d'air est fixé à une valeur constante de 0,6 changements d'air par heure pour toutes les simulations.

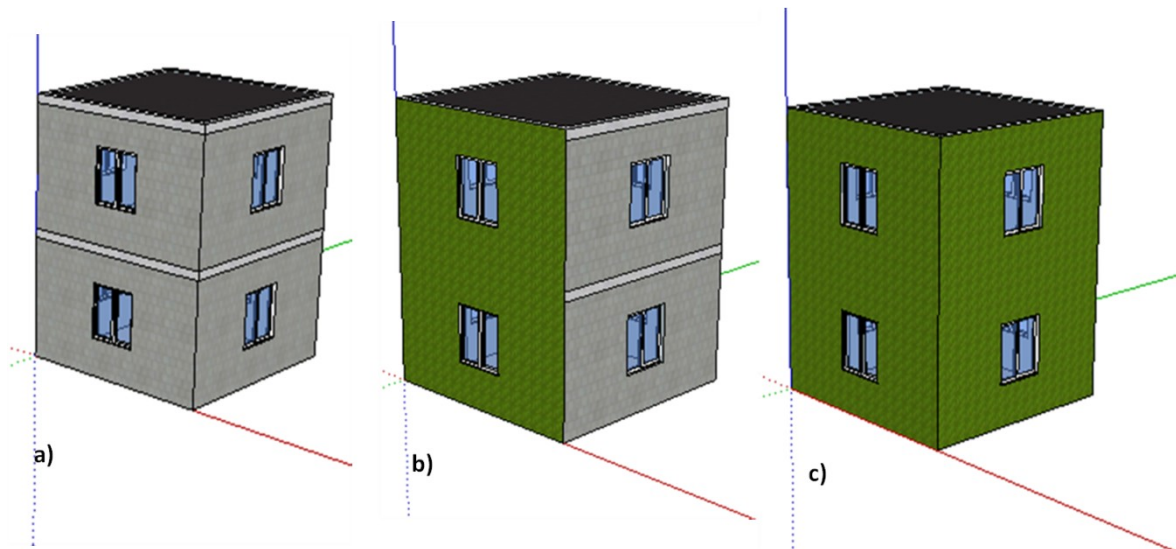


Figure V. 3 : Représentation des zones thermiques analysées.

II.2. Evaluation thermique du bâtiment selon l'orientation des façades végétales

II.2.1. Variation des températures de surface extérieures (T_{so}) :

La figure V.4 montre les résultats numériques de l'effet de l'orientation des façades végétales et de la façade nue sur les températures de surface extérieures du bâtiment. Les façades végétales permettent des réductions des températures de surface pour toutes les orientations testées par rapport au bâtiment de référence qui affiche les températures les plus élevées. Les réductions les plus importantes de la température des murs se sont produites sur les façades Est et Ouest. L'impact est moins fort sur les façades orientées vers le sud et vers le nord.

Les températures de surface extérieures maximales calculées pour les façades orientées à l'ouest et à l'est sont considérablement plus faibles que celles enregistrées sur la surface du mur nu. La façade Est a pu intercepter le rayonnement solaire dans les premières heures de la journée avec une réduction maximale de $9,49^{\circ}\text{C}$ de la température de surface du bâtiment. Pour la façade Ouest, la différence maximale de température est de l'ordre $16,03^{\circ}\text{C}$. Ces façades sont considérées comme celles soumises aux conditions extrêmes recevant d'importants apports solaires. La façade ouest est soumise à de grandes variations journalières et annuelles de la température. Les apports de fin de journée seront stockés dans le mur durant la nuit et restitués le matin. Pour cette orientation, (Kontoleon

& Eumorfopoulou, 2010) ont obtenu une réduction presque similaire de l'ordre de 16.8°C sous le climat méditerranéen d'Athènes alors que (Pan, et al., 2018) ont enregistré une réduction moins importante de l'ordre de 6.1°C sous le climat subtropical.

De même pour la paroi végétale Sud, recevant les apports solaires au milieu de la journée, les températures de surface maximales sont considérablement plus faibles, par rapport aux températures de la paroi nue enregistrant un écart moins important de l'ordre de 7.95°C ($T_{\text{se(Fref)}} \text{ max} = 39.01^{\circ}\text{C}$ alors que $T_{\text{se(FV)}} \text{ max}$ ne dépasse pas 31.06°C).

Cependant, l'effet de la façade végétale orientée au nord sur la température de surface a été négligeable car cette surface ne reçoit pas de rayonnement solaire direct. Les températures maximales sont légèrement inférieures par rapport aux températures du mur nu. Cette différence est de l'ordre de 4.39°C ($T_{\text{se(FVnord)}} \text{ max} = 30.53^{\circ}\text{C}$).

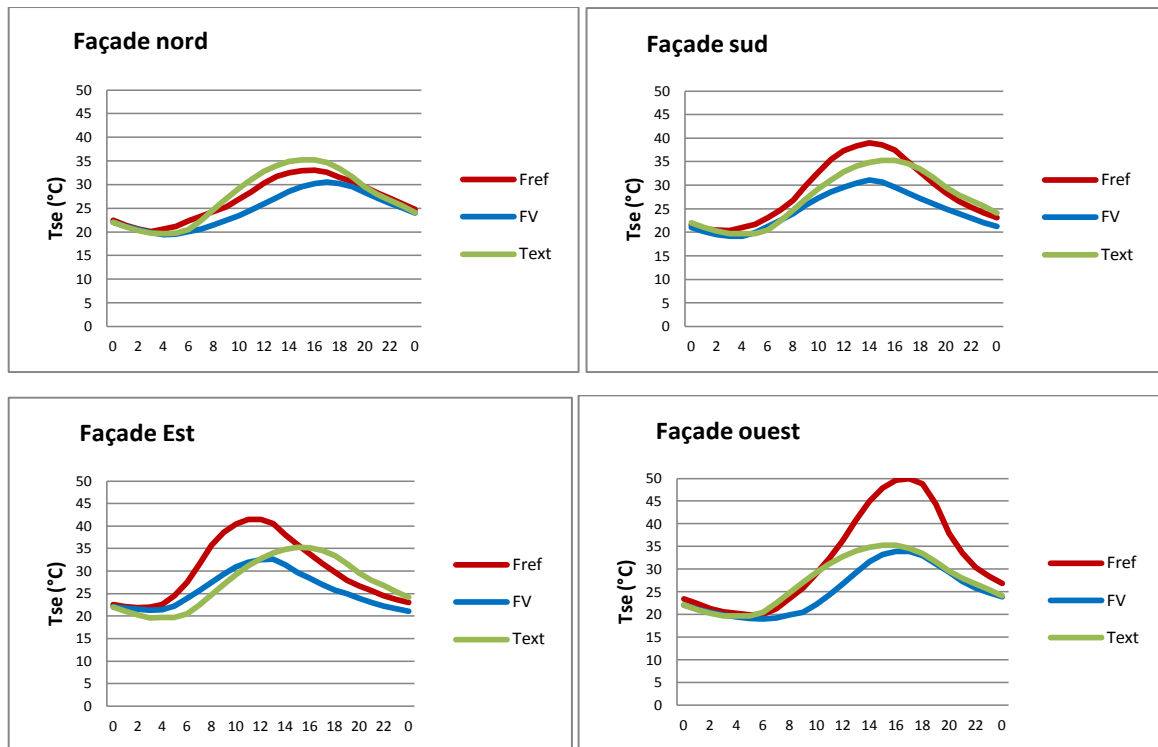


Figure V. 4 : Variation des températures de surface pour les quatre façades (nues et végétales)

II.2.2. Variation des températures opératives (Top):

La figure V.5 montre l'effet des façades végétales sur les températures opératives en période estivale pour les murs orientés Est, ouest, sud, et nord.

Les températures de surface externe ont une influence directe sur les températures opératives. En effet, pour tous les cas simulés, les températures maximales du bâtiment végétalisé sont constamment inférieures que celles du bâtiment de référence. Ce dernier, stocke une grande quantité d'énergie affectant directement les variations de température à l'intérieur de l'espace simulé.

Comparé au bâtiment de référence, la végétalisation de toutes les façades enregistre la plus grande réduction de la température opérative avec un écart maximal de 4,83°C et un écart moyen de 1.59°C.

La couverture végétale sur les façades Est et ouest conduit respectivement à une réduction de 4,1°C et 4.22°C de la température opérative maximale durant la journée et réduit la température minimale de 2,45°C et 0.45°C. Pour l'orientation sud, cette réduction est moins importante de l'ordre de 3,87°C pour la Top max et 1,27°C pour la Top min.

Dans le cas de la façade végétale Nord, la température maximale et la température minimale ont été réduites de 3,4°C et 0.80°C respectivement.

Les résultats de la simulation ont montré que les effets de refroidissement des plantes sont nettement plus importants pour les façades exposées au rayonnement direct. Ces effets sont plus remarquables sur les façades ouest, est et sud que sur la façade nord du bâtiment. Des résultats similaires ont également été observés par (Jim & He, 2011) sous le climat subtropical de Hong Kong et par (Eumorfopoulou & Kontoleon., 2009) et (Pérez, et al., 2017) sous le climat méditerranéen d'Athènes et d'Espagne. Toutefois, (Djedjig, 2013) a obtenu un impact thermique plus important pour les façades ouest et sud sous le climat océanique de La Rochelle.

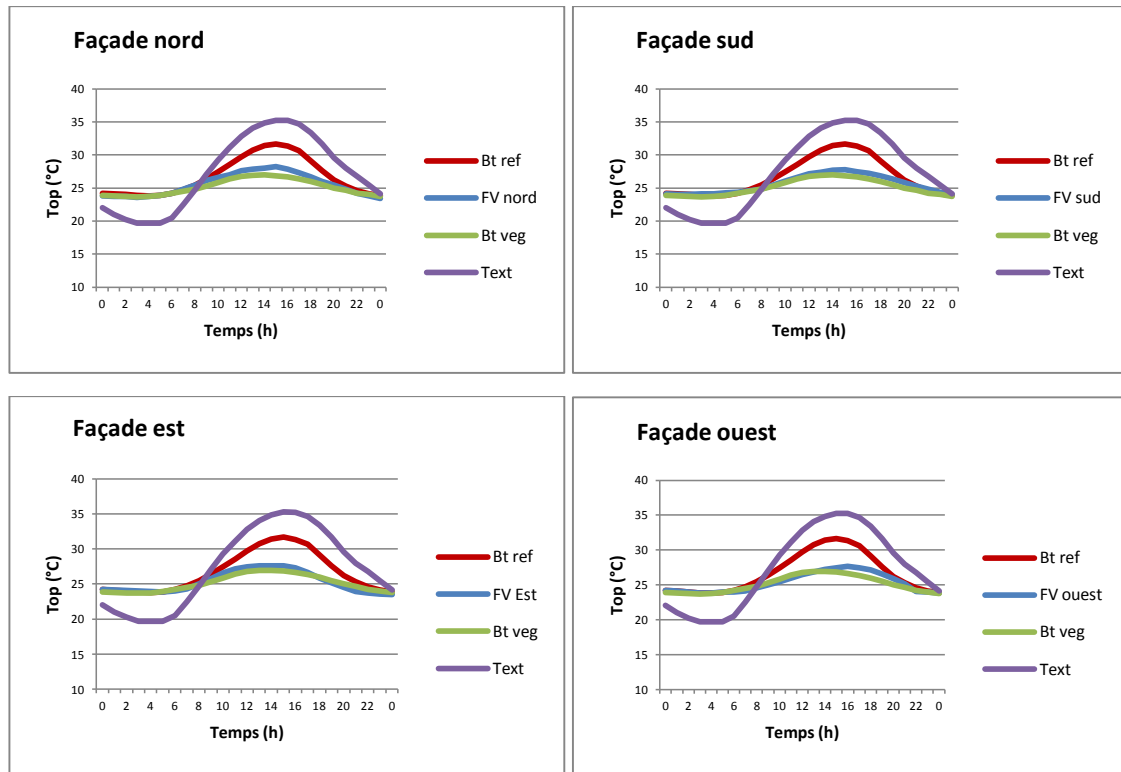


Figure V. 5 : Variation des températures opératives selon les différentes configurations proposées

II.3. Evaluation énergétique selon l'orientation des façades végétales

II.3.1. Les besoins en refroidissement

Les valeurs de température de consigne sont de 19°C pendant la période d'hiver et 27°C pendant la période estivale. La période de chauffage s'étale de novembre à avril et la période de refroidissement s'étale de juin à septembre.

Les résultats susmentionnés montrent que la FV a un effet significatif sur la diminution des températures opératives et surfaciques externes en saison estivale. Cette diminution implique des économies d'énergie potentielles pour le bâtiment étudié. Dunnett & Kingsbury (2008) précisent qu'une diminution de 0.5°C de la température ambiante d'un bâtiment peut conduire à une baisse de 8% de l'électricité.

En effet, les façades végétales affichent des charges en refroidissement nettement inférieures que celles du bâtiment de référence pour toutes les orientations (Figure V.6). Le bâtiment entièrement végétalisé affiche les meilleures économies d'énergie ; sa consommation d'énergie est de l'ordre de 19,1 kWh/m², soit 24,26 kWh/m² de moins que

la consommation d'énergie du bâtiment de référence (43,36 kWh/m²) représentant une économie d'énergie de 55.95%.

Wong et al (2009) ont obtenu des économies d'énergie beaucoup plus importantes sous un climat tropical, de l'ordre de 74% pour un bâtiment opaque entièrement végétalisé et 17.9% pour un bâtiment vitré végétalisé.

Pour les différentes orientations, les économies d'énergie pour le refroidissement sont nettement supérieures pour la façade végétale orientée ouest. La diminution des charges de refroidissement est d'environ 24,84%, suivie de la façade végétale orientée Est avec une réduction de 19,19%. Sous un climat continental humide, (Di & Wang, 1999) ont obtenu une réduction allant jusqu'à 28% de la charge de refroidissement d'un bâtiment dont la façade ouest est végétalisée.

D'autre part, l'économie d'énergie obtenue pour la façade végétale orientée au sud est moins importante par rapport au mur Est. Dans ce cas, les besoins en énergie sont de l'ordre de 13,63% car cette orientation reçoit une énergie solaire inférieure en saison chaude.

Quant à la façade végétale orientée au nord, elle engendre une faible diminution des besoins en climatisation de l'ordre de 7,47% car elle reçoit peu d'ensoleillement en été.

Par conséquent, la réduction de la charge de rafraîchissement de l'ensemble du bâtiment peut considérablement varier en fonction de la configuration des bâtiments et de l'orientation de la façade verte.

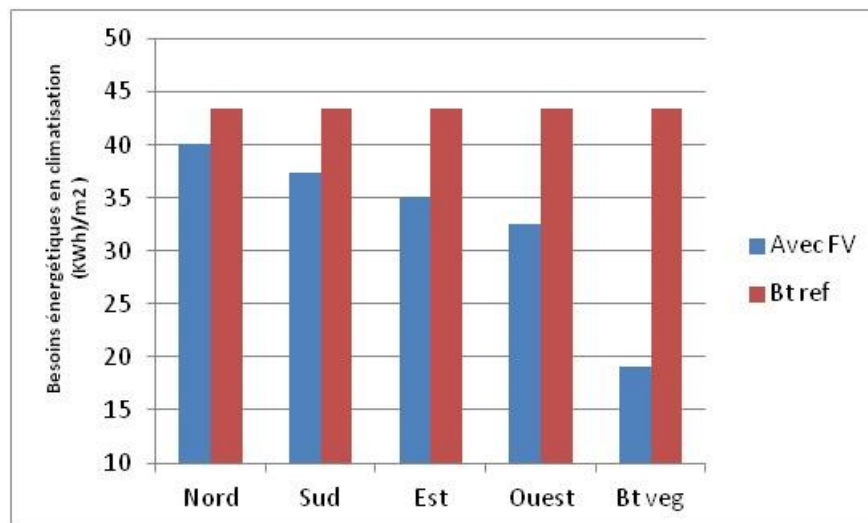


Figure V. 6 : Besoins en refroidissement selon les différentes configurations proposées

Pour les charges mensuelles des différentes orientations de FV, le maximum de demande énergétique en refroidissement se manifeste pour le mois le plus chaud (juillet) avec 12 kWh/m², suivie du mois d'août avec 11.1 kWh/m² et juin, 9.01 kWh/m². Alors que le minimum est observé pour le mois de septembre 5.55 Kwh/m². Le bâtiment entièrement végétalisé a montré les niveaux les plus bas de demande en énergie de climatisation pour tous les mois de surchauffe (7.82 kWh/m² (juil), 5.29 kWh/m² (août), 3.98 kWh/m² (juin) et 2.01 kWh/m² (sept)) (Figure V.7).

