



HAL
open science

Comportement thermique et économie d'énergie dans un appartement avec différentes mesures d'efficacité énergétique dans les six zones climatiques du Maroc

My El Hadi Drissi Lamrhari

► To cite this version:

My El Hadi Drissi Lamrhari. Comportement thermique et économie d'énergie dans un appartement avec différentes mesures d'efficacité énergétique dans les six zones climatiques du Maroc. Thermique [physics.class-ph]. Université Cadi Ayyad Marrakech (Maroc), 2018. Français. NNT: . tel-01986862v1

HAL Id: tel-01986862

<https://hal.science/tel-01986862v1>

Submitted on 19 Jan 2019 (v1), last revised 28 Jan 2019 (v2)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ROYAUME DU MAROC



Faculté des Sciences Semlalia

كلية العلوم السمالية

N° d'ordre : 269

THÈSE

Présentée à la Faculté pour obtenir le grade de :

Docteur

CED : Sciences et Techniques

Spécialité : Energétique et Thermique

Comportement thermique et économie d'énergie dans un appartement avec différentes mesures d'efficacité énergétique dans les six zones climatiques du Maroc

Par:

My El Hadi Drissi Lamrhari

Dernier diplôme: Master Spécialisé

Spécialité : Ingénierie du Management de la Sécurité, de l'Hygiène, de l'Environnement et de la Qualité

Soutenue le 29/12/2018 devant la commission d'examen :

Président	:	Pr. Abderrahim Brakez	PES	FSS-Marrakech
Examineurs	:	Pr. Abdeslam Draoui	PES	FST-Tanger
		Pr. Khalid Elharrouni	PES	ENA-Rabat
		Pr. Hassan Chehouani	PES	FST-Marrakech
		Pr. Najma Laaroussi	PH	EST-Salé
		Pr. Brahim Benhamou	PES	FSS-Marrakech

...A My Ahmed Drissi Lamrhari



**Academy Hassan II
of Sciences and
Techniques**

Recherches menées avec le concours de
l'Académie Hassan II des Sciences et
Techniques

Dans le cadre du projet

RafriBAT 2012



AVANT-PROPOS

Ce travail a été réalisé dans deux Laboratoires :

- Laboratoire d'attache : LMFE, Laboratoire de Mécanique des Fluides et Énergétique-Unité Associée au CNRST, URAC 27- de la Faculté des Sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad, Marrakech.
- Laboratoire de travail : EnR2E, Laboratoire des Énergies Renouvelables et de l'Efficacité Énergétique, du Centre National d'Études et de Recherches sur l'Eau et l'Énergie -CNEREE-, Université Cadi Ayyad, Marrakech.

Remerciements

Je dois cette thèse à mon Directeur Dr. Brahim Benhamou Professeur de l'Enseignement Supérieur à la Faculté des Sciences Semlalia qui m'a fait confiance en m'accordant ce sujet de thèse et qui, par son appui continu durant toutes ces années, m'a donné confiance, énergie et endurance. Qu'il veuille recevoir, ici, toute ma gratitude et ma sincère et profonde reconnaissance pour sa patience, ses hautes qualités humaines, d'organisation et de professionnalisme.

Je remercie vivement Messieurs les Professeurs, Khalid El Harrouni, Abdesslam Draoui et Hassan Chehouani qui ont accepté de rapporter sur cette thèse et d'en constituer le Jury. Mes profonds remerciements vont également au Pr. Najma Laaroussi qui s'est donné la peine de se déplacer à Marrakech pour participer au Jury de cette thèse. Dans le même sens, je remercie le Professeur Abderrahim Brakez d'avoir accepté de présider le Jury de ma soutenance ainsi que pour son support moral continu durant toutes ces années de travail.

Je tiens à remercier vivement mon cher ami Mustapha El Masaoudi d'avoir eu l'amabilité de nous confier son appartement (ADAM) durant toutes ces années en guise de chantier de travail théorique et expérimental.

Ce travail de thèse n'aurait pas été possible sans l'appui moral et psychologique de ma chère maman, de mes chers frères et soeur ainsi que de mes meilleurs amis : Abdelwahed, Taoufiq, Othmane, Bouchra, Hafida, Amine et les motards de Marrakech.

Mes Remerciement vont également au Professeur Leila Mandi, Directrice du CNEREE ainsi qu'à tout le personnel de ce Centre et à leur tête Dr. Fatima Ait Nouh pour leur accueil convivial au sein du Centre.

Cette thèse a été linguistiquement révisée et corrigée par mon grand ami Abdelilah Hasbi que je remercie vivement pour ses efforts et pour sa disponibilité habituelle.

Je profite de cette occasion pour remercier mes chers collègues au Projet Rafribat, chercheurs Séniors Pr. Hassan Hamdi, Pr. Amine Bennouna, Pr. Lahcen Boukhatem et Juniors : Dr. Issam Sobhy, et Dr. Hicham Mastouri pour les moments de collaboration agréables que nous avons passés ensemble.

Mes vifs remerciements sont adressés à tous mes collègues de l'EMSI-Marrakech, à leur tête Mme Abounouh et M. Zakaria pour leur encouragement permanent.

Durant mon stage de perfectionnement à l'Agence Marocaine pour l'Efficacité Energétique, j'ai eu l'occasion de rencontrer des personnes agréables. Merci à M. Ankila, M. Choukry et à tout le personnel de l'AMEE Marrakech et Rabat.

Enfin, je ne manque pas l'occasion pour remercier Professeur Lahcen Hassani, Directeur de CED-STI, Mme. Abouchoukr, Chef du Service « Doctorat » à la FSSM ainsi que le personnel de ce Service pour les efforts et les facilitations déployés durant six années de collaboration.

Table des matières

Nomenclature	I
Abréviations	IV
Liste des Figures	VI
Résumé	XI
Abstract	XIII
ملخص	XIV
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
I. Contexte et enjeux	1
II. Typologie du bâtiment au Maroc	2
III. Loi sur l'efficacité énergétique (Loi 47-09)	3
Chapitre I : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE ET ÉTAT DE L'ART	6
I. Introduction	6
II. Réglementations thermiques	6
III. La norme Passivhaus	7
IV. Techniques passives	7
IV.1. L'isolation thermique des parois opaques.....	7
IV.2. Le double mur à lame d'air	11
IV.3. L'inertie du sol.....	12
IV.4. Le coefficient d'absorption de la façade et du toit.....	14
IV.5. Les parois transparentes	15
IV.6. L'orientation	16
IV.7. Les matériaux à changement de phase.....	17
V. Techniques semi passives.....	18
V.1. La ventilation mécanique contrôlée	18
V.2. Le puits canadien.....	20
V.3. Le mur Trombe.....	22
VI. Confort thermique	23
VII. Analyse des données	26
VII.1. Analyse des données appliquée à l'énergétique du bâtiment	27
VII.2. Les plans d'expériences.....	27
VII.3. La régression linéaire.....	28
VIII. Conclusion	30
Chapitre II : DESCRIPTION DES APPROCHES THÉORIQUES ET EXPÉRIMENTALE ADOPTÉES	32
I. Introduction	32

II. Description du bâtiment étudié.....	32
III. Modélisation du bâtiment sous TRNSYS	33
III.1. Présentation de TRNSYS	34
III.2. Modélisation multizone du bâtiment par le Type 56 «TRNBuild»	35
III.3. Description mathématique des composantes utilisées dans la simulation... ..	35
III.4. Hypothèses de simulation adoptées.....	39
III.5. Modélisation du bâtiment en 3D	41
III.6. Création du projet TPF (TRNSYS Project File)	41
IV. Données météorologiques	42
V. Conclusion.....	43
Chapitre III : ÉTUDE NUMÉRIQUE de PREDICTION DES BESOINS THERMIQUES DANS UNE CELLULE DE BATIMENT SOUS LE CLIMAT DE MARRAKECH.....	44
I. Introduction	44
II. Description de la cellule du bâtiment étudiée	44
III. Description des éléments de l'étude	46
III.1. Données météorologiques	46
III.2. Description de la méthodologie	47
III.3. Hypothèses de simulation	49
IV. Résultats et discussion.....	50
IV.1. Charges de refroidissement.....	50
IV.2. Charges de chauffage	52
IV.3. Précision des modèles mathématiques élaborés	55
IV.4. Analyse des coefficients des modèles polynomiaux.....	56
V. Conclusion.....	57
Chapitre IV : SIMULATION DYNAMIQUE D'UN APPARTEMENT ET PROPOSITIONS POUR AMELIORER SES PERFORMANCES ENERGETIQUES DANS LES SIX ZONES CLIMATIQUES DU MAROC	59
I. Introduction	59
II. Description de la météorologie.....	60
III. Hypothèses de simulation et suivi expérimental	62
III.1. Configurations architecturales, thermophysiques et comportementales	65
III.2. Propriétés thermophysiques	67
III.3. Consigne de chauffage / refroidissement	68
III.4. Scénarios d'occupation et de ventilation.....	68
III.5. Indices d'inconfort thermique	69
IV. Analyse et discussion des résultats.....	69
IV.1. Comportement thermique de l'appartement conditionné	69
IV.1.1. Isolation de la façade.....	69

Table des matières

IV.1.2. Isolation du toit	74
IV.1.3. Isolation du plancher sur terre plein	74
IV.1.4. Ventilation mécanique contrôlée.....	76
IV.1.5. Impact de l'étage	78
IV.1.6. Orientation.....	79
IV.1.7. Coefficient d'absorption.....	81
IV.2. Confort thermique de l'appartement non conditionné	83
IV.3. Meilleure combinaison des techniques passive et semi-passive.....	87
V. Conclusion.....	89
CONCLUSION GENERALE	91
REFERENCES	94
ANNEXES	102

NOMENCLATURE

Symbole	Définition	Unité
A_w	Surface d'une paroi	m^2
b	Effusivité thermique	$W.s^{1/2}/(K.m^2)$
b_0	Constante	$kWh/(m^2.a)$
b_i	Coefficient polynomial du facteur X_i	-
C_p	Chaleur spécifique	$J/(kg.K)$
CZi	Zone climatique numéro « i »	-
D	Profondeur sous la surface du sol	m
DW	Critère de Durbin et Watson	-
E	Consommation d'énergie électrique	Wh
e_i	Erreur à l'étape d'ordre « i » ($Q_{calculée} - Q_{estimée}$)	$kWh/m^2.a$
F_s	Facteur solaire	-
$h_{interne}$	Coefficient de transfert de chaleur par convection d'une surface interne	$W/(m^2.K)$
$h_{outside}$	Coefficient de transfert de chaleur par convection d'une surface externe	$W/(m^2.K)$
In	Inertie thermique	$J/(K.m^2)$
Is	Indice d'inconfort thermique d'été (N_s/NT_s)*100	%
Iw	Indice d'inconfort thermique d'hiver (N_w/NT_w)*100	%
L	Pertes de chaleur sèches dues à la respiration	W/m^2
M	Métabolisme	met ($58W/m^2$)
N_s	Nombre d'heures d'inconfort thermique (été)	h
N_w	Nombre d'heures d'inconfort thermique (hiver)	h
NT_s	Nombre d'heures de la période chaude (= 4416)	h
NT_w	Nombre d'heures de la période froide (= 4344)	h
N	Nombre d'expériences	-
p	Perte de charge totale du système de ventilation	Pa
P_{abs}	Puissance électrique absorbée par le système de ventilation	W
q ou \dot{V}	Débit volumique d'air	$m^3.h^{-1}$

\dot{Q}_i	Gains de chaleur nets	W
\dot{Q}_{surf}	Gains convectifs provenant des parois intérieures	W
\dot{Q}_{inf}	Gains d'infiltration	W
\dot{Q}_{vent}	Gains de ventilation	W
$\dot{Q}_{g,c}$	Gains convectifs internes (par les occupants, par les équipements, par l'éclairage, etc.)	W
\dot{Q}_{cplg}	Gains convectifs dus à l'écoulement de l'air entre les zones	W
\dot{Q}_{solair}	Gains solaires entrant dans une zone à travers les fenêtres externes et qui sont immédiatement transférés en gain convectif à l'air intérieur	W
\dot{Q}_{ISHCCI}	Rayonnements solaires absorbés par les dispositifs d'ombrage internes de la zone, qui sont directement transférés comme un gain convectif à l'air intérieur	W
\dot{Q}_{r,w_i}	Gains radiatifs par le nœud surfacique du mur	W
\dot{Q}_{g,r,w_i}	Gains radiatifs internes reçus par le mur	W
\dot{Q}_{sol,w_i}	Gains solaires reçus par le mur via les fenêtres	W
\dot{Q}_{long,w_i}	Gains à travers les échanges de chaleur par rayonnement entre un mur et les autres murs de la zone	W
$\dot{Q}_{wall-gain}$	Flux de chaleur radiatif spécifique à un mur donné	W
Q_H	Charge de chauffage	kWh/(m ² .a)
Q_C	Charge de refroidissement	kWh/(m ² .a)
Q	Charge thermique totale	kWh/(m ² .a)
R	Coefficient de corrélation	-
RH	Humidité relative de l'air	%
T_{air}	Température du nœud représentant la zone thermique	K
$T_{paroi,i}$	Température de surface d'une paroi	K
$T_{vent,i}$	Température de l'air provenant de la ventilation	K
$T_{zone,i}$	Température de la zone i	K
T_{surf}	Température de surface d'une paroi	K
T_{mean}	Température moyenne annuelle de la surface du sol	K
T_{out}	Température de l'air ambiant	K

T_{amp}	Amplitude de la température de la surface du sol (température maximale moins la température moyenne de l'air)	K
t_{now}	Jour courant de l'année	jour
t_{shift}	Jour de l'année correspondant à la température minimale de la surface du sol	jour
T_{amb}	Température ambiante	K
T_{max}	Température maximale mensuelle	K
T_{min}	Température minimal mensuelle	K
T_{moy}	Température moyenne mensuelle	K
$U, (U\text{-value})$	Coefficient de transmission thermique d'une paroi opaque	W.(m ² .K)
U_g	Coefficient de transmission thermique d'une paroi transparente	W.(m ² .K)
V	Vitesse du vent	m/s
$[X]$	Matrice des variables explicatives (des facteurs d'entrée ou encore des variables indépendantes)	-
$[Y]$	Matrice colonne de la réponse (de la variable dépendante)	-
Z_i	Zone thermique numéro « i »	-
ΔQ	Écart relatif de la charge thermique totale	%
$\Delta Q_{H,C}$	Écart relatif de la charge de chauffage (H), refroidissement (C)	%
Lettres grecques		
λ	Conductivité thermique d'un matériau	W/(m.K)
η	Rendement instantané du moteur de VMC	%
ρ	Masse volumique	Kg/m ³
α	Diffusivité thermique	m ² /s

ABREVIATIONS

Symbole	Définition
ACH	Volume de changement d'air par heure (Air Changes per Hour)
AIE (IEA)	Agence Internationale de l'Énergie (International Energy Agency)
AMEE	Agence Marocaine pour l'Efficacité Énergétique
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
CFD	Computational Fluid Dynamics
CLO	Échanges radiatifs de courtes longueurs d'ondes
CNEREE	Centre National d'Études et de Recherches sur l'Eau et l'Énergie
DOE	Design of experiment (Plan d'expériences)
DCV	Demand Controlled Ventilation
EnR2E	Laboratoire des Énergies Renouvelables et d'Efficacité Énergétique
EPS	Polystyrène expansé
FS	Facteur solaire d'un vitrage
GLO	Échanges radiatifs de grandes longueurs d'ondes
HCP	Haut Commissariat au Plan
HVAC	Heating, Ventilation and Air-Conditioning
LMFE	Laboratoire de Mécanique des Fluides et Énergétique
MCP	Matériaux à Changement de Phase
MEMEE	Ministère de l'Énergie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement
MMM	Maison Marocaine Moderne
NDH	Number of Discomfort Hours (Nombre d'heures d'inconfort thermique)
PMV	Predicted Mean Vote
PPD	Predicted Percentage Dissatisfied
RDC	Rez de chaussée
RT	Réglementation Thermique (France)
RTCM	Règlement Thermique des Constructions au Maroc
TGBV	Taux Global des Baies Vitrées
TL	Transmission lumineuse d'un vitrage

TMY	Typical Meteorological Year (Année Météorologique Typique)
TPF	TRNSYS Project File
TRNSYS	TRansient SYstem Simulation
VMC	Ventilation mécanique contrôlée
XPS	Polystyrène extrudé

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Nombre d'autorisations de construire délivrées en 2015-2016 (HCP 2017) 3
Figure 2.	Quelques prototypes de murs avec isolation thermique, a : Mousse rigide de polyuréthane, b : Granulat de verre, c : Fibragglos (de bois), d : polystyrène expansé. (photos prises à la plate forme de l'AMEE, Marrakech 2017)..... 8
Figure 3.	Optimisation de l'épaisseur de l'isolant (Kaynakli et al. 2012)..... 9
Figure 4.	Température et humidité relative de « Basic chamber » et « energy Efficient Chamber ». (Fang et al. 2014) 10
Figure 5.	Construction d'un prototype de double mur à épaisseur variable de la lame d'air (Aviram et al. 2001) 12
Figure 6.	Profil de température annuelle du sol de Marrakech. (Sobhy et al. 2017). 13
Figure 7.	Un exemple d'architecture troglodytique à « Matmata» en Tunisie, bâtiment enterré. (Zermout 2011)..... 14
Figure 8.	Réflexion et transmission à travers une paroi transparente..... 15
Figure 9.	Illustration du choix de la protection d'une baie vitrée (AMEE 2017)..... 16
Figure 10.	Principe de fonctionnement du système à base de MCP : -a- fonctionnement diurne, -b- fonctionne nocturne. (Arkar et al. 2007) 18
Figure 11.	Installation de ventilation double flux pour un bâtiment tertiaire (Chlela 2008)..... 19
Figure 12.	Principe de fonctionnement simplifié d'un puits canadien monotube 21
Figure 13.	Mise en place du puits canadien et schéma global du projet de Villa AMYS à Marrakech. (Khabbaz et al. 2016) 22
Figure 14.	Coupe verticale d'une structure type d'un mur Trombe (Sadineni et al. 2011)..... 23
Figure 15.	Correspondance entre les indices PMV et PPD (Fanger 1970) 25
Figure 16.	Température opérative optimale en fonction de l'activité et de l'habillement de l'occupant (Fanger 1970)..... 25
Figure 17.	Processus de réalisation d'un plan d'expériences 28
Figure 18.	Plan d'architecte et vue de la façade de l'appartement ADAM..... 33
Figure 19.	Interface graphique de TRNSYS présentant l'approche schéma-bloc (Projet TPF de l'appartement ADAM au Rez de chaussée)..... 35
Figure 20.	Flux de chaleur convectifs sur un nœud d'air (TRNSYS, 2010) 36
Figure 21.	Flux de chaleur radiatifs dans une paroi (TRNSYS, 2010)..... 38
Figure 22.	Maillage du sol sous un bâtiment et désignation des champs : Near-Field et Far-Field (TRNSYS 2010) 40

Figure 23.	Image 3D de l'appartement ADAM.....	41
Figure 24.	Charges de refroidissement de la cellule de bâtiment étudiée pour les matériaux de construction Type1 (a) et Type2 (b)	50
Figure 25.	Diagrammes de Pareto des coefficients des modèles polynomiaux de la charge de refroidissement pour les Type1 (a) et Type2 (b).....	51
Figure 26.	Charges de chauffage de la cellule de bâtiment étudiée pour les matériaux de construction Type1 (a) et Type2 (b)	53
Figure 27.	Diagrammes de Pareto des coefficients des modèles polynomiaux de la charge de chauffage pour les Type1 (a) et Type2 (b).....	54
Figure 28.	Courbes de corrélation des charges de refroidissement	55
Figure 29.	Courbes de corrélation des charges de refroidissement	56
Figure 30.	Valeurs des coefficients normalisés des modèles polynomiaux	57
Figure 31.	Zones climatiques du Maroc selon le RTCM (RTCM 2014).....	61
Figure 32.	Température ambiante horaire (courbe) et rayonnement solaire global mensuel sur un plan horizontal (points) pour les six zones climatiques du Maroc durant une année météorologique typique (Meteonorm 2014).....	62
Figure 33.	Positionnement des dataloggers TESTO174H (dans la zone thermique Z3)	63
Figure 34.	Températures simulées, mesurées (axe de gauche) et ambiantes (axe de droite) pendant la semaine la plus chaude (à gauche) et la semaine la plus froide (à droite) de l'année 2014 pour la zone thermique Z3	64
Figure 35.	Températures simulées, mesurées (axe de gauche) et ambiantes (axe de droite) pendant la semaine la plus chaude (à gauche) et la semaine la plus froide (à droite) de l'année 2014 pour la zone thermique Z4	64
Figure 36.	Ecart maximal entre les températures mesurées et celles simulées (Points) et distribution des écarts absolus entre celles-ci (Histogrammes).....	65
Figure 37.	Configurations de l'appartement ADAM au RDC.....	66
Figure 38.	Configurations de l'appartement ADAM à l'étage intermédiaire.....	66
Figure 39.	Configurations de l'appartement ADAM au dernier étage	67
Figure 40.	Calcul du coefficient de transmission thermique de la façade de l'appartement dans la zone Z5 (à gauche) et Z4 (à droite) par l'appareil Greenteg® selon la norme (ISO 9869 2014).....	68
Figure 41.	Charges de chauffage/refroidissement pour les deux configurations W20 et W221 (histogrammes) ainsi que leur écart relatif (Points) pour les six zones climatiques du Maroc	70
Figure 42.	Charges de chauffage/refroidissement pour les deux configurations W20 et W20s (histogrammes) ainsi que leur écart relatif (Points) pour les six zones climatiques du Maroc	71

Figure 43.	Charge de refroidissement des configurations W21 (lame d'air et double vitrage) et W20 (lame d'air et simple vitrage) pour les six climats du Maroc..... 72	72
Figure 44.	Charge de refroidissement des configurations W221 (EPS et double vitrage) et W220 (EPS et simple vitrage) pour les six climats du Maroc . 72	72
Figure 45.	Charge de refroidissement des configurations W221 (EPS et double vitrage) et W21 (lame d'air et double vitrage) pour les six climats du Maroc..... 73	73
Figure 46.	Variation relative de la charge thermique totale de l'appartement ADAM entre les configuration W20 (simple vitrage) et W21 (double vitrage) pour les six climats du Maroc 73	73
Figure 47.	Charges de chauffage/refroidissement pour les deux configurations W221 et W222 (histogrammes) ainsi que leur écart relatif (Points) pour les six zones climatiques du Maroc 74	74
Figure 48.	Charges de chauffage/refroidissement pour les deux configurations W121 et W122 (histogrammes) ainsi que leur écart relatif (Points) pour les six zones climatiques du Maroc 75	75
Figure 49.	Variation relative de la charge thermique totale de l'appartement ADAM entre les configurations W121 et W122 76	76
Figure 50.	Charges de chauffage/refroidissement avec et sans VMC (histogrammes) ainsi que leur écart relatif (Points) pour les six zones climatiques du Maroc 77	77
Figure 51.	Nombre d'heures de confort thermique dans les climats du Maroc selon la base de données (Meteonorm 2014)..... 78	78
Figure 52.	Charges thermique globale de l'appartement ADAM pour les trois étages (W10 :RDC, W00 :Intermédiaire et W20 : dernier étage) dans les six zones climatiques du Maroc 79	79
Figure 53.	Charges thermiques totales de l'appartement ADAM selon l'orientation de sa façade 80	80
Figure 54.	Charges de chauffage/refroidissement (histogrammes) et leurs variations relatives (points) de l'appartement ADAM pour les orientation sud et ouest 81	81
Figure 55.	Evolution des charges de chauffage/refroidissement (a) et de la charge thermique totale (b) de l'appartement ADAM selon l'absorptivité solaire de la facade et du toit respectivement 0,3 et 0,4 (minimum absorptance) ou 0,8 et 0,9 (maximum absorptance) 82	82
Figure 56.	Indices d'inconfort thermique hivernal (a) et estival (b) pour la zone Z5 . 84	84
Figure 57.	Indices d'inconfort thermique hivernal (a) et estival (b) pour la zone Z6 . 85	85
Figure 58.	Indices d'inconfort thermique hivernal (a) et estival (b) pour la zone Z2 . 87	87

Figure 59.	Charge thermique totale annuelle de l'appartement ADAM avec la meilleure combinaison des techniques passives et semi-passive comparée au cas de référence.....	88
------------	--	----

LISTE DES TABLEAUX

Tableau. 1.	Valeurs du coefficient Ug et de Fs pour le simple et le double vitrage (BINAYATE 2015).....	16
Tableau. 2.	Comparaison des charges de chauffage/refroidissement pour différents types d'isolation et d'orientation. Source : (Daouas 2011), adapté par l'auteur.....	17
Tableau. 3.	Températures moyennes annuelles de l'air ambiant dans les zones climatiques du Maroc (Meteonorm 2014).....	39
Tableau. 4.	Paramètres de calcul du coefficient de transfert de chaleur par convection	40
Tableau. 5.	Variante des dimensions de la cellule de bâtiment étudiée	45
Tableau. 6.	Composition des murs de la cellule de bâtiment.....	45
Tableau. 7.	Composition du plancher bas de la cellule de bâtiment	45
Tableau. 8.	Composition de la toiture de la cellule de bâtiment	45
Tableau. 9.	Caractéristiques thermophysiques de la brique rouge et du parpaing (TRNSYS 2010).....	46
Tableau. 10.	Données météorologiques de Marrakech (Station d'Agdal 2009).....	47
Tableau. 11.	Matrice d'expérimentation pour le Type 1 (Brique rouge).....	48
Tableau. 12.	Matrice d'expérimentation pour le Type 2 (Parpaing).....	49
Tableau. 13.	Description des climats étudiés (Meteonorm 2014).....	60
Tableau. 14.	Puissance et durée de fonctionnement des appareils électroménagers au sein de l'appartement.....	68
Tableau. 15.	Combinaison des techniques passives et semi-passive selon le climat	88

RESUME

La conception de constructions bioclimatiques prend une place capitale dans les préoccupations des spécialistes du bâtiment dans le monde entier et la consommation d'énergie pour le conditionnement des intérieurs est d'autant plus élevée que les dégâts écologiques y afférents deviennent alarmants.

L'objectif de ce travail s'inscrit dans cette optique en mettant à disposition un guide de conception de bâtiment à consommation d'énergie réduite en matière de chauffage et de refroidissement. Concrètement, Cette thèse vise à étudier l'impact de nombreux paramètres techniques, architecturaux et météorologiques d'un appartement sur sa performance énergétique et son confort thermique. Les paramètres étudiés sont: l'isolation thermique de l'enveloppe, l'orientation, le niveau de l'étage, le couplage du plancher bas au sol, le coefficient d'absorption du toit et des murs extérieurs et la ventilation mécanique contrôlée. Une étude numérique basée sur TRNSYS est réalisée dans les six climats différents du Maroc tels qu'ils sont définis par le Règlement Thermique des Constructions au Maroc à savoir ; Atlantique : Agadir, Méditerranéen : Tanger, Continental : Fès, Froid : Ifrane, Semi-aride : Marrakech et Désertique : Errachidia. Le modèle numérique a été validé par rapport aux résultats expérimentaux obtenus lors de longues campagnes de suivi expérimental en été et en hiver d'un appartement situé dans la ville de Marrakech.