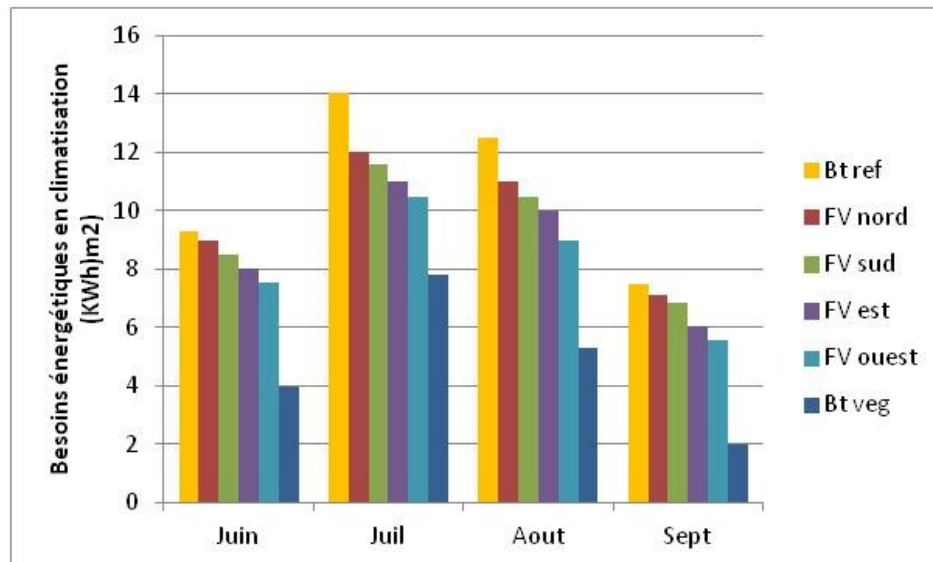


Figure V. 7 : Besoins mensuels de climatisation selon les différentes configurations proposées

Par conséquent, la plus forte réduction de la consommation d'énergie de rafraîchissement due à la façade végétale sous un climat semi-aride est enregistrée pour les orientations est et Ouest. Cela corrobore fortement les résultats obtenus par (Kontoleon & Eumorfopoulou, 2010) sous le climat méditerranéen. Ils ont enregistré des réductions de la charge de refroidissement allant jusqu'à 20% pour la façade Ouest, suivie de l'orientation Est 18%, sud 8%, et vers le nord 5%. De même pour le climat chaud, où (Alexandri & Jones, 2008) ont obtenu 53% de réduction de consommation énergétique pour le refroidissement avec une grande influence pour l'orientation ouest. Contrairement aux climats océanique et continental où la forte économie d'énergie est obtenue par les façades ouest et sud (Djedjig, et al., 2015) et (Susorova, 2013).

Ainsi, cet effet de rafraîchissement est beaucoup plus important en juillet et en août qu'en juin. Bien que ces valeurs absolues ne soient pas généralisables, mais elles confortent bien les résultats de beaucoup de chercheurs. L'orientation de la façade verte joue un rôle

important dans la réalisation d'économies d'énergie, expliqué par le fait que la façade reçoit une quantité différente de rayonnement solaire en fonction de son orientation. Par conséquent, la mauvaise orientation des bâtiments peut être compensée par l'intégration des façades végétales entraînant une économie d'énergie remarquable pour le rafraîchissement.

II.3.2. Les besoins en chauffage

Comme le montre la figure V.8, l'utilisation des plantes à feuilles persistantes diminue légèrement la demande énergétique totale en chauffage par rapport à celle du bâtiment de référence. Ce dernier, enregistre une demande de 65.01 kWh/m^2 . Pour le bâtiment végétalisé, le maximum de la charge de chauffage se manifeste pour l'orientation nord avec $63,3 \text{ kWh/m}^2$, suivie de l'orientation, Est avec 62.04 kWh/m^2 , ouest $61,95 \text{ kWh/m}^2$ et l'orientation sud avec 61.4 kWh/m^2 . Alors que le minimum est observé pour le bâtiment entièrement végétalisé avec 57.9 kWh/m^2 . L'orientation nord est moins favorable que les autres orientations en hiver, dû essentiellement aux faibles apports solaires pour une telle façade.

La charge de chauffage est réduite de 2.63% pour la façade nord, 5.55% pour la façade sud, 4.71% pour la façade ouest, 4.57% pour l'orientation est et 10.94% pour le bâtiment entièrement végétalisé. Dans ce cas, la façade végétale avec plantes persistantes ne favorise pas de grandes économies d'énergie pour le chauffage.

Un récapitulatif des résultats des besoins et des économies d'énergie obtenus dans cette partie de l'étude est présenté dans le tableau V.3.

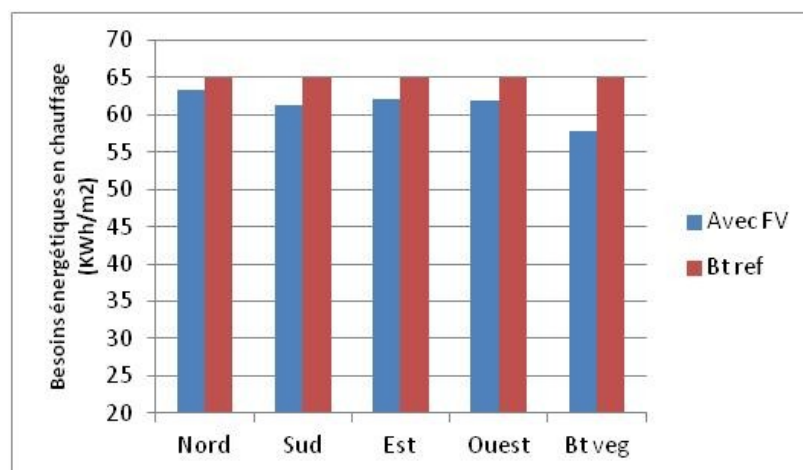


Figure V. 8 : Besoins de chauffage selon les différentes configurations proposées

En outre, les besoins énergétiques mensuels pour le chauffage des trois bâtiments selon les différentes orientations sont présentés dans la figure V.9 où de faibles écarts sont enregistrés. En moyenne, la demande énergétique en termes de chauffage du bâtiment totalement végétalisé est inférieure de 3.06 kWh/m² par rapport à celle du bâtiment de référence.

Pour les différentes façades végétalisées, la demande mensuelle en énergie pour le chauffage la plus importante a été enregistrée durant les mois de décembre, janvier, février et mars. Elle atteint son maximum de 16 kWh/m² pendant le mois le plus froid (janvier), suivie du mois février (13,5 kWh/m²), ensuite le mois de mars (11,7 kWh/m²) et enfin décembre (11,5 kWh/m²). Cette demande en énergie est d'autant plus faible durant les mois d'octobre (1,9 kWh/m²), novembre (6,2 kWh/m²) et avril (2,5 kWh/m²). En moyenne, la charge de chauffage est réduite de 3,17%.

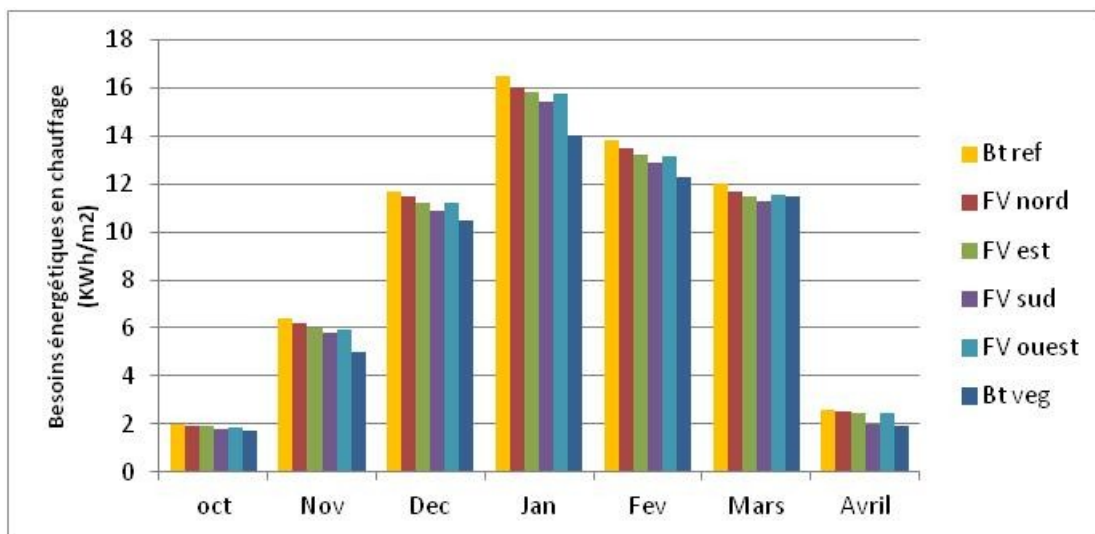


Figure V.9 : Besoins mensuels de chauffage selon les différentes configurations proposées

Dans tous les cas, la façade végétale a permis de réduire les besoins en énergie avec une plus grande baisse pour les besoins de rafraîchissement.

Par conséquent, il est utile de souligner que le choix de la bonne orientation des plantes sur les surfaces verticales peut entraîner une économie d'énergie remarquable pour le rafraîchissement des bâtiments pendant l'été. Ces résultats confirment ceux de (Kontoleon & Eumorfopoulou, 2010) (Djedjig, 2013) et (Coma, el., 2017) ainsi que l'hypothèse émise au départ concernant l'importance de l'orientation de la FV dans la

réalisation d'économie d'énergie avec un effet plus prononcé pour les murs soumis aux grandes variations de températures.

Les résultats numériques obtenus dans cette partie de l'étude sont résumés dans le tableau V.3.

Tableau V.3 : Résultats des besoins et des économies d'énergies

Configuration de bâtiment	Orientation	Besoins en climatisation (kWh/m ²)	Besoins en chauffage (kWh/m ²)	Economie d'énergie en climatisation (%)	Economie d'énergie chauffage (%)
Cas a (réf)		43.36	65.01		
Cas b	Nord	40.12	63.3	7.47	2.63
	Est	35.04	62.04	19.19	4.57
	Sud	37.45	61.40	13.63	5.55
	Ouest	32.59	61.95	24.84	4.71
Cas c		19.10	57.90	55.95	10.94

Conclusion

Le modèle développé précédemment a été appliqué à de diverses orientations et configurations de bâtiment. L'ensemble des simulations numériques réalisées a montré des améliorations significatives de la performance thermique et énergétique de l'enveloppe des bâtiments sous l'effet de la façade végétale.

Indépendamment de l'orientation, les FV génèrent moins de gain de chaleur à travers l'enveloppe du bâtiment et plus d'économie d'énergie pour le refroidissement. Elles sont capables de limiter les surchauffes et de réduire la température de surface des façades de bâtiments pendant l'été de par l'évapotranspiration et l'ombre qu'elles projettent sur le bâtiment. Ce qui confirme encore une fois les résultats de l'étude expérimentale effectuée et le rôle décisif de la végétalisation des parois verticales dans l'amélioration du confort thermique.

La végétation a permis de réduire les gains de chaleur par conduction à travers les murs extérieurs améliorant ainsi l'efficacité énergétique du bâtiment, avec un effet plus prononcé pour les murs orientés à l'est et à l'ouest. Cela s'est traduit par de faibles charges d'énergie pour le refroidissement. Cet effet de refroidissement est beaucoup plus faible sur les façades recevant moins de rayonnement direct. Quant à la charge de chauffage, elle est légèrement diminuée sous l'effet de la végétalisation des façades.

Par conséquent, le choix de la bonne orientation des plantes sur les surfaces verticales peut entraîner une économie d'énergie remarquable pour le rafraîchissement des bâtiments pendant l'été.

Par ailleurs, en comparant les performances thermiques et énergétiques de l'isolation thermique conventionnelle et de la couverture végétale, il s'est avéré que cette dernière offre plus d'avantages en matière de rafraîchissement. Les meilleures performances thermiques et les besoins de refroidissement les plus bas ont été obtenus pour le cas de la façade végétale indirecte avec des économies d'énergie atteignant jusqu'à 38.7%. La couche d'air formée entre la façade et la couverture végétale, sert d'isolation supplémentaire. L'amélioration thermique des conditions intérieures est de plus en plus significative sur les murs extérieurs non isolés.

Les résultats de la simulation sous le climat contrasté de Constantine révèlent aussi que les plantes à feuilles persistantes ont un impact insignifiant sur la demande en chauffage. Pour cela, les plantes à feuillage caduc sont à privilégier sous un tel climat.

Par conséquent, la façade végétalisée s'avère l'une des solutions les plus pertinentes pour réduire les besoins énergétiques pour le refroidissement des bâtiments. Elle constitue par conséquent une alternative au refroidissement passif sous le climat semi-aride.

CONCLUSION GENERALE
&
PERSPECTIVES

Une façon évidente de compenser le manque d'espaces verts en ville est d'intégrer la végétation à l'enveloppe architecturale à travers les toits et les murs verts. En plus de leur intérêt pour l'atténuation de l'effet d'îlot de chaleur urbain, de l'amélioration de la qualité de l'air et de l'accroissement de la biodiversité, les murs verts apportent une plus-value esthétique remarquable aux espaces et peuvent même agir sur l'efficacité énergétique des bâtiments car la surface des murs extérieurs d'un bâtiment est supérieure à celle du toit.

Il est important de rappeler que la plupart du parc immobilier résidentiel en Algérie est en maçonnerie légère sans isolation thermique avec des fenêtres à simple vitrage et un taux d'infiltration élevé, ce qui rend l'utilisation des systèmes de climatisation souvent inévitable en période estivale et, par conséquent, une consommation d'énergie excessive et une augmentation de la pollution de l'air. Pour cela, l'optimisation de l'enveloppe architecturale en ayant recours aux procédés de rafraîchissement passif tels que les enveloppes végétales est plus que recommandé pour un meilleur environnement thermique.

Depuis la période préhistorique jusqu'à aujourd'hui, les murs végétalisés ont fait l'objet d'avancements techniques conséquents et se sont transformés en un élément de paroi à part entière. Ils peuvent se distinguer en murs vivants et façades végétales directes ou indirectes.

L'aperçu des recherches antérieures sur la modélisation thermique des enveloppes végétales examinées dans le cadre de cette recherche a démontré l'efficacité des FV à améliorer l'environnement thermique des bâtiments. Cette modélisation doit se faire par le biais de model ou de programme intégrés dans des codes de simulation thermique et dynamique des bâtiments.

Dans cette optique, cette thèse se veut une contribution à la recherche scientifique dans le domaine de l'architecture bioclimatique et de l'ingénierie. Elle porte sur la prédiction du comportement thermique et énergétique des façades végétales sous les conditions climatiques de Constantine. L'objectif principal étant de faire contribuer ce système à l'amélioration de l'efficacité thermique et énergétique des bâtiments par le biais de la modélisation.

A la suite d'une analyse documentaire approfondie de la modélisation des murs verts, un modèle mathématique basé sur des hypothèses simplificatrices et considérant les interactions bâti-végétation-environnement a été élaboré afin de caractériser les effets des

façades végétales. Ce modèle a la particularité de reproduire l'effet tampon fourni par la cavité d'air et tout le processus thermique y afférent.

Le bilan thermique de la composante végétale a été établi en introduisant les caractéristiques des plantes et les conditions météo en utilisant TRNSYS. Le modèle prend en compte de façon la plus réaliste possible la réponse thermique de la façade végétale et résout les équations du bilan énergétique de la façade par rapport au flux thermique qui se traduit par la contribution de rayonnement solaire émis et absorbé (grandes et courtes longueurs d'ondes), de chaleur sensible et de chaleur latente.

Plusieurs équations de bilan thermique ont été écrites pour chacune des couches composant le système de façade végétale (végétation - cavité d'air). L'analyse des différentes interactions entre la végétation et son environnement a montré que le rayonnement solaire est le paramètre le plus influent sur le bilan thermique global de la façade verte.

Le modèle développé a bien évidemment fait l'objet d'une validation expérimentale au cours de la période estivale sous le climat semi aride de Constantine. Les caractéristiques de la plante ont été introduites dans le modèle développé afin de comparer les propriétés thermiques des façades générées par le modèle avec celles mesurées où de fortes corrélations ont été obtenues. Dans l'ensemble, on peut considérer que le modèle développé est capable de prédire le comportement thermique des façades vertes.

Les mesures in situ effectuées ont permis de démontrer que la végétalisation des murs des bâtiments constitue un procédé efficace pour réduire la température ambiante et les températures de surface des bâtiments grâce aux effets d'ombrage et d'évapotranspiration. L'enveloppe végétale a un impact significatif sur la performance thermique des bâtiments en limitant l'absorption du rayonnement solaire et le transfert de chaleur qui en découle.

En effet, une couche végétale recouvrant une façade peut réduire la température de la surface extérieure de cette dernière et les fluctuations de température intérieure. La chaleur transmise à travers le mur extérieur est ainsi diminuée, en particulier les jours à fort ensoleillement contribuant grandement à l'efficacité de l'enveloppe.

Le modèle a également été utilisé pour analyser la sensibilité de plusieurs paramètres du modèle, en faisant changer les valeurs d'un paramètre tout en gardant les autres paramètres constants. Cette analyse de sensibilité a permis de mettre en avant les

paramètres du modèle les plus sensibles et déterminants dans la performance thermique de ce type de parois. Cette partie de l'étude a permis de constater que les paramètres décisifs pour améliorer le refroidissement passif des FV dépendent principalement du choix des plantes, notamment de leur indice de surface foliaire, leur taux de couverture et leur transmissivité.