Les charges de chauffage et de refroidissement de l'appartement ainsi que les indices d'inconfort thermique sont calculés pour les onze configurations possibles combinant les variantes des paramètres étudiés. Les résultats montrent que l'isolation thermique de la façade conduit à une surchauffe estivale avec une augmentation de la charge thermique totale de l'appartement pouvant atteindre 18% dans tous les climats considérés, à l'exception du climat froid. Il est constaté que la technique d'isolation thermique de la façade par la lame d'air, en empêchant la surchauffe estivale, est suffisante pour atteindre un niveau appréciable d'efficacité énergétique et de confort thermique. De même, il est établi que l'isolation thermique du plancher bas sur terre plein provoque une augmentation de la charge thermique d'au moins 67% pour les climats chauds et modérés. La meilleure combinaison de toutes les mesures d'efficacité énergétique étudiées pour chaque condition climatique est évaluée par la comparaison des charges thermiques avec celles d'un cas de référence qui représente l'appartement réel.

Préalablement à cette approche expérimentale, une étude théorique basée sur la méthode des plans d'expérience et sur la régression linéaire est mise en œuvre afin de prédire, à travers des modèles mathématiques, les charges de refroidissement et de chauffage d'une cellule de bâtiment à Marrakech au climat chaud et semi-aride ainsi que d'hierarchiser les facteurs à haut impact sur les performances énergétiques du bâtiment dans cette région.

L'analyse des modèles mathématiques élaborés sur la base des résultats de plusieurs simulations dynamiques à l'aide de TRNSYS, compte tenu de la haute précision des coefficients de corrélation obtenus (supérieurs à 0.92), permet de conclure que dans le climat de Marrakech, les paramètres du bâtiment qui ont un impact important sur sa charge

thermique sont principalement le Taux Global des Baies Vitrées, l'isolation thermique du toit, des murs et du plancher bas.

Enfin, cette approche peut être considérée, d'une part, comme un carrefour entre l'énergétique des bâtiments, l'architecture ainsi que les méthodes mathématiques (plans d'expériences et régression multilinéaire) qui apporte une valeur ajoutée du point de vue méthodologique et d'autre part comme un outil d'évaluation préalable à la construction des bâtiments sous les différents climats étudiés.

ABSTRACT

The bioclimatic construction tendency is of top importance for building specialists all over the world and the concerns of energy consumption for indoors conditioning is increasing as the associated ecological damages is progressively alarming.

The main goal of this work is to provide guidance to a building design with purposed reduced energy consumption for heating and cooling. Concretely, this thesis aims at studying the impact of many technical, architectural and meteorological parameters of an apartment on its energy performance and thermal comfort. The studied parameters are: the envelope thermal insulation, the orientation, the floor level, the coupling of the slab-on-grade, the absorption coefficient of the roof and the external walls and the controlled mechanical ventilation. A numerical study based on TRNSYS code is carried out for six different climates of Morocco as defined by the Thermal Regulation of Construction in Morocco namely; Atlantic: Agadir, Mediterranean: Tangier, Continental: Fez, Cold: Ifrane, Semi-arid: Marrakech and Desert: Errachidia. The numerical model has been validated by the experimental results obtained from long experimental monitoring campaigns in summer and winter of the apartment located in the city of Marrakech.

The heating and cooling loads of the apartment as well as the thermal discomfort indices are calculated for the eleven possible configurations combining the studied parameters. The results show that the thermal insulation of the facade leads to a summer overheating with an increase in the total thermal load of the apartment up to 18% in all the considered climates, with the exception of the cold one. Furthermore, it is found that introducing the thermal insulation of the facade by the air gap is sufficient to achieve an acceptable level of energy saving and thermal comfort as it prevents summer overheating. Similarly, it is established that the slab-on-grade thermal insulation causes an increase in the thermal load of at least 67% for warm and moderate climates. The best combination of all the studied energy efficiency measures for each climate condition is evaluated by comparison with a reference case that represents the actual apartment.

Before the experimental approach setting, a theoretical study based on the Design of Experiment method and the linear regression is implemented in order to predict, through mathematical models, the cooling and heating loads of a building cell in Marrakech as well as to prioritize most impacting factors on the building's energy performance in this region. The analysis of the elaborated mathematical models on the basis of results from several dynamic TRNSYS simulations, and taking into account the high precision of the obtained correlation coefficients (superior to 0.92), makes it possible to conclude that in the climate of Marrakech, the parameters of the building that have a significant impact on its thermal load are mainly the window to wall ratio, the roof, the slab-on-grade and the walls thermal insulation.

Finally, this approach can be considered, on the one hand, as a crossroad between building energetic, architecture and mathematical methods (Design of Experiment and multilinear regression) that provide an added value from methodological point of view, and on the other hand as an evaluation tool prior to the construction of buildings in the different studied climates.

ملخص

يحتل تصميم البنايات البيومناخية مكانة كبرى من بين انشغالات أخصائي ميدان البناء على مستوى العالم أجمع، واستهلاك الطاقة لأجل التكيف الداخلي في ارتفاع متزايد تنجم عنه أضرار بيئية مقلقة.

إن الهدف من هذه الرسالة العلمية ينخرط في هذه الرؤية بحيث يروم إلى منح دليل لتصميم مبان ذات استهلاك منخفض للطاقة فيما يخص التبريد والتدفئة. بمعنى أدق، يهدف هذا البحث إلى دراسة أثر مجموعة من العوامل التقنية، المعمارية والمناخية على الإمكانيات والقدرات الطاقية والحرارية لبناية سكنية من نوع "شقة" بمراكش. العوامل التي تم اعتبارها هي: العزل الحراري، وضعية الواجهة، الطابق، تجميع الطابق الأرضي، معامل الامتصاص الضوئي للسقف والجدران والتهوية المراقبة ميكانيكيا.

مكنت دراسة رياضية نظرية أنجزت بشكل قبلي من تحديد الأثر الخاص بكل عامل من عوامل التأثير المباشر على الأداء الطاقى لخلية بنائية في منطقة مراكش شبه الحارة وتميزت هذه الدراسة القبلية بدقة النماذج الرياضية المحصلة بحوالي 92%. في ما بعد مكنت الدراسة الرقمية المنجزة باستعمال برنامج TRNSYS والتي تم تثبيتها بواسطة متابعة تجريبية طويلة المدى مكنت من خلق نموذج رقمي للشقة موضوع الدراسة لأجل تقييم أدائها الطاقى تحت الظروف المناخية لمناطق المغرب الستة: أكادير – طنجة – فاس – إفران - مراكش والراشيدية كما تم إحداثها من طرف ضابط البناء العام المحدد لقواعد الأداء الطاقى للمباني المنجز من طرف الوكالة المغربية للنجاعة الطاقية.

بينت هذه الدراسة أن العزل الحراري للجدران وللطابق الأرضي يؤدي إلى إحماء خلال فصل الصيف ويرفع بذلك الاحتياجات الطاقية للشقة بحوالي 18% و67% على التوالي لا سيما في المناطق ذات المناخ من المعتدل إلى الصحراوي فيما تبين أن نظام التهوية المعتمد مكن من الحصول على أداء طاقى جيد للشقة خصوصا خلال فترة التبريد.

تعتبر هذه الأطروحة بمثابة عمل يلتقي فيه كل من النجاعة الطاقية للمباني في شقتها الفيزيائي والمعماري إلى جانب التحليل الرياضي النظري النموذجي المبني على تصميم التجارب والتراجعية الخطية المتعددة و نتوخى من خلاله منح قيمة مضافة إلى ميدان طاقية المباني.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

I. Contexte et enjeux

Le réchauffement de la planète et les changements climatiques sont principalement causés par la forte émission des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Le secteur énergétique étant mondialement le plus important émetteur de ces gaz, plusieurs pays ont renforcé la priorité donnée à l'efficacité énergétique et à l'utilisation des énergies renouvelables par la mise en œuvre de politiques adaptées à leurs spécificités économiques, sociales et climatiques. Selon l'Agence Internationale de l'Énergie, dans 20 pays représentant 85% de la consommation totale d'énergie finale en 2013, le secteur du bâtiment résidentiel, avec une part moyenne d'environ 21%, représentait la troisième consommation d'énergie finale la plus élevée. De plus, le chauffage et le refroidissement des locaux représentaient jusqu'à 55% de l'énergie totale consommée dans le secteur du bâtiment (IAE 2016). Aussi, les préoccupations mondiales en matière d'environnement et d'énergie ont conduit à une croissance rapide de l'obligation de construire des habitations plus économes en demande d'énergie notamment pour les besoins de chauffage et de refroidissement. D'autre part, le Maroc dépend en majorité dans son approvisionnement énergétique des importations et sa facture énergétique ne cesse d'augmenter. Cette facture a connu, selon l'Office des Changes, une hausse de 27.4% pour atteindre 69.4 milliards de dirhams en 2017 (Ecomédia 2018). En outre, Le secteur du bâtiment connaît une dynamique sans précédent et sa consommation énergétique devrait s'accroître davantage suite aux fortes productions en logements et aux réalisations de vastes chantiers urbains en cours et/ou programmés avec 1,5 millions de logements à construire entre 2010 et 2020 (AMEE 2015). A cela s'ajoute la demande croissante des citoyens en confort au sein des habitations suite à l'amélioration de l'exigence du niveau de vie et à la baisse des prix des équipements électroménagers. Ceci engendre des pics sporadiques de consommation électrique en été qui ont atteint selon l'Office National de l'Electricité et de l'Eau Potable, 6180 MW et 6290MW en terme de puissance appelée à 21h00 en Aout 2017 et 2018 respectivement.

Dans le cadre de ses engagements internationaux, le Maroc a exprimé sa volonté de réduire les émissions de gaz à effet de serre et d'assurer une mutation vers une croissance durable d'autant plus que le pays est fortement affecté par une consommation énergétique en constante croissance ainsi que par sa dépendance énergétique quasi-totale vis-à-vis de l'extérieur. Dans ce contexte, le Maroc a adopté la stratégie énergétique nationale, tracée en mars 2009 qui définit comme objectif prioritaire à l'horizon 2020 la réduction de la dépendance énergétique, estimé en 2009 à 97%. L'atteinte de cet objectif passera essentiellement par l'installation de 42% de la capacité de production électrique à partir de ressources propres et renouvelables telles que le solaire thermique et photovoltaïque, l'éolien et l'hydroélectrique, et aussi par la mise en œuvre d'une politique globale pour la promotion de l'efficacité énergétique dans différents secteurs et notamment dans celui du bâtiment par la diminution de 15% de la consommation d'énergie à l'horizon de 2030. Cette stratégie est déployée à plus d'un niveau: technique, financier, institutionnel, juridique etc. De surcroît, durant la dernière décennie, le Maroc a adopté une politique avant-gardiste dans le domaine

de l'énergie basée sur l'exploitation et la mise en valeur de son potentiel naturel. En effet, le Maroc dispose de gisements importants en énergies propres, notamment en solaire et en éolien. Le potentiel des énergies renouvelables au Maroc se présente comme suit (Chater 2013):

- L'énergie éolienne: présente un potentiel considérable exploitable dépassant les 7000 MW.
- L'énergie solaire: présente également un grand gisement d'une moyenne au sol de 4.7 à 5.6 kWh/m².j et d'une durée moyenne annuelle d'insolation de plus de 3000 heures.
- L'énergie hydroélectrique: la puissance installée en hydroélectricité est de l'ordre de 1730 MW en 2010 et un potentiel significatif de microcentrales hydrauliques, estimé à plus de 200 sites, pourra être exploité.

Pour exploiter ces gisements, plusieurs chantiers sont en marche. Un vaste programme intégré de production électrique à partir de l'énergie solaire est en cours. Dans ce sens, des centrales électriques d'une puissance totale de 2000 MW ont été installées ou programmées depuis 2015. Pour la filière éolienne, la puissance électrique installée d'origine éolienne est destinée à être portée à 2000 MW en 2020 (MEMEE 2009).

Ainsi, la politique du Maroc en matière d'efficacité énergétique entend la clarification des relations entre l'administration et les autres parties prenantes en établissant un système de gouvernance institutionnalisé de l'efficacité énergétique, un cadre législatif et réglementaire et des normes standards.

Enfin, la construction de logements énergétiquement efficaces apparaît comme l'une des actions les plus urgentes à mener pour mettre en œuvre la stratégie nationale en matière d'énergies renouvelables et d'efficacité énergétique. Une diminution significative des besoins de chauffage et de refroidissement du bâtiment ainsi qu'une amélioration du confort thermique peuvent être obtenues grâce à l'utilisation de certains matériaux de construction et une conception architecturale appropriée, notamment une meilleure orientation, un dimensionnement optimal des fenêtres, une isolation thermique, etc. les travaux de recherche menés dans cette thèse s'inscrivent dans cette optique.

II. Typologie du bâtiment au Maroc

Le Maroc est doté de 4.6 million d'unités de bâtiment résidentiel (HCP 2017). Avec le succès qu'a connu le logement à 250 000 DH au cours des dernières années, on a eu tendance à réduire le segment social à ce type d'habitat. Or, le logement, notamment les appartements de moyen et haut standing (type de l'appartement étudié dans cette thèse) devrait susciter le même degré d'attention et d'intérêt. Le stock national de logements sociaux est évalué à près de 1.2 million, soit un habitat sur 4 du parc global. Toutefois, dans ce total, plus des deux tiers sont des maisons marocaines modernes, ce qui prouve que les ménages concernés privilégient l'acquisition de lots de terrain et l'auto-construction à l'achat d'un appartement (essentiellement les logements à 250 000 DH). La maison marocaine est de loin le type

d'habitat préféré des Marocains comme le montre la Figure 1. Sur l'ensemble du parc de logements occupé à titre principal (4.6 millions), 67% sont des maisons marocaines modernes. Celles-ci dominent largement dans toutes les villes sauf à Casablanca et à Rabat. Notons toutefois que les appartements sociaux en immeubles dominent dans les grandes métropoles, 57% à Casablanca par exemple. (Harmak 2016).

Avec une évolution annuelle d'environ 3% du parc du logement national (HCP 2017), le Maroc se trouve dans la contrainte de doter les nouvelles constructions de véritables mesures d'efficacité énergétique en matière de chauffage/refroidissement et d'éclairage etc. d'autant plus que la dépendance du pays en termes de ressources énergétiques pèse lourd et qu'elle ne sera pas surmontée de sitôt.

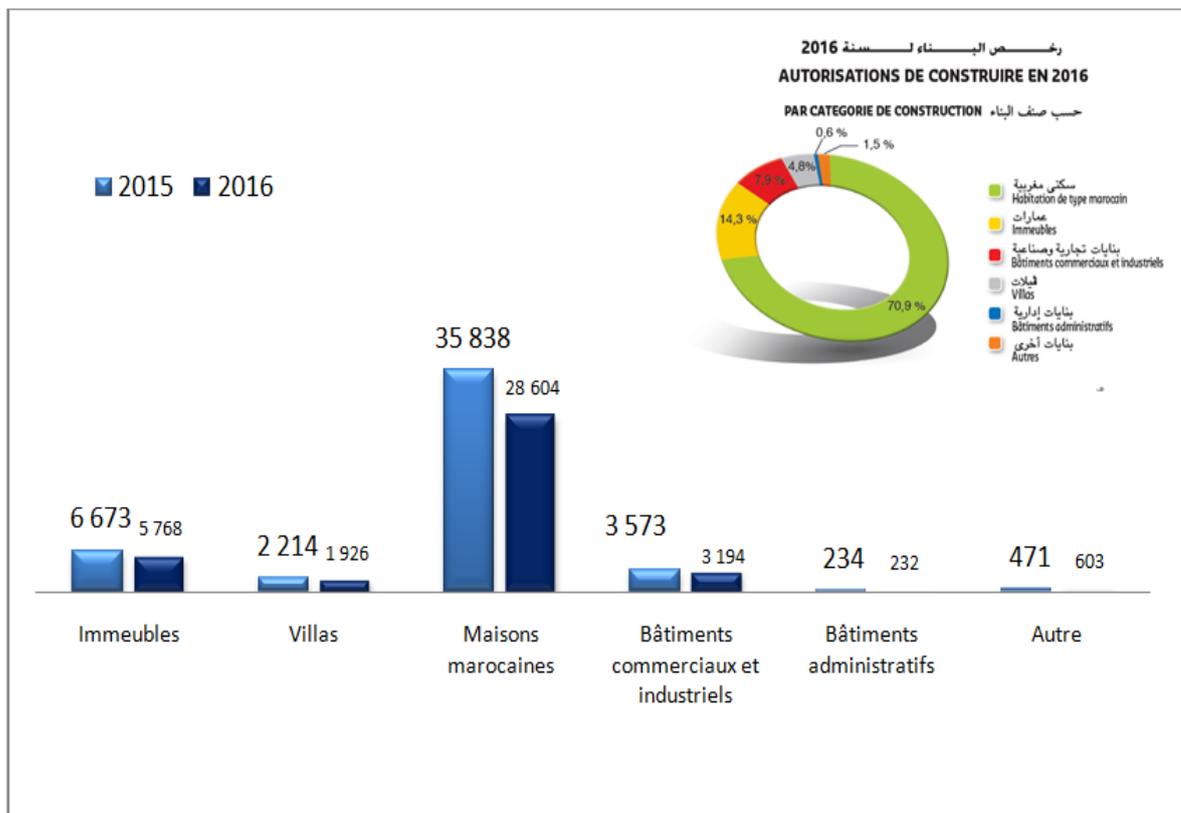


Figure 1. Nombre d'autorisations de construire délivrées en 2015-2016 (HCP 2017)

III. Loi sur l'efficacité énergétique (Loi 47-09)

Afin d'accompagner la mise en œuvre de sa stratégie en matière d'efficacité énergétique, le Maroc a promulgué un ensemble de lois et de règlements constituant un cadre législatif de référence et de standardisation des différentes questions en relation avec les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique. Nous citons ici, à titre d'exemple la loi 47-09 relative à l'efficacité énergétique.

La loi 47-09 est composée de 28 articles stipulant différentes exigences générales dans le domaine de l'efficacité énergétique. Dans le chapitre premier, le texte de cette loi présente quelques définitions terminologiques de l'efficacité énergétique : la performance énergétique, l'audit énergétique et les entreprises de services énergétiques. Dans le second chapitre la loi traite de la performance énergétique en général. Ce chapitre est essentiellement consacré à :

- l'obligation du respect des performances énergétiques minimales par les appareils mis en vente dans le territoire national et leur labellisation ;
- la fixation par le (RTCM 2014) des performances énergétiques dans le bâtiment notamment l'éclairage, l'orientation et l'isolation thermique ;
- l'obligation des administrations, des établissements publics et des collectivités territoriales d'intégrer la rationalisation de la performance énergétique dans leurs services mais aussi dans leurs relations avec leurs partenaires ;
- Certaines dispositions législatives sur les entreprises de services énergétiques.

L'étude d'impact énergétique fait l'objet du troisième chapitre de la loi. En effet, la loi souligne l'obligation de la présentation d'une étude d'impact énergétique relative à tout projet de programme d'aménagement urbain ou tout projet de programme de construction de bâtiment quel que soit leur usage en fonction d'un seuil de consommation d'énergie thermique et/ou électrique spécifique à chaque catégorie de projet. Enfin dans le quatrième chapitre, la loi considère que tout établissement, entreprise ou personne physique dont la consommation d'énergie thermique et/ou électrique dépasse un seuil spécifique fixé par voie réglementaire, sont soumis à un audit obligatoire et périodique effectué par une entreprise de services énergétiques agréée par l'Etat. Dans les autres chapitres, du cinquième au huitième et dernier, la loi traite du contrôle technique, de la constatation des infractions et des pénalités.

Au Maroc, le domaine de l'efficacité énergétique dans le bâtiment est actuellement à ses phases rudimentaires et son développement nécessite la conjugaison des efforts de toutes les parties prenantes. En effet, l'aboutissement de ce grand chantier passe par plusieurs actions politiques, réglementaires etc. mais aussi scientifiques et techniques. C'est dans ce but que cette thèse tente de s'inscrire en apportant une contribution à la conception de bâtiments économes en termes de consommation d'énergie relative au chauffage/refroidissement des espaces intérieurs. Durant la période de recherche consacrée à cette thèse, nous avons envisagé l'évaluation de l'impact de plusieurs facteurs physiques, architecturaux, matériels etc. sur le comportement thermique des bâtiments et ce en adoptant deux approches : une théorique et l'autre expérimentale. Au fait, la présentation de ce manuscrit de thèse s'articule autour des axes suivants :

Le premier chapitre dans lequel nous passerons en revue l'état de l'art des différentes techniques passives et semi-passives dans le bâtiment se base sur une description détaillée des outils de l'efficacité énergétique dans le monde entier.

Le second chapitre est consacré à la description de la méthodologie mise en œuvre pour atteindre les objectifs de ce travail, la description du logiciel et des bâtiments étudiés etc.

Dans le troisième chapitre nous présenterons une étude théorique préalable visant à priser l'importance de l'impact de chacune des variables les plus souvent abordées dans la littérature et qui interviennent directement dans l'efficacité énergétique d'un bâtiment. Cette étude théorique est basée sur des techniques statistiques d'analyse de données et de conception de l'expérimentation à mener : les plans d'expériences et la régression linéaire. Cette méthode permet également de prédire, à des degrés de précision appréciables, le comportement thermique d'un bâtiment dans un climat semi aride tel que celui de Marrakech.

Le quatrième chapitre est dédié à une étude par simulation numérique d'un bâtiment grandeur nature situé à Marrakech en vue de déterminer ses performances énergétiques en fonction des variables architecturales, matérielles et climatiques et d'élaborer certaines recommandations à même d'améliorer ces performances énergétiques et de confort thermique aussi bien dans le climat semi aride de Marrakech que dans les cinq autres climats du Maroc tels qu'ils ont été définis par le Règlement Thermique de Construction au Maroc (RTCM 2014).

Enfin, dans la conclusion générale, nous récapitulerons les principaux résultats de ce travail aussi bien dans son volet théorique qu'expérimental et nous présenterons quelques perspectives de recherche pour améliorer certains aspects des idées globales de cette thèse.

CHAPITRE I : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE ET ÉTAT DE L'ART

I. Introduction

Depuis des millénaires, la thermique au sein du bâtiment a suscité l'intérêt et l'ingéniosité de l'Homme, en ce sens que, d'un point de vue sociale, l'habitat représente l'abri, la protection contre les aléas de la nature, l'intégrité physique et dernièrement le confort de ses occupants. Ainsi, au fil des années, l'Homme a usé de son génie pour améliorer les conditions thermiques au sein de son logement en commençant par les techniques les plus simples voire artisanales jusqu'aux mesures avancées de l'efficacité énergétique et du confort thermique telles qu'elles sont connues de nos jours. D'importantes économies d'énergie de chauffage et de refroidissement ainsi que l'amélioration du confort thermique au sein du bâtiment peuvent être obtenues grâce à des techniques passives et/ou semi-passives appropriées, notamment la meilleure orientation, le dimensionnement optimal des fenêtres, l'isolation thermique, la ventilation naturelle ou mécanique... (Al-Sallal 1998; Al-ajmi and Hanby 2008; Krüger et al. 2010; Jaber and Ajib 2011; Ebrahimpour and Maerefat 2011; Givoni 2011; Hester et al. 2012; Yaşar and Kalfa 2012; Byrne et al. 2013; Stazi et al. 2013; Khabbaz et al. 2016; Mastouri et al. 2013, 2017; Boumhaout et al. 2017; Sobhy et al. 2014,2017a; Drissi et Benhamou 2018), etc. Toutefois, le comportement et la sensibilité des occupants à l'économie d'énergie d'un bâtiment ne sont pas des moindres (Ashouri et al. 2018 ; Zhang et al. 2018). En effet, récemment (en 2018) au Japon, une méthode basée sur le data-mining et en relation directe avec le comportement des occupants vis-à-vis de l'usage de l'énergie a été proposée par Ashouri et al. (2018). Cette méthode a permis d'économiser 21% de la facture énergétique par le changement des habitudes d'utilisation de l'énergie par les occupants du bâtiment étudié.

Dans cette partie, nous nous intéresserons à une description détaillée de l'état de l'art de l'efficacité énergétique dans le bâtiment dans son volet passif, c'est-à-dire l'analyse des notions et des techniques de la thermique au sein des bâtiments tels que l'isolation thermique, la conception architecturale, les matériaux de construction, etc. Nous aborderons aussi la méthodologie de recherche expérimentale basée sur la conception de plans optimaux d'expérimentation ainsi que les modèles mathématiques y afférents.

II. Réglementations thermiques

Une réglementation thermique est, en général, un texte cadrant la thermique des bâtiments neufs et/ou existants. Elle fixe des consommations d'énergie maximales dans plusieurs domaines : chauffage / refroidissement, eau chaude sanitaire, ventilation et éclairage... pour chaque type de bâtiment ; résidentiel, administratif, commercial etc, les réglementations thermiques ont fait leur apparition dans les différents pays développés après le milieu du siècle passé pour s'accroître vers 1974 suite au premier choc pétrolier afin de faire face à la hausse brutale du prix des hydrocarbures et de réduire la facture énergétique. Au Maroc, la première réglementation thermique a été élaborée par l'Agence Marocaine pour l'Efficacité Énergétique et a vu le jour le 06 novembre 2014 sous le nom de : « **Règlement Général de Construction Fixant les Règles de Performance Énergétique de**

Constructions » (RTCM 2014). Cependant, malgré son entrée en vigueur en novembre 2015, le (RTCM 2014) reste quasi-inapplicable pour des raisons jusqu'à présent inconnues.

D'autre part, le Règlement Thermique des Constructions au Maroc (RTCM 2014) se présente sous forme de deux approches : une est dite approche prescriptive et l'autre performancielle. La première offre une description technique des exigences limites réglementaires des caractéristiques thermiques des enveloppes des bâtiments résidentiels. La deuxième explicite les performances thermiques limites des bâtiments résidentiels par zone climatique. Le RTCM se limite toutefois au volet thermique du bâtiment et ne traite pas des autres types de consommation électrique (éclairage par exemple) bien qu'il soit indiqué à l'article 3 de la loi 47-09. Dans les chapitres suivants, nous aurons l'occasion de discuter des dispositions de ce règlement.

III. La norme Passivhaus

La norme Passivhaus a été développée en Allemagne à la fin des années 1980. Elle établit des exigences très élevées en termes d'efficacité énergétique, de conception et de construction de bâtiments. L'Institut Passivhaus de Darmstadt (Allemagne) promeut et contrôle la norme et définit le processus d'assurance qualité associé. L'objectif principal de Passivhaus est de minimiser les exigences pour le chauffage/refroidissement des locaux. Il se concentre aussi largement sur l'évitement et la réduction des pertes de transmission et en augmentant et/ou en optimisant les avantages du gain solaire passif. En outre, Passivhaus vise à fournir une bonne qualité d'air intérieur et un confort thermique acceptable. Par définition, la consommation d'une maison Passivhaus (15kWh/m².a) se concentre sur des caractéristiques de conception passive telles que l'isolation thermique, l'étanchéité à l'air et l'orientation optimale. Cependant, elle permet aussi d'inclure certains éléments semi passifs notamment la ventilation mécanique avec récupération de chaleur (Sameni et al. 2015).