D'autres paramètres tels que l'épaisseur de la cavité d'air, intervient également dans le comportement thermique des façades végétales. D'ailleurs, plusieurs épaisseurs de cavité ont été testées. Il s'est révélé que cette cavité peut ralentir le taux de transfert de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment et entraîner des réductions en termes d'humidité au sein de la paroi impliquant le renforcement de l'isolation de l'enveloppe et la diminution de la stagnation de l'humidité.

Par conséquent, les performances thermiques les plus optimales ont été obtenues avec une distance variant de 5 à 15cm, l'effet de refroidissement de la FV est accentué et l'humidité relative intérieure est réduite.

Par ailleurs, tous ces paramètres affectent la réponse thermique du bâtiment d'une manière différente. L'efficacité de la façade végétale dépend fortement de l'indice foliaire.

Le modèle a également permis de réaliser des simulations numériques dans le but d'évaluer l'effet de plusieurs configurations de façades végétales sur la performance thermique et énergétique des bâtiments.

En premier lieu, des façades végétales de différentes orientations ont été testées. Les résultats ont révélé que l'effet de refroidissement dépend de l'orientation de la couche verte intégrée. L'orientation des façades végétales a eu des effets significatifs sur la diminution des températures de la paroi extérieure, de la température opérative et de la consommation d'énergie dans le bâtiment.

Ainsi, les réductions de températures de surface extérieure et celles opératives calculées impliquaient des réductions de la charge de refroidissement de 7,47% pour le nord, 19,19% pour l'est, 13,63% pour le sud et 24,84% pour l'ouest.

Les conclusions de cette partie de l'étude révèlent que l'incorporation adéquate d'une couverture végétale sur les façades de bâtiment peut sensiblement améliorer l'efficacité thermique et énergétique du bâtiment, avec un effet plus prononcé sur les façades très exposées au soleil en l'occurrence les murs est et ouest.

La deuxième partie a également permis de conclure que comparés aux isolants conventionnels qui sont généralement coûteux et ne peuvent être utilisés pour tous les types de construction et dans tous les climats, l'utilisation adéquate de la végétation sur une façade peut constituer un moyen de diminution de l'énergie solaire absorbée par l'enveloppe du bâtiment d'une manière simple et à faible coût. Les meilleures performances thermiques et les besoins de refroidissement les plus bas ont été obtenus pour le cas de l'enveloppe végétale indirecte avec des économies d'énergie atteignant jusqu'à 38.7%. L'amélioration thermique des conditions intérieures est de plus en plus significative sur les murs extérieurs non isolés.

Les résultats de la simulation sous le climat contrasté de Constantine révèlent aussi que les plantes à feuilles persistantes ont un impact insignifiant sur la réduction de demande en chauffage. Pour cela, les plantes à feuillage caduc sont à privilégier sous un tel climat.

Les résultats de la présente recherche viennent à la fin consolider ceux d'autres recherches quant à la contribution de la façade végétale à réduire les besoins en énergie et à assurer un confort thermique intérieur satisfaisant. Dans l'ensemble, l'intégration de la végétation sur les façades semble avoir un effet thermique et énergétique positif pour les bâtiments durant la période estivale sous le climat semi-aride. Ces enveloppes peuvent être considérées comme une stratégie de rafraîchissement passif pouvant améliorer les conditions thermiques intérieures et ajouter une plus value esthétique à l'enveloppe du bâtiment.

Enfin, cette contribution à la recherche scientifique a permis de valider le modèle élaboré, de confirmer les hypothèses émises au départ et de répondre aux objectifs de ce travail.

Recommandations :

En guise de recommandations et afin d'améliorer les performances thermiques des façades végétales sous le climat semi aride, il conviendrait de :

- Choisir des plantes dont le taux de couverture et l'indice foliaire sont à leur maximum et dont la transmissivité est à son bas niveau, pour réduire le transfert de chaleur vers l'intérieur du bâtiment et aboutir à de meilleures performances thermiques. Les feuilles plus petites et plus denses peuvent fournir un meilleur effet thermique en augmentant la surface pour l'évapotranspiration.
- Privilégier les systèmes directs ou indirects de façades végétales.
- Il est préférable d'éloigner l'écran végétal d'une dizaine de centimètre du mur pour éviter une humidité stagnante qui pourrait endommager le mur.
- Opter pour des typologies végétales à feuilles caduques denses avec peu de branchage afin de réduire les gains solaires en saison chaude et d'en profiter en période hivernale.
- Plusieurs plantes grimpantes sont à privilégier pour des climats tempérés tels que les plantes à vrilles et les plantes volubiles. Ces plantes peuvent atteindre jusqu'à une trentaine de mètres de hauteur.
- Les plantes à crampons dont les racines aériennes nécessitent des surfaces rugueuses sont aussi à envisager. Par ailleurs, le choix des revêtements est primordial, car certains sont sujets à détérioration, comme c'est le cas des murs à colombage ou les enduits chaux (voir les détails de ces plantes en annexe A).
- Le choix des façades végétales en fonction de l'orientation est plus que nécessaire pour l'amélioration du confort et une meilleure efficacité du système.
- Les résultats obtenus dans cette recherche nous permettent de confirmer le rôle positif de la présence des végétaux utilisés sur des bâtiments non isolés. D'ailleurs, la végétalisation des façades peut contribuer positivement à la réhabilitation et à la rénovation thermique durable des bâtiments existants impliquant le renforcement de l'isolation de l'enveloppe.

Suggestion de travaux futurs et limites de l'étude:

L'utilisation de murs verts dans l'architecture a ouvert de nouvelles possibilités de conception et a créé de nouveaux défis pour les concepteurs, dans le but d'augmenter

l'efficacité énergétique des bâtiments. Les recherches futures sur les murs végétalisés devraient:

- Etendre l'évaluation du rendement thermique et énergétique des façades végétales à d'autres contextes climatiques algériens, notamment le climat humide et le climat aride.
- Comparer les performances thermiques des plantes intégrées aux façades aux dispositifs d'ombrage conventionnels (les stores, les volets roulants etc.).
- Etendre la partie expérimentale sur une longue durée particulièrement sur la période hivernale pour la végétation persistante afin d'évaluer son effet réel sur la consommation de chauffage.
- Tester une plus grande variété d'espèces végétales adaptées aux zones semi-arides.
- Étudier la contribution des façades végétales dans l'amélioration de l'isolation acoustique des bâtiments.
- Intégrer les modèles de paroi végétales dans des outils CFD.
- Les murs vivants exigent une conception complexe et constituent aussi une piste prometteuse en termes d'amélioration et de régulation d'ambiance thermique et de consommation énergétique. Il s'agit d'élaborer un modèle de murs vivants et le comparer à celui des façades végétales.
- Hormis leurs effets positifs sur le comportement thermique et énergétique des bâtiments, les façades végétales peuvent aussi agir sur le microclimat urbain, la qualité de l'air et la biodiversité. Il y a lieu alors d'explorer comment les façades végétalisées affectent-elles le microclimat et l'effet d'îlot de chaleur urbain.

En termes de limites, la validation du modèle a été limitée par la difficulté de définir les propriétés des plantes. Cela exige une recherche plus approfondie et des mesures expérimentales plus précises pour en déterminer ces données, ce qui permettra d'augmenter davantage la précision du calcul.

Il est à préciser aussi que le modèle développé dans cette étude est relatif aux façades végétales. Il n'est donc pas certain que les conclusions puissent s'appliquer aux murs vivants qui présentent plus de complexité quant à la présence du substrat. D'autres améliorations peuvent être alors apportées au modèle en rajoutant d'autres équations de transfert de chaleur et d'humidité relatives aux composantes des murs vivants.

BIBLIOGRAPHIE

- Afrin, S., 2009. *Green Skyscraper: Integration of Plants into Skyscrapers*. Stockholm(MASTER'S THESIS ON KTH, Department of Urban Planning and Environment Division of Urban and Regional Studies): s.n.
- Akbari, H., Pomerantz, M. & Taha, H., 2001. Cool Surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *70(3)*, pp. 295-310.
- Alexandri, E. & Jones, P., 2008. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and Environment 43*, p. 480–493.
- Allard, Y., 2012. *Mesure et vérification du rendement et simulations calibrées d'un bâtiment résidentiel net zéro énergie étude de cas : abondance Montréal*. Ecole Polytechnique De Montréal : Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de maîtrise ès sciences appliquées (Génie mécanique).
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D. & Smith, M., 2001. FAO irrigation and drainage. *crop evapotranspiration*, Issue 56.
- Anon., s.d. s.l.:s.n.
- APRUE, 2017. *2ème séminaire sur l'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment en Algérie*, Alger: L'Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie (APRUE)..
- ASHRAE Guidelines, 14-2002. *Measurement of energy and demand savings*. Atlanta, Georgia: American Society of Heating, Ventilating and air conditioning Engineers.
- Assimakopoulou, N., 2004. *Niki Assim Développement et évaluation des systèmes de contrôle de régulation d'un vitrage électrochromique pour des applications de bâtiment*. s.l.:université de Lyon.
- Attal, E. et al., 2016. *Caractérisation acoustique et vibratoire d'échantillons inhomogènes de types feuillage ou substrat*. Le Mans France, s.n.
- Ayata, T., Tabares-Velasco, P. & Srebric, J., 2011. An investigation of sensible heat fluxes at a green roof in a laboratory setup. *Building and Environment*, Volume 46, pp. 1851-1861.
- Azos Diaz, K., 2011. *Eléments méthodologiques pour la production de scénarios de végétalisation d'un quartier dans un objectif de réduction de la consommation énergétique des bâtiments*. Thèse de Master STEU (Sciences et Techniques des Environnements urbains) spécialité ambiances et formes urbaines: s.n.
- Basdogan, G. & Çiğ, A., 2016. Ecological-social-economical impacts of vertical gardens in the sustainable city model. *Derleme/Review*, 26(3), pp. 430 - 438.
- Bass, B. & Baskaran, B., 2001. *Evaluating Rooftop and Vertical Gardens as an Adaptation Strategy for Urban Areas*, s.l.: s.n.

- Bekkouche, S. et al., 2012. *L'apport de l'émissivité thermique, cas d'un mur type opaque muni de cavités d'air*. Ghardaia, Algerie, Renouvelables, Unité de Recherche Appliquée en Energies.
- Belili, H. & Abdou, S., 2020. Assessment of the energy efficiency of an externally insulated rehabilitated building under semi-arid climate. *J Fundam Appl Sci*, 12(1S), pp. 288-303.
- Belot, A., 2007. *Simulation des échanges d'énergie et de masse d'un couvert végétal : développement et validation d'un modèle quasi 3D, DART-EB*. s.l.:Sciences of the Universe [physics]. AgroParisTech.
- Benhalilou, K., 2009. *Impact de la végétation grimpante sur le confort hygrothermique des bâtiments sous le climat semi-aride*. Université Mentouri Constantine: Mémoire de magistère.
- Bernier, A.-M., 2011. *Végétalisation du bâtiment en milieu urbain: bénéfiques et perspectives*. Mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en sciences de l'environnement: s.n.
- Berroug, F., Lakhel, E., El Omari, M. & El Qarnia, H., 2010. Simulation numérique des besoins énergétiques d'une serre agricole sous le climat de Marrakech - Maroc. *Revue des Energies Renouvelables*, 13(1), pp. 133 - 148.
- Blanc, P., 2008. *The Vertical Garden: From Nature to the City*. s.l:(Book style) New York: Norton, W. W. & Company, Inc.
- Bonan, G. B., 2008. *Ecological Climatology: Concepts and Applications*. s.l.:second ed. Cambridge University Press..
- Bonhomme, R., 1994. *Chapitre 2 Les rayonnements solaires et le fonctionnement du couvert végétal Partie II : environnement des plantes cultivées*. s.l.:Institut national de la recherche agronomique, Unité de recherches en bioclimatologie, Thiverval-Grignon, France.
- Bozonnet, E., Belarbi, R. & Allard, F., 2003. *Impact du micro climat urbain sur les bâtiments : Circulation d'air et évaluation du rayonnement solaire à l'échelle d'une rue*. LEPTAB Université La Rochelle, s.n.
- Brochard, D. & Benech, L., 2004. *Le jardin de ville*. Paris: Editions Nathan.
- Cabeza, L. et al., 2010. Experimental study on the performance of insulation materials in Mediterranean construction. *Energy and Buildings*, Volume 42, p. 630–636.
- Cameron, R., Taylor, J. & Emmett, M., 2014. What's "cool" in the world of green façades? How plant choice influences the cooling properties of green walls. pp. 198-207.
- Cameron, R., Taylor, J. & Emmett, M., 2015. Hedera green façade – Energy performance and saving under different maritime-temperate, winter weather conditions. *Building and environment*, Volume 92, p. 111–121.

- Cécile, D. M., 2013. *Modélisation de la végétation urbaine et stratégies d'adaptation pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville*. Doctorat de l'université de Toulouse: s.n.
- Cheng, C., Cheung, K. K. & Chu, L., 2010. Thermal performance of a vegetated cladding system on facade walls. *Building and Environment* 45, pp. 1779-1787.
- Chen, Q., Ding, Q. & Liu, X., 2019. Establishment and Validation of a Solar Radiation Model for a Living Wall system. *Energy & Buildings*, Volume 195, p. 105–115.
- Chen, Q., Li, B. & Liu, X., 2013. An experimental evaluation of the living wall system in hot and humid climate. *Energy and Buildings*, Volume 61, p. 298–307.
- Chesné, L., 2012. *Vers une nouvelle méthodologie de conception des bâtiments, basée sur leurs performances bioclimatiques*. Thèse INSA de Lyon: Architecture, space management.
- Chiang, K. & Tan, A., 2009. *Vertical Greenery for the Tropics*. Singapore: National Park Board: (Book style) .
- Clergeau, P., Abbadie, L., David, A. & Foti, L., 2018. *La biodiversité en ville dense : nouveaux regards, nouveaux dispositifs. « Du bord du toit au caniveau »*. Programme de recherche ECOVILLE. Synthèse opérationnelle. Plante & Cité: s.n.
- Coma, J. et al., 2017. Vertical greenery systems for energy savings in buildings: A comparative study between green walls and green facades. *Building and Environment*, Volume 111, pp. 228-237.
- David, M. & Jennifer, M., 2005. Utility of Penman-Monteith, Priestley-Taylor, reference evapotranspiration, and pan evaporation methods to estimate pasture evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, Issue 308, pp. 81-104.
- DAVIS, M. J. M., TENPIERIK, M. J. & RAMIREZ, F. R. a. P. M. E., 2017. More than just a Green Facade: the sound absorption properties of a vertical garden with and without plants.
- de Jesus, M., Lourenço, J., Arce, R. & Macias, M., 2017. Green façades and in situ measurements of outdoor building thermal behaviour.
- De Munck, C., 2013. *Modélisation de la végétation urbaine et stratégies d'adaptation pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville*. Université de Toulouse: Thèse de doctorat.
- Di, H. & Wang, D., 1999. Cooling effect of ivy on a wall Experimental Heat Transfer. *A Journal of Thermal Energy Generation, Transport, Storage, and Conversion*, 13(3), pp. 235-345.
- Dimoudi, A. & Nikolopoulou, M., 2003. Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits. *Energy and building*, 35(1), pp. 69-76.

- Djedjig, R., 2013. *Impacts des enveloppes végétales à l'interface bâtiment microclimat urbain*. Université de La Rochelle(Spécialité génie civil): s.n.
- Djedjig, R., Bozonnet, E. & Belarbi, R., 2015. Analysis of thermal effects of vegetated envelopes: Integration of a validated model in a building energy simulation program. *Energy and Buildings* 86, p. 93–103.
- Djedjig, R., Bozonnet, E. & Belarbi, R., 2016. Modeling green wall interactions with street canyons for building energy simulation in urban context. *Urban Climate* , Issue 16, p. 75–85.
- Dugué, A., 2013. *Caractérisation et valorisation de protections solaires pour la conception de bâtiments : analyse expérimentale et propositions de modélisations*. Bordeaux I(Ecole Doctorale Des Sciences Physiques De L'ingénieur L'université): s.n.
- Dunnett, N. & Kingsbury, N., 2008. *Toits et murs végétaux*. s.l.:Editions du Rouergue.
- Duréault, J., 2013. *Architecture contemporaine et nature en ville*. s.l.:Mémoire de Fin d'Études Sciences agricoles.
- Eumorfopoulou, E. & Aravantinos, D., 1998. The contribution of a planted roof to the thermal protection of buildings in Greece. *Energy and Building*, 27(1), pp. 29-36.
- Eumorfopoulou, E. & Kontoleon, K., 2009. Experimental approach to the contribution of plant-covered walls to the thermal behaviour of building envelopes. *Building and Environment*, Volume 44, p. 1024–1038.
- Facer, J., 2005. *The role of 'greening' in commercial property development*. Fourth-year undergraduate project: s.n.
- Feng, H. & Hewage, K., 2014. Energy saving performance of green vegetation on LEED certified buildings. *Energy and Buildings* 75 , p. 281–289.
- Flores Larsen, S., Filippin, C. & Lesino, G., 2015. Modeling double skin green facades with traditional thermal simulation software. Volume Solar Energy 121.
- Frankenstein, S. & Koenig, G., 2004. *FASST Vegetation Models*, s.l.: US Army Engineer Research and Development Center, Cold Regions Research and Engineering Laboratory.
- Ganji, H., Mohammad Kari, B. & Norouzian Pour, H., 2013. *Thermal performance of vegetation integrated with the building façade*. Pinkafeld, Austria, Forschungs- und Studienzentrums Pinkafeld.
- Givoni, B., 1994. *Passive and low energy cooling of buildings*. New York:Van Nostrand Reinhold: John Wiley&Son,Inc USA.
- Givoni, B., 1998. *Climate considerations in building and urban design*. Van Nostrand Reinhold éd. New-York: s.n.
- Gonchar, J., 2007. *Vertical and Verdant: Living Wall Systems Sprout on Two Buildings in Paris and Vancouver*, s.l.: s.n.

- Grau, E., 2012. *Modélisation DART du transfert radiatif Terre-Atmosphère pour simuler les bilans radiatifs, images de télédétection et mesures LIDAR des paysages terrestres*. s.l.:Doctorat De l'université de Toulouse .
- Gupta, A., Hall, M., Hopfe, C. & Rezgui, Y., 2011. *Building integrated vegetation as an energy conservation measure applied to non-domestic building typology in the uk*. Sidney, s.n.
- Haggag, M., Hassan, A. & Elmasry, S., 2014. Experimental study on reduced heat gain through green facades in a high heat load climate. *Energy and Buildings* 82, p. 668–674.
- Heyraud, G. M., De Montmollin, B., Almeida, S. & Monney, F. M., 2009. *La végétalisation des façades et des murs*. Conseils pour la réalisation et l'entretien ville de Neuchâtel: Guide "Nature en Ville" .
- Hoelscher, M.-T., Nehls, T., Jänicke, B. & Wessolek, G., 2016. Quantifying cooling effects of facade greening: Shading, transpiration and insulation. *Energy and Buildings*, Volume 114, p. 283–290.
- Hoi, M., Lam, Y., Ip, K. & Miller, A., September 2005. *Thermal shading effect of climbing plants on glazed facades*. Tokyo, s.n., pp. 27-29.
- Holm, D., 1989. Thermal Improvement by means of Leaf Cover on External Walls -- A Simulation Model. *Energy and Buildings*, 14, pp. 19 - 30.
- Hoyano, A., 1988. Climatological uses of plants for solar control and the effects on the thermal environment of a building. *Japan Energy and Buildings*, Volume 11, pp. 181-199.
- Huang, Y., Akbari, H., Taha, H. & Rosendeld, A., 1987. The Potential of Vegetation in Reducing Summer Cooling Loads in Residential Buildings. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Volume 26, pp. 1103-1116.
- Hui, S. C. M. & Zheng, Z., 2013. *Thermal regulation performance of green living walls in buildings*. Hong Kong, s.n.
- Hunter, A. et al., 2014. Quantifying the thermal performance of green façades: A critical review. *Ecological Engineering*, Volume 63, p. 102– 113.
- Ip, K., Lam, M. & Miller, A., 2010. Shading performance of a vertical deciduous climbing plant canopy. *Building and Environment* 45, pp. 81-88.
- Jaffal, I., Ouldboukhitine, S. & Belarbi, R., 2012. A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renewable Energy*, Volume 43, pp. 157-164.
- Jannot, Y., 2002. *Transferts thermiques*. s.l.:Ecole des Mines Nancy.
- Jim, C., 2015. Greenwall classification and critical design-management assessments. *Ecological Engineering*, Volume 77, p. 348–362.

- Jim, C. & He, H., 2011. Estimating heat flux transmission of vertical greenery ecosystem. *Ecological Engineering*, Volume 37 Issue 8, pp. 1112-1122.
- Jim, C. & Tsang, S., 2010. Biophysical properties and thermal performance of an intensive green roof. *Building and Environment*, p. 1263–1274.
- Johnston, J. & Newton, J., 2004. *Building Green: a guide to using plants on roofs, walls and pavements*, London: The London Ecology Unit.
- Jones, H. & Rotenberg, 2001. Energy, Radiation and Temperature Regulation in Plants. Dans: April (University of Dundee): *ENCYCLOPEDIA OF LIFE SCIENCES*, John Wiley & Sons, Ltd.
- Kalani, K., Dahanayake, C. & Chow, C. L., 2017. Studying the Potential of Energy Saving through Vertical Greenery Systems: Using EnergyPlus Simulation Program. *Energy and Buildings*, Volume 138, pp. 47-59.
- Kenai, M. A., 2016. *Caractérisation, analyse et modélisation des échanges énergétiques entre un mur végétalisé intensif et son environnement*. Thèse de doctorat Génie Civil: s.n.
- Knowles, L., 2005. *Living Wall: A Feasibility Study for SLC*, s.l.: Final Report University of Waterloo.
- Köhler, M., 2008. Green facades—a view back and some visions. *Urban Ecosystem*, vol. 11, pp. 423-436.
- Kontoleon, K. & Eumorfopoulou, E., 2010. The effect of the orientation and proportion of a plant-covered wall layer on the thermal performance of a building zone. *Building and Environment* 45, p. 1287–1303.
- Koyama, T. et al., 2013. Takuya Koyama, Mika Yoshinaga, Hideki Hayashi, Kei-ichiro Maeda, Akira Yamauchi Identification of key plant traits contributing to the cooling effects of green façades using freestanding walls. *Building and Environment*, Volume 66, pp. 96-103.
- Koyama, T., Yoshinaga, M., Maeda, K.-i. & Yamauchi., A., 2015. Transpiration cooling effect of climber greenwall with an air gap on indoor thermal environment. Volume 83, p. 343–353.
- Kumar, D. et al., 2020. Comparative analysis of building insulation material properties and performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 131.
- Labouze, E., 1993. *Bâtir avec l'environnement, enjeux écologiques et initiatives industrielles*. Paris: L'entrepreneur.
- Lambertini, A., 2007. *Vertical Gardens*. s.l.:London: Thames and Hudson.
- Lam, M., 2006. *Experimental modelling of deciduous climbing plants as shading devices*. s.l., Institute for tropical architecture.

- Lam, M., H. Y., I. K. & Miller, A., 2005. *Thermal shading effect of climbing plants on glazed facades*. Tokyo, s.n.
- Laopanitchakul, V. & al, 2008. *Climbing-Plant on solid wall for Reducing Energy in Tropical Climate*. s.l., s.n.
- Laparé, F., 2013. *The green room method: incorporating green façades into whole building energy models*. A Major Research Project presented to Ryerson University, Canada: s.n.
- Lavigne, P. & al, 1994. *Architecture climatique Une contribution au développement durable Tome 1 : Bases physiques*. s.l.:EDISUD.
- Lee, L. & Jim, C., 2017. Subtropical summer thermal effects of wire-rope climber green walls with different air-gap depths. *Building and Environment*, Volume 126, pp. 1-12.
- Libessart, L. K. M. A., 2018. Measuring thermal conductivity of green-walls components in controlled conditions. *Journal of Building Engineering*, Volume 19, p. 258–265.
- Li, C., An, H. & Lu, K., 2019. *the effects of green facades on thermal performance in humid and hot climate*. s.l., Springer Singapore.
- Liébard, A. & De Herde, A., 2005. *LiébarTraité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques ; Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*. s.l.:Presses de l'imprimerie Moderne de l'Est, Baume-les-Dame.
- Luquet, D., 2002. *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*. Paris: Institut National Agronomique.
- Madre, F. & Vergnes, A., 2018. *La végétalisation du bâti: support de la biodiversité urbaine?*. Paris(Museum National d'Histoire Naturelle Département d'Ecologie et Gestion de la Biodiversité): s.n.
- Malakar, M., Acharyya, P. & Biswas, S., 2017. Vertical gardening for enlivening the ambiance. *Journal of Crop and Weed*, 3(13), pp. 89-93.
- Malys, L., 2009. *Modélisation climatique des façades végétales : caractéristiques radiatives des couvertures végétales de façades*. s.l.:s.n.
- Malys, L. & Musy, M. a. I. C., 2016. Direct and Indirect Impacts of Vegetation on Building Comfort: A Comparative Study of Lawns, GreenWalls and Green Roofs. *Energies, MDPI*, Volume 9 (1).
- Manso, M. & Castro-Gomes, J., 2015. Green wall systems: A review of their characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*41(2015), p. 863–871.
- Mansouri, O., 2018. *Effet de la réflectivité de la couleur de l'enveloppe sur la consommation énergétique du bâtiment et sur le confort thermique intérieur -Cas de la ville de Skikda-*. Université Constantine3: s.n.

- Marchi, M. et al., 2015. Carbon dioxide sequestration model of a vertical greenery system. *Ecological Modelling*, Volume 306, pp. 46-56.
- Marty, P., 2012. *cours de Transferts Thermiques (Conduction et rayonnement)*. Génie des procédés: Université Joseph Fourier, Grenoble.
- Mazria, E., 1980. *Le guide de l'énergie solaire passive*. s.l.:Editions Parenthèses.
- Mazzali, U. et al., 2013. Experimental investigation on the energy performance of Living Walls in a temperate climate. *Buliding and environment*, Volume 64, p. 57–66.
- Mcpherson, E., Herrington, L. & Heisler, G., 1988. Impacts of Vegetation on Residential Heating and Cooling. *Energy and Buildings*, Volume 12, pp. 41-51.
- Medjelekh, D., 2006. *Impact de l'inertie thermique sur le confort hygrothermique et la consommation énergétique du bâtiment : cas de l'habitation de l'époque coloniale à Guelma*. Université Mentouri Constantine: Mémoire de Magister.
- Medjelekh, D., 2010. Modélisation de l'impact de l'isolation thermique sur la température intérieure. *Revue des énergies renouvelables*, Volume 13, pp. 265-273.
- Musy, M., 2014. *Une ville verte, les rôles du végétal en ville*. s.l.:Editions Quae.
- Musy, M. & Bozonnet, E., 2011. *Façades et toitures: impacts climatiques et thermiques*. s.l., s.n.
- Nait, N., 2011. *La réhabilitation énergétique dans les logements collectifs existants. Cas du climat semi aride de Constantine*. Université Mentouri Constantine: Mémoire de Magistère.
- Neuchâtel, 2009. *La végétalisation des façades et des murs Conseils pour la réalisation et l'entretien*, s.l.: Ville de Neuchâtel.
- Newton, J., Gedge, D., Early, P. & Wilson, S., 2007. *Building Greener: Guidance on the Use of Green Roofs, Green Walls and Complementary Features on Buildings*. London: CIRIA Publication.
- Nezzar, S. & Gourdache, M., 2004. *Etude des performances énergétiques d'une conception bioclimatique en région aride*, s.l.: World Energy Council 5th Floor, Regency House, 1-4 Warwick Street, London W1B 5LT, UK.
- Ochoa, J., 1999. *Vegetation as an instrument for climate control*. Technical University of Catalonia, School of Architecture: Doctoral Thesis.
- Olivieri, Olivieri, L. & Neila, J., 2014. Experimental study of the thermal-energy performance of an insulated vegetal façade under summer conditions in a continental mediterranean climate. pp. 61-76.
- Othman, A. R. & Sahidin, N., 2016. Vertical greening façade as passive approach in sustainable design. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Volume 222, p. 845 – 854.

- Ottelé, M., 2011. *The Green Building Envelope: Vertical Greening*. Civil Engineering and Geosciences: s.n.
- Ottelé, M. & Perini, K., 2017. Comparative experimental approach to investigate the thermal behaviour of vertical greened facades of buildings. *Ecological Engineering*, Volume 108, pp. 152-161.
- Ottelé, M., van Bohemen, H. D. & L.A. FraaijM, A., 2010. Quantifying the deposition of particulate matter on climber vegetation on living walls. *Ecological Engineering*, Volume 36, pp. 154-162.
- Ouldboukhitine, S.-E., 2012. *Modélisation théorique et expérimentale du comportement énergétique et environnemental des toitures végétalisées*. Université de La Rochelle(Spécialité Génie Civi): s.n.
- Palmeri, L., Barausse, A. & Jorgensen, S. E., 2017. *Ecological Processes Handbook*. CRC Press  d. s.l.:s.n.
- Pan, L ; Wei, S ; Chu, LM, 2018. Orientation effect on thermal and energy performance of vertical greenery systems. *Energy and Buildings*, Volume 175, p. 102–112.
- Pan, L. & ChuL, M., 2016. Energy saving potential and life cycle environmental impacts of a vertical greenery system in Hong Kong: A case study. *Building and Environment*, Volume 96, p. 293–300.
- Papadakis, G., Tsamis, P. & Kyritsis, S., 2001. An experimental investigation of the effect of shading with plants for solar control of buildings. *Energy and Buildings*, Volume 33, pp. 831-836.
- Paris, M., 2012. *Parois végétales, morphog n ses végétales S minaire Architecture Ambiances et cultures numériques*. s.l., Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble.
- Peacock, R., Reneke, P., Davis, W. D. & Jones, W., 1999. Quantifying fire model evaluation using functional analysis. *Fire Saf. J*, Volume 33, pp. 167-184.
- Peck, S. W., Callaghan, C., Bass, B. & Kuhn, M. E., 1999. *Research report: greenbacks from green roofs: forging a new industry in Canada*, Ottawa, Canada: s.n.
- Pérez, G., Coma, J., Sol, S. & Cabeza, L., 2017. Green facade for energy savings in buildings: The influence of leaf area index and facade orientation on the shadow effect. *Applied Energy*, Volume 187, pp. 424-437.
- Pérez, G. et al., 2011. Behaviour of green facades in Mediterranean Continental climate. *Energy Conversion and Management* , Volume 52, p. 1861–1867.
- Perez, G. et al., 2011. Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings. *Applied Energy* 88, p. 4854–4859.

- Perini, K. et al., 2011. Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope. *Building and Environment* 46, pp. 2287-2294.
- Perini, K., Ottelé, M. H. E. M. & Raiteri, R., 2011. Greening the building envelope, façade greening and living wall systems. *Open Journal of Ecology*, Volume 1, pp. 1-8.
- Pieruschka, R., Huber, G. & Berry, J. A., 2010. Control of transpiration by radiation. 107(30)(13372–13377).
- Pommier, G., Provendier, D., Gutleben, C. & Musy, M., 2014. *Rôle du végétal dans le développement urbain durable*, s.l.: Programme de recherche VegDUD Fiches de synthèse.
- Prazeres, R. F. M. G., 2015. *Experimental study of the Thermal Behavior on Green Façades*. T cnico Lisboa: Extended Abstract tir  de Mémoire pour l'obtention d'un diplôme de master en génie civil.
- Price, J. W., 2010. *Green façade energetics*, s.l.: Master of Science University of Maryland, College Park.
- Pulesell, R. & al, e., 2014. Energy based evaluation of environmental performances of Living Wall and Grass Wall systems. *Energy and Buildings* 73, p. 200–211.
- QIAN, Z., 1995. An Investigation to the Cooling and Moisturizing Effects of Creepers on the Surrounding Area, Researches on the Green Effects. *Chinese Environmental Science Press*.
- Rahman, A. M. A., Yeok, F. S. & Amir, A. F., 2011. The Building Thermal Performance and Carbon Sequestration Evaluation for Psophocarpus tetragonobulus on Biofaade Wall in the Tropical Environment. *World Academy of Science, Engineering and Technology Vol:52*.
- Raji, B., Tenpierik, M. J. & van den Dobbelsteen, A., 2015. The impact of greening systems on building energy performance: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 45(C) , pp. 610-623.
- Roditi, D., 2011. *Ventilation et lumière naturelle*. s.l.: ditions Eyrolles.
- Ruiz, G. R. & Bandera, C. F. V. o. C. E. M. C. E. E. 2. 1. 1., 2017. Validation of Calibrated Energy Models: Common Errors. *Energies*, 10(1587).
- Safikhani, T. & al, 2014. A review of energy characteristic of vertical greenery systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 40, p. 450–462.
- Safikhani, T., Megat Abdullah, A., Remaz Ossen, D. & Baharvand, M., 2014. Thermal Impacts of Vertical Greenery Systems. *Environmental and Climate Technologies*, Volume 14, pp. 5-11.
- Sandifer, S. & Givoni, B., 2002. Thermal effects of vines on wall temperatures-comparing laboratory and field collected data UCLA. *University of California at Los Angeles*.