IV. Techniques passives

IV.1. L'isolation thermique des parois opaques

L'isolation thermique consiste à placer une barrière contre le déplacement de la chaleur en utilisant des matériaux ayant des propriétés thermophysiques à même de ralentir les déperditions de l'énergie thermique. Actuellement, plusieurs matériaux peuvent être utilisés dans ce sens. On peut citer certains isolants naturels tels que la fibre de cellulose, le liège, la laine, la fibre de coco, le chanvre, etc. ainsi que certains isolants thermiques industriels : le polystyrène expansé ou extrudé, la mousse rigide de polyuréthane, le granulat de verre, le fibragglos de bois ou de tissu recyclés, etc. (Figure 2)

L'importance de l'isolation thermique dans la réduction des charges de chauffage/refroidissement du bâtiment a été largement étudiée dans la littérature (Farhanieh & Sattari, 2006; Bolattürk 2008; Kaynakli 2012; Kolaitis et al. 2013; Kumar & Suman 2013; Ozel 2013; Fang et al 2014) . Aux Pays-Bas, Van Hooff et al. (2014) ont évalué l'effet de six techniques passives sur le nombre d'heures de surchauffe en utilisant la simulation thermique dynamique de trois bâtiments résidentiels génériques à savoir, une maison détachée, une maison semi détachée avec terrasse et un appartement au dernier étage.



Figure 2. Quelques prototypes de murs avec isolation thermique, a : Mousse rigide de polyuréthane, b : Granulat de verre, c : Fibragglos (de bois), d : polystyrène expansé. (photos prises à la plate forme de l'AMEE, Marrakech 2017)

Les techniques passives considérées dans cette étude sont: la résistance thermique, la capacité thermique, la réflectivité à courte longueur d'ondes (albédo), les toitures végétalisées, l'ombrage des baies vitrées et la ventilation naturelle. Les données météorologiques utilisées ont été mesurées à DeBilt (Pays-Bas) en 2006, connues pour l'apparition de plusieurs vagues de chaleur où la température ambiante peut dépasser 35°C en été. Selon les auteurs, ces données météorologiques peuvent être considérées comme un exemple d'une année où les températures estivales seront probablement fréquentes à l'avenir en raison des changements climatiques. Il a été établi, entre autres, que le nombre d'heures de surchauffe pour le cas de l'appartement est significativement plus élevé en raison du transfert de chaleur à travers le toit. De plus, l'augmentation de la résistance thermique de l'enveloppe du bâtiment augmente le nombre d'heures de surchauffe qui peuvent être limitées par l'ombrage ou par une ventilation naturelle supplémentaire. Ainsi, l'ambivalence de l'isolation thermique de l'enveloppe a été confirmée. En effet, l'augmentation de l'isolation thermique pour réduire la consommation d'énergie pour le chauffage entraîne une surchauffe, notamment dans les climats chauds. L'analyse de ce point fera l'objet, entre autres, du IV^{ème} chapitre de cette thèse.

Les conditions climatiques interviennent directement dans les décisions et les choix à adopter pour mettre en place telle ou telle technique passive ou semi-passive. En effet certaines mesures d'efficacité énergétique peuvent être bénéfiques pour un climat donné sans pour autant l'être pour d'autre telles que l'isolation thermique des parois verticales, du plancher bas sur terre plein ou la ventilation (Sadineni et al. 2011; Sobhy et al. 2017 ; Drissi et Benhamou 2018). La relation entre la conception passive des bâtiments et le climat a été étudiée par Gong et al. (2012). Suite à une étude numérique, les auteurs ont optimisé sept mesures de conception passive incorporées dans un modèle de cellule de bâtiment d'une surface de 16 m² pour cinq types de climats (été chaud et hiver chaud, été chaud et hiver froid, climat très froid, climat froid et doux) représentés par 25 villes en Chine. Les systèmes étudiés

dans cette recherche sont: L'isolation thermique des murs et du toit, l'épaisseur du matériau d'isolation, l'orientation des fenêtres, le taux global des baies vitrées, le type de vitrage et la profondeur du surplombe. Les résultats ont montré que l'isolation des murs extérieurs et la profondeur du surplombe sont les deux paramètres les plus importants dans la variation de la charge thermique annuelle des bâtiments dans les climats considérés. La contribution de ces deux systèmes passifs dans la réduction de la charge thermique annuelle est d'environ 70% et 10% respectivement. De plus, Benhamou et Bennouna (2013) ont conclu, via une étude numérique d'une maison individuelle de 167m² sur deux étages dans le climat semi-aride de Marrakech, que l'isolation thermique du toit réduit considérablement (environ 40%) la charge thermique annuelle de la maison. En revanche, les auteurs ont montré que l'isolation thermique des murs diminue essentiellement la charge de chauffage, alors que cela peut conduire à une surchauffe estivale.

Kaynakli (2012) a effectué une revue de littérature sur l'isolation thermique des murs extérieurs des bâtiments. Cette revue a porté sur les matériaux d'isolation et leur épaisseur optimale économique. L'auteur a également examiné les effets de l'isolation thermique de l'enveloppe et d'autres paramètres de conception sur la consommation d'énergie du bâtiment ainsi que sur les émissions de CO₂. Cette étude montre que l'épaisseur optimale de l'isolant se trouve pratiquement à l'intersection des courbes représentant respectivement le coût de l'isolant et le coût de la consommation énergétique liée aux besoins de chauffage/refroidissement du bâtiment (Figure 3).

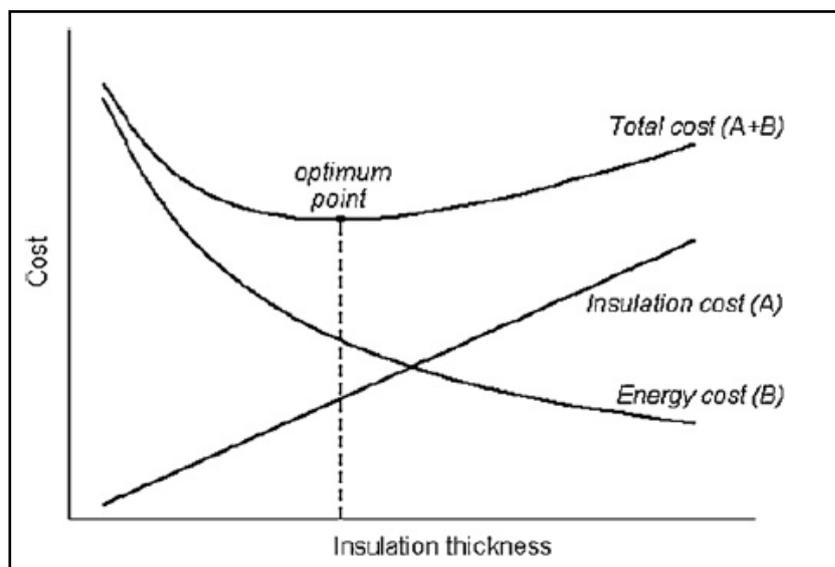


Figure 3. Optimisation de l'épaisseur de l'isolant (Kaynakli et al. 2012)

De la même manière, en Chine, Fang et al. (2014) ont comparé expérimentalement l'effet de l'isolation thermique sur la consommation d'énergie de refroidissement de deux chambres dans le climat chaud de la région de Chongqing. La première chambre, dite «Energy Efficient Chamber», a été construite avec un système d'isolation thermique des murs extérieurs et la seconde, dite «Basic Chamber», a été construite selon la conception standard des bâtiments résidentiels en Chine. Les auteurs ont conclu que la première chambre économise 23.5% de la consommation d'énergie pour le refroidissement par rapport à la seconde. Cependant, la surchauffe estivale qui peut être causée par l'isolation thermique de

l'enveloppe, l'inertie du sol, l'effet de l'isolation thermique du toit sont des facteurs qui n'ont pas été pris en compte dans cette recherche. Notons également que la conclusion des auteurs a été basée uniquement sur la comparaison des températures au sein des deux chambres durant deux jours typiques d'été (24 et 25 juillet) comme le montre la Figure 4.

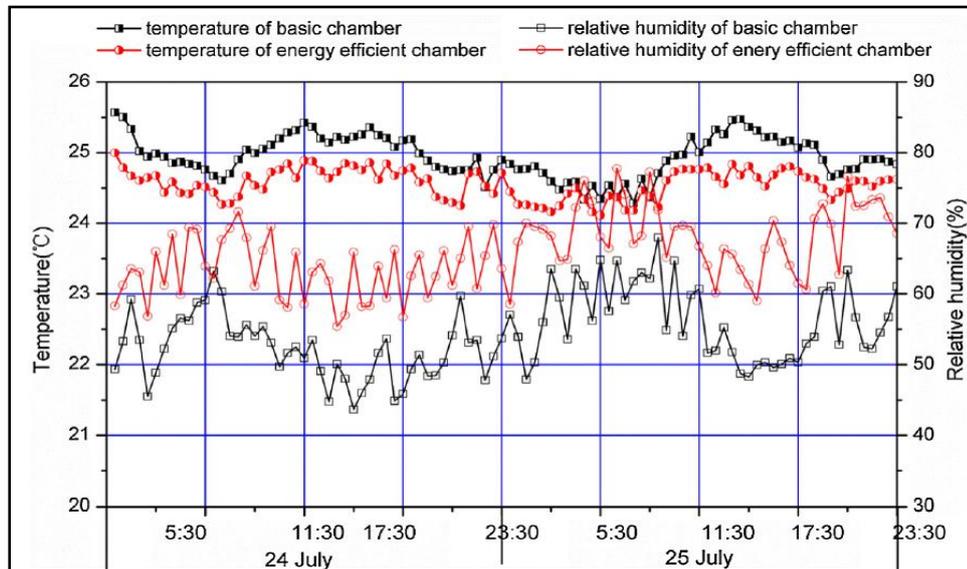


Figure 4. Température et humidité relative de « Basic chamber » et « energy Efficient Chamber ». (Fang et al. 2014)

Dans une autre étude, Stazi et al. (2013) ont vérifié les performances thermiques des trois enveloppes caractérisées par différents types de murs traditionnels adoptés dans les climats tempérés. À cet effet, ils ont fait des comparaisons expérimentales entre trois bâtiments situés en Italie. Tous ces bâtiments ont été construits entre les années 1940 et les années 1980, et ont des enveloppes avec différents types de murs pour faire face aux conditions climatiques extérieures : la capacité (masse thermique élevée), la stratification (différentes couches et une cavité) et la résistance (utilisation d'une couche d'isolation). Les résultats de simulation par le logiciel EnergyPlus montrent que le comportement des trois enveloppes est très différent car ils interagissent de différentes manières en fonction des changements climatiques. En été, les enveloppes avec les stratégies de la capacité ou de la résistance ont un effet bénéfique par rapport aux enveloppes stratifiées, tandis qu'en hiver, la paroi isolée se comporte mieux que les autres (en raison de son faible coefficient de transmission thermique). D'autre part, une enveloppe d'une grande capacité a un effet négatif en été, car elle provoque des problèmes considérables de surchauffe. Au contraire, en hiver l'isolation placée à l'extérieur semble être une bonne solution. À la fin de cette recherche, ils ont conclu que, contrairement à une couche d'isolation extérieure traditionnelle qui peut causer des problèmes de surchauffe en été, une couche d'isolation externe ventilée est une solution optimale en ce qui concerne le confort et la consommation d'énergie, aussi bien pour les masses thermiques élevées que pour les enveloppes stratifiées. Une étude similaire sur l'inertie thermique de l'enveloppe a été faite en Argentine par Larsen et al. (2012). Ils ont analysé l'influence d'une enveloppe massive et légère d'un immeuble sur la consommation énergétique annuelle. Ils ont simulé la charge de chauffage et de refroidissement de l'immeuble par le logiciel EnergyPlus, avec l'utilisation des données météorologiques horaires

de Salta (Argentine). Après la comparaison entre les murs légers et massifs, ils ont affirmé que ces derniers sont préférables à ceux légers dans les climats arides. Ce type de mur donne des économies d'énergie d'environ 25%.

Par ailleurs, aujourd'hui l'isolation thermique est tellement évoquée dans le domaine de l'efficacité énergétique des bâtiments qu'elles sont devenues indissociables dans l'esprit du simple utilisateur et parfois même chez certains professionnels. Cependant, il convient de mentionner que l'effet négatif de l'isolation thermique de l'enveloppe sur les performances énergétiques et le confort thermique du bâtiment, notamment la surchauffe en été, n'est pas négligeable et pourtant n'a pas reçu suffisamment d'attention.

IV.2. Le double mur à lame d'air

Dans la section précédente, nous avons présenté l'importance de l'isolation thermique des murs extérieurs dans la réduction de la charge de chauffage/refroidissement des bâtiments mais aussi l'effet négatif de la forte masse thermique au sein de l'enveloppe notamment en été. Alternativement, l'isolation thermique des murs extérieurs peut être réalisée en utilisant une technique largement connue : le double mur à lame d'air qui peut être efficace en fonction du climat; cette technique est communément utilisée dans la construction au Maroc, pour des raisons d'isolation acoustiques mais aussi thermiques.

D'autre part, les modes de transfert de l'énergie thermique en général sont largement connus sous leur forme classique dans la littérature. Ils sont subdivisés en trois catégories principales : la conduction, la convection et le rayonnement. Or, dans le domaine du bâtiment, ces modes de transfert peuvent prendre une tournure tout à fait différente selon les matériaux de construction, les conditions climatiques et bien d'autres paramètres. Nous citons à titre d'exemple ici l'air qui est considéré comme un meilleur isolant thermique, toutefois dans une cavité d'un mur, ses propriétés thermophysiques changent complètement selon l'épaisseur de la cavité et selon la température des parois internes de cette cavité. Dans les travaux de recherche envisagés dans cette thèse et notamment dans le IV^{ème} chapitre, la conductivité thermique équivalente de la lame d'air d'une épaisseur de 7cm a été calculée selon la méthode des corrélations suivie par Sobhy et al. (2017a). Afin d'améliorer la compréhension de la résistance thermique d'un double mur à lame d'air de différentes épaisseurs et des régimes d'écoulement interne, Aviram et al. (2001) ont effectué une étude expérimentale du transfert de chaleur à travers un double mur muni d'une lame d'air (Figure 5). Les auteurs ont testé un mur de cavité en parpaing et en briques avec des épaisseurs de lame d'air de 78, 60 et 40 mm. Les auteurs ont établi l'influence de la convection de l'air à l'intérieur de la cavité lors du transfert de chaleur à travers la paroi. Il a été constaté que la lame d'air devient plus résistante à la chaleur à une épaisseur étroite en raison de la diminution de l'amplitude du transfert de chaleur par convection.

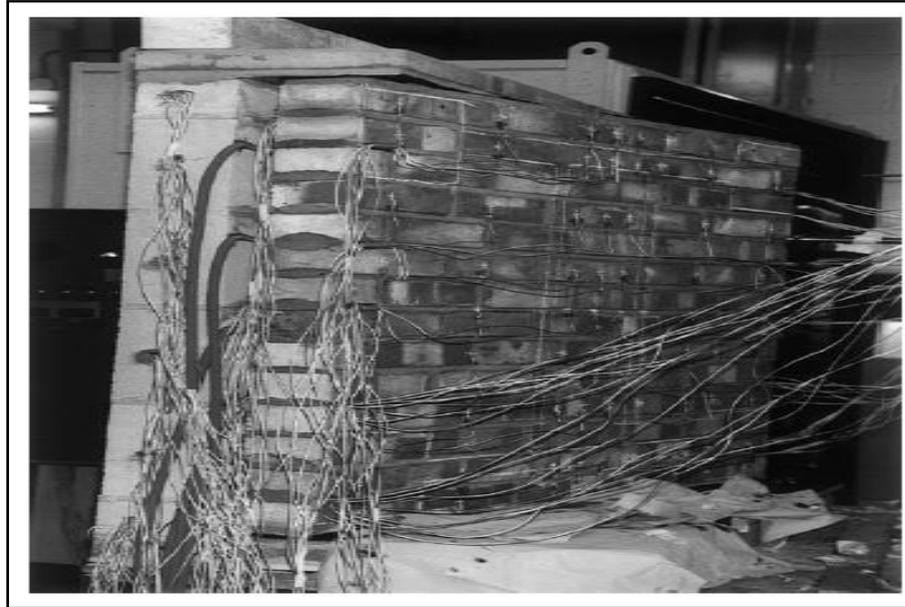


Figure 5. Construction d'un prototype de double mur à épaisseur variable de la lame d'air (Aviram et al. 2001)

Comme indiqué ci-dessus, une isolation thermique élevée a un effet ambivalent sur les charges thermiques des bâtiments, car elle peut entraîner une surchauffe estivale (Benhamou et Bennouna 2013, Van Hooff 2014 ; Stazi et al. 2016 ; Sobhy et al. 2017a, Mastouri et al. 2017). Le double mur à lame d'air s'avère par ailleurs efficace spécialement pour les climats modérés à chauds (Drissi et Benhamou 2018).

IV.3. L'inertie du sol

Le sol est considéré comme le gisement thermique naturel le plus important. En effet, du point de vue thermique, la croûte terrestre se charge et se décharge en été et en hiver respectivement. Entre les deux saisons, un déphasage d'amplitude peut être constaté entre la température ambiante et celle du sol et cette dernière peut être considérée comme étant quasiment constante à une profondeur de 2,5 à 3m et égale à la température de l'air ambiant à la surface du sol selon l'équation (Eq. 1.1) de Kusuda et Achenbach. (1965) :

$$T = T_{\text{mean}} - T_{\text{amp}} * \exp \left[-D * \left(\frac{\pi}{365\alpha} \right)^{0.5} \right] \cos \left\{ \frac{2\pi}{365} \left[t_{\text{now}} - t_{\text{shift}} - \frac{D}{2} * \left(\frac{365}{\pi\alpha} \right)^{0.5} \right] \right\} \quad \text{Eq. I.1}$$

Ce phénomène permet au sol de se caractériser par une inertie thermique importante dont les bâtiments peuvent profiter pour maintenir un confort thermique grâce à des planchers bas sur terre plein couplés (sans isolation thermique) ou carrément à des bâtiments enterrés ou semi-enterrés. La Figure 6 montre le profil de température du sol (à Marrakech), sur une année, à une profondeur de 0.75 m et pour une conductivité thermique de $\lambda=1.28 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, une densité de 2000 kg.m^{-3} , une chaleur spécifique de $0.66 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et une température moyenne de la surface du sol de $20.3 \text{ }^\circ\text{C}$ (Sobhy et al. 2017)

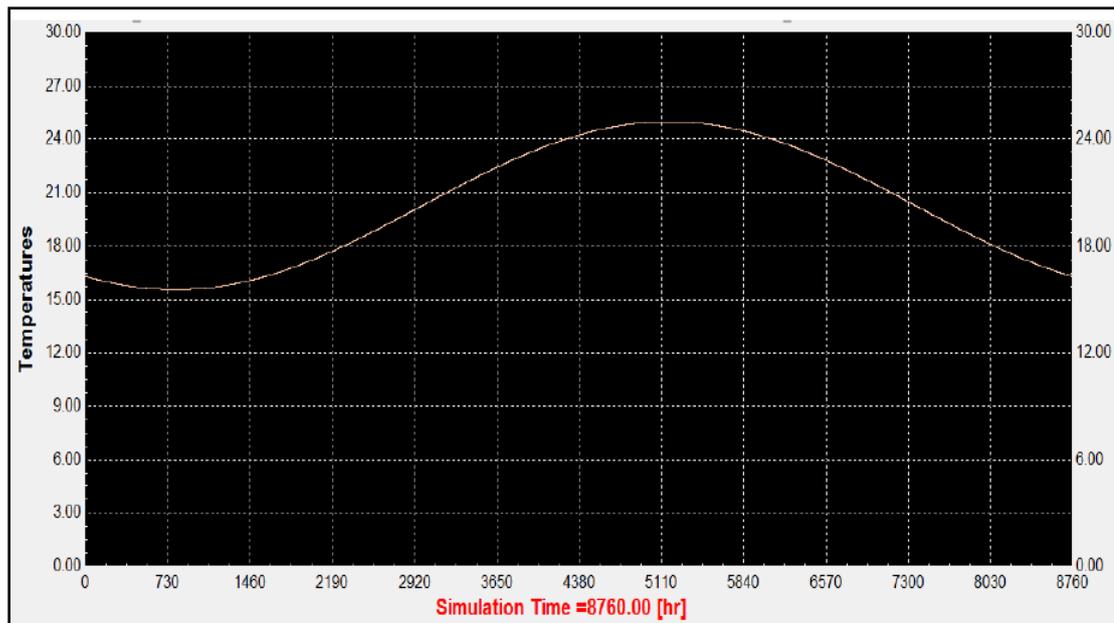


Figure 6. Profil de température annuelle du sol de Marrakech. (Sobhy et al. 2017)

En effet, en fonction des conditions climatiques, l'isolation thermique des planchers bas sur sol n'est pas toujours nécessaire, comme l'indiquent Sobhy et al. (2017a) qui ont étudié le comportement thermique d'une maison semi-détachée située dans le climat semi-aride de Marrakech. Dans cette étude, les auteurs ont montré que l'isolation thermique du plancher bas sur sol n'est pas du tout nécessaire car la demande de chauffage est inférieure à celle de refroidissement. De plus, cette isolation thermique augmente la demande de refroidissement de la maison car elle l'empêche de bénéficier de l'inertie thermique du sol. Pourtant, dans la littérature on ne trouve que très peu d'études qui se penchent sur cette question fondamentale.

Par ailleurs, les constructions enterrées ou semi enterrées (Figure 7) offrent des ambiances intérieures très confortables. Par l'augmentation considérable de l'inertie thermique de l'enveloppe, la variation journalière des températures disparaît; seul le cycle annuel pèse sur l'ambiance intérieure (Figure 6). Des exemples qui ont fait l'objet d'investigation expérimentale, ont prouvé qu'une température intérieure peut être maintenue stable autour de 30°C, alors que la température de surface dans les parois extérieures dépasse les 40°C (Zermout 2011). Selon le même auteur, d'autres mesures montrent que près de la surface, la température fluctue quotidiennement autour de la température moyenne diurne, mais avec la profondeur, la période d'intégration de la température moyenne augmente et à une certaine profondeur, l'amplitude finit par se stabiliser autour de la moyenne annuelle de la température extérieure.

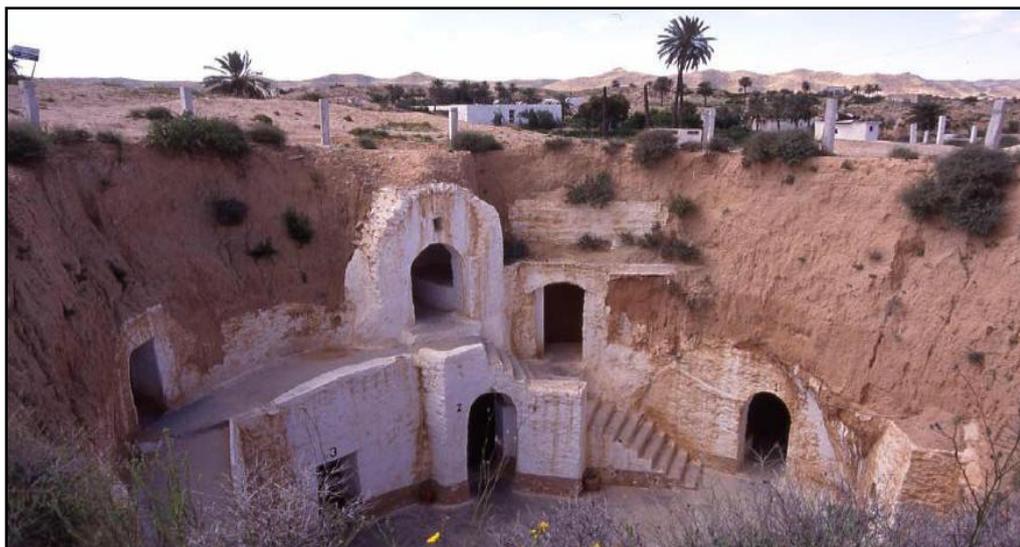


Figure 7. Un exemple d'architecture troglodytique à « Matmata» en Tunisie, bâtiment enterré. (Zermout 2011)

IV.4. Le coefficient d'absorption de la façade et du toit

La couleur rouge est réglementaire pour les façades des bâtiments dans presque toutes les villes intérieures marocaines ; alors que dans les villes côtières, méditerranéennes et quelques villes intérieures, surtout du nord du pays, les façades des bâtiments sont généralement peintes en blanc. De plus, il est courant dans les bâtiments marocains d'utiliser du carrelage de couleur foncée pour les terrasses. La performance thermique de ces bâtiments est, à coup sûr, affectée par l'absorption solaire qui en résulte. En effet, Suehrcke et al. (2008) ont constaté que, dans une situation de ciel dégagé à Townsville, au nord de l'Australie, entre 20% à 95% du rayonnement solaire est typiquement absorbé par la surface du toit. Ces auteurs ont affirmé que les gains de chaleur totaux d'un toit de couleur claire sont d'environ 30% inférieurs à ceux d'un toit de couleur sombre.

En Italie, Piselli et al. (2017) ont examiné l'impact de la réflectivité solaire du toit (min = 0.1 couleur très sombre et max = 0.8 couleur très claire) de trois types de bâtiments, à savoir un plateau de bureau, une maison individuelle et un appartement au dernier étage et ce sous l'effet de cinq climats différents d'Italie allant de très chaud à très froid. Les auteurs ont fait varier en parallèle d'autres paramètres tels que le type de conditionnement HVAC, les gains thermiques internes et le niveau d'isolation du toit. Les résultats montrent, d'une part, que la réflectivité optimale du toit qui permet de réduire la charge annuelle de chauffage/refroidissement des bâtiments étudiés est principalement affectée par le contexte climatique. D'autre part et en particulier dans le climat principalement dominé par le besoin de refroidissement (Palerme), la réflectivité optimale du toit est, quelque soient les autres paramètres, la plus élevée c'est-à-dire 0.8. En revanche, pour les zones où le climat est plus doux : (Naples et Rome) et les climats dominés par le besoin de chauffage : (Milan et Tarvisio), la réflectivité optimale du toit peut varier dans toute la gamme considérée et selon chaque combinaison spécifique des autres facteurs examinés. Autrement dit, dans de telles zones climatiques, les bâtiments semblent être moins sensibles à la variation de la réflectivité du toit. Enfin les auteurs ont conclu que les toitures à haute réflectivité (0.8) semblent être une

stratégie optimale potentielle dans tous les climats étudiés sauf pour les climats froids où il faut prendre en considération les autres paramètres étudiés.

A Qatar, Kharesh et Al-Khawaja (2016) ont envisagé la mise en place de certaines mesures visant à réduire la consommation électrique notamment celle des systèmes de climatisation au sein des bâtiments à Doha. Pour ce faire, cinq paramètres déterminants, selon les auteurs, ont été variés moyennant une simulation thermique dynamique d'un bâtiment résidentiel d'une superficie de 144m², à savoir : la température de consigne à l'intérieur du bâtiment (de 22 à 24°C), l'intensité de l'éclairage (de 10 à 3W.m⁻²), le coefficient de transmission thermique de l'enveloppe (1.78 à 0.57 W.m⁻².K⁻¹), le coefficient d'absorption de la façade et du toit (Couleur « medium » à couleur « light ») et le type de vitrage (de simple vitrage clair à double vitrage gris). Parmi les conclusions de cette étude on trouve la réduction de la charge de refroidissement de 12% grâce à la minimisation du coefficient d'absorption de la façade et du toit.

IV.5. Les parois transparentes

Une baie vitrée (fenêtre, porte, véranda...) est typiquement composée d'une partie transparente : le vitrage, simple, double ou triple et d'une partie opaque : le cadre : acier, aluminium, bois ou PVC, ainsi que de certains accessoires. Les performances thermiques d'une paroi vitrée sont essentiellement garanties par la qualité de ses composants : vitrage, joints, profilé, pré-cadre... une paroi transparente est caractérisée par les phénomènes de transmission et de réflexion de la lumière (Figure 8).

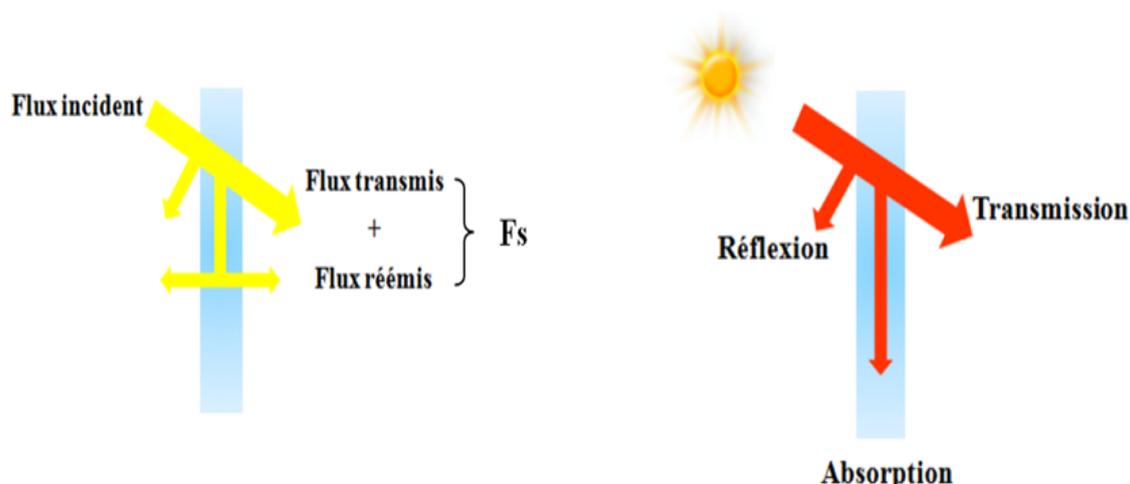


Figure 8. Réflexion et transmission à travers une paroi transparente.

Parmi les critères de performance énergétique d'une paroi vitrée on trouve le coefficient de transmission thermique U_g qui représente sa capacité d'isolation thermique ainsi que sa capacité à conserver l'énergie à l'intérieur du bâtiment et le facteur solaire F_s qui traduit le taux de transmission de la lumière par la fenêtre. Ce facteur représente la part du rayonnement solaire qui est transmise à l'intérieur du bâtiment. La valeur du facteur solaire est comprise entre 0 et 1 et plus sa valeur est élevée, plus les apports de chaleur sont importants. Cette caractéristique est prise en compte pour évaluer les apports solaires pénétrant dans le bâtiment. Le Tableau 1 présente quelques valeurs du coefficient U_g et de F_s pour les types de vitrage les plus fréquemment utilisés selon BINAYATE (2015).

Tableau. 1. Valeurs du coefficient U_g et de F_s pour le simple et le double vitrage (BINAYATE 2015)

	U_g ($W.m^{-2}.K^{-1}$)	F_s
Simple vitrage	5.6	0.85
Double vitrage	2.8	0.75

L'effet de serre se produit quand le rayonnement solaire incident est absorbé par les éléments de la fenêtre (vitrage, store, etc.) du côté intérieur du bâtiment. Aussi, une protection solaire est fortement recommandée contre ce phénomène : Dans la Figure 9, les protections extérieures seront toujours efficaces contre les surchauffes car elles arrêtent les rayons du soleil avant qu'ils n'atteignent le vitrage. Une plus grande efficacité sera atteinte pour des couleurs foncées. Les protections intérieures ne seront efficaces contre les surchauffes que si elles repoussent les rayons du soleil ayant traversé le vitrage. Pour cela, elles doivent être non absorbantes et réfléchissantes (de couleur claire).

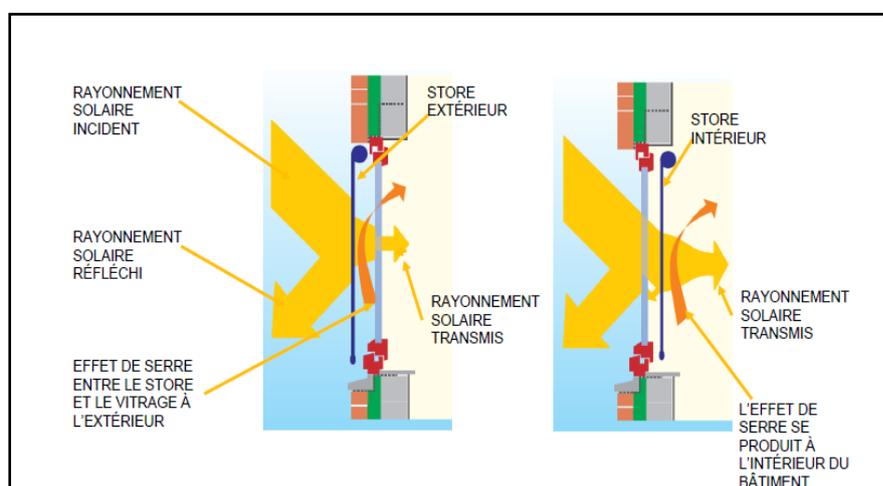


Figure 9. Illustration du choix de la protection d'une baie vitrée (AMEE 2017)

Dong et al. (2014) ont effectué une étude sur la stratégie de réduction des charges de chauffage/refroidissement pour des bâtiments non-isolés à Longreach (Australie). Cette étude a traité les effets de cinq facteurs: le taux global des baies vitrées (TGBV), le type de vitrage (simple ou double), l'ombrage des fenêtres, la ventilation et l'épaisseur des murs. Les auteurs démontrent qu'à Longreach, l'effet de chaque taille de fenêtre (TGBV) des différentes orientations sur la charge d'énergie totale étaient similaires les uns aux autres. L'augmentation du TGBV entraîne une augmentation importante de la charge thermique; de 21%, 17%, 22% et 19% respectivement pour les fenêtres nord, est, sud et ouest. Cela signifie, dans ce cas, que l'orientation du bâtiment n'affecte pas trop la charge d'énergie par rapport à la taille des fenêtres. D'autre part, en fonction de l'inertie des murs, la charge énergétique totale a chuté à environ 50% (de 220 à 112 MJ/m².a) à mesure que l'épaisseur de la paroi augmentait de 20 à 40 cm.

IV.6. L'orientation

L'orientation du bâtiment ou encore celle de sa façade principale est un critère d'évaluation du point de vue parfois commercial : Les professionnels de l'immobilier

avancent ce critère comme étant un bon argument de vente. Or, une bonne ou une mauvaise orientation peut dépendre de plusieurs facteurs dont la distribution architecturale des pièces du bâtiment sur la surface bâtie, le climat, l'isolation thermique, le Taux Global des Baies Vitrées (TGBV), etc. En effet, en Tunisie (Tunis), en utilisant la méthode analytique CFFT (Complex Finite Fourier Transform) sur différents types de murs composites de bâtiment typique avec une couche d'isolation au milieu, Daouas (2011) a montré qu'en période hivernale, le flux thermique transmis à travers un mur sans isolation est égal à 34 et 13 MJ/m² respectivement en orientation nord et sud, soit un écart relatif de 61%. Il est encore trois fois plus important pour une orientation nord isolée utilisant un double mur à lame d'air d'une épaisseur de 4cm que pour une exposition sud avec la même isolation; en passant de 23 à 8 MJ/m² respectivement. D'autre part, pour l'orientation est et ouest, les charges annuelles de chauffage/refroidissement sont égales aussi bien pour une isolation avec le polystyrène expansé que pour une isolation avec lame d'air. La charge de refroidissement varie légèrement pour les murs utilisant l'isolation de la lame d'air pour les quatre orientations, cependant, une isolation thermique avec polystyrène expansé permet de maintenir la même valeur de la charge de refroidissement annuelle (4 MJ/m²) et de conserver la charge de chauffage entre 2 et 5 MJ/m² pour toutes les orientations. Néanmoins, l'isolation des murs en polystyrène expansé diminue celle-ci pour toutes les orientations, et notamment celle du Nord (baisse de 34 à 5 MJ/m²). L'auteur conclut enfin que les charges annuelles de chauffage/refroidissement ont montré des changements significatifs par rapport à l'isolation thermique et à l'orientation des murs, notamment entre les murs exposés au sud et au nord. Les orientations ouest et est sont les moins sensibles à l'isolation thermique pendant la saison froide. Le Tableau 2 résume les résultats de cette étude. D'une manière générale, l'orientation sud reste la meilleure, du moins dans l'hémisphère nord, vu qu'elle procure au bâtiment une exposition au rayonnement solaire direct durant toute la journée. Du point de vue efficacité énergétique, cette orientation assure des économies d'énergie relatives à l'éclairage. Cependant, dans les climats chauds, une stratégie adéquate de protection solaire des baies vitrées s'impose afin de réduire la surchauffe et donc la charge de refroidissement.

Tableau. 2. Comparaison des charges de chauffage/refroidissement pour différents types d'isolation et d'orientation. Source : (Daouas 2011), adapté par l'auteur

Orientations	EPS (optimisé)		Lame d'air 4cm		Sans isolation	
	Q _H (MJ/m ²)	Q _C (MJ/m ²)	Q _H (MJ/m ²)	Q _C (MJ/m ²)	Q _H (MJ/m ²)	Q _C (MJ/m ²)
Ouest	4	4	18	18	26	28
Est	4	4	18	19	26	29
Sud	2	4	8	16	13	24
Nord	5	4	23	13	34	18

IV.7. Les matériaux à changement de phase

Les Matériaux à Changement de Phase (MCP) sont des matériaux organiques ou inorganiques « intelligents » dont le comportement thermique repose sur un principe physique basique : ils passent en phase liquide en absorbant de l'énergie à partir d'une certaine température caractéristique pour chaque type de matériau (en général fixée par leur

formulation physicochimique) et restituent cette énergie lorsque la température de leur environnement est inférieure à cette température caractéristique (Ekomy Ango 2011).

Généralement, le stockage de l'énergie thermique permet à la chaleur d'être utilisée en différé. Ce stockage peut se produire sous plusieurs formes à savoir : la chaleur sensible (stockage dans des matériaux inertes), la chaleur latente (utilisation de MCP qui emmagasinent l'énergie au fur et à mesure qu'ils changent de phase) et la chaleur des réactions (thermochimie et absorption). (Soupart-Caron 2015)

Les performances thermiques des MCP sont très largement abordées dans la littérature (Arkar et al. 2005, 2007 ; Saman et al. 2005 ; Pascal 2010 ; Ekomy Ango 2011 ; Soupart-Caron 2015). En effet, Arkar et al. (2007) ont mis en œuvre une technique de refroidissement composée d'un système de ventilation mécanique, d'un système de stockage thermique (stockage de chaleur latente), (LTHES : Latent Heat Thermal Energy Storage). Le LTHES est un cylindre contenant de petites sphères de MCP (Figure 10). L'optimisation du LTHES a été faite à partir de certains paramètres dont principalement les caractéristiques physicochimiques des MCP. L'hypothèse de la modélisation des LTHES est que les sphères se comportent comme un milieu continu et non comme des noyaux discrets et indépendants de telle manière que durant le jour, lorsque la température de l'air extérieur (T_a) est supérieure à la température de fusion des MCP (T_o), les MCP contenus dans les sphères changent de phase en passant en phase liquide, ce qui permet au bâtiment d'être rafraîchi grâce à l'air provenant des LTHES (Figure 10-a). Lorsque la température extérieure ambiante (T_a) est inférieure à la température de fusion des MCP (T_o) (en général la nuit), le bâtiment est rafraîchi par l'air provenant de l'extérieur. En même temps, les MCP contenus dans les sphères reviennent à la phase solide (Figure 10-b).

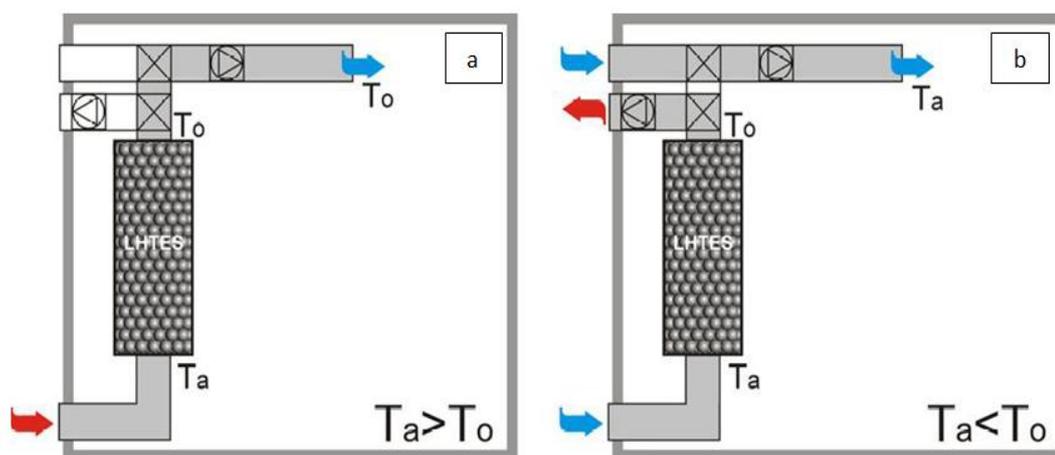


Figure 10. Principe de fonctionnement du système à base de MCP : -a- fonctionnement diurne, -b- fonctionne nocturne. (Arkar et al. 2007)

V. Techniques semi passives

V.1. La ventilation mécanique contrôlée

La ventilation d'un bâtiment consiste à y faire circuler de l'air neuf de plusieurs façons différentes. Cette technique peut se faire naturellement et dans ce cas elle est considérée purement passive. Naturellement, l'air peut être acheminé en utilisant le tirage thermique et

les effets du vent ou par ouverture des fenêtres. Les débits de renouvellement d'air sont alors difficiles à contrôler. La ventilation peut également être effectuée à l'aide de dispositifs électromécaniques (ventilateurs, extracteurs...) dont la consommation d'énergie n'atteint pas celles des dispositifs conventionnels de conditionnement de l'air circulant au sein du bâtiment et dans ce cas elle est dite semi passive : La ventilation mécanique contrôlée. Pour assurer le renouvellement d'air nécessaire, il faut pouvoir contrôler la ventilation autrement une ventilation trop importante constitue aussi une perte d'énergie. Dans le logement, la norme NBN D50-001 évoque des systèmes appelés : A, B, C ou D selon que l'amenée et/ou l'évacuation d'air est naturelle ou mécanique. Typiquement, on parle de ventilation simple flux lorsque la pulsion ou l'extraction d'air est assurée par un seul ventilateur poussant l'air neuf dans un sens unique ou de ventilation double flux lorsque la pulsion et l'extraction sont assurées par deux ventilateurs à sens opposés. La Figure 11 illustre l'installation d'un système de ventilation double flux avec récupération de chaleur sur l'air extrait.

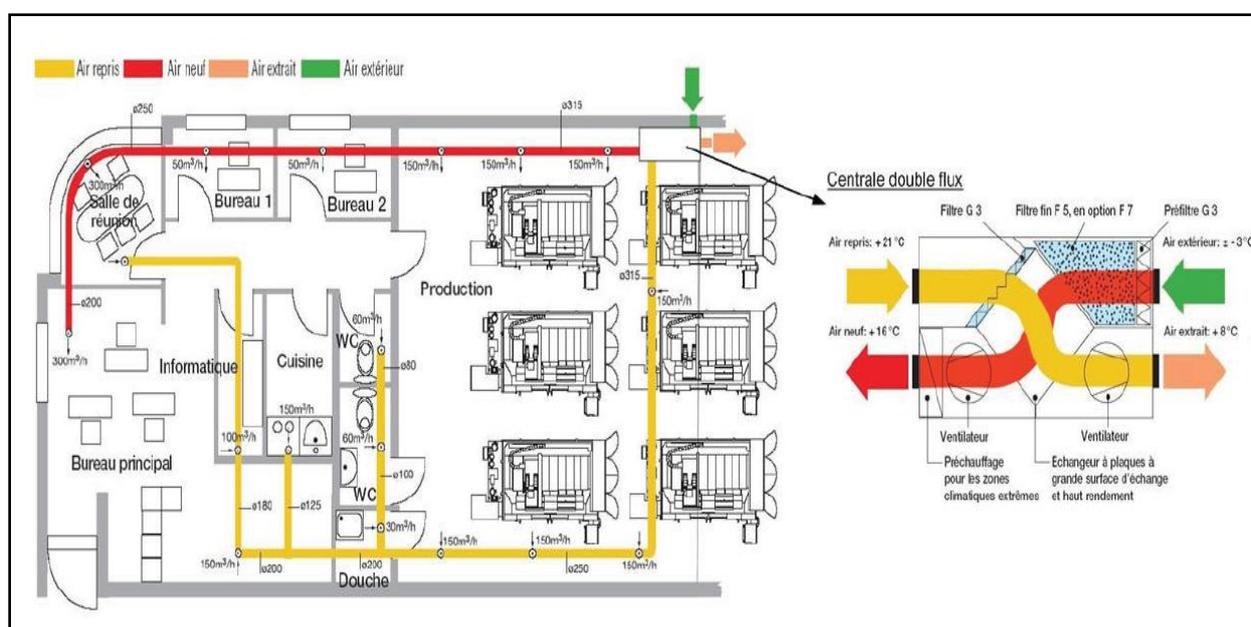


Figure 11. Installation de ventilation double flux pour un bâtiment tertiaire (Chlela 2008)

La ventilation mécanique contrôlée permet de gérer l'aération du bâtiment quel que soit le temps ou la saison. L'important dans ce type de ventilation c'est qu'elle fait bénéficier le bâtiment du potentiel naturel de l'air extérieur plutôt dans le rafraîchissement mais beaucoup moins dans le chauffage selon les conditions climatiques (Drissi et Benhamou 2018). Le sujet de la ventilation des bâtiments est abordé dans la littérature depuis plusieurs décennies à travers le monde entier. En effet, Florides et al. (2002) ont utilisé le logiciel TRNSYS de simulation thermique, pour la modélisation et la simulation des flux d'énergie d'une maison typique située à Nicosie (Chypre). Ils ont étudié plusieurs techniques telles que : la ventilation naturelle, la protection solaire, les différents types de vitrage, l'orientation, la forme des bâtiments, et la masse thermique. Après les simulations de ces systèmes les auteurs ont conclu que :

- La ventilation conduit à une réduction maximale de la charge de refroidissement annuelle de 7,7%.

- L'économie de la charge annuelle de refroidissement, pour une maison bien isolée, peut atteindre 24% lorsque des fenêtres à double vitrage sont utilisées.
- Environ 7% de la charge annuelle de refroidissement peut être sauvegardée pour une maison construite à partir des murs simples et sans isolation du toit. Ces économies sont d'environ 19% pour une maison construite à partir de murs et de toiture avec isolation de 5 cm.
- La forme du bâtiment influe sur la charge thermique : Les résultats montrent que la forme allongée provoque une augmentation de la charge de chauffage annuelle comprise entre 8.2 et 26.7% selon le type de construction, par rapport à une maison carrée.
- En ce qui concerne la masse thermique, l'analyse montre que l'augmentation de la masse des murs et/ou des toits et l'utilisation de la ventilation nocturne n'est pas suffisante pour baisser la température de la maison à des limites acceptables pendant l'été. En outre, l'analyse montre que le toit est l'élément structurel le plus important des bâtiments dans un environnement chaud.

D'autre part, La ventilation contrôlée à la demande (Demand Controlled Ventilation) est un autre type de ventilation. Elle était introduite par Delwati et al. (2017) et Merema et al. (2018). Cette technique semi-passive fait référence à un système de ventilation avec un débit d'air contrôlé basé sur la qualité de l'air intérieur. La DCV fonctionne à des débits d'air réduits pendant la partie prépondérante du temps de fonctionnement. Par conséquent, moins d'énergie est nécessaire pour le fonctionnement du ventilateur par rapport à un système de ventilation à volume d'air constant. Vu qu'elle adapte automatiquement les débits d'air en fonction de la demande de ventilation réelle (par le nombre d'occupants ou par la concentration de CO₂), la ventilation contrôlée à la demande (DCV) est considérée comme une bonne mesure pour améliorer l'efficacité énergétique au sein des bâtiments résidentiels ou non notamment dans le volet relatif à la consommation électrique des ventilateurs. En effet, Merema et al. (2018) ont examiné l'effet de la DCV sur la qualité de l'air (concentration CO₂) et sur l'efficacité de la ventilation en général au sein de quatre bâtiments non résidentiels en Belgique (deux salles de lecture et deux salles de bureau). Les auteurs confirment avoir réduit la consommation des ventilateurs de 25% à 55% et les déperditions thermiques dues à la ventilation à débit d'air constant de 25% à 32% pour un débit d'air de 29m³/h.pers. Néanmoins, Dans cette étude, les auteurs n'ont pas évalué l'impact de cette technique sur le confort thermique au sein des bâtiments étudiés particulièrement en période estivale ni le coût global généré par sa mise en œuvre.

Dans le IVème chapitre de cette thèse nous traiterons l'impact de la ventilation mécanique contrôlée sur les performances thermiques des bâtiments aussi bien en hiver qu'en été et sous différentes conditions climatiques.

V.2. Le puits canadien

Le puits canadien (appelé aussi puits provençal) utilise le principe d'échange de la chaleur air-sol à travers des conduites enterrées à environ 2 à 3m dans le sol avoisinant le bâtiment. L'échange thermique s'effectue entre le sol et l'air qui circule dans ces conduites. Dans ce système, l'air refroidi sera soufflé après à l'intérieur du bâtiment (Figure 12). Il est parmi les

systèmes utilisés pour la dissipation de la chaleur. À une profondeur d'environ 2 à 3 m la température du sol reste assez faible et constante le long de l'année. La performance de tels systèmes varie en fonction de ses caractéristiques telles que la longueur et le diamètre du tuyau, le débit d'air, la profondeur à laquelle le système est enterré, le matériau de la tuyauterie, etc.

De nombreuses applications des échangeurs de chaleur avec le sol sont disponibles partout dans le monde et plusieurs travaux scientifiques ont été publiés pour divers types de bâtiments (Bansal et al. 2011 ; Santamouris et Kolokosta 2013 ; Hollmuller et Lachal 2014 ; Khabbaz et al. 2016). Dans une expérience en Belgique rapportée dans une revue de littérature par Santamouris et Kolokosta (2013), un puits canadien a été utilisé dans un immeuble de bureaux d'une surface de 2000 m², pour le chauffage et le refroidissement de l'air au sein du bâtiment. L'échangeur de chaleur comprend deux tuyaux de 80 cm de diamètre interne et 40 m de longueur, enterrés à des profondeurs de 3 m et de 5 m respectivement et qui sont reliés au système de ventilation de l'immeuble. L'expérience a montré que la température maximale de sortie de l'air à partir des tuyaux enterrés ne dépasse jamais 22°C. Parallèlement, le puits canadien a diminué les heures d'inconfort thermique dans les bureaux de 20% à 30% pendant toute la période d'été.

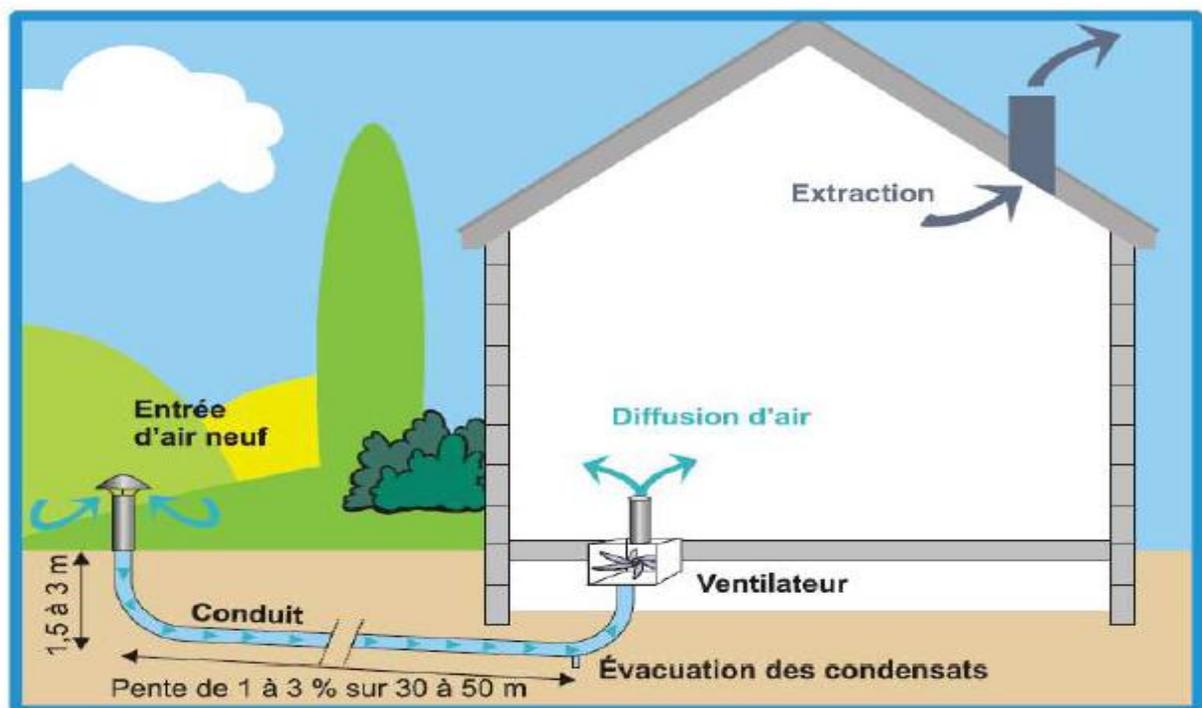


Figure 12. Principe de fonctionnement simplifié d'un puits canadien monotube

D'autre part, à Marrakech, dans une maison détachée de type villa, Khabbaz et al. (2016) ont mené une expérience d'installation d'un puits canadien à 1 tube puis à trois tubes (Figure 13). L'analyse par simulation numérique à l'aide de TRNSYS, des performances de l'échangeur air-sol pour le rafraîchissement passif sous le climat de Marrakech, a été réalisée en fonctionnement continu avec 1 et 3 tubes durant la période chaude de l'année (Mai - Septembre). Les auteurs confirment que le système fournit une réduction de température de l'ordre de 19,5°C et 18,3°C pour un fonctionnement avec 1 tube et 3 tubes respectivement, avec une température à la sortie du tube enterré de 25,1°C et 26°C. Il en découle une capacité

de refroidissement de 58w/m^2 (1 tube) et 55w/m^2 (3 tubes) pour une température à l'entrée de $44,6^\circ\text{C}$.