- Sheweka, S. M. & Mohamed, N. M., 2012. Green Facades as a New Sustainable Approach Towards Climate Change. p. 507 – 520.
- Stec, W. & van Paassen, A., 2003. *Defining the performance of the double skin facade with the use of the simulation model*. Eindhoven, Netherlands, s.n.
- Stec, W., van Paassen, A. & Maziarz, A., 2005. Modeling the double skin facade with plants. *Energy and Buildings* 37, p. 419–427.
- Sternberg, T., Viles, H. & Cathersides, A., 2011. Evaluating the role of ivy (*Hedera helix*) in moderating wall surface microclimates and contributing to the bioprotection of historic buildings. *Building and Environment*, Volume 46, pp. 293-297.
- Šuklje, T., B, V., C, A. & Medved, S., 2013. *Bionic façade inspired by vertical greenery systems*. s.l., s.n.
- Suklje, T., Medved, S. & Arkar, C., 2016. On detailed thermal response modeling of vertical greenery systems as cooling measure for buildings and cities in summer conditions. *Energy* 115, pp. 1055-1068.
- Sulaiman, M., Jamil, M., Zain, M. & Kuttler, W. a. S. M., 2013. *THERMAL EVALUATION OF GREEN FAÇADE ON OPAQUE WALL*. Universiti Kebangsaan Malaysia, s.n.
- Sunakorn, P. & Yimprayoon, C., 2011. *Thermal performance of biofacade with natural ventilation in the tropical climate*. s.l., s.n., p. 34–41.
- Susorova, I., 2013. *Evaluation of the effects of vegetation and green walls on building thermal performance and energy consumption*. s.l.:Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Architecture in the Graduate.
- Susorova, I., Angulo, M., Bahrami, P. & Stephens, B., 2013. A model of vegetated exterior facades for evaluation of wall thermal performance. *Building and Environment* 67, Volume 67, pp. 1-13.
- Susorova, I., Azimi, P. & Stephens, B., 2014. The effects of climbing vegetation on the local microclimate, thermal performance, and air infiltration of four building facade orientations. *Building and Environment*, Volume 76, pp. 113-124.
- Tilley, D., Price, J., Matt, S. & Marrow, B., 2012. *Vegetated walls: thermal and growth properties of structured green facades*, s.l.: Final report to green roofs for healthy cities-green walls group.
- Tousignant, M.-É. & Delorme, M., 2006. *Connaître le fonctionnement de la plante pour mieux gérer son environnement*. Québec Vert.
- Tsoumarakis, C. et al., 2008. *Thermal performance of a vegetated wall during hot and cold weather conditions*. Dublin, s.n., p. 22nd to 24th.

- Vergriete, Y. & Labrecque, M., Janvier 2007. *Rôles des arbres et des plantes grimpantes en milieu urbain : revue de littérature et tentative d'extrapolation au contexte montréalais*, s.l.: Rapport d'étape destiné au conseil général de l'environnement de Montréal .
- Vinet, J., 1999. *Greencode : Reglementary frame for renewable energy use in urban side through vegetation planning and strategic surfaces. Technical report*, s.l.: Ecole d'architecture de Nantes.
- Viollet le Duc, E., 1875. *Histoire de l'habitation humaine depuis les temps préhistoriques jusqu'à nos jours*. s.l.:Bibliothèque d'éducation et de récréation.
- Vox, G., Blanco, I. & Schettini, E., 2018. Green façades to control wall surface temperature in buildings. *Building and Environment*, Volume 129, pp. 154-166.
- Widiastuti, R., Caesarendra, W., Prianto, E. & Setia, B. W., 2018. Study on the leaves densities as parameter for effectiveness of energy transfer on the green façade. *Buildings*, 8(138).
- Wilson, E., 1984. *Biophilia*. Cambridge: Harvard University Press.
- Wong, I. & Baldwin, A. N., 2016. Investigating the potential of applying vertical green walls to high-rise residential buildings for energy-saving in sub-tropical region. *Building and Environment* 97, pp. 34-39.
- Wong, N. H., Tan, A. Y. K., Tan, P. Y. & Wong, N. C., 2009. Energy simulation of vertical greenery systems. *Energy and Buildings* 41, p. 1401–1408.
- Wong, N. et al., 2010. Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and Environment*, Volume 45, p. 663–672.
- Yan, H. & Ong, B. L. G., 2001. *VBFRED-IVY: the development of a computational tool to model the thermal performance of plants on buildings in the Singapore climate*. s.l.:John S. Gero, Scott Chase and Mike Rosenman (eds), CAADRIA2001, Key Centre of Design Computing and Cognition, University of Sidney.
- Yin, H. et al., 2017. Cooling effect of direct green façades during hot summer days: an observational study in Nanjing, China using TIR and 3DDPC data.
- Yoshimi, J. & Altan, H., 2011. *Thermal simulations on the effects of vegetated walls on indoor building environments*. Sydney, s.n.
- Yu, C., 2006. *The intervention of plants in the conflicts between buildings and climate*. National university of Singapore: s.n.
- Yuksel, E. & Nil Turkeri, A., 2017. A literature review of experimental setups monitoring thermal performance of vegetated facade systems. volume5(number 2).
- Zaiyi, L. & Niu, J., 1999. *Study on thermal function of ivy-covered walls*. Hong Kong, s.n.

ANNEXES

Annexe A

Tableau A. 1 : Liste des plantes adaptées aux façades végétales (Malakar, et al., 2017)

Name of plants	Deciduous(D) Evergreen (E) Annual (A)	Growth rate	Soil
<i>Hedera helix</i> (Self-clinging climber)	E	Slow	Rich
<i>Parthenocissus quinquefolia</i> (Self-clinging climber)	D	Average	Any
<i>Hydrangia petiolaris</i> (Self-clinging climber)	D	Average	Loamy
<i>Euonymus fortunei</i> (Self-clinging climber)	E	Slow	Any
<i>Lonicera periclymenum</i> (Twining climber)	D	Average	Good loam
<i>Clematis vitalba</i> (Twining climber)	D	Fast	Prefer alkaline
<i>Aristolochia</i> sp. (Twining climber)	D	Average	Rich moist
<i>Jasminum officinale</i> (Twining climber)	D	Fast	Well drained
<i>Passiflora caerulea</i> (Twining climber)	D	Fast	Any
<i>Lathyrus odoratus</i> (Twining climber)	A	Fast	Rich, well drained

Tableau A. 2 : Types de plantes grimpantes et leurs besoins en support (Bernier.,2011)







Plantes grimpantes	Requièrent un support (treillis)	Ne requièrent pas de support (treillis)
 à racines-crampons		✓
 à ventouses		✓
 à tiges volubiles	✓	
 à pétioles volubiles	✓	
 à vrilles	✓	
 à palissiers	✓	

Tableau A. 3 : Les principales plantes grimpantes (Neuchâtel, 2009)

Nom commun	Nom latin	Type de plante	Exposition
Bignone à grandes fleurs	<i>Campsis grandiflora</i>	Arbuste	Soleil
Bryone dioïque	<i>Bryonia dioica</i>	Annuelle	Soleil
Capucine	<i>Tropaeolum sp.</i>	Annuelle	Soleil / Mi ombre
Chèvrefeuille	<i>Lonicera caprifolium</i>	Arbuste	Soleil / Mi ombre
Clématite - Bois fumant	<i>Clematis vitalba</i>	Arbuste	Soleil / Mi ombre
Cobée	<i>Cobaea scandens</i>	Annuelle	Soleil / Mi ombre
Glycine	<i>Wisteria sinensis</i>	Arbuste	Soleil
Haricot d'Espagne	<i>Phaseolus coccineus</i>	Annuelle	Soleil
Herbe aux femmes battues	<i>Tamus communis</i>	Vivace	Mi ombre / ombre
Hortensia grimpant	<i>Hydrangea petiolaris</i>	Arbuste	Mi ombre / ombre
Houblon commun	<i>Humulus lupulus</i>	Vivace	Soleil
Ipomée - Belle de jour	<i>Ipomaea tricolor</i>	Annuelle	Soleil
Jasmin commun	<i>Jasminum officinale</i>	Arbuste	Soleil
Jasmin d'hiver	<i>Jasminum nudiflorum</i>	Arbuste	Soleil
Kiwis	<i>Actinidia sp.</i>	Arbuste	Soleil / mi ombre
Lierre	<i>Hedera helix</i>	Vivace	Soleil à ombre
Thunbergia / Sourire de Zanzibar	<i>Thunbergia alata</i>	Annuelle à vivace	Soleil
Vigne à raisins	<i>Vitis vinifera</i>	Arbuste	Soleil
Vigne vierge du Japon	<i>Parthenocissus tricuspidata</i>	Arbuste	Soleil / mi ombre



plantes indigènes



plantes exotiques : attention au potentiel d'invasion.

Type de végétalisation	Indigène / Exotique	Remarques
Support - Rameaux sarmenteux	Exotique	Très peu d'entretien
Sans support - Vrilles	Indigène	Plante non comestible
Support - Tiges volubiles	Exotique	Plante comestible qui s'associe très bien avec d'autres grimpantes
Support - Tiges volubiles	Indigène	Fruits non comestibles
Support - Tiges volubiles munies de petites vrilles	Indigène	*Pieds à l'ombre et tête au soleil*
Support - Tiges volubiles munies de petites vrilles	Exotique	Développement très rapide
Support - Tiges volubiles	Exotique	Les jeunes plants mettent 3-4 ans avant de fleurir
Support - Tiges volubiles	Exotique	Développement très rapide
Support - Tiges volubiles	Indigène	Plante non comestible
Sans support - Crampons	Exotique	Aime un sol plutôt acide
Support - Rameaux sarmenteux munis de vrilles	Indigène	Développement très rapide
Support - Tiges volubiles	Exotique	A besoin d'eau
Support - Rameaux sarmenteux	Exotique	Aime la chaleur
Support - Rameaux sarmenteux	Exotique	Feuillage semi-persistant
Support - Tiges volubiles	Exotique	Beaucoup de variétés
Sans support - Crampons	Indigène	Feuillage persistant
Support - Tiges volubiles	Exotique	Devient vivace si elle est protégée du gel (veranda)
Sans support - Vrilles	Exotique	Sol bien drainé, caillouteux
Sans support - Ventouses	Exotique	Couleurs automnales

Annexe B

Détails des formules du modèle développé

$$a1_instationnaire = \frac{(\rho C_p)_f d_f F}{\Delta t}$$

$$a1_sensible = h_{fe} F + h_{fi} F$$

$$a1_latent = (h_{fe}^m + h_{fi}^m) F \left. \frac{\delta p_v^{sat}}{\delta T} \right|_{(k)}$$

$$a1_infrarouge = \sigma_f (h_e^{IR} + h_e^{IR})$$

$$b1_sensible = - h_{fi} F$$

$$c1_instationnaire = \frac{(\rho C_p)_f d_f F}{\Delta t} T_f^{(k)}$$

$$c1_solaire = \sigma_f [(1 - \tau_f - \rho_s) (1 + \tau_f \rho_w)] Q_s$$

$$c1_sensible = h_{fe} F T_a$$

$$c1_infrarouge = \sigma_f h_e^{IR} T_{env} + \sigma_f h_i^{IR} T_w$$

$$c1_latent = (h_{fe}^m + h_{fi}^m) F p_{va} + [p_{vf}^{sat}]^{(k)} - \left. \frac{\delta p_v^{sat}}{\delta T} \right|_{(k)} T_f^{(k)} - F(h_{fe}^m + h_{fi}^m)$$

$$a2_sensible = - h_{fi} F$$

$$b2_instationnaire = \frac{(\rho C_p)_{air} X}{\Delta t}$$

$$b2_sensible = h_{fi} F + h_w$$

$$b2_vent = (\rho C_p)_{air} Q_v$$

$$c2_instationnaire = \frac{(\rho C_p)_{air} X T_c^{(k)}}{\Delta t}$$

$$c2_sensible = h_w T_w$$

$$c2_vent = (\rho C_p)_{air} Q_v T_a$$

$$hf = \frac{\rho_{air} \cdot \rho C_p}{rc + ra}$$

Annexe C

Tableau C. 1 : Détails des appareils de mesure

Type d'appareil utilisé	Caractéristiques																										
Lecteur d'humidité USB PCE-HT 71N	<p>Le lecteur d'humidité USB détecte l'humidité et la température de l'air et la mémorise internement. Ce lecteur d'humidité USB à format réduit et avec une vaste mémoire (jusqu'à un max. de 32000 valeurs / 16000 valeurs par paramètre) sert surtout au registre prolongé des données (comptoirs réfrigérés des supermarchés, transports réfrigérés, entrepôts, chambres climatisés pour PC). Le lecteur d'humidité USB fonctionne avec un enregistreur autonome qui enregistre les valeurs climatologiques des laps de temps désirés. Ce lecteur d'humidité USB peut transmettre toutes les valeurs à un ordinateur. Le registre du lecteur d'humidité USB peut être activé manuellement ou il est aussi possible de programmer préalablement le lecteur d'humidité USB (temps de démarrage et final, date et part de mesure) et le laisser enregistrer in situ. Une fois transmises les valeurs, vous pouvez les analyser sur l'ordinateur. De plus, le logiciel inclus dans la livraison du lecteur d'humidité USB calcule le point de rosée. L'horloge interne avec la date du lecteur d'humidité USB permet à l'utilisateur d'affecter avec précision les résultats.</p>																										
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="background-color: #f2f2f2;">Description générale / spécifications</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">Plage de mesure</td> <td style="text-align: center;">-40 ... +70 °C / 0 ... 100% H.r.</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Précision</td> <td style="text-align: center;">±1 °C / ±3% H.r. Point de rosée (25 °C/40-100% H.r.) ± 2 °C</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Résolution</td> <td style="text-align: center;">0,1 °C / 0,1% H.r.</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Taux de mesure</td> <td style="text-align: center;">2s ... 2h réglable</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Début/ Finalisation/date</td> <td style="text-align: center;">Programmable</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Mémoire</td> <td style="text-align: center;">32000 valeurs (16000 par paramètre)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Software</td> <td style="text-align: center;">Si, para programmer et sélectionner</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Conditions environnementales</td> <td style="text-align: center;">De -40 ... a +70 °C y de 0 ... a100% H.r. non condensé</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Alimentation</td> <td style="text-align: center;">pile interne (interchangeable) Durée jusqu'à les 3 ans</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Mesures</td> <td style="text-align: center;">30x25x130mm</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Fixation</td> <td style="text-align: center;">Fixation au mur incluse</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Poids</td> <td style="text-align: center;">30g</td> </tr> </tbody> </table>	Description générale / spécifications		Plage de mesure	-40 ... +70 °C / 0 ... 100% H.r.	Précision	±1 °C / ±3% H.r. Point de rosée (25 °C/40-100% H.r.) ± 2 °C	Résolution	0,1 °C / 0,1% H.r.	Taux de mesure	2s ... 2h réglable	Début/ Finalisation/date	Programmable	Mémoire	32000 valeurs (16000 par paramètre)	Software	Si, para programmer et sélectionner	Conditions environnementales	De -40 ... a +70 °C y de 0 ... a100% H.r. non condensé	Alimentation	pile interne (interchangeable) Durée jusqu'à les 3 ans	Mesures	30x25x130mm	Fixation	Fixation au mur incluse	Poids	30g
Description générale / spécifications																											
Plage de mesure	-40 ... +70 °C / 0 ... 100% H.r.																										
Précision	±1 °C / ±3% H.r. Point de rosée (25 °C/40-100% H.r.) ± 2 °C																										
Résolution	0,1 °C / 0,1% H.r.																										
Taux de mesure	2s ... 2h réglable																										
Début/ Finalisation/date	Programmable																										
Mémoire	32000 valeurs (16000 par paramètre)																										
Software	Si, para programmer et sélectionner																										
Conditions environnementales	De -40 ... a +70 °C y de 0 ... a100% H.r. non condensé																										
Alimentation	pile interne (interchangeable) Durée jusqu'à les 3 ans																										
Mesures	30x25x130mm																										
Fixation	Fixation au mur incluse																										
Poids	30g																										
Thermomètre Infrarouge Exttech	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" style="background-color: #e0f2f1;">Specifications</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: left;">Range</td> <td style="text-align: left;">-4 to 630°F (-20 to 332°C)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: left;">Basic Accuracy</td> <td style="text-align: left;">±2% of reading +4°F/2°C</td> </tr> <tr> <td style="text-align: left;">Max. Resolution</td> <td style="text-align: left;">0.1°F/°C</td> </tr> <tr> <td style="text-align: left;">Emissivity</td> <td style="text-align: left;">0.95 fixed</td> </tr> <tr> <td style="text-align: left;">Field of View (Distance to Target)</td> <td style="text-align: left;">8:1</td> </tr> <tr> <td style="text-align: left;">Dimensions</td> <td style="text-align: left;">3.2 x 1.6 x 6.3" (82x41.5x160mm)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: left;">Weight</td> <td style="text-align: left;">6.3oz (180g)</td> </tr> </tbody> </table>	Specifications		Range	-4 to 630°F (-20 to 332°C)	Basic Accuracy	±2% of reading +4°F/2°C	Max. Resolution	0.1°F/°C	Emissivity	0.95 fixed	Field of View (Distance to Target)	8:1	Dimensions	3.2 x 1.6 x 6.3" (82x41.5x160mm)	Weight	6.3oz (180g)										
Specifications																											
Range	-4 to 630°F (-20 to 332°C)																										
Basic Accuracy	±2% of reading +4°F/2°C																										
Max. Resolution	0.1°F/°C																										
Emissivity	0.95 fixed																										
Field of View (Distance to Target)	8:1																										
Dimensions	3.2 x 1.6 x 6.3" (82x41.5x160mm)																										
Weight	6.3oz (180g)																										