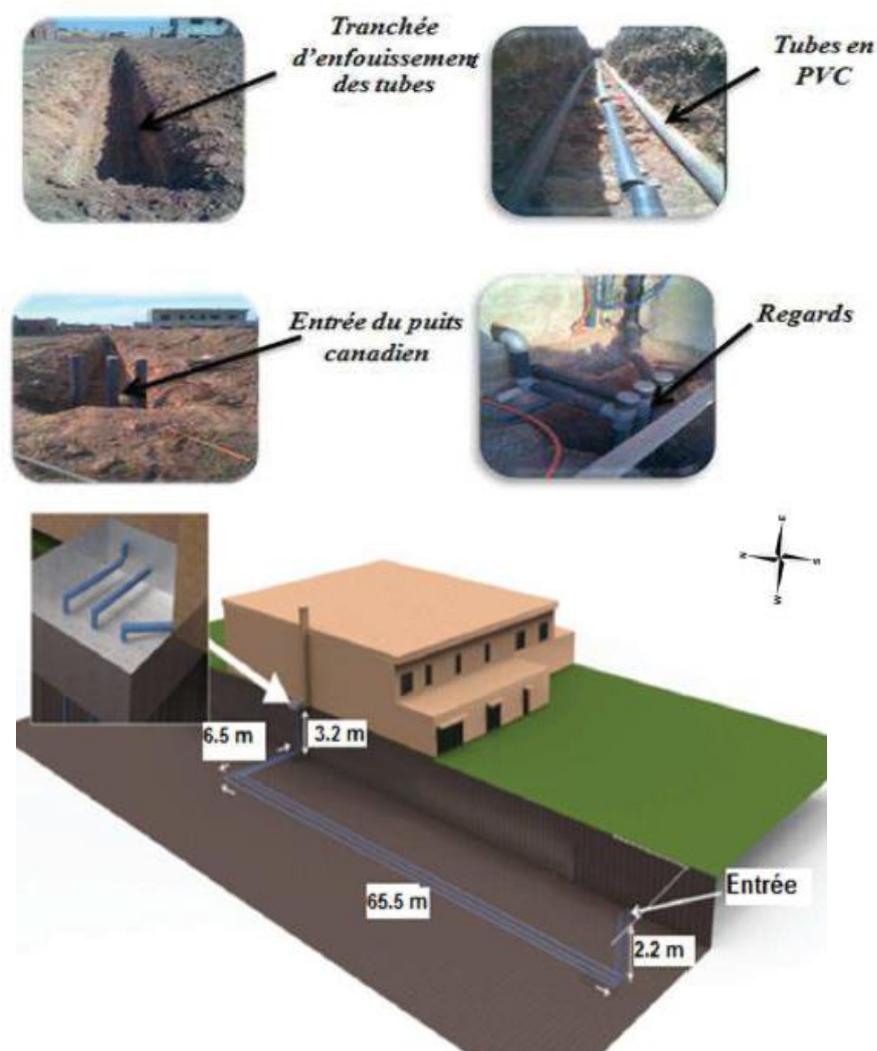


Figure 13. Mise en place du puits canadien et schéma global du projet de Villa AMYS à Marrakech. (Khabbaz et al. 2016)

V.3. Le mur Trombe

Le mur Trombe illustré dans la Figure 14, est composé d'un vitrage extérieur placé devant un mur en béton afin de créer un effet de serre. Entre les deux, la lame d'air est réchauffée. Des ouvertures sont pratiquées dans les parties basses et hautes du mur de manière à créer une circulation d'air entre la lame d'air et les locaux à chauffer. L'air chauffé dans la lame d'air pénètre ainsi par les ouvertures supérieures dans les locaux. En chauffant la pièce, il se refroidit au contact de l'air du local et, une fois rafraîchi, revient par les ouvertures inférieures dans la lame d'air pour se réchauffer à nouveau. Cette technique fait intervenir la capacité thermique de stockage du bâtiment et elle permet d'atténuer le pic de la charge de refroidissement et de moduler la température interne.

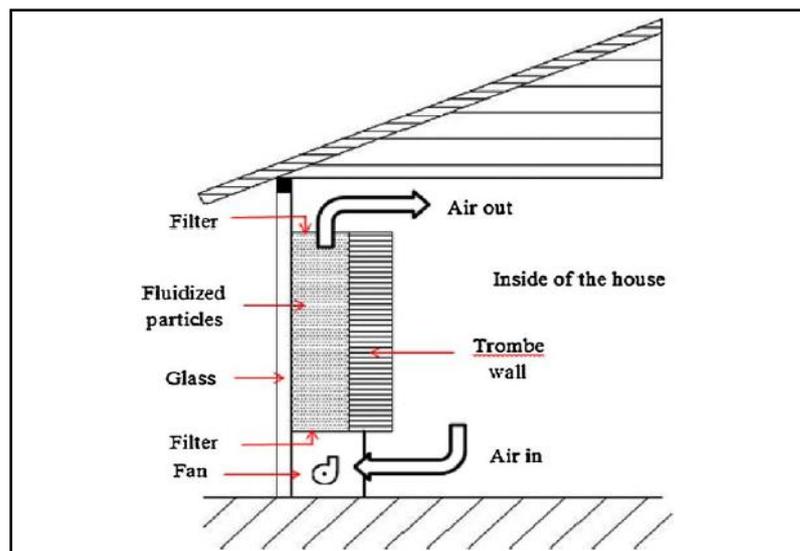


Figure 14. Coupe verticale d'une structure type d'un mur Trombe (Sadineni et al. 2011)

Sadineni et al. (2011) ont présenté un examen technique des composantes de l'enveloppe du bâtiment et leur rôle dans l'amélioration de son efficacité énergétique. Les auteurs ont discuté de diverses études concernant la mise à niveau des performances énergétiques des bâtiments en utilisant des systèmes passifs. Cette revue a montré que la consommation énergétique des bâtiments peut être largement réduite en adoptant des techniques passives telles que: le mur Trombe, l'isolation thermique de l'enveloppe, différentes technologies de fenêtres énergétiquement performantes, les toitures végétalisées, etc. Les auteurs ont également discuté de l'effet de la masse thermique et des matériaux à changement de phase sur la charge de refroidissement / chauffage et ont conclu que les stratégies d'efficacité énergétique passive sont très sensibles aux facteurs météorologiques telle que l'application de la masse thermique comme méthode d'économie d'énergie qui serait plus efficace dans les zones où les différences de température ambiante jour-nuit sont élevées.

Wang et al. (2013) ont étudié et analysé l'influence de la technique du mur Trombe comme étant une paroi de stockage, sur l'environnement thermique intérieur d'une maison passive de 700 m², orientée Sud et située à Tianjin (Chine). En outre, ils ont examiné les différents facteurs de l'enveloppe du bâtiment qui ont un impact sur la consommation énergétique des bâtiments et sur le confort thermique intérieur. Les résultats des simulations TRNSYS montrent que l'environnement intérieur avec le mur Trombe est meilleur que celui avec un mur ordinaire car ce système réduit la consommation annuelle d'énergie de 8.6% et augmente l'indice d'évaluation de confort thermique à 12.9%. D'autre part, les facteurs de l'enveloppe du bâtiment, le Taux Global de Baies Vitrées (TGBV), l'orientation du bâtiment, la structure de la paroi intérieure et le coefficient de forme, ont une influence sur l'indice de la consommation d'énergie et sur l'indice de confort thermique.

VI. Confort thermique

Il est évident que l'objectif principal de l'application des systèmes passifs dans les bâtiments est de diminuer la consommation d'énergie tout en maintenant un niveau de confort thermique acceptable à l'intérieur du bâtiment. L'environnement thermique intérieur d'un bâtiment peut être influencé par plusieurs paramètres physiques tels que la température de

l'air, la température radiante, l'humidité relative de l'air et la vitesse de l'air, en plus de l'activité physique et de l'habillement. Au-delà de ces variables qui influencent l'échange de chaleur entre l'occupant du bâtiment et son environnement, le confort thermique peut être influencé par des paramètres physiologiques, psychologiques et sociologiques (Fanger 1970, Givoni 1976, ASHRAE 1997). Compte tenu de l'importance du confort thermique dans la qualité de vie, la santé et la productivité humaine, plusieurs modèles ont été établis et développés pour analyser et évaluer le degré de confort thermique des occupants. Ces modèles étaient généralement menés à travers des tests empiriques et des enquêtes d'opinion purement subjectives (Fanger 1970 ; Givoni 1976). D'un autre côté, certains chercheurs (Stazi et al. 2016) ont utilisé la méthode « A » décrite dans l'annexe informative « F » de la norme européenne (CSN EN 15251 2007).

Parmi les modèles de confort les plus répandus et les plus utilisés il y a celui de Fanger (1970). Ce modèle représente une méthode analytique permettant de chiffrer le confort thermique ressenti par l'occupant en proposant un pourcentage d'insatisfaction (PPD : Predicted Percentage of Dissatisfied) qui dépend majoritairement des conditions climatiques, de l'habillement et de l'activité de l'occupant. Le PPD est lié à un autre facteur : le PMV (Predicted Mean Vote) qui prévoit la valeur moyenne des votes d'un large groupe d'occupants sur l'échelle de perception thermique de sept évaluations comme suit :

- +3 : sensation très chaude
- +2 : sensation chaude
- +1 : sensation légèrement chaude
- 0 : sensation neutre
- -1 : sensation légèrement froide
- -2 : sensation froide
- -3 : sensation très froide

Les facteurs de confort thermique de Fanger s'écrivent selon les équations I. 2-3 (Fanger 1970).

$$PMV = [0.303\exp^{-0.036*M} + 0.028] * L \quad (\text{Eq. I. 2})$$

$$PPD = 100 - 95 * \exp^{-(0.03353*PMV^4 + 0.2179*PMV^2)} \quad (\text{Eq. I. 3})$$

La relation entre les indices PMV et PPD est décrite dans la Figure 15 où l'on peut voir que dans la situation optimale (PMV = 0, sensation neutre) le pourcentage des occupants insatisfaits est de 5% parmi des personnes subissant les mêmes conditions thermiques, vestimentaires et métaboliques. Au fait, le pourcentage d'insatisfaction augmente de façon symétrique si le PMV s'écarte de 0 vers la sensation froide ou vers la sensation chaude.

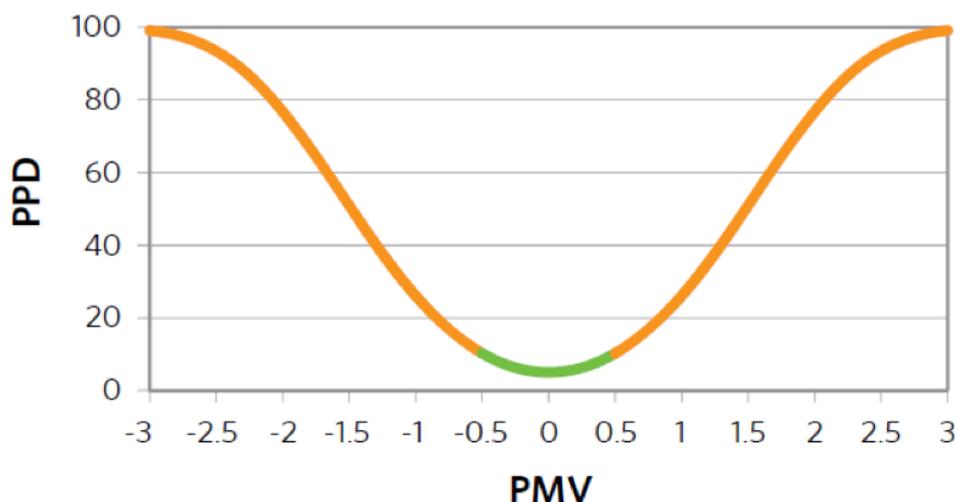


Figure 15. Correspondance entre les indices PMV et PPD (Fanger 1970)

Par ailleurs, la Figure 16 présente la température opérative optimale de l'ambiance en fonction de l'activité et de l'habillement de l'occupant. A partir de cette figure, on peut constater que pour une personne exerçant une activité physique moyenne (2Met) et moyennement vêtue (1Clo), la température opérative optimale pour une sensation de confort thermique est entre 18 et 20°C. Plus les vêtements sont légers et pour une même activité (2Met), la température opérative nécessaire pour le confort thermique de l'occupant peut monter jusqu'à 28°C pour (0.25Clo) par exemple. Quand l'activité et l'habillement sont consistants, la température est seulement aux alentours de 10°C.

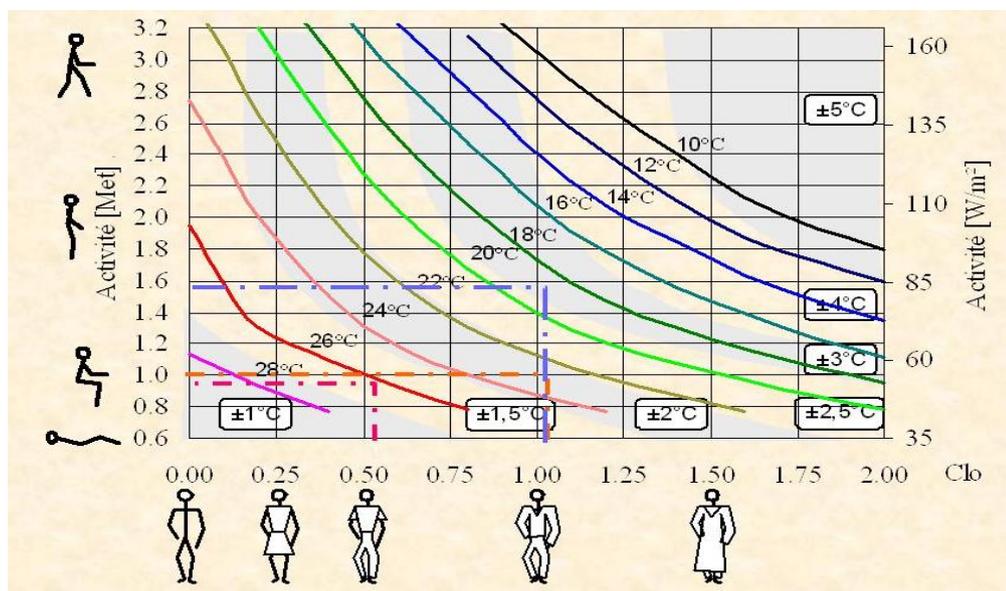


Figure 16. Température opérative optimale en fonction de l'activité et de l'habillement de l'occupant (Fanger 1970)

Plusieurs études sont faites sur la base du modèle de Fanger, tel que Buratti et al. (2013) qui ont étudié et analysé les performances thermiques et énergétiques d'une salle de conférences située à la faculté d'Ingénierie de l'Université de Pérouse, en Italie, par le biais de deux programmes de simulation (EnergyPlus et TRNSYS). Les auteurs ont calculé les indices de confort PMV et PPD pour chaque orientation des fenêtres de la salle étudiée et ont validé

les calculs des indices de confort avec les données expérimentales afin de comparer les performances des deux codes de calcul. Le modèle de Fanger est très connu mais largement critiqué aussi, vu la subjectivité des occupants ainsi que les différences physiologiques et psychologiques d'un occupant à l'autre. D'autres méthodes peuvent représenter le confort thermique dont certaines sont décrites dans cette revue de littérature et utilisées dans le chapitre IV de cette thèse : Les indices d'inconfort thermique d'été/hiver (Drissi et Benhamou 2018).

Basé sur le calcul du nombre d'heures d'inconfort et sur la charge de refroidissement d'un appartement dans un climat chaud et sec en Egypte, Dabaieh et al. (2014) ont introduit certaines techniques passives comme moyen de réduire les charges de refroidissement. Les auteurs ont calculé les heures d'inconfort d'été en se basant sur le Code égyptien de l'efficacité énergétique dans les bâtiments résidentiels avec des points de consigne de 30 ° C et de 50% pour la température et l'humidité de l'air intérieur. À cette fin, les auteurs ont simulé 37 modèles de toiture et ont constaté que l'utilisation d'un toit en voûte avec un revêtement à albédo élevé diminue de 53% le nombre d'heures d'inconfort et économise 826 kWh pendant la saison estivale par rapport à un cas de référence. De même, Mastouri et al. (2017) ont évalué le nombre d'heures d'inconfort (NDH) pour deux maisons dans le climat chaud et semi-aride de Marrakech. Les auteurs ont défini le nombre d'heures d'inconfort (NDH : Number of Discomfort Hours) comme le nombre d'heures pendant lesquelles la température de l'air intérieur est en dehors de l'intervalle de température de confort thermique adopté de 18-26°C. Les maisons étudiées, appelées Zitoune et Ref.Case sont des villas à deux étages avec quatre façades construites sur une superficie totale de 330m² chacune. Zitoune intègre de nombreuses techniques passives telles que la technique de double dalle pour l'isolation thermique du toit, le double vitrage et l'inertie thermique élevée des murs, tandis que Ref.Case est construite avec des matériaux de construction classiques et ne possède pas toutes ces techniques passives. Les résultats de cette étude montrent que les systèmes passifs étudiés ont un effet remarquable sur la température de l'air intérieur, le confort thermique et les charges de chauffage/refroidissement du bâtiment Zitoune. De plus, de meilleures conditions de confort thermique sont atteintes à Zitoune puisque son NDH est réduit de 62% par rapport à la maison Ref.Case.

VII. Analyse des données

L'analyse des données permet de traiter un nombre très important de données et de dégager les aspects les plus intéressants de la structure de celles-ci. Le succès de cette discipline dans les dernières années est dû, dans une large mesure, aux représentations graphiques fournies par les méthodes d'analyse des données. Ces schémas graphiques peuvent mettre en évidence des relations difficilement perceptibles par la lecture simple et directe des données. Les fondements mathématiques de l'analyse des données ont commencé à se développer au début du XXe siècle, mais ce sont les logiciels de calcul qui ont rendu cette discipline opérationnelle, et qui en ont permis une utilisation très étendue. Mathématiques, Informatique et sciences appliquées en général sont ici intimement liées.

Afin de comprendre un phénomène, on est amené à faire des expériences, en collecter les résultats, les analyser et tirer les conclusions. Or, ce processus est souvent parsemé de

difficultés diverses et de facteurs multiples d'erreur. Les plans d'expériences et la technique de régression linéaire, entre autres, fournissent des solutions à cet égard.

VII.1. Analyse des données appliquée à l'énergétique du bâtiment

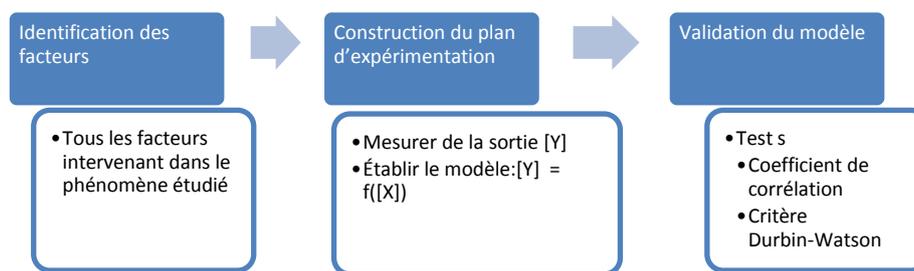
Pour étudier et analyser la variation des besoins énergétiques d'un bâtiment, plusieurs méthodes peuvent être évaluées. Foucquier et al. (2013) ont analysé l'état de l'art de la modélisation du bâtiment et de la prédiction de la performance énergétique. Les auteurs ont proposé une revue des principales techniques et outils permettant la prédiction de la performance énergétique du bâtiment. Ces techniques ont été introduites sous forme de trois catégories principales : les méthodes "boîte blanche", "boîte noire" et "hybride" ou "boîte grise", la première est une technique physique et elle est divisée en trois outils différents selon les caractéristiques de la construction. La seconde est centrée sur les techniques statistiques: support machine vecteur, réseaux neuronaux artificiels, algorithme génétique et demande conditionnelle d'analyse appelée aussi régression linéaire. La dernière (méthode de la boîte grise) prend en compte à la fois les aspects physiques et statistiques de l'analyse. Les méthodes physiques qui sont des approches de mécanique des fluides numérique (CFD), zonale et nodale sont principalement utilisées pour leur capacité à produire des descriptions détaillées des différents flux à l'intérieur des bâtiments et à étudier avec précision le comportement thermique du bâtiment. Néanmoins, l'utilisation de ces méthodes implique un temps de calcul énorme, une complexité de la mise en œuvre du modèle, et nécessite des descriptions détaillées des flux énergétiques. En revanche, la méthode de la «boîte noire», en particulier la régression linéaire, peut être utilisée pour la prévision ou la prédiction et pour l'exploration des données. Cette méthode présente un avantage majeur qui est sa simplicité dans la mesure où il n'y a pas de colinéarité entre les paramètres étudiés.

VII.2. Les plans d'expériences

L'expérimentateur a souvent tendance à se lancer dans la réalisation des essais qui lui semblent pertinents et/ou faisables. Or, pour comprendre un phénomène donné, le nombre exhaustif d'expériences à réaliser dépend du nombre de facteurs intervenant dans la variation des indicateurs dudit phénomène et qui pourrait donc s'élever à un nombre irréaliste et irréalisable d'essais. L'expérimentateur peut aussi faire varier les facteurs intervenant un par un, ce qui conduirait à un nombre interminable d'essais et forcément à un gaspillage considérable de temps, d'efficacité et de ressources sans pour autant garantir une exactitude des résultats recherchés. Cependant, le contexte d'utilisation des plans d'expérience recouvre les phénomènes de type « boîte noire » que l'on vise à comprendre pour mieux en saisir le fonctionnement et en optimiser les indicateurs. Pour ce faire, une connaissance minimale sur le phénomène étudié s'impose avant d'entreprendre les essais. L'expérimentateur devrait être alors en mesure d'établir la liste des paramètres susceptibles d'intervenir dans le fonctionnement de « la boîte noire ». Ces paramètres sont les « entrées » appelées aussi variables explicatives représentées par la matrice [X]. Les indicateurs du phénomène sont les « sorties » appelées aussi réponses ou variables dépendantes représentées par la matrice [Y]. L'objectif est de pouvoir expliquer le fonctionnement de la boîte noire en estimant les réponses pour les combinaisons (de variables explicatives) non réalisées à partir des résultats d'essais effectués (de simulations dans notre cas).

Chaque point expérimental apporte une valeur de la réponse. Or cette réponse est modélisée par un polynôme dont les coefficients [b] sont les inconnues qu'il faut déterminer. À la fin du plan d'expériences, on a un système de N équations (s'il y a N essais) à p inconnues (s'il y a p coefficients dans le modèle choisi *a priori*). Ce système s'écrit d'une manière simple en notation matricielle $[Y] = [b] [X]$. Ce système ne peut pas, en général, être résolu simplement car le nombre d'équations est inférieur au nombre d'inconnues. Au fait, cette résolution ne peut être menée à bien que si l'on utilise une méthode de régression la plupart du temps basée sur le critère d'optimisation des moindres carrés. On obtient ainsi les estimations des coefficients [b]. Le résultat de ce calcul est donné dans la Figure 17 (Goupy & Creighton 2006)

En d'autres termes, la valeur ajoutée des plans d'expériences est de pouvoir réaliser le minimum de simulations tout en étant en mesure d'expliquer la totalité de l'information sur les variables dépendantes. En effet, le processus d'aboutissement d'un plan d'expériences décrit dans la Figure 17 montre que l'expérimentateur commence par la définition des entrées, la réalisation des essais (simulations) et la mesure des ou de la variable(s) dépendante(s). Ensuite, l'identification des facteurs prépondérants en se basant sur les valeurs absolues des coefficients « bi » représentés par la matrice colonne [b]. Enfin, la conception du modèle polynomial et son évaluation par le coefficient de corrélation (Fouquier et al. 2013).



$$[b] = ([X]^t [X])^{-1} [X]^t [Y]$$

Figure 17. Processus de réalisation d'un plan d'expériences

Il est à noter qu'une éventuelle optimisation par un modèle quadratique peut être envisagée si le coefficient de corrélation du modèle linéaire s'avère insuffisant. Ces étapes seront détaillées davantage dans la section suivante. D'autre part, la méthode des plans d'expériences a été adoptée dans le domaine de l'efficacité énergétique des bâtiments par plusieurs auteurs (Flory-Celini 2008, Jaffal et al. 2009, Chlela et al. 2009, Romani et al. 2015).

VII.3. La régression linéaire

La régression linéaire est une méthode statistique qui sert à prédire la réponse de certains système à leurs facteurs d'entrée et ce à l'aide de modèles polynomiaux. Elle a été introduite par Francis Galton en 1886. Plusieurs chercheurs l'ont utilisée pour de nombreuses

implémentations dans divers domaines. En 1980, Parti et Parti ont été parmi les premiers à proposer une nouvelle méthode utilisant la régression linéaire pour la prédiction de la consommation d'énergie des bâtiments. En Roumanie, sur la base de la régression linéaire multiple, Catalina et al. (2013) ont étudié la prédiction de la demande énergétique dans le bâtiment de type appartement dans trois climats différents (Moscou, Bucarest et Nice). Les auteurs ont constaté que, sur la base de six facteurs initialement définis, les principaux facteurs influençant la charge de chauffage du bâtiment étudié sont: le coefficient global de déperditions thermiques et l'orientation du bâtiment. De nombreux autres chercheurs, utilisant la régression linéaire multiple, ont travaillé sur la prédiction des phénomènes physiques et en particulier de la consommation d'énergie dans différents types de bâtiments (Aydinalp-Koksal et al. 2008 ; Krüger et al. 2011 ; Hygh et al. 2012 ; Yun et al. 2012 ; Catalina et al. 2013 ; Melo et al. 2016 ; Fang et Lahdelma 2016 ; Drissi et Benhamou 2017).

Plusieurs modèles mathématiques peuvent être utilisés pour prédire la demande d'énergie dans les bâtiments. En effet, Eq. I.4 est le modèle linéaire; il est utilisé par de nombreux auteurs comme nous le présenterons ci-après. Ce modèle donne des résultats satisfaisants en fonction de son coefficient de corrélation et suppose la relation linéaire entre le vecteur des facteurs d'entrée [X] et le vecteur de réponse [Y]. Eq. I.5 et I.6 représentent les modèles linéaires prenant en compte l'interaction entre les facteurs respectivement de premier et de second ordre. Ils peuvent être utilisés pour ajouter une précision à la réponse [Y] lorsque des paramètres indépendants [X] interagissent entre eux. Enfin, le modèle quadratique représenté par Eq. I.7 est utilisé en ajoutant un terme quadratique pur au terme linéaire afin de focaliser la réponse et d'optimiser la prédiction.

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i \cdot X_i \quad \text{Eq. I.4}$$

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i \cdot X_i + \sum_{i,j=1}^n b_{ij} \cdot X_i X_j \quad \text{Eq. I.5}$$

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i \cdot X_i + \sum_{i,j,k=1}^n b_{ijk} \cdot X_i \cdot X_j \cdot X_k \quad \text{Eq. I.6}$$

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i \cdot X_i + \sum_{i=1}^n b_{ii} \cdot X_i^2 \quad \text{Eq. I.7}$$

Korolija et al. (2013) ont prouvé que les demandes de refroidissement et de chauffage de certains immeubles de bureaux au Royaume-Uni peuvent être prédites avec précision en utilisant des modèles de régression linéaire multiple avec un coefficient de détermination élevé ($R = 0,95$). En outre, Asadi et al. (2014) ont développé un modèle de régression multilinéaire pour prédire la consommation d'énergie des bâtiments commerciaux de formes géométriques variées. Les auteurs ont choisi des matériaux de construction ainsi que le calendrier d'occupation comme variables de conception définies et rapportent avoir testé plusieurs modèles et trouvé que le modèle linéaire est approprié pour leur cas d'étude avec un coefficient de corrélation supérieur à 0,94. En outre, Jaffal et al. (2009) ont mené une étude numérique pour prédire la demande de chauffage d'une habitation pour différentes villes de France représentant des climats continentaux, océaniques et méditerranéens. Les chercheurs ont effectué des simulations dynamiques pour plusieurs configurations du bâtiment étudié en fonction de 11 paramètres d'enveloppe et d'orientations différentes. Les résultats de la simulation ont été adoptés en utilisant quatre modèles polynomiaux (modèle linéaire, modèle

d'interaction, modèle quadratique pur et modèle quadratique complet). Les auteurs montrent que même si le modèle quadratique était nécessaire pour obtenir une précision acceptable pour le climat méditerranéen, le modèle linéaire donne un bon accord avec les simulations dynamiques pour les deux autres climats (continental et océanique). D'autre part, Romani et al. (2015) ont établi une modélisation des charges de chauffage et de refroidissement pour les six zones climatiques du Maroc. Les auteurs ont considéré un appartement de 100m² avec plusieurs éléments: épaisseurs d'isolation d'enveloppe, type de vitrage, coefficients d'absorption des murs et du toit, taux de renouvellement d'air et stores de fenêtres. Les modèles polynomiaux considérés pour les résultats des simulations sont les mêmes que ceux utilisés par Jaffal et al. (2009). Les auteurs ont confirmé que la charge de refroidissement prédite par les modèles quadratiques et d'interaction complets montre un bon accord avec les résultats de la simulation. Cependant, tous les quatre modèles considérés prédisent avec précision la charge thermique de la maison ($R = 0,95$), sauf pour le climat océanique d'Agadir. Pour le climat semi aride de la ville de Marrakech en particulier, les modèles quadratique et linéaire ont une précision similaire pour les besoins de chauffage et de refroidissement. Toutefois, il est à signaler que dans la majorité des études revues dans la littérature, les auteurs ne consacrent pas une bonne attention à l'analyse et l'interprétation des valeurs des coefficients « bi » qui rendent compte de la prépondérance du facteur Xi dans le processus de modélisation, ils s'arrêtent beaucoup plus sur la précision et sur le choix des modèles.

À la lumière de cette revue de littérature consacrée à l'analyse des données, on peut conclure que le modèle multilinéaire prédit avec précision la demande énergétique des bâtiments dans différents climats. Ce modèle sera utilisé dans cette étude au III^e chapitre. De plus, dans le modèle linéaire, le critère de Durbin-Watson (DW) rend compte de l'autocorrélation des erreurs absolues (résidus e_i) qui représente la différence entre la valeur de la réponse estimée par le modèle et celle calculée par simulation. Le critère DW est donné par l'équation Eq. I.8 (Durbin et Watson 1951):

$$DW = \frac{\sum_{i=2}^N (e_{i-1} - e_i)^2}{\sum_{i=1}^N e_i^2} \quad \text{Eq. I.8}$$

La valeur DW converge vers zéro s'il existe une forte corrélation entre les points successifs. S'il existe une faible corrélation entre les points successifs, c'est-à-dire une distribution aléatoire de l'erreur, la valeur DW est plus proche de 2 (Rutledge et Barros 2002).

VIII. Conclusion

Dans cette partie, nous avons décrit l'état de l'art du volet passif de l'efficacité énergétique dans le bâtiment. En d'autres termes les techniques relatives à l'aspect des échanges thermiques au sein des bâtiments particulièrement les techniques les plus largement abordées dans la littérature ont été explicitées. Il s'agit principalement de l'isolation thermique, l'architecture, les matériaux de construction, les techniques semi-passives etc. d'autre part nous avons effectué un passage en revue de certaines techniques statistiques d'analyse de données. Nous avons en effet exposé la méthodologie de recherche

expérimentale basée sur les plans d'expériences et les différents modèles mathématiques servant à exprimer la variable de sortie (la charge thermique dans notre cas) en fonction des facteurs à impact direct sur cette dernière.

Afin d'atteindre l'efficacité énergétique souhaitée, nous avons souligné dans ce chapitre aussi la nécessité d'une conception de combinaisons spéciales de l'ensemble des techniques passives et semi-passives selon les spécificités techniques, architecturales et climatiques du bâtiment en question, étant donné l'impossibilité de mettre en œuvre des techniques énergétiquement efficaces standards indépendamment des disparités de chaque bâtiment.

Dans le but de traiter la conception de ces différentes combinaisons, le chapitre suivant sera consacré à la description des approches théoriques et expérimentales suivies dans cette recherche. En effet, dans cette thèse, nous avons envisagé l'évaluation de l'impact de plusieurs facteurs physiques, architecturaux, matériels etc. sur le comportement thermique des bâtiments de type « appartement » et ce en adoptant deux approches : une théorique et l'autre expérimentale et pour les six zones climatiques du Maroc.

CHAPITRE II : DESCRIPTION DES APPROCHES THÉORIQUES ET EXPÉRIMENTALE ADOPTÉES

I. Introduction

Comme nous l'avons précisé en introduction de cette thèse, ce travail de recherche est basé sur deux approches : une approche théorique qui vise la détermination des facteurs à haut impact sur les performances énergétiques du bâtiment dans le climat de Marrakech ainsi que le degré d'influence de chacun de ces facteurs, et une approche expérimentale appliquée à un appartement situé à Marrakech. En effet, pour cette seconde approche, après avoir validé le modèle de simulation par une longue période de suivi expérimental des températures au sein des différentes zones thermiques de l'appartement, les charges de chauffage/refroidissement et le confort thermique ont été examinés de près et ce dans les six climats du Maroc préalablement définis par le RTCM. Ces deux études ont été menées principalement à l'aide de simulations thermiques dynamiques des charges de chauffage/refroidissement et des températures opératives qui serviront par la suite au calcul des taux de confort thermique au sein du bâtiment étudié. Enfin cette seconde approche a permis également d'examiner les performances thermiques du bâtiment sous plusieurs variantes d'isolation thermique de l'enveloppe, d'orientation de la façade, d'étage de l'appartement etc.

II. Description du bâtiment étudié

Le bâtiment étudié, appelé appartement « ADAM », est situé à Marrakech, (Latitude 31°38'N, Longitude 8°03'O, Altitude 426m). Le bâtiment est un appartement situé au quatrième étage d'un immeuble de cinq étages. Construit sur une superficie nette de 106,8m², l'appartement se compose d'une cuisine, trois chambres avec terrasses, un salon, une salle de bain, deux salles d'eau et un couloir. Les chambres, le salon et la cuisine donnent sur l'unique façade de l'appartement orientée ouest. La Figure 18 montre le plan architectural avec le zonage thermique et la vue de la façade principale du bâtiment.

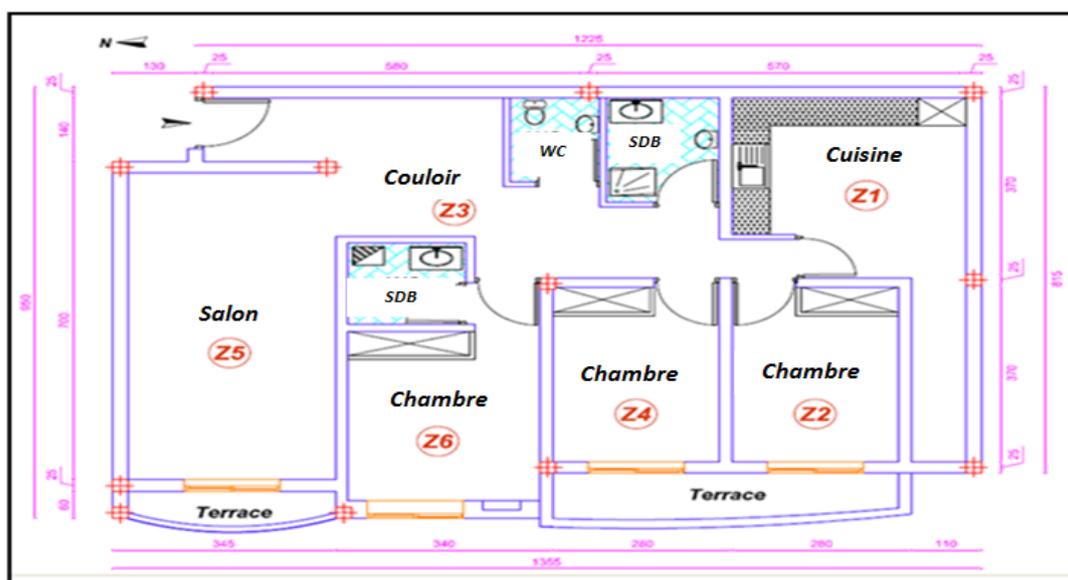




Figure 18. Plan d'architecte et vue de la façade de l'appartement ADAM

La façade de l'appartement est d'une épaisseur totale de 41cm, composée de cinq couches (de l'intérieur vers l'extérieur: 2cm de mortier de ciment, une brique rouge de 10cm, une lame d'air de 7cm, une brique rouge de 20cm et 2cm de mortier de ciment). La transmittance thermique résultante U est de $0.473 \text{ W.m}^{-2}\text{.K}^{-1}$. Les murs extérieurs nord, est et sud sont adjacents aux blocs voisins du même type et donc considérés comme des surfaces adiabatiques. L'épaisseur totale de ces murs, y compris les murs voisins, est de 44cm avec quatre couches (2 cm de mortier de ciment, deux briques parpaing de 20 cm chacune et 2 cm de mortier de ciment). La valeur globale de U correspondante est de $1.111 \text{ W.m}^{-2}\text{.K}^{-1}$. L'épaisseur totale du toit et du plancher bas est de 31 cm avec cinq couches (2 cm de plâtre, 16 cm de briques hourdis avec poutres d'acier, 5 cm de béton armé, 6 cm de mortier de ciment et 2 cm de marbre) avec une valeur U globale de $2.471 \text{ W.m}^{-2}\text{.K}^{-1}$. Les murs intérieurs ont une épaisseur de 19 cm et sont composés de parpaing de 15 cm avec 2 cm de mortier de ciment de chaque côté. Leur coefficient de transmission thermique est de $2.225 \text{ W.m}^{-2}\text{.K}^{-1}$. Les fenêtres sont munies d'un simple vitrage avec un cadre d'aluminium et sont équipées de volets roulants externes. La valeur U du vitrage est prise égale à $5.740 \text{ W.m}^{-2}\text{.K}^{-1}$. Le Taux Global de Baies Vitrées est de 29%. Les tableaux A.1-2 de l'Annexe I montrent les caractéristiques thermophysiques des couches constitutives de la façade, du plancher bas et du toit de l'appartement.

III. Modélisation du bâtiment sous TRNSYS

Aujourd'hui, la conception de modèles efficaces de l'énergétique du bâtiment et du dimensionnement des équipements solaires et/ou thermiques performants sont abondamment disponibles grâce à des logiciels appropriés. En fait, plusieurs logiciels existent sur le marché pour faciliter aux chercheurs et aux professionnels de traiter les questions de l'efficacité énergétique des bâtiments résidentiels et tertiaires ainsi que celle des équipements connexes. Or, La complexité et l'importance des problématiques liées à la simulation thermique dynamique des bâtiments interpellent à plus d'un titre à s'assurer de la valeur scientifique et technique d'un outil informatique quelconque en termes de précision des calculs effectués et des approches adoptées. En effet, plusieurs auteurs ont réalisé des comparaisons entre différents logiciels de simulation thermique dynamique des systèmes (TRNSYS, TAS, ESP-r,

IES, EnergyPlus, Codyba, Solene et Comfie Pléiade) et ont souvent confirmé la performance de TRNSYS (Beckman et al. 1994; Buratti et al. 2013; Asim et al. 2016; Khabbaz et al. 2016 ; Sobhy et al. 2017a) . La comparaison des logiciels disponibles faite par (Flory-Celini 2008) a été basée sur la possibilité d'effectuer des simulations thermiques dynamiques des bâtiments en utilisant les modules disponibles y compris les éléments architecturaux, les dispositifs climatiques, les bibliothèques des matériaux de construction, d'ouvertures, de protection, etc. Cette comparaison montre que les deux environnements qui semblent répondre largement à la problématique posée dans cette étude (Flory-Celini 2008) sont TRNSYS et EnergyPlus. Bien que ce dernier présente plus de dispositifs climatiques tels que l'éclairage et le transfert aéraulique, TRNSYS a l'avantage de posséder une interface graphique plus ergonomique, d'une plus grande rapidité de prise en main et permet d'ajouter des types élaborés en logiciels de programmation. TRNSYS se base sur la méthode de modélisation nodale et la ventilation simulée par des transferts de masse est prise en compte par l'outil de simulation aéraulique TRNFLOW qui est associé à TRNSYS. D'autre part, suite à une étude que les auteurs Buratti et al. ont effectuée en 2013 sur la simulation de la performance énergétique et du confort thermique dans des bâtiments non résidentiels en Italie avec les deux codes TRNSYS et EnergyPlus confirment que TRNSYS est extrêmement flexible pour la simulation de différents systèmes transitoires, tandis qu'EnergyPlus est plus spécifique pour l'étude du comportement du bâtiment, ainsi que les résultats des deux codes de simulation sont en bon accord et que les légères différences constatées étaient dues à l'approche différente pour l'évaluation du rayonnement solaire sur les surfaces inclinées et sur le modèle de conduction thermique transitoire.

III.1. Présentation de TRNSYS

TRNSYS (TRaNsient System Simulation) est un logiciel commercial développé par le laboratoire d'énergie solaire de l'Université de Madison à Wisconsin (États-Unis). Disponible depuis 1975, TRNSYS est dédié à la simulation thermique dynamique des bâtiments et des systèmes solaires de la simple production d'eau chaude sanitaire à la conception et la simulation des bâtiments mono ou multizones, en fonction de leurs emplacements, de leurs matériaux de construction, de leur architecture etc. TRNSYS permet également la visualisation, à un pas de temps défini par l'utilisateur, de la consommation d'énergie en termes de chauffage, de refroidissement etc, ainsi que la production annuelle d'énergie des équipements solaires et/ou thermiques pour un bâtiment donné (chauffe-eau solaire, panneau photovoltaïque, etc). TRNSYS est basé sur une approche par schéma-bloc (Figure 19). Cette approche modulaire permet à la fois de réduire le degré de complexité des problèmes à traiter et de travailler dans un environnement permettant de rajouter de nouveaux composants et de nouveaux concepts en utilisant plusieurs langages de programmation (C, C++, Pascal, Fortran, etc.). De plus, TRNSYS peut être facilement connecté à de nombreuses autres applications, pour le pré-traitement ou le post-traitement ou par le biais d'appels interactifs au cours de la simulation (Microsoft Excel, Matlab, etc.).

TRNSYS est doté d'une panoplie de composants appelés aussi (Types) riche et diversifiée (bâtiment mono ou multizones, équipements de chauffage/refroidissement, panneaux solaires, données météorologiques, traceurs en ligne, régulateurs, contrôleurs calculateurs, scénario de gestion d'objets etc). La création du fichier TPF (TRNSYS Project

File), la phase principale d'un projet de simulation, consiste à relier les différents éléments nécessaires à la simulation souhaitée : bâtiment multizone (Type 56), Données météorologique (Type 99), etc.

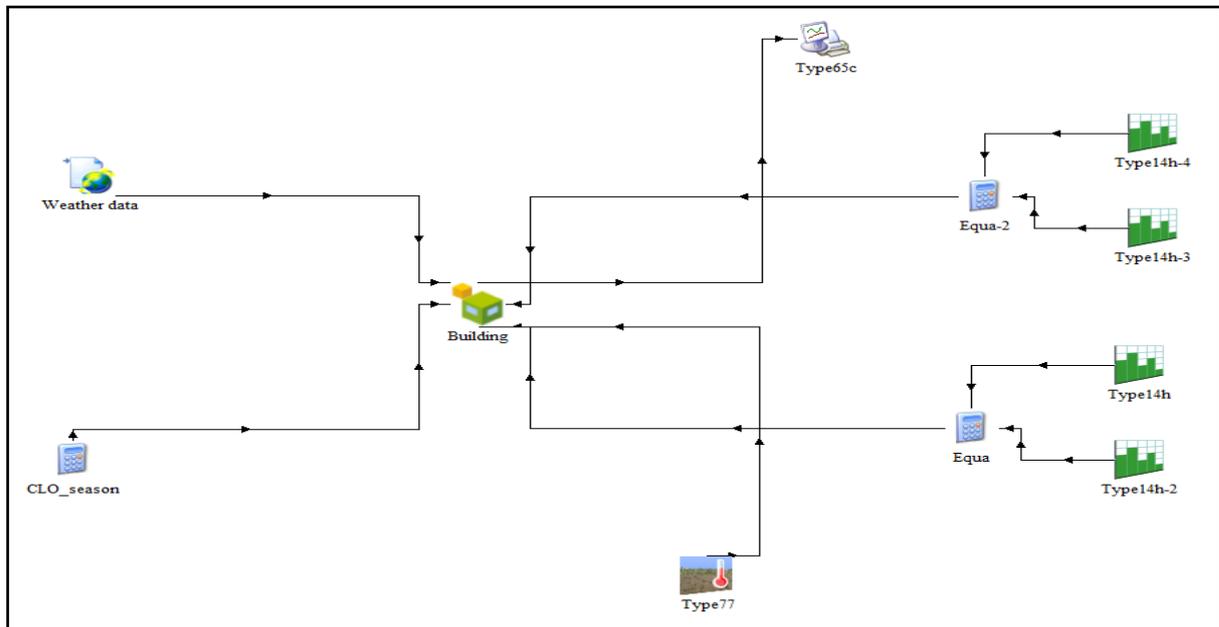


Figure 19. Interface graphique de TRNSYS présentant l'approche schéma-bloc (Projet TPF de l'appartement ADAM au Rez de chaussée)

III.2. Modélisation multizone du bâtiment par le Type 56 «TRNBuild»

Le Type 56 permet de simuler le comportement thermique d'un bâtiment donné sous forme d'une ou de plusieurs zones thermiques. Le programme TRNBuild qui est l'interface graphique du Type 56 génère un fichier de type (*.b17) contenant la description du bâtiment (matériaux de construction, composition, dimensions et position des parois opaques et transparentes, protections solaires, équipement de chauffage/refroidissement/ventilation, calendrier d'activités...). Ce fichier est la source d'informations nécessaires à la simulation thermique dynamique du bâtiment multizone en question. A l'instar de tout Type de TRNSYS, les entrées et les sorties du Type 56 peuvent être configurées en fonction de la description du bâtiment et des besoins de l'utilisateur.

III.3. Description mathématique des composantes utilisées dans la simulation

III.3.1. Type 56 (Bâtiment multizone)

Transfert thermique par conduction dans une paroi d'un bâtiment

Dans le Type 56 correspondant à la simulation des bâtiments à zones thermiques multiples, le transfert thermique par conduction à travers les parois du bâtiment est modélisé par les fonctions de transfert de Mitalas et Arsenault (TRNSYS, 2010). Cette méthode est basée sur l'analyse des échanges de chaleur, qui permet de calculer avec une bonne précision la conduction dans les parois en régime transitoire. Le détail de ce calcul est donné en Annexe II de cette thèse.

Transferts convectifs sur un nœud d'air

Le modèle du bâtiment dans le Type 56 est un modèle avec un nœud d'air représentant toute la masse d'air d'une zone donnée. Ce nœud d'air représente la capacité thermique du volume d'air étudié et le bilan thermique sur le nœud d'air fait intervenir l'ensemble des apports générés dans l'environnement de la zone étudiée. En effet, le flux de chaleur convectif reçu par un nœud d'air d'une zone thermique (Eq. II.1) est la somme des flux convectifs provenant des différentes surfaces de la zone (Eq. II.2), des gains par infiltration (Eq. II.3), des gains par ventilation (Eq. II.4), des gains internes dus aux occupants, aux équipements et à l'éclairage, des gains dus au couplage de l'air avec les différentes zones adjacentes (Eq. II.5) et des gains solaires à travers les fenêtres. La Figure 20 présente les différents flux convectifs reçus par un nœud d'air (TRNSYS, 2010).

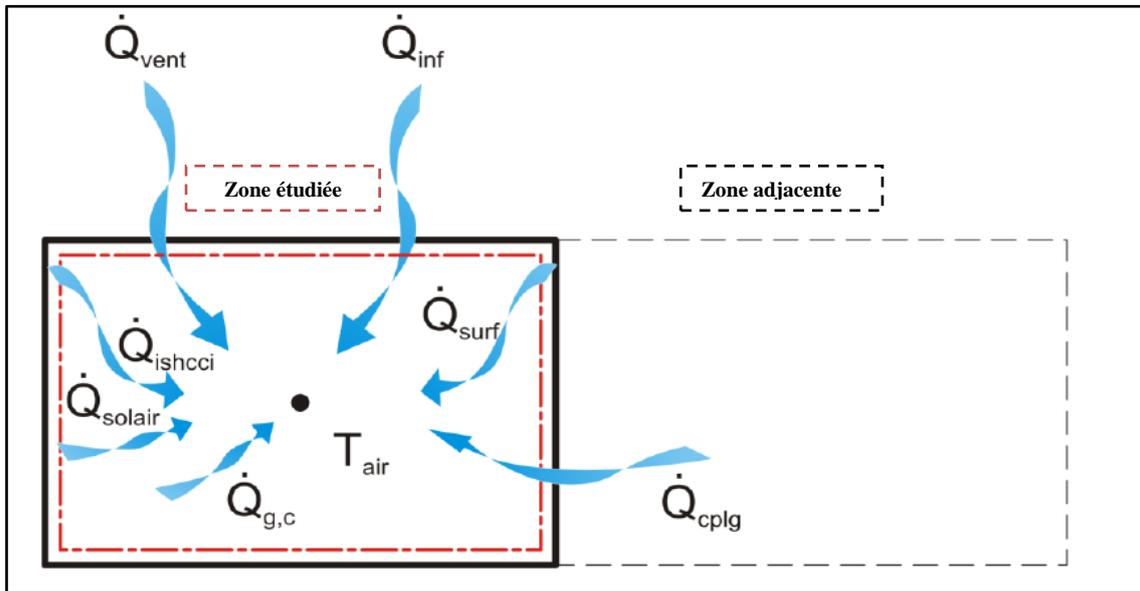


Figure 20. Flux de chaleur convectifs sur un nœud d'air (TRNSYS, 2010)

Les flux convectifs illustrés dans la Figure 20 sont définis par les équations suivantes:

$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_{surf,i} + \dot{Q}_{inf,i} + \dot{Q}_{vent,i} + \dot{Q}_{g,c,i} + \dot{Q}_{cplg,i} + \dot{Q}_{solair,i} + \dot{Q}_{ISHCCI,i} \quad \text{Eq. II.1}$$

Avec :

$\dot{Q}_{surf,i}$: Les gains convectifs provenant des parois intérieures.

$$\dot{Q}_{surf,i} = U_{w,i} A_{w,i} (T_{paroi} - T_{air}) \quad \text{Eq. II.2}$$

$\dot{Q}_{inf,i}$: Les gains d'infiltration (débit d'air provenant de l'extérieur).

$$\dot{Q}_{inf,i} = \dot{V} \rho C_p (T_{ext,i} - T_{air}) \quad \text{Eq. II.3}$$

$\dot{Q}_{vent,i}$: Les gains de ventilation (débit d'air provenant d'une source définie par l'utilisateur, système de HVAC).

$$\dot{Q}_{\text{vent},i} = \dot{V} \rho C_p (T_{\text{vent},i} - T_{\text{air}}) \quad \text{Eq. II.4}$$

$\dot{Q}_{g,c,i}$: Les gains convectifs internes (par les occupants, par les équipements, par l'éclairage, etc.).

$\dot{Q}_{\text{cplg},i}$: Les gains convectifs dus à l'écoulement de l'air entre les zones.

$$\dot{Q}_{\text{cplg},i} = \dot{V} \rho C_p (T_{\text{zone},i} - T_{\text{air}}) \quad \text{Eq. II.5}$$

$\dot{Q}_{\text{solair},i}$: Les gains solaires entrant dans une zone à travers les fenêtres externes et qui sont transférés en gain convectif à l'air intérieur.

$\dot{Q}_{\text{ISHCCI},i}$: Le rayonnement solaire absorbé par les dispositifs d'ombrage internes de la zone, qui est transféré comme un gain convectif à l'air intérieur.

Transferts radiatifs sur un nœud d'air

Quant aux échanges par rayonnement, TRNSYS distingue les échanges de courtes longueurs d'onde (CLO) correspondant à du rayonnement à longueurs d'onde inférieures à 2.5 μm et à celui à grandes longueurs d'onde (GLO) supérieures à 2.5 μm .

Le transfert interne de chaleur par rayonnement d'une paroi de la zone que reçoit un nœud (Figure 21) est la somme des gains radiatifs internes à la zone étudiée (Eq. II.6). Ces gains sont le résultat de l'échange par rayonnement entre la paroi et les autres surfaces ainsi que les gains radiatifs spécifiés éventuellement par l'utilisateur et les gains solaires reçus par la paroi à travers les fenêtres. La Figure 21 présente les flux de chaleur radiatifs internes d'une paroi de la zone reçus par un nœud.

$$\dot{Q}_{r,w_i} = \dot{Q}_{g,r,i,w_i} + \dot{Q}_{\text{sol},w_i} + \dot{Q}_{\text{long},w_i} + \dot{Q}_{\text{wall-gain}} \quad \text{Eq. II.6}$$

\dot{Q}_{r,w_i} : Les gains radiatifs reçus par un nœud surfacique d'une paroi.

\dot{Q}_{g,r,i,w_i} : Les gains radiatifs internes reçus par une paroi.

\dot{Q}_{sol,w_i} : Les gains solaires reçus par une paroi via les fenêtres.

$\dot{Q}_{\text{long},w_i}$: Les gains à travers les échanges de chaleur par rayonnement entre une paroi et les autres parois de la zone.

$\dot{Q}_{\text{wall-gain}}$: Le flux de chaleur radiatif spécifique à une paroi donnée.