Annexe D

Tableau D. 1 : Données climatiques de la ville de Constantine

WEATHER DATA SUMMARY												LOCATION: Constantine (Ain El) , -	
												Latitude/Longitude: 36.283° North, 6.617° East, Time Zone from Greenwich 1	
												Data Source: MN7 604190 WMO Station Number, Elevation 694 m	
MONTHLY MEANS	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	
Global Horiz Radiation (Avg Hourly)	268	315	393	490	495	541	578	525	453	374	297	253	Wh/sq.m
Direct Normal Radiation (Avg Hourly)	389	393	423	448	476	546	649	578	494	453	429	443	Wh/sq.m
Diffuse Radiation (Avg Hourly)	107	123	148	159	175	151	115	142	145	138	109	86	Wh/sq.m
Global Horiz Radiation (Max Hourly)	635	734	917	1100	1076	1101	1053	964	925	851	648	577	Wh/sq.m
Direct Normal Radiation (Max Hourly)	989	996	990	1003	1015	1012	971	901	980	996	989	971	Wh/sq.m
Diffuse Radiation (Max Hourly)	280	330	417	459	486	486	359	434	446	378	304	251	Wh/sq.m
Global Horiz Radiation (Avg Daily Total)	2639	3359	4656	5831	6915	7810	8208	7009	5545	4129	2999	2422	Wh/sq.m
Direct Normal Radiation (Avg Daily Total)	3838	4193	4994	5806	6643	7889	9224	7703	6033	4979	4321	4246	Wh/sq.m
Diffuse Radiation (Avg Daily Total)	1055	1307	1754	2065	2445	2188	1629	1902	1786	1529	1098	829	Wh/sq.m
Global Horiz Illumination (Avg Hourly)	28857	33966	42412	48771	53975	58877	62832	57695	49910	41121	32427	27399	lux
Direct Normal Illumination (Avg Hourly)	35441	36672	39366	42780	44926	53051	63867	54997	47803	42417	39779	40054	lux
Dry Bulb Temperature (Avg Monthly)	6	7	10	13	18	23	27	25	20	17	11	7	degrees C
Dew Point Temperature (Avg Monthly)	3	3	5	7	11	12	13	14	13	11	6	4	degrees C
Relative Humidity (Avg Monthly)	81	76	71	71	66	53	46	52	66	67	76	81	percent
Wind Direction (Monthly Mode)	260	250	240	250	290	60	30	10	180	270	250	270	degrees
Wind Speed (Avg Monthly)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	m/s
Ground Temperature (Avg Monthly of 1 Depths)	13	11	10	11	13	15	18	20	21	20	18	15	degrees C

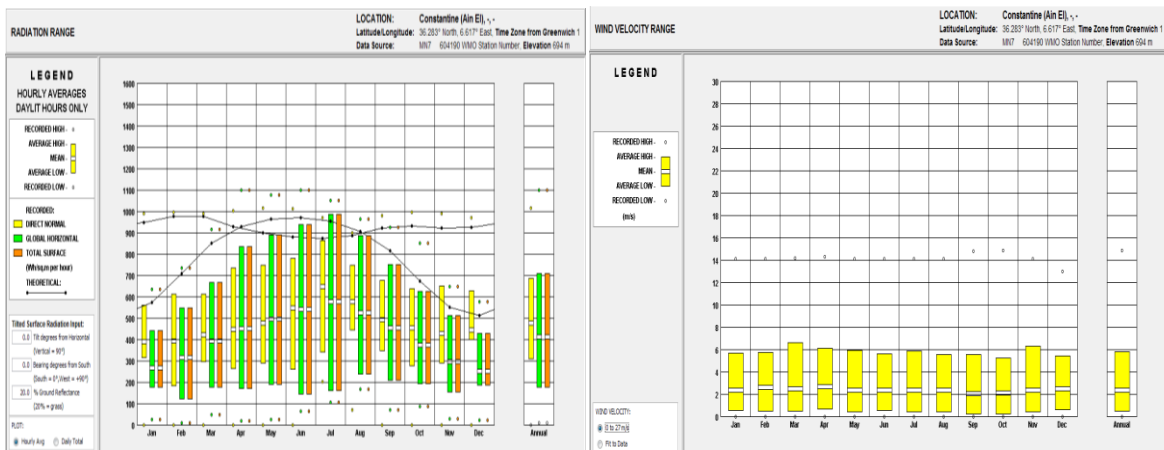
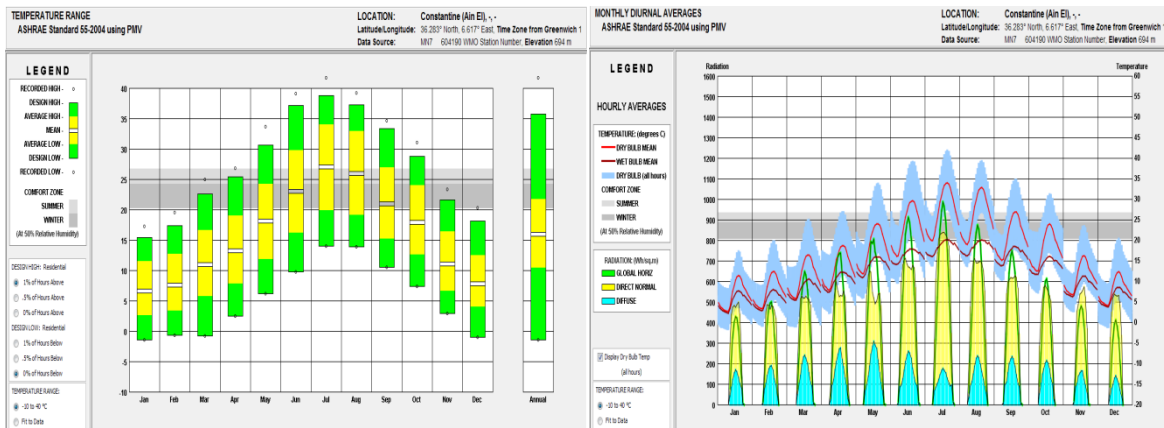
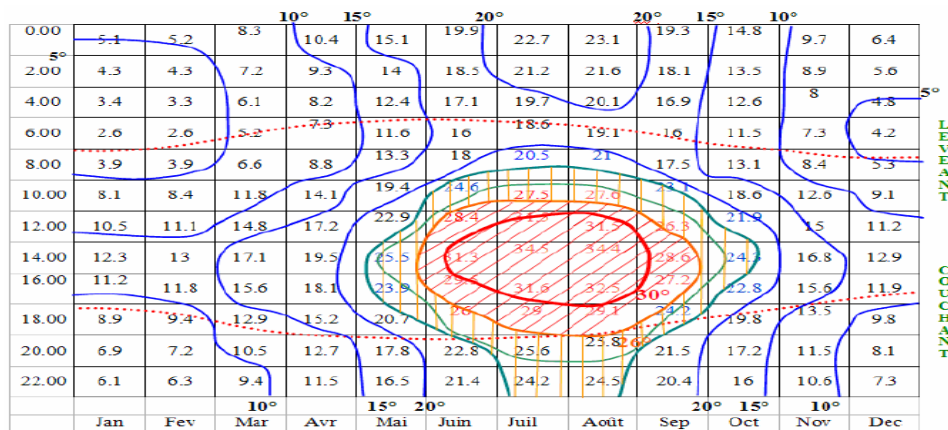


Figure D. 1 : Variation des données climatiques de la ville de Constantine



Zone de surchauffe
 Zone de confort

Figure D. 2 : Isothermes de la ville de Constantine

a) Calcul de la température neutre T_n d'après la formule suivante:

$$T_n = 11.9 + 0.534 T_0$$

Où T_n : la température neutre en °C

T_0 : la température extérieure moyenne du mois en question en °C.

$$T_0 = 26.1^\circ\text{C}$$

$$T_n = 25,8^\circ\text{C}$$

b) Les températures limites de confort T_c

$$T_c = T_n \pm 2 \text{ K.}$$

$$T_c = T_n + 2\text{K} = 27,8^\circ\text{C} \text{ c'est la limite supérieure du confort.}$$

$$T_c = T_n - 2\text{K} = 23,8^\circ\text{C} \text{ c'est la limite inférieure du confort.}$$

La plage de confort est située entre 23,8°C et 27,8°C

Tableau D. 2 : Classification des climats Koppen
https://fr.wikipedia.org/wiki/Classification_de_K%C3%B6ppen

Classe	Types de climats
A	<ul style="list-style-type: none"> • Équatorial : Af • Mousson : Am • Savane : Aw, As
B	<ul style="list-style-type: none"> • Désertique : BWh, BWk, BWn • Semi-aride : BSh, BSk, BSn
C	<ul style="list-style-type: none"> • Subtropical humide : Cfa, Cwa • Océanique : Cfb, Cwb, Cfc, Cwc • Méditerranéen : Csa, Csb, Csc
D	<ul style="list-style-type: none"> • Continental humide : Dfa, Dwa, Dfb, Dwb • Subarctique : Dfc, Dwc, Dfd, Dwd • Continental méditerranéen : Dsa, Dsb, Dsc, Dsd
E	<ul style="list-style-type: none"> • Tundra : ET • Inlandis ou calotte glaciaire : EF

Glossaire

Bilan radiatif	Le bilan radiatif d'un système est la différence entre le rayonnement incident qu'il absorbe et le rayonnement thermique qu'il émet. Le rayonnement incident absorbé est la différence entre le rayonnement incident intercepté et diffusé.
Caduc	Se dit d'un feuillage qui tombe chaque année, par opposition à persistant.
Coefficient de corrélation (r)	Un outil mathématique statistique qui permet de vérifier s'il existe une relation entre 2 variables. Le coefficient de corrélation permet de savoir le degré de relation entre deux variables, mais pour fiabiliser ce dernier il est nécessaire de calculer le coefficient de détermination (0.70 dans l'exemple) qui nous permet de connaître la qualité de prédiction. La valeur de (r) est comprise entre -1,0 et +1,0, les signes + et - sont utilisés pour les corrélations linéaires positives et négatives, respectivement.
Coefficient de détermination) R²	indique à quel point les valeurs simulées sont proches de la ligne de régression des valeurs mesurées. Il s'agit d'un autre indice statistique couramment utilisé pour mesurer l'incertitude des modèles. Il ne s'agit pas d'une valeur prescriptive pour les modèles calibrés, mais le manuel ASHRAE recommande que la valeur ne soit jamais inférieure à 0,75 pour les modèles calibrés. $R^2 = \left(\frac{n \sum_{i=1}^n m_i s_i - \sum_{i=1}^n m_i \sum_{i=1}^n s_i}{\sqrt{(n \sum_{i=1}^n m_i^2 - (\sum_{i=1}^n m_i)^2) (n \sum_{i=1}^n s_i^2 - (\sum_{i=1}^n s_i)^2)}} \right)^2$
	Ce coefficient varie entre 0 et 1, soit entre un pouvoir de prédiction faible et un pouvoir de prédiction fort. En bref, plus le coefficient de détermination se rapproche de 0, plus le nuage de points se disperse autour de la droite de régression. Au contraire, plus le R ² tend vers 1, plus le nuage de points se resserre autour de la droite de régression.
Crampons	permet à la plante de se maintenir sur des parois verticales
Epiphyte	terme de botanique. Qui croît sur d'autres plantes mais sans en tirer sa nourriture ; ce qui la distingue des plantes parasites. (http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/%C3%89piphytes/fr-fr/)
Evaporation	est le phénomène de changement de phase à travers lequel l'eau en état liquide est transformée en état gazeux. Une quantité d'énergie est donc requise pour que ce changement de phase ait lieu. Le rayonnement solaire direct et la température de l'air (dans un pourcentage moins important) fournissent cette énergie. Le phénomène d'évaporation dans l'atmosphère est aussi déterminé par la quantité d'humidité contenue dans l'air et par la vitesse du vent. Lorsque l'air devient saturé en humidité les procédés évaporatifs sont réduits ou stoppés [Allen et al, 1998]. Le phénomène d'évaporation est aussi régi par la différence de pression de vapeur d'eau VPD entre la surface et l'air environnant. Lorsque la surface évaporative est un substrat, la capacité de champ ou capacité de rétention maximale en eau du sol devient un facteur qui affecte le phénomène d'évaporation.
Evapotranspiration (ET)	est le procédé d'évaporation de l'eau sur une surface, et de transpiration des plantes.
Hydroponique	Une culture hors-sol où les plantes sont cultivées sous serre. La terre est remplacée par un substrat stérile, tels que les billes d'argile ou de la laine de roche. Ce substrat contient des solutions nutritives nécessaires pour réaliser une bonne culture. https://www.futura-sciences.com
Loi de conservation de l'énergie	A l'équilibre thermodynamique, la conservation de l'énergie implique : Reflectance+Absorbance+Transmittance = 1
MBE (Mean Bias Error) (Erreur de Biais moyen)	C'est la moyenne des erreurs d'un espace échantillon. En général, c'est un bon indicateur du comportement global des données simulées par rapport à la ligne de régression de l'échantillon. Dans l'équation (1), Des valeurs positives signifient que le modèle sous-estime les données mesurées, et une valeur négative signifie une surestimation. Cependant, le principal problème de cet indice est qu'il est sujet à des erreurs d'annulation où la somme des valeurs positives et négatives pourrait réduire la valeur du BME. Lorsqu'un modèle est calibré ou presque calibré, la ligne de régression de l'échantillon est si proche de celle simulée que l'effet d'annulation augmente considérablement.

Palissage (plantes palissées)	Technique arboricole qui consiste à conduire une plante sur une structure en y attachant ses tiges et ses branches à l'aide de liens.
Persistant	Se dit d'un feuillage qui reste toujours vert. Plante qui garde ses feuilles tout au long de l'année, par opposition à une plante à feuillage caduc.
Plante indigène	Espèce qui s'est installée naturellement dans la région locale depuis très longtemps (environ 1500 ans), qui est parfaitement adaptée au climat et au sol, par opposition à "exotique". Une proportion de 2/3 de plantes indigènes pour 1/3 de plantes exotiques est recommandée.
Plantes volubiles et à palisser	qui ont besoin d'être attachées au support. Dont la tige ou le pétiole* s'enroulent seuls autour des grilles ou sur d'autres plantes
RMSE : Le Root Mean Square Error	entre deux séries de K données X et Y est : $RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^K (X_i - Y_i)^2}{K}}$
Stomates	des petits orifices (pores) situés essentiellement sur la face abaxiale des feuilles (face inférieure pour les espèces hypostomatiques), qui permettent les échanges gazeux de vapeur d'eau et CO2 avec l'atmosphère. Ils ont une taille moyenne de 5 à 30mm et ne couvrent que 1 à 2% de la surface totale de la feuille.
Température opérative (Top)	combine les effets de la température radiante et de la température de l'air et constitue une variable importante et un indicateur de confort thermique largement utilisé

Propriétés des matériaux

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 1m ³ du matériau. Elle exprime la densité par la chaleur spécifique d'un matériau. Plus la capacité thermique est élevée, plus la quantité de chaleur que peut stocker le matériau est grande. Généralement ce sont les matériaux les plus lourds qui possèdent la plus grande capacité thermique comme le montre le tableau suivant.	[kJ/m ³ °C]
Coefficient à la diffusion de vapeur (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...	[μ]
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 somme des résistances thermiques des composants de mur (R). Plus U est faible, plus la paroi est isolante.	[W/m ² °C] ou degré kelvin [W/m ² °K]
Conductivité thermique (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 lambda est faible, plus le matériau est résistant au transfert par conduction.	[W/m°C] ou degré kelvin [W/m°K].
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 m ² /heure. Plus la valeur de diffusivité thermique est faible, plus le front de chaleur mettra du temps à traverser l'épaisseur du matériau, et donc, plus le temps entre le moment où la chaleur est arrivée sur une face d'un mur et le moment où elle atteindra l'autre face est importante. C'est une grandeur de l'inertie thermique.	
Effusivité thermique (Ef)	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/m ² .S.°C] ont pénétré sur 1 m ² de surface de matériau, 1 seconde après qu'elle a été mise en contact avec une autre surface de 1 m ² 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.	[W/m ² °C]
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.	
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.	[m ² °C/W]

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF HYGROTHERMAL BEHAVIOR OF DIRECT GREEN FACADES UNDER SEMI-ARID CLIMATE

K. Benhalilou^{1,2*}, S. Abdou², R. Djedjig³

¹Larbi Ben Mhidi University Oum El Bouaghi 04000 Algeria

²Laboratoire Architecture Bioclimatique et Environnement Constantine 3 University 25000
Algeria

³LERMAB University of Lorraine, IUT de Longwy, 186 rue de Lorraine, BP 90041, 54401,
Longwy, France

Received: 11 April 2018 / Accepted: 29 December 2019 / Published online: 01 January 2020

ABSTRACT

This paper aims to investigate the hygrothermal behavior of direct green facades and assess their efficiency under semi-arid climate. For that purpose, a comparative study was conducted in three buildings; two buildings with direct green façades (covered with deciduous climbing plants) and one with a bare façade. Air and surface temperature, relative humidity and wind speed were collected in situ and several factors were taken into consideration as thickness and density of plant cover. The analysis of measurement data revealed that direct green façades contribute to improve the outdoor and indoor thermal environment of buildings due to the effect of shading and evapotranspiration. Moreover, the different types of green façades illustrated their different heat impact on the thermal environment of buildings depending on the density and thickness of the plant layer and the covering ratio.

Keywords: green façades; hygrothermal comfort; semi-arid climate; investigation.

Author Correspondence, e-mail: kari_ben80@yahoo.fr

doi: <http://dx.doi.org/10.4314/jfas.v12i1.15>



1. INTRODUCTION

Cities are facing the challenges of global warming and alarming energy crisis. Precisely, in Algeria, residential and office buildings are confronted with problems of overheating and irrational consumption of electricity during overheat periods. They accounted for 42% of total final energy use [1]. So it becomes necessary to improve the building energy performance through passive cooling techniques.

It is widely admitted that one of the sustainable approaches to cooling buildings by natural means is vegetation. The relevance of its effect as a passive cooling device in the urban environment is recognized [2]. Its use to modify climate and comfort is a key design consideration in sustainable buildings [3-4].

Among the forms of vegetation in urban environment, one finds the vertical greening which became more and more useful for greening cities. As it contributes to enhance and restore the urban environment and improve buildings thermal performance [5]. Green envelopes are expected to reduce the urban heat island and energy consumption for air conditioning in buildings [6-7-8].

There are several terms for vertical greening building surfaces namely; green walls, biowalls, vertical gardens, green facades and living wall systems [9]. In this study, we were interested in direct green facades in which feature climbing plants attached directly to the wall without any supporting structure [10].

In recent years several studies were conducted in different climates considering that green façades are as a notable passive cooling technique [11], although similar studies under semi-arid climate are lacking. It is certain that plants constitute an excellent passive system for solar control of buildings offering significant advantages over conventional artificial sunscreens. Plants can provide shading effect better than blinds [12]. Plant physiology and leaf area should be considered when selecting species to maximize cooling of green walls [13].

Green facades can also enhance occupant's comfort [14] and produce changes in the ambient conditions (temperature and humidity). They can dramatically reduce the maximum temperatures of a building by shading walls from the sun and by evapotranspiration, with

daily temperature fluctuation being reduced by as much as 50% [15-16-17]. Plants work as a masonry protection, making its deterioration considerably slower than walls exposed to extreme climate conditions [18].

Many studies confirm that the potential thermal benefits of vegetated walls in reducing the surface temperature of buildings facades are promising in warm and tropical climate, leading to a reduction of 74.29% in the energy cooling load [19] and decreasing the daytime average temperature by 5°C compared to a bare façade [20]. The surface temperature differences between planted and not planted dark colour walls are quite remarkable in daytime reaching 13°C [21]. Green façades temperature fluctuates between 5°C and 30°C while exposed façades heat up to 60°C and cool to 10°C [22].

Moreover, thick ivy covering a west facing wall can reduce the peak cooling by 28% [23] and increase the air humidity by 10% to 20% [24]. To take advantage of ivy-covered walls, the covering ratio should be as big as possible [25].

In Mediterranean Continental climate, differences in the indoor surface temperatures of up to about 5°C were observed between the vegetal and non vegetal enclosure [26]. It was also confirmed that an air layer located between the façade and the green screen is characterized by slightly lower temperature and higher relative humidity [27]. This air layer can produce an interesting insulating effect. But it seems necessary to take into account the renewal of the air in this space and the density of the foliage. A temperature reduction reaching up 10.8°C was obtained for green walls under the same climate [4].

This study aims to evaluate the impact of direct green facades on summer hygrothermal environment of buildings under semi-arid climate of Algeria. In order to achieve this objective, an investigation on real buildings located in Constantine city is undertaken.

2. Presentation of the case study and methodology

2.1 Constantine climate

Constantine is located in the North-East of Algeria (latitude 36°17', longitude 6°37'). It has a semi-arid climate with hot dry summers and cold moist winters. Precipitation falls reach 630mm annually. Annual mean temperatures in Constantine vary between 7.15°C and 26.8°C with an average of 16.3°C.

season. In this period, there is a need for an effective control of solar radiation gains, thermal inertia and night ventilation. During overheat period, from July to August, ambient temperature is high and relative humidity is low. Hence, the use of evaporative cooling systems is recommended.

2.2 Experimental methodology

The study was carried out on four storey buildings that were selected for comparison. The field experiment was conducted in three residential buildings "A", "B" and "C" (Fig.1) in which simultaneous measurements of several physical parameters were carried out during four consecutive days of July.



Fig.1. Studied residential buildings A, B and C

There are two types of green façades (A and C) and a bare façade (B) having the same construction system, the same orientation and the same surrounding environment. All tested houses have only one façade facing south west; they are made of brick (double brick masonry with an air gap in the middle) covered with plastering on the indoor side and cement on the outdoor side (Fig.2).

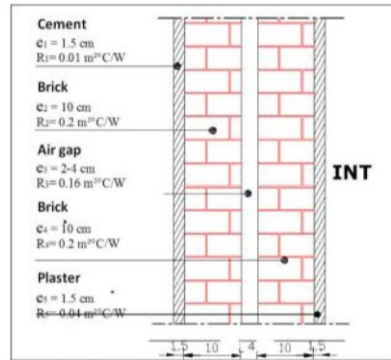


Fig.2. Detail of façade masonry

An intermediate floor is selected for all samples in order to measure the effect of green façades while eliminating the effect of the roof. The measured rooms were located at second floor level. Besides, other factors were taken into consideration to investigate the effect of climbing plants on the thermal environment of buildings as covering ratio, thickness and density of foliage.

The green screen of House "A" is very dense with a thickness of 20-30 cm and 100% of covering ratio. For house "C", it's less dense than "A" with a thickness of 10-15 cm and 80% of covering ratio as shown in Fig.3.



Fig.3. The three studied façades

The climbing plant covering "A" and "C" buildings is *Parthenocissus quinquefolia* known as Virginia creeper which is attached directly to the façade (Fig.4). It is a deciduous shrub,

grown as an ornamental plant for its ability to rapidly cover walls and buildings. The leaves are composed of five leaflets joined from a central point on the leafstalk, and range from 3 to 20 cm across whose have a toothed margin.



Fig.4. Parthenocissus quinquefolia covering the building "A"

This paper focuses on the study of the hygrothermal effects of green façades on buildings. Hence, temperature, humidity and air velocity measurements were performed on the three selected buildings. All measurements of air temperature and relative humidity are carried out four days using TES Thermo-Hygrometer TES-1360A ($\pm 3\%$ R.H and $\pm 0.8^{\circ}\text{C}$). Extech Infrared Thermometers IR400 $\pm 4^{\circ}\text{C}$ are used for the measurement of surface temperature. For air velocity measurements, a compact testo 425 thermal anemometer (± 0.03 m/s) was used. All these physical parameters were collected every two hours and measured simultaneously at six points at the same height. For buildings A and C, measurement points were located in the center of the test room (point1), on the internal and external surfaces of the façade (point 2 and 3), in the leaf layer (point4), at 30 cm from the plant cover (point5), and in outdoor environment (point6). For the building "B", there are only four points 1,2,3 and 6 (see Fig.5).

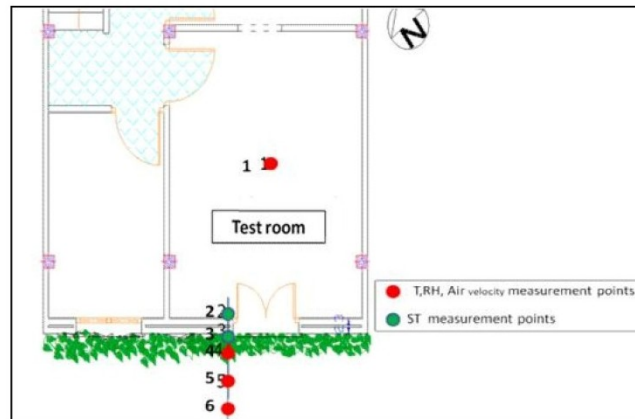


Fig.5. Measurement points

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Indoor ambient temperatures

At daytime, the variation of indoor temperatures of the three samples shows that the thermal effects of plants are quite significant. The results reveal that peak values are recorded in room “B” with a maximum ambient temperature of 33.3°C recorded at 4.p.m compared to 31.1°C in room “C” and 29.3°C in room “A” at 6 p.m (Fig.6). A maximum difference of 4.4°C is recorded at 4.p.m between "A" and "B" and 2.3°C between “A” and “C”. This difference can be explained by the influence of direct radiation on the facade “B” and shading and evaporative cooling effects of plant covered façades. Therefore, the green screen can reduce the sensitivity of the building to outdoor fluctuations by reducing heat gains.

At this time, the room “A” recorded a maximum difference of 8.45°C at 2.p.m with the meteorological temperature and 7.05°C with the microclimatic outside temperature as shown in Fig.6. Indeed, due to the local urban environment, outdoor temperatures are less than meteorological temperature at daytime and higher at night.

As a result, the interior temperatures of room “C” are higher than those of room “A” with a maximum difference of 2.3°C. The most pronounced cooling effect of green façade is observed during the middle of the day (11.am – 4.p.m). Consequently, green façade “A” which has dense foliage is very effective in obstructing the sun’s rays and casting a shadow.

Nevertheless, cooling effect of green façade is significantly reduced at night. Green façades doesn’t participate in decreasing temperature. After 6.p.m, the ambient temperatures decrease

slowly to reach a minimum value of 28.65°C in room "B", 27.7°C in room "C" and 27.1°C in room "A". Although, room "A" recorded the lowest nighttime temperatures compared to others rooms, these values are still higher than the nocturnal outdoor temperatures. In fact all tested rooms have higher ambient air temperature compared to surrounding air temperature owing to radiation emitted by walls to the atmosphere. This negative effect can be mitigated through nocturnal ventilation [28-29].

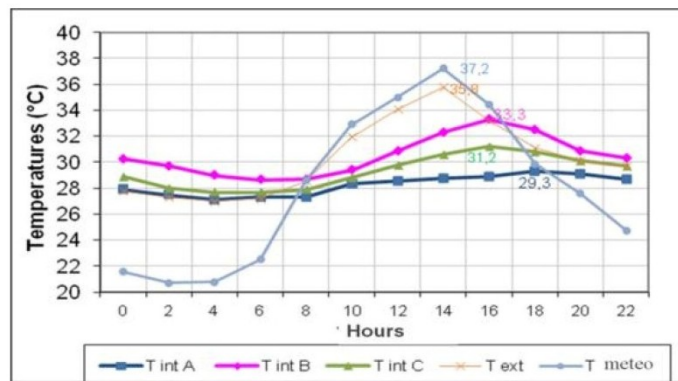


Fig.6. Variation of air temperatures in the three rooms

Fig.7 indicates that room "A" has negative values throughout the day with a maximum discrepancy of 7.05°C recorded at 2.p.m which coincides with the maximum outside temperature. This explains the positive behavior of the room "A" during all the day under the effect of Virginia creeper screen; therefore, vegetation moderates temperature variations.

For the room "C", a positive discrepancy is recorded between 12.p.m and 6.am due to the lack of cross ventilation (the door and shutter are closed at this time). But, from 8.am to 6.p.m, the discrepancy is negative with a maximum of 5.2°C reached at 2.p.m; this is explained by the protection of the wall despite its partial coverage (80%).

As for the house "B", its energy balance is rather positive between 4.p.m and 8.am due to an additional energy intake which has not been evacuated because of the wall's exposure to the direct and intense solar radiation on the one hand and the lack of cross ventilation on the other hand. Although the discrepancy of the mean indoor and outdoor temperatures is negative between 8.am and 4.p.m, marking a maximum of 3.3°C at 2.p.m, it remains low compared to those in houses "A" and "C".

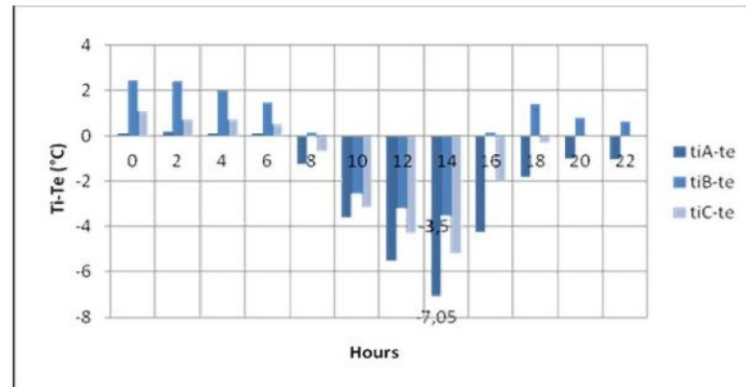


Fig.7. Variation of mean indoor and outdoor temperature difference in the three rooms

3.2. Variation of surface temperatures

Graph (a) on Fig.8 compares indoor surface temperatures measured on the three façades. It shows that the room “B” surface temperature profile varies on the same way as outdoor temperature form. The graph shows that the surface temperature of the bare façade is warmer than the surrounding. The maximum value of external surface temperature in façade “B” is 40°C whereas the maximum values in green façades (“C” and “A”) are 32°C and 29.5°C, respectively. These variations confirm the lack of effective solar protection of façade “B” and the shading effect of façades “A” and “C” provided by climbing plants and their capacity to intercept solar radiations. Consequently, the heat gain through the building envelope is reduced, and it is due to the difference of plant coverage ratio between the two façades “C” and “A”.

The graph (b) on Fig.8 compares outdoor surface temperatures. It shows also the difference between the three studied rooms. The internal surface temperatures in room “B” were higher than the ambient temperature due to daily peaks caused by solar radiation absorbed through the façade. Although the internal surface temperature of this façade rises quickly at day time reaching 34.1°C at 4.p.m, it falls and is close to the outdoor temperature in the late afternoon. At 6.am, the surface temperature reduced to 27°C slower than the ambient air temperature by 1.6°C. Indeed, the wall stores the daytime heat, which will be returned during the night.

The surface temperature amplitudes of the façade “A” are roughly similar to those obtained with façade “B” with a difference of 1.7°C. The green façade “A” maintain a lower

surface temperature than the green façade “C” with less heat storage. This increase is mainly due to internal gains and the energy flow transmitted through the window.

As a result, the plant layer has delayed the effect of heat transfer from outside to inside. It offers a good solar protection of the building envelope by reducing conduction and radiation heat transfer.

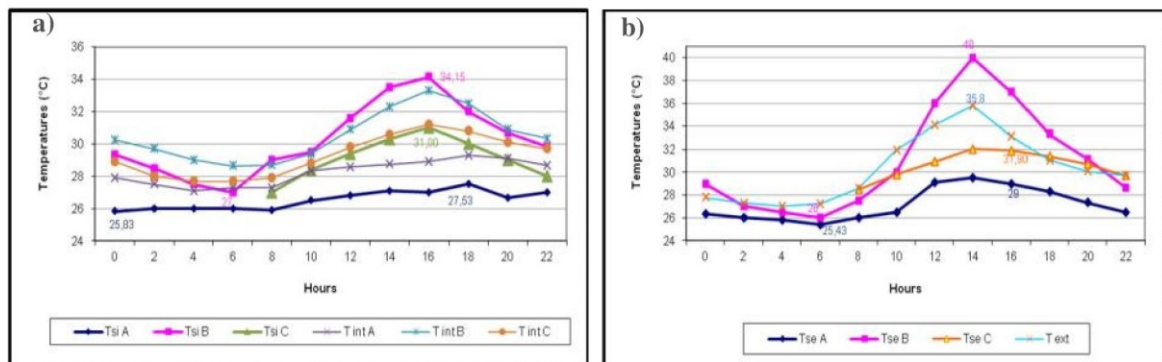


Fig.8. Variation of external surface temperatures in the three rooms

3.3 Variation of foliage temperatures

Figure 9 shows clearly that foliage temperatures and around it are lower than outside temperature. The "A" foliage temperatures range from 26.9°C to 33°C and the ones near the foliage range from 26.6°C to 34.55°C while the outside air temperatures range from 27°C to 35.8°C. For the house "C", the foliage temperatures range from 27.3°C to 33.9°C while the ones near the foliage range from 26.9°C to 34.8°C. This reduction is due especially to evapotranspiration process.

Solar radiation influences greatly plant transpiration and has a direct effect on stomata. Plants leaves open their stomata and evaporate water which will lower the leaf temperature and could decrease the air temperature near the plant. Thus, thanks to convection, the cooling is accelerated; noting that the air speed at this time is 1.39m/s.

In addition, leaf temperatures of house "A" are 2.4°C below leaf temperatures of house “C”. Consequently, leaf temperatures may be considerably influenced by thickness and density. When the foliage is dense, the evapotranspiration phenomenon is high influencing the thermal environment.

From 8.p.m, the "A" foliage temperature exceeds slightly the outside temperature with a discrepancy of 0.2°C . Indeed, at night, when the outdoor temperature is relatively low, the building releases heat by long wave radiation and convection with the surrounding air [23].