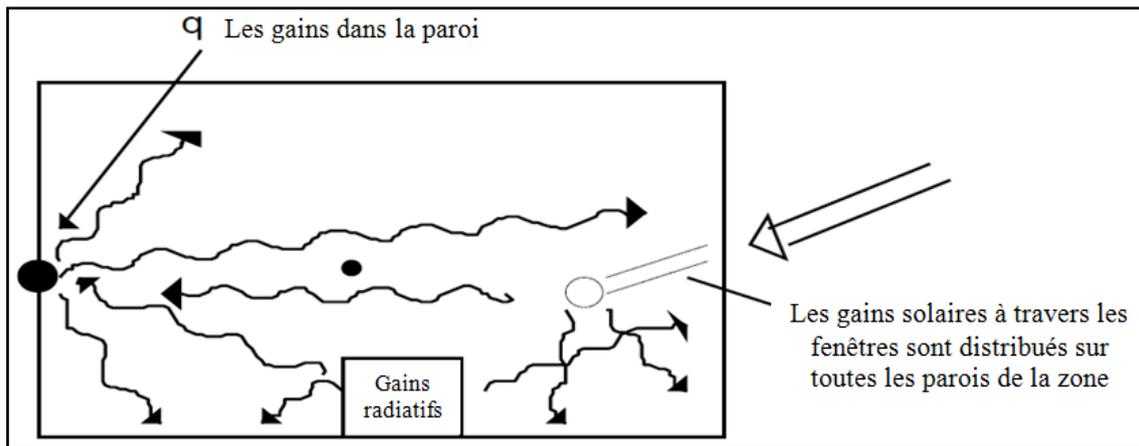


Figure 21. Flux de chaleur radiatifs dans une paroi (TRNSYS, 2010)

Pour tenir compte de l'ombrage externe des murs et des fenêtres extérieures, TRNBuild génère les matrices d'ombrage et d'insolation, à l'aide des données 3D de TRNSYS3D, qui permettent de déterminer la quantité d'énergie solaire qui arrive sur chaque façade du bâtiment. Pour générer cette matrice, TRNBuild fait appel à TRNSHD : un sous-programme de TRNSYS.

Méthode de calcul de la charge thermique

La variation de l'énergie thermique dans une zone est égale au flux de chaleur net « Q_i » échangé par cette zone selon l'équation II. 1. (TRNSYS 2010). La température d'une zone thermique au sein d'un bâtiment (nœud thermique) est calculée par TRNSYS en utilisant l'équation II. 7 qui s'écrit:

$$C_i \cdot \frac{d}{dt} T_i = \dot{Q}_i \quad (\text{Eq. II. 7})$$

De plus, la charge thermique d'un bâtiment est la quantité de chaleur à extraire (refroidissement) ou à fournir (chauffage) durant une période donnée afin d'y maintenir une température prédéfinie (température de consigne). Cette charge thermique de chauffage ou de refroidissement est reliée directement à la température de l'air de la zone. L'équation II. 7 peut être reformulée en incluant la puissance thermique (TRNSYS, 2010).

$$C_i \cdot \frac{d}{dt} T_i = \dot{Q}_i - P_i \quad (\text{Eq. II. 8})$$

Où P_i est la charge thermique de la zone i (négative pour le chauffage et positive pour le refroidissement).

III.3.2. Présentation de quelques types de TRNSYS utilisés dans la simulation de l'appartement ADAM

Type 99 (Lecteur des données météorologiques)

L'objectif principal de cette composante est la lecture des données météorologiques à des intervalles de temps réguliers à partir d'un fichier de données et l'estimation du taux de rayonnement direct et diffus incident sur les surfaces inclinées. Ces estimations sont faites en utilisant la corrélation complète de Reindl (Reindl et al. 1990). Le Type 99 permet de lire

plusieurs formats standards de données météorologiques. Les données du rayonnement solaire sont vérifiées pour les valeurs supérieures à zéro avant le lever et après le coucher du soleil. Le processeur de rayonnement interne génère des sorties de rayonnement direct et diffus pour un nombre arbitraire de surfaces avec une inclinaison et un angle d'azimut bien précis. Enfin, les sorties standards sont la température de l'air ambiant, le rayonnement global, l'humidité relative, la vitesse et la direction du vent etc. Ces sorties standards constituent des entrées pour d'autres Types dont principalement le Type 56.

Type 65 (Traceur en ligne)

Le Type 65 permet d'afficher les variables sélectionnées à un intervalle de temps déterminé (allant d'une heure à une année), pendant que la simulation progresse. Ce type est très largement utilisé pour visualiser les résultats graphiques d'une simulation vu la multitude d'informations qu'il est capable de présenter simultanément ainsi que sa capacité à détecter les éventuels dysfonctionnements de la simulation et de son paramétrage. Si le programme s'exécute, un fichier contenant les valeurs de toutes les variables sélectionnées sera créé au cours de la simulation. Les données graphiques de ce fichier peuvent, par la suite, être transcrites en fichier « *.txt » ou « *.xls » pour un traitement ultérieur.

III.4. Hypothèses de simulation adoptées

III.4.1. Type 77, Type 49 (Couplage du bâtiment au sol)

Le couplage entre un bâtiment et le sol peut être fait par deux méthodes différentes. La première consiste à modéliser ce couplage à l'aide de la composante (Type 77), qui présente l'évolution sinusoïdale de la température du sol à une profondeur précise (Figure 6). Ce type consiste à renseigner la température moyenne de la surface du sol qui est typiquement la moyenne annuelle de la température de l'air au lieu considéré. Ce modèle est basé sur la corrélation de Kusuda et Achenbach (1965) (Eq. I.1) qui estime la température du sol à une profondeur donnée compte tenu de la période de l'année, des propriétés du sol, de la température moyenne annuelle de la surface du sol, de l'amplitude de la température annuelle de la surface du sol et du jour de l'année au cours de laquelle se produit la température annuelle minimale de la surface

Le Tableau 3 donne les températures moyennes annuelles de l'air ambiant dans les zones climatiques du Maroc selon la base de données (Meteonorm 2014).

Tableau. 3. Températures moyennes annuelles de l'air ambiant dans les zones climatiques du Maroc (Meteonorm 2014)

Zone	Ville	Type de climat	Température ambiante moyenne (°C)
CZ1	Agadir	Atlantique	20.8
CZ2	Tanger	Méditerranéen	17.7
CZ3	Fès	Continental	18.4
CZ4	Ifrane	Froid	11.9
CZ5	Marrakech	Semi-aride	20.7
CZ6	Errachidia	Désertique	20.4

La deuxième méthode du couplage du bâtiment au sol est faite à l'aide du Type 49 (TRNSYS 2010). Ce dernier est basé sur un modèle des différences finies en trois dimensions et il nécessite un maillage du sol de la partie couverte par le bâtiment (near-field) ainsi que l'entourage du bâtiment (far-field) afin de calculer le transfert thermique entre les zones du RDC et le sol (Figure 22). La température du champ lointain du sol est calculée par la corrélation de Kusuda et Achenbach (1965) (Eq. I.1). Cette température change uniquement en fonction de la profondeur et de la période de l'année, par contre, le calcul de la température du champ proche prend en considération les échanges thermiques (flux de chaleur par conduction) entre le sol et le bâtiment.

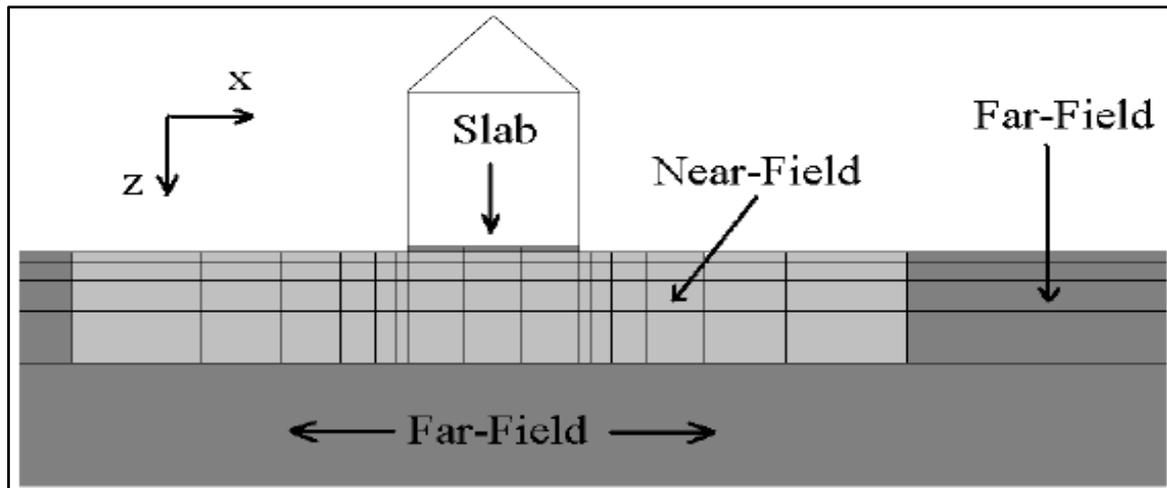


Figure 22. Maillage du sol sous un bâtiment et désignation des champs : Near-Field et Far-Field (TRNSYS 2010)

III.4.2. Calcul des coefficients convectifs

Pour TRNSYS, le calcul par défaut des coefficients de transfert de chaleur par convection est seulement valable pour les surfaces internes du bâtiment. Ces coefficients sont calculés selon l'équation II.10. Les valeurs des variables A et B pour chaque type de surface sont présentées dans le Tableau 4 (TRNSYS 2010).

$$h_{\text{interne}} = A (T_{\text{surf}} - T_{\text{air}})^B \quad \text{Eq. II.10}$$

Tableau. 4. Paramètres de calcul du coefficient de transfert de chaleur par convection

Type de surface	A (kJ.h ⁻¹ .m ⁻² .K ⁻¹)	B (-)
Plafond	7.20	0.31
Plancher bas	3.88	0.31
Mur (surface verticale)	5.76	0.30

Par ailleurs, du moment que l'équation (Eq. II.10) ne peut être utilisée pour les surfaces externes du bâtiment, la corrélation présentée par l'équation (Eq. II.11) (Incropera 1985) a été adoptée vu qu'elle tient compte de la vitesse du vent disponible dans le fichier météorologique. Cette équation est ensuite reliée à une fonction d'entrée créée dans le Type56.

$$h_{\text{outside}} = 2.8 + 3.2 \cdot V \quad \text{Eq. II.11}$$

III.4.3. Inertie thermique dans TRNSYS

Le Type 56 prend comme hypothèse par défaut, qu'une zone thermique ne contient que de l'air, chose qui n'est pas toujours vraie. Les murs internes et les meubles ont généralement une inertie thermique à prendre en considération. Cette hypothèse prise par défaut par TRNSYS conduit à considérer que la capacité thermique d'une zone thermique au sein du bâtiment est automatiquement réglée sur une valeur par défaut de 1.2 multipliée par le volume de la zone en question (TRNSYS 2010). Cette valeur est prise en considération vu que la valeur approximative de la capacité calorifique de l'air dans les conditions standard est de $1\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ et la valeur approximative de la masse volumique de l'air est de $1.2\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Pour éviter cette hypothèse par défaut, l'inertie thermique des murs internes pour chacune des zones thermiques a été calculée en utilisant l'équation (Eq. II.12), tandis que pour celle des meubles, la valeur de $20\text{ kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^2$ a été prise en considération selon la Réglementation Thermique française (RT 2012).

$$I_n = \rho \cdot C_p \quad \text{Eq. II.12}$$

III.5. Modélisation du bâtiment en 3D

Dans la version actuelle de TRNSYS (Version 17), le concepteur a développé un plug-in appelé TRNSYS3D compatible avec l'application de dessin en 3D : Google SketchUp 8, ce dernier permet de concevoir le bâtiment en trois dimensions selon sa géométrie et son orientation. L'utilisation de ce plug-in suppose avoir effectué le découpage préalable du bâtiment en zones thermiques avant d'entamer la modélisation. À cet effet, l'appartement ADAM a été subdivisé en six zones thermiques comme il est présenté dans la Figure 23.

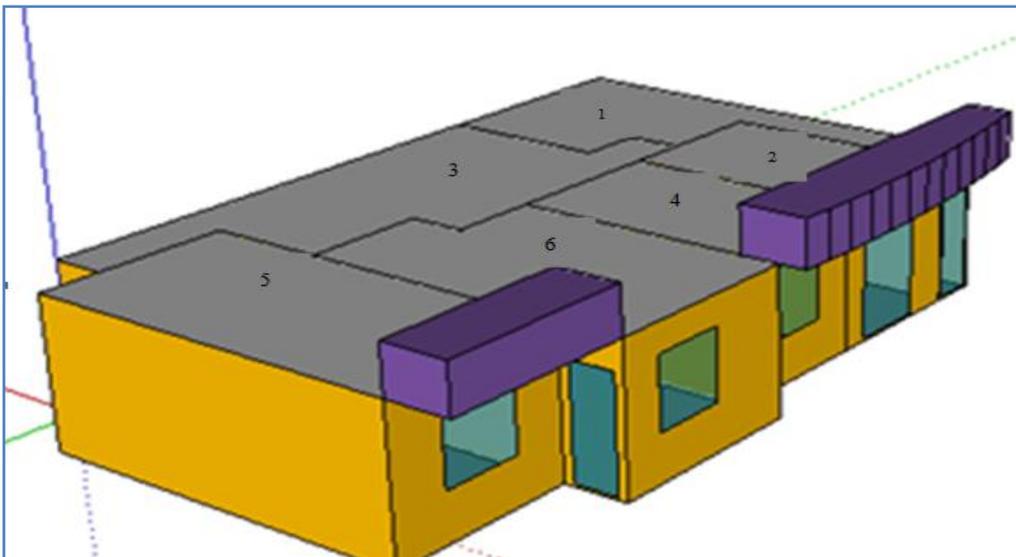


Figure 23. Image 3D de l'appartement ADAM

III.6. Création du projet TPF (TRNSYS Project File)

L'utilisation du plug-in TRNSYS3D permet de générer le fichier d'extension (*.idf) contenant toutes les informations de la géométrie de la bâtisse ainsi que son orientation. Ensuite, l'interface TRNSYS Simulation Studio offre la possibilité de préparer la simulation

par l'importation du fichier (*.idf). En effet, le projet TPF consiste à choisir, dans un premier temps, un ensemble de composantes physiques, en s'appuyant soit sur des modèles existants dans la bibliothèque de TRNSYS, soit en les créant et puis à définir les interactions physiques entre ces composantes en effectuant les liaisons appropriées. Le comportement thermique du bâtiment étudié est simulé à travers la modélisation transitoire multizone (Type 56) avec un pas de temps de 1h.

IV. Données météorologiques

La modélisation dynamique des systèmes thermiques à l'aide de TRNSYS nécessite des données d'entrée précises et fiables notamment celle de la météorologie. Parmi les fichiers les plus couramment utilisés on trouve les fichiers dits : Année Météorologique Typique (Typical Meteorological Year). Un fichier TMY donne à l'utilisateur des données horaires, sur les douze mois calendaires équivalents à une année météorologique typique. On trouve aussi les TRY (Test Reference Year) et les SSY (Standard Solar Year). Les mois typiques composant cette année typique sont choisis parmi ceux d'une longue période (environ 10 à 20 ans) et les techniques de choix de ces mois typiques sont appelées techniques de génération de fichiers TMY et sont basées sur des calculs stochastiques. Les techniques les plus connues sont la méthode « Danish Method » (Anderssen et al. 1977), la méthode de « Sandia laboratories » (Hall et al. 1978) et la méthode de « Festa et Ratto » (Festa et Ratto 1993). Plusieurs auteurs ont travaillé sur la comparaison de ces méthodes : Argiriou et al. (1999) ainsi que Bilbao et al. (2004) ont conclu que la qualité des résultats de simulation utilisant les TMY issus d'une méthode ou d'une autre dépend de plusieurs facteurs tels que les caractéristiques géographiques et climatiques de la région étudiée, la nature et la taille du système à simuler ; cependant, aucune conclusion n'a été faite concernant l'efficacité absolue de l'une ou de l'autre des méthodes. (Janjai et al. 2008) ont effectué une comparaison entre les trois méthodes. En effet, des TMY ont été générés en utilisant les trois méthodes pour quatre différentes zones géographiques en Thaïlande. Ces TMY ont été utilisés sur TRNSYS pour simuler des systèmes photovoltaïques et des chauffe-eau solaires de tailles différentes. En comparant les performances des trois méthodes, Ratto & Festa, Sandia et Danish, les auteurs (Janjai et al. 2008) sont parvenus à conclure que les résultats de simulation TRNSYS utilisant les TMY en question ne sont pas en contradiction avec des simulations utilisant des fichiers météorologiques de la moyenne des 10 dernières années pris séparément aussi bien pour les systèmes photovoltaïques que pour les chauffe-eau solaires. Vu les niveaux de complexité élevés pour les méthodes Festa et Ratto, et Danish, et vu la simplicité relative de la méthode Sandia, les auteurs recommandent son utilisation pour la génération de fichiers TMY.

Dans cette thèse, pour effectuer les simulations thermiques dynamiques de l'appartement ADAM, nous avons utilisé les fichiers TMY de (Meteonorm 2014) des six zones climatiques du Maroc à savoir : CZ1 : Agadir, CZ2 : Tanger, CZ3 : Fès, CZ4 : Ifrane, CZ5 : Marrakech et CZ6 : Errachidia, tandis que pour valider le modèle de simulation de l'appartement, des données météorologiques de Marrakech mesurées en 2014 *in-situ* ont été adoptées (cf. § chapitre IV). De plus, pour réaliser l'étude thermique sur la cellule de bâtiment

(cf. § chapitre III), nous avons utilisé des données météorologiques de Marrakech mesurées *in-situ* en 2009.

V. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons procédé à la présentation de l'appartement étudié et à la description ainsi qu'à la justification du choix de l'outil de simulation TRNSYS. Nous avons aussi présenté les techniques de conception des fichiers de données météorologiques et le choix effectué pour cette étude en matière de ces dernières. Dans le chapitre suivant, une étude numérique des paramètres intervenant dans l'efficacité énergétique d'une cellule de bâtiment dans le climat de Marrakech sera présentée en vue de préparer l'entrée en matière de l'étude expérimentale qui sera abordée dans le IV^{ème} chapitre.

CHAPITRE III : ÉTUDE NUMÉRIQUE DE PREDICTION DES BESOINS THERMIQUES DANS UNE CELLULE DE BATIMENT SOUS LE CLIMAT DE MARRAKECH

I. Introduction

Nombreux sont les paramètres qui interviennent dans la caractérisation du comportement thermique d'un bâtiment. Plusieurs études ont abordé ce sujet et se sont attelées à prédire les charges de chauffage / refroidissement et/ou la température de l'air au sein de différents types de bâtiments dans différentes conditions climatiques et ce en suivant diverses approches numériques. Les recherches ayant traité de la prédiction du comportement thermique d'un bâtiment se basent dans l'ensemble sur des méthodes d'analyse de données telles qu'elles sont décrites dans l'introduction de cette thèse (cf. § Chapitre I). Néanmoins, la définition préalable des facteurs susceptibles d'avoir un impact direct sur les charges de chauffage / refroidissement n'est pas exempte d'intuition ou, au meilleur des cas, s'appuie sur l'expérience et le vécu de l'Homme de la technique. Dans ce chapitre, nous nous proposons de prédire, à travers des modèles mathématiques, les charges de chauffage / refroidissement d'une cellule de bâtiment à Marrakech dont le climat est caractérisé par des étés très chauds et des hivers relativement froids. Huit paramètres du bâtiment ont été sélectionnés pour modéliser sa demande d'énergie thermique en utilisant la méthode de régression linéaire multiple qui conduit à des modèles mathématiques de haute précision. Le choix de ces paramètres est basé sur la littérature d'une part et d'autre part sur la nécessité de les classer par ordre d'importance de leurs impacts respectifs sur le comportement thermique du bâtiment.

Les modèles mathématiques sont élaborés sur la base des résultats de plusieurs simulations dynamiques à l'aide de TRNSYS. La méthodologie adoptée dans cette étude est la suivante: Tout d'abord, des simulations dynamiques ont été réalisées pour les configurations (décrites dans les Tableaux 11-12). Ensuite, les demandes d'énergie de chauffage et de refroidissement sont estimées par des modèles polynomiaux en utilisant la méthode de régression linéaire multiple.

II. Description de la cellule du bâtiment étudiée

Le bâtiment étudié est une cellule construite sur sol avec quatre façades. La hauteur de la cellule est de 3m et toutes les façades ont la même surface. Une des façades, appelée la façade principale, a une fenêtre avec un simple vitrage. Le Tableau 5 montre les dimensions des trois variantes étudiées de la cellule du bâtiment.

Tableau. 5. Variantes des dimensions de la cellule de bâtiment étudiée

Volume (m ³)	Surface (m ²)					Hauteur (m)
	Nord	Sud	Ouest	Est	Planchers	
40	10.98	10.98	10.98	10.98	13.39	3
80	15.48	15.48	15.48	15.48	26.62	3
120	18.96	18.96	18.96	18.96	39.94	3

Afin d'évaluer l'influence des paramètres du bâtiment sur sa charge thermique, sept paramètres sont sélectionnés: l'isolation thermique de la façade principale (X_1), du sol (X_2), du toit (X_3) et des murs (X_4), le volume du bâtiment (X_5), le TGBV (X_6), l'orientation de la façade principale (X_7). En outre, deux types de matériaux de construction (le huitième paramètre) couramment utilisés dans la région de Marrakech sont considérés: la brique rouge (Type1) et le parpaing (Type2). Les Tableaux 6-8 présentent la constitution des murs, du sol et du toit pour différentes configurations étudiées et leurs valeurs du coefficient de transmission thermique U selon (TRNSYS 2010).

Tableau. 6. Composition des murs de la cellule de bâtiment

	Mortier (Interne)	Parpaing	EPS	Brique rouge	Mortier (Externe)	Épaisseur totale (cm)	U(W/m ² .K)
Type1_ isolé	2.5	–	5	20	2.5	30	0.410
Type1_non-isolé	2.5	–	–	20	2.5	25	0.805
Type2_ isolé	2.5	20	5	–	2.5	30	0.486
Type2_non-isolé	2.5	20	–	–	2.5	25	1.167

Tableau. 7. Composition du plancher bas de la cellule de bâtiment

	Carrelage (Interne)	Mortier	XPS	Béton armé	Lit de galet (Externe)	Épaisseur totale (cm)	U(W/m ² .K)
Plancher bas isolé	2	7	5	7	25	46	0.542
Plancher bas non isolé	2	7	0	7	25	41	1.548

Tableau. 8. Composition de la toiture de la cellule de bâtiment

	Plâtre (Interne)	Hourdis	Brique rouge	XPS	Mortier	Carrelage (externe)	Épaisseur totale (cm)	U(W/m ² .K)
Type1_ isolé	2	–	20	5	2.5	2	31.5	0.540
Type1_non isolé	2	–	20	–	2.5	2	26.5	1.746
Type2_ isolé	2	20	–	5	2.5	2	31.5	0.491
Type 2_ non isolé	2	20	–	–	2.5	2	26.5	1.195

III. Description des éléments de l'étude

Les quatre premiers paramètres (X_1 à X_4) prennent des valeurs de 0 ou 1 respectivement en fonction de l'absence ou de la présence de l'isolation. Le cinquième paramètre X_5 (le volume de la cellule de bâtiment) prend les valeurs: 40, 80 ou 120m^3 . Le sixième paramètre X_6 (le Taux Global des Baies Vitrées : TGBV) varie selon trois valeurs: 10%, 15% ou 20%. Le paramètre représentant l'orientation de la façade principale du bâtiment X_7 a les valeurs: 0° , 90° , 180° ou 270° correspondant respectivement au sud, à l'ouest, au nord ou à l'est.

Les propriétés thermophysiques de ces matériaux sont données dans le Tableau 9.

Tableau. 9. Caractéristiques thermophysiques de la brique rouge et du parpaing (TRNSYS 2010)

	Conductivité λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Masse volumique ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Chaleur spécifique c_p ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}$)	Diffusivité α ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	Effusivité b ($\text{W}\cdot\text{s}^{1/2}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$)
Brique rouge (Type 1)	0.700	1 300	0.650	0.828E-06	7.691E+02
Parpaing (Type 2)	1.119	720	0.794	1.957E-06	7.998E+02

III.1. Données météorologiques

Le bâtiment simulé est situé à Marrakech (Latitude $31^\circ38'N$, Longitude $8^\circ03'O$, Altitude 466 m) qui est caractérisée par un climat chaud et sec en été et un hiver relativement froid. Les hivers sont souvent froids le matin et la nuit (minima à 6°C), mais les températures augmentent très rapidement pendant la journée pour atteindre 18°C en moyenne. D'autre part, la période estivale est souvent chaude, avec des températures minimales de 20 à 22°C et pendant la journée, la température dépasse 40°C . Marrakech représente la zone climatique CZ5 selon le zonage climatique du RTCM (2014). Le Tableau 10 présente les températures maximales, minimales et moyennes mensuelles, ainsi que le rayonnement solaire global sur une surface horizontale et le rayonnement solaire global moyen journalier sur une surface horizontale enregistré à Marrakech depuis la station météorologique Agdal pour l'année 2009.

Tableau. 10. Données météorologiques de Marrakech (Station d'Agdal 2009)

Mois	Température maximale (°C)	Température Minimale (°C)	Température moyenne (°C)	Rayonnement solaire global sur un plan horizontal (kWh/m ²)	Rayonnement solaire global moyen journalier sur un plan horizontal (kWh/m ² .j)
Janvier	21.4	-1.5	8.6	92	3.00
Février	25.0	1.8	11.8	104	3.73
Mars	30.9	4.4	15.3	138	4.61
Avril	33.9	4.8	16.4	188	6.09
Mai	34.7	8.2	20.7	205	6.62
Juin	40.9	12.0	24.5	198	6.61
Juillet	44.0	14.5	28.7	214	6.92
Aout	42.5	15.8	27.0	204	6.61
Septembre	36.0	11.4	21.9	158	5.27
Octobre	34.6	11.4	21.3	138	4.46
Novembre	30.4	4.6	15.8	102	3.42
Décembre	24.3	0.8	12.7	85	2.76

III.2. Description de la méthodologie

La variation des sept paramètres qui prennent différents niveaux (2 niveaux pour X_1 , X_2 , X_3 et X_4 , 4 niveaux pour X_7 et 3 niveaux pour X_5 et X_6) conduit à augmenter de manière excessive le nombre de combinaisons: $2^4 * 4^1 * 3^2 = 576$. Par conséquent, pour les deux matériaux de construction considérés, nous devrions effectuer $576 * 2 = 1152$ simulations dynamiques. Étant donné que l'exécution de toutes ces simulations est peu pratique en raison du temps que cela nécessiterait, une méthode représentative et efficace pour l'identification du nombre d'expériences nécessaire et suffisant est « Les Plans d'Expériences » (DOE : Design Of Experiment) qui est une méthode prête à l'emploi et qui réduit considérablement le nombre d'expériences à effectuer. Basé sur un calcul mathématique à l'aide du code « Design Expert », le DOE permet d'obtenir les informations nécessaires limitant ainsi le nombre d'expériences à un niveau réaliste. De nombreux auteurs ont utilisé cette méthode pour l'optimisation des simulations de demande d'énergie du bâtiment (Romani et al. 2015, Flory-Celini 2008, Jaffal et al. 2009, Chlela et al. 2009, etc).