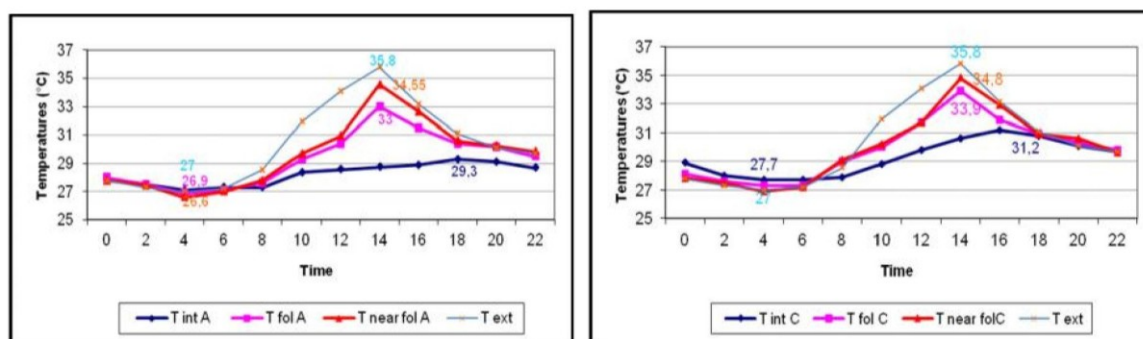


Fig.9. Variation of foliage temperatures of green façades “A” and “C”

The Fig.10 shows the thermal behavior of the three rooms at different measuring points. It should be noted that at 2.p.m, while the outside air temperature registers its maximum value of 35.8°C , the temperature near the foliage of house "A" is 34.55°C , marking a difference of 1.25°C and the leaf temperature is 33°C with a discrepancy of 2.8°C . At the same time, the house "C" foliage temperature recorded 33.9°C and near the foliage is 34.8°C .

All these fluctuations can be explained by the different heat transfer processes between the leaf layer, wall and environment detailed by [23]. During the day, part of the solar radiation reaches the leaf layer and another part is reflected by the leaves, while the rest is absorbed by the wall. The leaves absorb a large amount of incident solar radiation for photosynthesis and transpiration. Due to convection and evaporation, leaf temperatures are lower than surface temperatures of bare façade. The air temperatures are gradually reduced by the green layer effect through the evapotranspiration process. The heat energy is absorbed during the water evaporation from plants, which extracts the excess heat from the surroundings. Therefore, evapotranspiration leads to a thermal gradient between the ambient air and the plant layer.

A temperature difference of 6.3°C is recorded between the external surface of wall "A" and the outside air. This is mainly due to the plant shading projected on the wall. The green screen reduces the heat transfer from the outside to the inside and therefore contributes to the

reduction of the surface temperature of the wall and that of the ambient air. The gains generated inside room "A" are then limited to the internal gains. Therefore, at daytime, plant shading reduces heat gain into the building envelope by reducing the surface temperatures and by converting solar radiation to a latent heat [30-31].

By comparing these values with those recorded in room "C", this clearly shows that this room is less protected than room "A" and shows that the density, thickness and covering ratio play a major role in improving the thermal comfort of buildings. More the foliage is thick and dense; more temperatures are lower. The total absence of shading of the façade "B" promote the absorption of solar radiation during the day; which causes a rise in the external surface temperature up to 40°C while façades "A" and "C", which reach 29.5°C and 32°C respectively. Therefore, in summer period, the leaf layer reduces the temperature of the surrounding environment and provides a thermal comfort for buildings, protecting them from extreme heat.

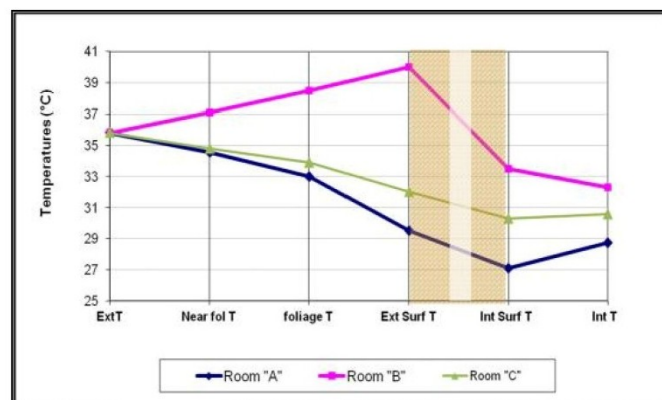


Fig.10. Temperatures evolution in the three rooms for differing measuring points at maximum outdoor temperature

3.4 Variation of relative humidity

As shown in Fig.11 and Fig.12, the humidity foliage levels are consistently higher despite the remarkable reduction found in the leaf temperatures.

These high values of relative humidity of the foliage directly affect that of the indoor air.

The ambient humidity level in room "A" is significantly higher than that of room "B" ranging

from 46.3% to 61% with a maximum difference of 22.7% recorded at 4.am and a minimum difference of 7.53% at 4.pm. It exceeds outdoor humidity readings with a maximum difference of 28.4%. This observation could have two origins. The first is plant transpiration, which tends to increase relative humidity in the air near the foliage. The second is the drop in temperature, which implies an increase in relative humidity, particularly for indoor air. Consequently, an air gap between the building and the plant layer is recommended to reduce humidity storage and to allow air circulation.

In addition, the vapor exchange surface between plants and air is related to plant density and the thickness and surface of leaves. More these parameters are large; great will be the evapotranspiration phenomenon [32].

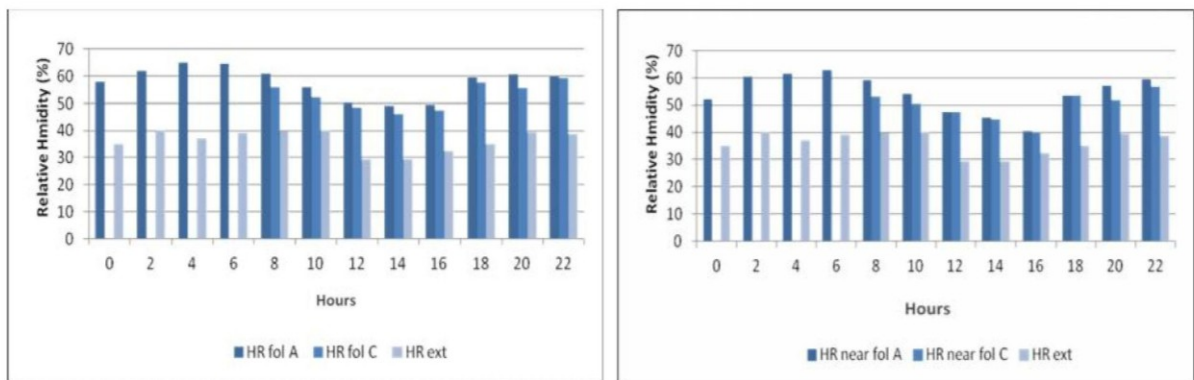


Fig.11. Variation of foliage humidity of green façades “A” and “C”

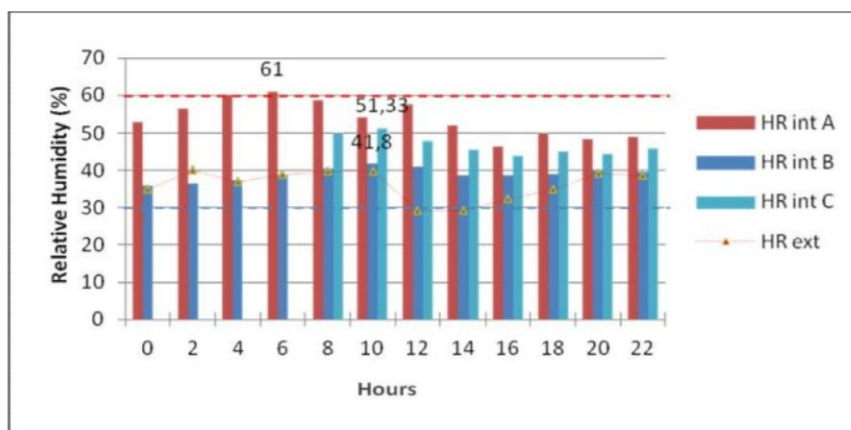


Fig.12. Variation of indoor relative humidity in the three rooms

4. CONCLUSION

This study focuses on an experimental investigation of the impact of green facades on hygrothermal environment of residential buildings under semi-arid climatic conditions during summer.

The analysis of measurement data indicates that direct green façades can be considered as a passive technique to control solar radiation under semi arid climate. Green façades can greatly affect the thermal comfort of occupants by protecting the building envelope from overheating. It acts as a buffer zone between the indoor and outdoor environment. Indeed, like a second skin, deciduous climbing plants on the southwestern side provided good sun protection of the building envelope by reducing conduction and radiation heat transfer. Climbers reduce the ambient and surface temperatures along building façades especially at daytime via shading and evapotranspiration.

Nevertheless, Virginia creeper screen contribute to increase the humidity level requiring nocturnal ventilation. Accordingly, an air gap between the building and the green screen is recommended to avoid condensation and allow air circulation.

On the other hand, the different types of green façades illustrated their different heat impact on the thermal environment of buildings. Therefore, plant density, foliage thickness and covering ratio have a high influence on the thermal environment. More these parameters are large; great will be the thermal performance of building envelope.

5. ACKNOWLEDGEMENTS

This research is part of an experimental work carried out as part of PHD thesis to evaluate the hygrothermal performance of direct green façades in semi arid climate of Algeria. The authors would like to acknowledge the homeowners for their important help and for their valuable contribution.

6. REFERENCES

[1] APRUE (Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie). 2ème séminaire sur l'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment en Algérie.

25 avril., 2017

- [2] Alexandri E, and Jones P. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and Environment.*, 2008, 43 : 480–493.
- [3] Ip K, Lam M and Miller A. Shading performance of a vertical deciduous climbing plant canopy. *Building and Environment.*, 2009, 45: 81-88
- [4] Eumorfopoulou EA and Kontoleon KJ. Experimental approach to the contribution of plant-covered walls to the thermal behaviour of building envelopes. *Building and Environment.*, 2009, 44: 1024–1038
- [5] Manso M, Castro-Gomes J. Green wall systems: A review of their characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*, 2015, 41: pp. 863–871.
- [6] Djedjig R, Bozonnet E and Belarbi R. Modelling green wall interactions with street canyons for building energy simulation in urban context. *Urban Climate.*, 2016, 16: 75–85.
- [7] Bass B and Baskaran B. Evaluating Rooftop and Vertical Gardens as an Adaptation Strategy for Urban Areas. Final CCAF impacts and adaptation progress report, NRCC-46737., 2001.
- [8] Šuklje T; Medved S. Bionic façade inspired by vertical greenery systems. Conference: Central Europe towards Sustainable Building (CESB)., 2013.
- [9] Cheng CY, Cheung Ken KS and Chu LM., 2010.- Thermal performance of a vegetated cladding system on facade walls. *Building and Environment*, 45: 1779-1787.
- [10] Köhler M. Green facades-A view back and some visions. *Urban Ecosystems.*, 2008, 11: 423–436.
- [11] Sulaiman MKAM., Jamil M., Zain MFM., Kuttler W and Shahidan MF. Thermal evaluation of green façade on opaque wall. The International Conference on Engineering and Built Environment (ICEBE). University of Kebangsaan Malaysia., 2013.
- [12] Stec WJ, Van Paassen AHC and Maziarz A. Modeling the double skin facade with plants. *Energy and Buildings.*, 2005, 37: 419–427.
- [13] Cameron RWF, Taylor JE and Emmett MR. What’s “cool” in the world of green façades? How plant choice influences the cooling properties of green walls. *Building and Environment.*, 2014, 73: 198-207.

-
- [14] Perini K, Marc Ottelé ALA, Fraaij Haas EM and Rossana R. Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope. *Building and Environment.*; 2011, 46: 2287-2294.
- [15] Wong NH, Tan AYK, Chen Y, Sekar K, Tan PY and Chan D. Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls, *Building and Environment.*, 2010, 45: 663–672.
- [16] Djedjig R, Bozonnet E and Belarbi R. Analysis of thermal effects of vegetated envelopes: Integration of a validated model in a building energy simulation program. *Energy and Building.*, 2015, 86: 93–103.
- [17] Dunnett N and Kingsbury N. *Planting Green Roofs and Living Walls.* Timber Press, 2008.
- [18] Johnston J and Newton J. *Building Green: a guide to using plants on roofs, walls and pavements.* The London Ecology Unit, 1992.
- [19] Wong NH, Tan AY, Tan, PY and Wong NC. Energy simulation of vertical greenery systems. *Energy and Buildings.*, 2009, 41 : 1401–1408.
- [20] Haggag M, Hassan A and Elmasry S. Experimental study on reduced heat gain through green facades in a high heat load climate. *Energy and Buildings.*, 2014, 82: 668–674.
- [21] Yan H, Ong B and Lim GT., 2001.- A preliminary investigation into the thermal environment of a planted wall in Singapore. *The 18th International Conference on Passive and Low Energy Architecture, Florianopolis, Brazil.* November, 7-9: 791-796.
- [22] Peck SW, Callaghan C, Bass B and Kuhn ME. Research report: greenbacks from green roofs: forging a new industry in Canada, Canadian Mortgage and Housing Corporation (CMHC). Ottawa, Canada, 1999.
- [23] Di HF and Wang DN. Cooling effect of ivy on a wall. *Experimental Heat Transfer. A journal of Thermal Energy Generation, Transport, Storage, and Conversion.*, 1999, 12(3): 235-345. Tsinghua University, Chine.
- [24] Qian ZM. *An Investigation to the Cooling and Moisturizing Effects of Creepers on the Surrounding Area, Researches on the Green Effects.* Chinese Environmental Science Press. Beijing, 1995.
- [25] Zaiyi L and Niu JL. Study on thermal function of ivy-covered walls. Dept of building

services engineering, Hong Kong, 2000.

[26] Olivieri F, Olivieri L and Neila J. Experimental study of the thermal-energy performance of an insulated vegetal façade under summer conditions in a continental Mediterranean climate. *Building and Environment.*, 2014, 77: 61-76.

[27] Pérez G, Rincón L, Vila A., González JM and Cabeza LF. Behaviour of green facades in Mediterranean Continental climate. *Energy Conversion and Management.*, 2010, 52: 1861–1867.

[28] Yin H, Kong F, Middel A, Dronova I, Xu H and James P. Cooling effect of direct green façades during hot summer days: an observational study in Nanjing, China using TIR and 3DPC data. *Building and Environment.*, 2017, 116: 195-206.

[29] Sunakorn P and Yimprayoon C. Thermal performance of biofacade with natural ventilation in the tropical climate. *International Conference on Green Buildings and Sustainable Cities Procedia Engineering.*, 2011, Vol 34–41.

[30] Hoi M, Lam Y, Ip K and Miller A. Thermal shading effect of climbing plants on glazed facades. *The World Sustainable Building Conference, Tokyo. September 27-29, 2005.*

[31] Akbari H. Shade trees reduce building energy use and CO₂ emissions from power plants. *Environmental Pollution.*, 2002, 116 : 119–126.

[32] Palmeri L, Barausse A and Jorgensen SE. *Ecological Processes Handbook*. CRC Press, 2017

How to cite this article:

Benhalilou K, Abdou S, Djedjig R. Experimental investigation on hygrothermal behavior of direct green facades under semi-arid climate. *J. Fundam. Appl. Sci.*, 2020, 12(1), 213-229.



BENHALILOU Karima

L'enveloppe végétale : une alternative au rafraîchissement passif

Cas de la façade végétale

Thèse en vue de l'Obtention du Diplôme de Doctorat en Sciences

Résumé

La présente recherche aborde la question de l'efficacité de l'enveloppe végétale en tant que procédé de rafraîchissement passif des bâtiments sous un climat semi aride. Elle vise l'évaluation des performances thermiques et énergétiques des façades végétales par le biais de l'expérimentation et de la modélisation.

Les plantes sont des organismes vivants qui répondent d'une manière très complexe aux conditions environnementales. La complexité des phénomènes biophysiques en jeu entre la plante, le bâtiment et l'environnement rend encore difficile la modélisation des façades végétales nécessitant l'élaboration de modèles numériques rigoureux.

Pour cela, un modèle mathématique reposant sur des hypothèses simplificatrices et considérant les interactions bâti-végétation-environnement a été développé afin de caractériser les effets des façades végétales. Ce modèle a la particularité de reproduire l'effet tampon fourni par la cavité d'air et tous les flux radiatifs et convectifs y afférents. En effet, différents processus de transfert de chaleur ont été pris en compte dans le bilan énergétique de la paroi végétale à savoir l'absorption du rayonnement solaire, l'échange de chaleur sensible par convection entre le feuillage et l'air ambiant, l'échange d'énergie infrarouge entre le feuillage et l'environnement et la chaleur latente dégagée par la plante par transpiration. Pour valider ce modèle, les résultats numériques sont comparés aux données expérimentales où de fortes corrélations ont été obtenues.

Les résultats expérimentaux ont révélé que l'adoption des façades végétales peut avoir un effet thermique positif pour les bâtiments sous le climat semi-aride durant la période estivale. Les résultats numériques ont ainsi montré que la façade végétale peut réduire considérablement le transfert de chaleur à travers l'enveloppe du bâtiment diminuant ainsi les charges de climatisation.

L'étude de sensibilité a aussi mis en évidence l'efficacité thermique des façades végétales qui dépend fortement de la densité foliaire caractérisée par l'indice de surface foliaire et le taux de couverture. D'autres paramètres tels que la profondeur de la cavité d'air, intervient également dans le comportement thermique de ce type de parois.

Mots clés : façades végétales, modélisation, rafraîchissement passif, validation expérimentale, performances thermiques et énergétiques.

Directeur de thèse : Pr OUTTAS SALIHA - Université Constantine 3

Année Universitaire : 2020-2021