Les Tableaux 11 et 12 présentent les résultats de la conception des expériences pour les deux matériaux de construction considérés.

Tableau. 11. Matrice d'expérimentation pour le Type 1 (Brique rouge)

Numéro de la simulation	X₁ Isolation Façade	X₂ isolation Sol	X₃ Isolation Toit	X₄ Isolation Murs	X₅ Volume	X₆ TGBV	X₇ Orientaion	Q_H (kwh/m ² .a)	Q_c (kwh/m ² .a)
1	0	1	0	0	40	0.20	Nord	402	68
2	0	0	1	0	120	0.15	Nord	218	4
3	0	1	0	0	120	0.10	Est	262	58
4	0	0	1	1	80	0.10	Sud	154	3
5	0	1	1	1	80	0.10	Nord	196	3
6	0	1	0	1	80	0.10	Nord	232	60
7	0	0	1	1	120	0.15	Nord	160	9
8	0	1	0	1	120	0.20	Sud	174	127
9	0	1	0	1	120	0.15	Ouest	192	149
10	1	1	1	0	40	0.10	Sud	294	2
11	1	0	0	0	40	0.15	Ouest	331	103
12	1	1	1	0	80	0.20	Ouest	215	72
13	1	0	0	0	80	0.10	Est	265	47
14	1	1	1	1	40	0.10	Ouest	240	19
15	1	1	1	1	40	0.15	Est	260	11
16	1	0	0	1	40	0.10	Ouest	272	80
17	1	0	0	1	40	0.10	Est	290	39
18	1	0	0	1	40	0.20	Nord	296	86
19	1	1	1	1	80	0.20	Ouest	168	106
20	1	0	0	1	80	0.20	Est	227	121
21	1	1	1	1	120	0.20	Ouest	142	92

Tableau. 12. Matrice d'expérimentation pour le Type 2 (Parpaing)

Numéro de simulation	X ₁ Isolation Façade	X ₂ isolation Sol	X ₃ Isolation Toit	X ₄ Isolation Murs	X ₅ Volume	X ₆ TGBV	X ₇ Orientaion	Q _H (kwh/m ² .a)	Q _c (kwh/m ² .a)
1	0	1	0	0	40	0.20	Nord	564	31
2	0	0	1	0	120	0.15	Nord	319	2
3	0	1	0	0	120	0.10	Est	342	11
4	0	1	1	1	80	0.10	Nord	136	3
5	0	0	1	1	80	0.10	Sud	194	2
6	0	1	0	1	80	0.10	Nord	212	15
7	0	0	1	1	120	0.15	Nord	156	6
8	0	1	0	1	120	0.20	Sud	130	72
9	0	1	0	1	120	0.15	Ouest	157	96
10	1	1	1	0	40	0.10	Sud	459	2
11	1	0	0	0	40	0.15	Ouest	463	38
12	1	0	0	0	80	0.10	Est	317	41
13	1	1	1	0	80	0.20	Ouest	347	10
14	1	1	1	1	40	0.15	Est	186	27
15	1	0	0	1	40	0.10	Est	207	18
16	1	1	1	1	40	0.10	Ouest	207	61
17	1	0	0	1	40	0.10	Ouest	227	21
18	1	0	0	1	40	0.20	Nord	232	66
19	1	0	0	1	80	0.20	Est	129	121
20	1	1	1	1	80	0.20	Ouest	176	96
21	1	1	1	1	120	0.20	Ouest	109	103

III.3. Hypothèses de simulation

Les simulations dynamiques des 42 configurations de la cellule de bâtiment étudiée, obtenues à partir du DOE, sont réalisées à l'aide du logiciel TRNSYS. La demande d'énergie pour le chauffage / refroidissement du bâtiment est calculée sur la base de points de consigne de 20°C et 26°C respectivement pour le chauffage et le refroidissement selon la norme (NM ISO 7730 2010). Les données météorologiques utilisées dans les simulations dynamiques sont la température ambiante horaire, la vitesse du vent, la direction du vent, l'humidité relative et le rayonnement solaire global sur un plan horizontal pour l'année 2009. De plus, les hypothèses suivantes sont adoptées:

- La cellule est inoccupée et sans gains internes;
- La température de l'air dans la cellule du bâtiment est considérée comme uniforme.
- Pas d'ombrage sur la fenêtre;

- La température et l'humidité initiales sont prises égales à 20°C et 50% respectivement.

IV. Résultats et discussion

IV.1. Charges de refroidissement

La charge de refroidissement de la cellule de bâtiment étudiée est prédite en utilisant une régression linéaire multiple. Pour les matériaux de construction de Type1 et Type2, les modèles mathématiques correspondants sont donnés par les équations III.1-2 respectivement,

$$Q_c = -26.6 + 35.8 * X_1 + 17.7 * X_2 - 72.1 * X_3 + 14.6 * X_4 + 0.5 * X_5 + 416.6 * X_6 - 0.14 * X_7 \quad \text{Eq. III.1}$$

$$Q_c = -74.4 + 41.0 * X_1 + 13.1 * X_2 - 30.1 * X_3 + 29.3 * X_4 + 0.4 * X_5 + 404.5 * X_6 - 0.09 * X_7 \quad \text{Eq. III.2}$$

Les Figures 24 montrent les charges de refroidissement annuelles calculées et celles estimées de la cellule du bâtiment étudiée.

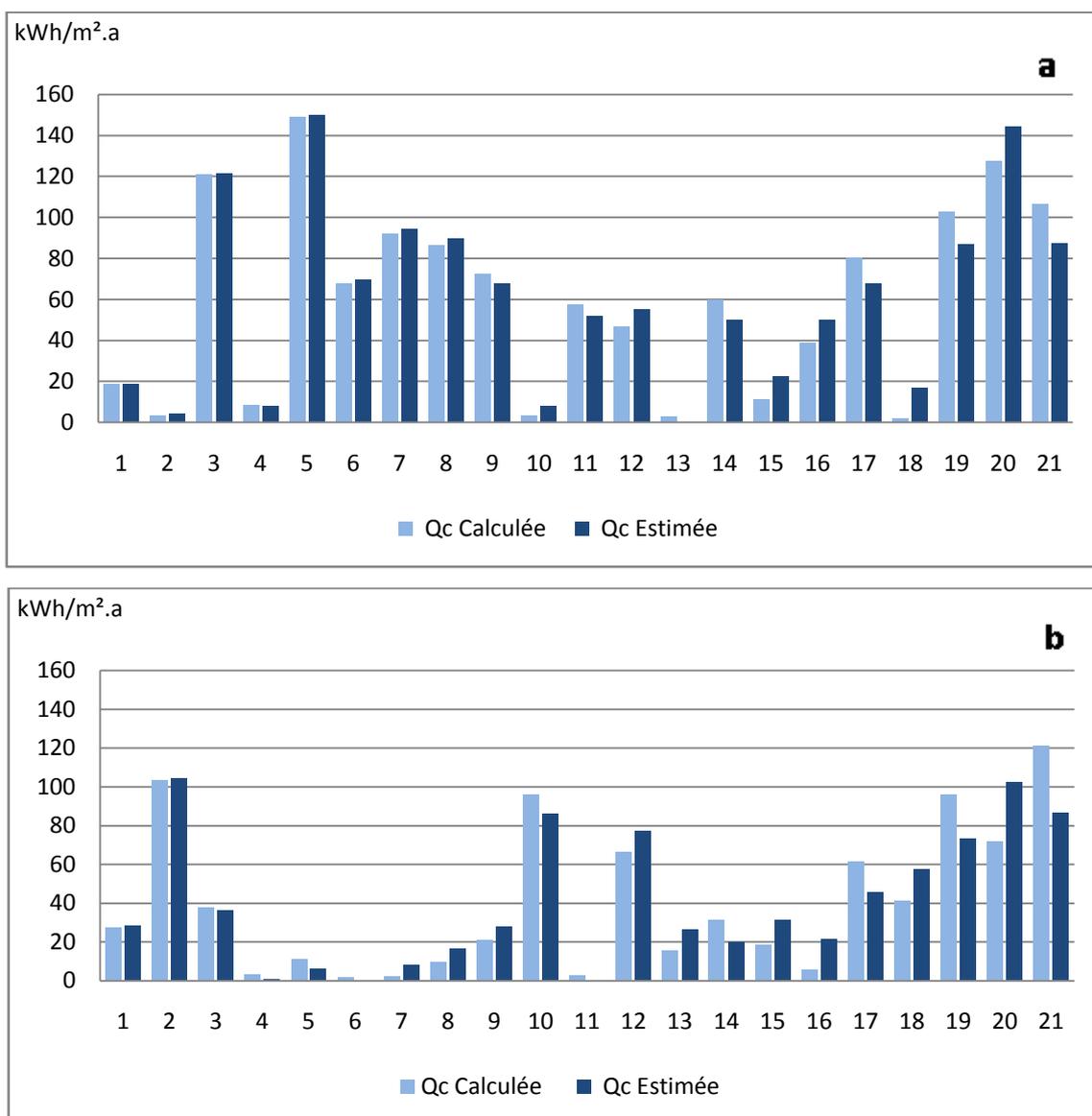


Figure 24. Charges de refroidissement de la cellule de bâtiment étudiée pour les matériaux de construction Type1 (a) et Type2 (b)

À partir de ces figures, on peut remarquer que les charges de refroidissement de toutes les configurations du bâtiment sont essentiellement supérieures à 20 kWh/m².a. En outre, la charge de refroidissement de seulement 7 configurations de Type1 (Fig. 24-a) et 9 de Type2 (Fig. 24-b) prennent des valeurs en dessous de ce seuil. On remarque également que la charge de refroidissement de la cellule de bâtiment de Type1 prend des valeurs supérieures à celle du Type2 dans la plupart des configurations en particulier pour celles correspondant à un toit non isolé. Dans le cas d'un toit isolé, les charges de refroidissement sont à peine les mêmes. On peut conclure que, lorsque le toit est isolé, le type de matériaux de construction n'a pas d'effet significatif sur la charge de refroidissement dans un climat semi-aride.

En outre, on peut conclure des Figures 24 que les résidus absolus e_i , représentant la différence entre charges calculées et estimées sont distribués aléatoirement autour de zéro, sans relation apparente entre les valeurs absolues des résidus et celles des charges de refroidissement. En effet, les modèles mathématiques surestiment ($e_i > 0$) la charge de refroidissement calculée pour certaines configurations de la cellule du bâtiment alors qu'ils la sous-estiment ($e_i < 0$) pour d'autres. De plus, le résidu absolu est inférieur à 5 et 7 kWh/m².a dans la moitié des expériences pour les matériaux de construction de Type1 et Type2 respectivement.

Les Figures 25 présentent le diagramme de Pareto des coefficients des modèles polynomiaux pour la charge de refroidissement des cellules du bâtiment. Ces figures montrent que la charge de refroidissement du bâtiment étudié peut être essentiellement prédite par trois paramètres, à savoir le TGBV (X_6), l'isolation du toit (X_3) et l'isolation de la façade principale (X_1).

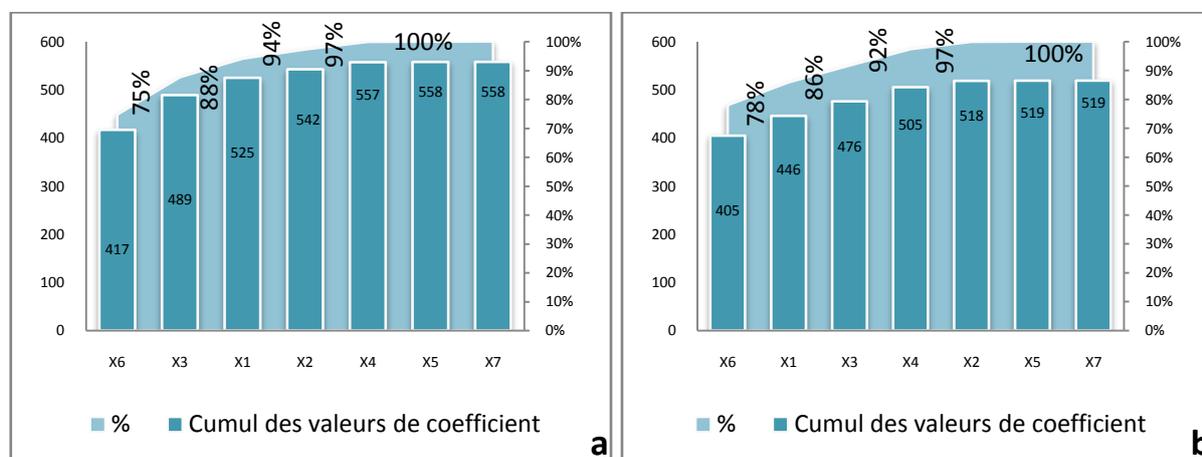


Figure 25. Diagrammes de Pareto des coefficients des modèles polynomiaux de la charge de refroidissement pour les Type1 (a) et Type2 (b)

En effet, ces trois paramètres représentent 94% et 92% de l'information relative à la charge de refroidissement pour les matériaux de construction de Type 1 (brique rouge) et de Type 2 (parpaing) respectivement.

Afin de réduire la charge de refroidissement de la cellule du bâtiment, l'isolation du toit (X_3) devrait être augmentée en raison du signe négatif de son coefficient. Ce résultat est en accord avec les climats chauds semi-arides. Cependant, les facteurs dont les coefficients sont de signes positifs, à savoir l'isolation de la façade principale (X_1), l'isolation du sol (X_2),

l'isolation des murs (X_4), le volume du bâtiment (X_5) et le TGBV (X_6) doivent être réduits et contrôlés. Ces résultats sont valables pour les deux types de matériaux de construction. Aussi, il convient de souligner que, selon le diagramme de Pareto (Figs. 25), le TGBV (X_6), l'isolation de la toiture (X_3) et l'isolation de la façade principale (X_1) sont les trois facteurs prépondérants à maîtriser pour réduire la charge de refroidissement de la cellule dans le cas du climat chaud de Marrakech. En outre, le facteur d'orientation du bâtiment (X_7) influe le moins sur la demande de refroidissement du bâtiment avec un faible coefficient de -0.14 et -0.09 respectivement pour les matériaux de construction de Type1 (brique rouge) et de Type2 (parpaing). Rappelons que les expériences sont menées sur une cellule de bâtiment exposée au rayonnement solaire, sans aucun bâtiment voisin, sans ombrage sur la surface vitrée. Cela a été reflété dans les résultats, par la prépondérance du TGBV (X_6) avec un taux de 75% et 78% de l'information liée à la charge de refroidissement selon les matériaux de construction de Type1 et Type2 respectivement.

On peut en conclure que, malgré la modification du matériau du bâtiment, les résultats confirment la dominance de trois facteurs, avec une légère différence dans leur ordre d'importance d'un matériau de construction à l'autre. En fait, pour le Type1, le classement est le suivant : le TGBV (X_6), l'isolation du toit (X_3) puis l'isolation de la façade principale (X_1), tandis que pour le Type 2 l'ordre est: X_6 , X_1 et X_3 .

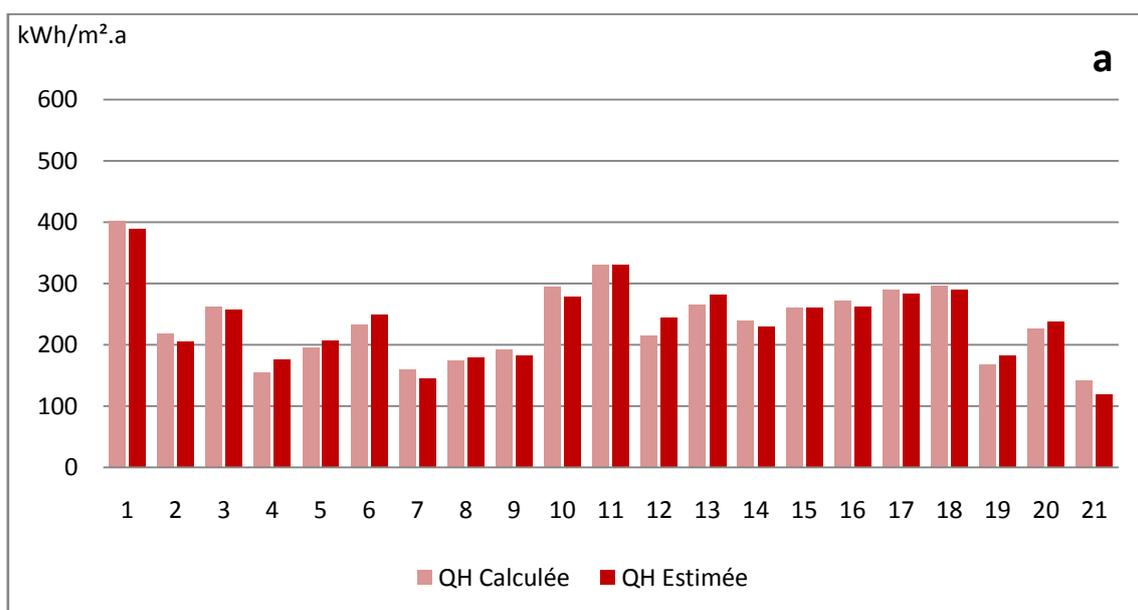
IV.2. Charges de chauffage

En ce qui concerne la charge de chauffage de la cellule de bâtiment étudiée, les modèles mathématiques correspondants sont donnés par les équations III.3-4 pour les matériaux de construction de Type1 et de Type2 respectivement,

$$Q_H = 388.1 - 30.3 * X_1 + 8.2 * X_2 - 40.9 * X_3 - 61.1 * X_4 - 1.5 * X_5 + 172.0 * X_6 + 0.12 * X_7 \quad \text{Eq. III.3}$$

$$Q_H = 545.9 - 66.4 * X_1 + 10.7 * X_2 - 24.4 * X_3 - 218.9 * X_4 - 1.9 * X_5 + 271.5 * X_6 + 0.04 * X_7 \quad \text{Eq. III.4}$$

Les Figures 26 présentent les charges de chauffage annuelles calculées et estimées de la cellule de bâtiment étudiée.



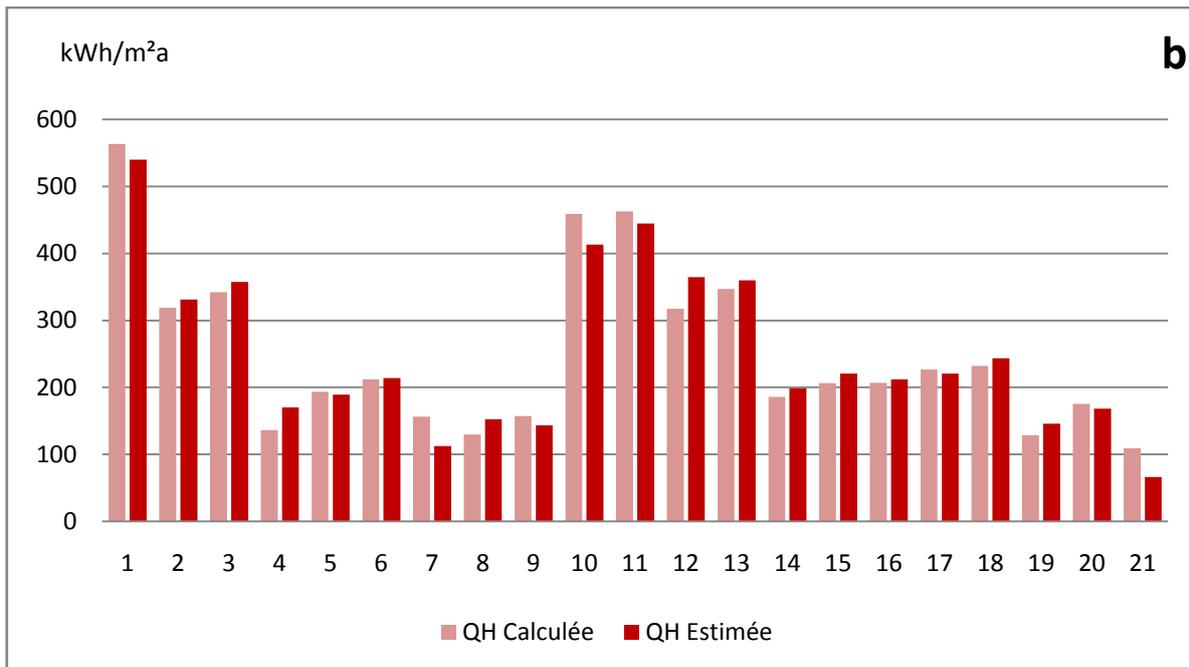


Figure 26. Charges de chauffage de la cellule de bâtiment étudiée pour les matériaux de construction Type1 (a) et Type2 (b)

A partir de ces figures, on constate que toutes les charges de chauffage dépassent $100 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a}$. De plus, celle dans le cas de murs non isolés des configurations 1 – 3 et 10 – 13 (Fig. 26-b, Tableau 12) est considérablement plus élevée dans le cas du matériau de construction de Type2 (parpaing). Ceci s'explique par la conductivité thermique élevée et par la faible inertie thermique du parpaing par rapport à celles de la brique rouge (Tableau 9). En effet, grâce à son inertie thermique relativement élevée, la brique rouge présente l'avantage de stocker les gains solaires. De plus, la brique rouge dont la diffusivité thermique est beaucoup plus faible, transmet lentement la chaleur provenant du rayonnement solaire par rapport au parpaing fournissant ainsi un apport de chaleur à l'environnement intérieur pendant la nuit. De plus, le parpaing étant moins isolant que la brique rouge, favorise les pertes thermiques du bâtiment. En outre, pour les configurations 4 - 9 et 14 – 21 (murs isolés, Tableaux 11-12), la charge de chauffage de la cellule construite par de la brique rouge est légèrement supérieure à celle construite par du parpaing. D'une part, l'isolation thermique réduit les pertes thermiques du bâtiment; d'autre part, l'inertie thermique relativement élevée de la brique rouge entraîne des besoins de chauffage plus élevés de la cellule de bâtiment.

En outre, les Figures 26 montrent que pour le matériau de construction de Type1, 80% des expériences présentent un résidu absolu inférieur à $15 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a}$ pour une charge moyenne de chauffage de $238 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a}$, ce qui conduit à un résidu relatif de 6 %. Le résidu relatif correspondant pour le matériau de construction de Type 2 est inférieur à 5%, pour 60% des expériences dont la charge de chauffage est estimée inférieure à $15 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a}$ pour une charge de chauffage moyenne de $251 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a}$.

Les Figures 27 présentent le diagramme de Pareto des coefficients du modèle polynomial pour la cellule de bâtiment en termes de charge de chauffage.

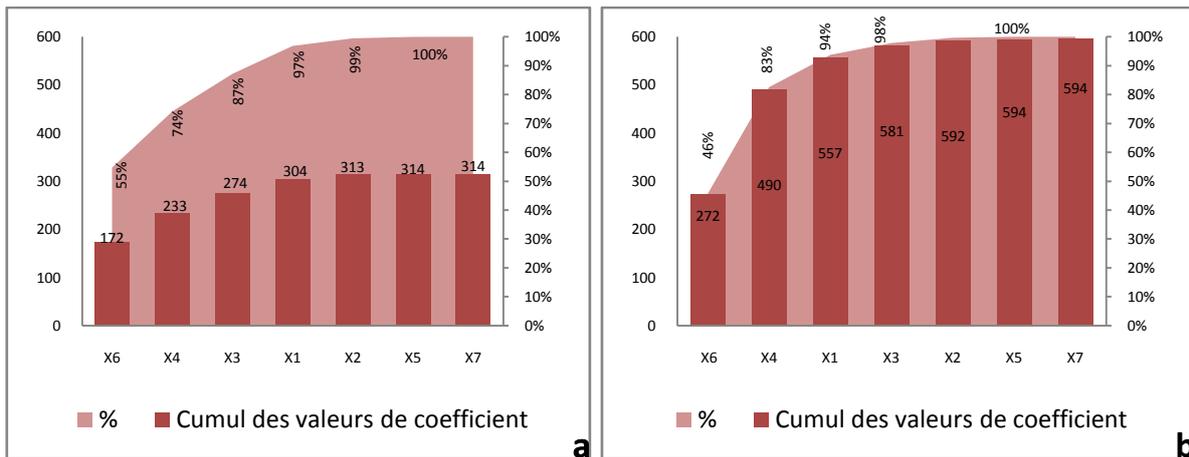


Figure 27. Diagrammes de Pareto des coefficients des modèles polynomiaux de la charge de chauffage pour les Type1 (a) et Type2 (b)

Pour le matériau de construction de Type1, 87% de l'information associée à la charge de chauffage est représentée par les trois premiers paramètres du diagramme de Pareto: le TGBV (X_6), l'isolation des murs (X_4) et l'isolation du toit (X_3) (Fig. 27-a), tandis que pour le matériau de construction de Type2, 94% de l'information relative à la charge de chauffage est exprimée par les trois premiers paramètres: le TGBV (X_6), l'isolation des murs (X_4) et l'isolation de la façade principale (X_1). En plus de cela, l'isolation thermique de la façade principale (X_1) pour le Type1 et l'isolation de la toiture (X_3) pour le Type2 peuvent améliorer ces pourcentages pour atteindre respectivement 97% et 98%.

Afin de réduire la charge de chauffage de la cellule du bâtiment, les paramètres «Xi» du bâtiment ayant des coefficients «bi» prenant des signes négatifs, en particulier X_1 , X_3 et X_4 , devraient être augmentés. Cependant, les facteurs dont les coefficients sont de signes positifs à savoir X_6 et X_2 devraient être réduits. Ceci est valable pour les deux types de matériaux de construction.

Selon le diagramme de Pareto (Figs. 27), trois paramètres doivent être contrôlés afin de réduire la charge de chauffage. Deux de ces paramètres sont communs aux deux matériaux de construction considérés ; le TGBV (X_6) et l'isolation thermique des murs (X_4). Le troisième paramètre est l'isolation thermique du toit (X_3) et l'isolation thermique de la façade (X_1) respectivement pour les matériaux de construction de Type1 et de Type2. La comparaison avec le diagramme de Pareto des coefficients de régression polynomiale de la charge de refroidissement de la cellule conduit à la conclusion que la réduction de celle-ci peut être obtenue par le contrôle de trois paramètres : le TGBV (X_6), l'isolation du toit (X_3) et l'isolation de la façade principale (X_1). L'isolation thermique des autres murs de la cellule du bâtiment (X_4), même si elle influence fortement la charge de chauffage, a un faible impact sur la charge de refroidissement. De plus, l'impact de ce facteur est ambivalent puisque son coefficient (b_4) est négatif dans la régression polynomiale de charge de chauffage (Eqs. III. 1-2) alors qu'il est positif dans les modèles mathématiques de la charge de refroidissement (Eqs. III. 3-4). Cela signifie que l'augmentation de l'isolation thermique des murs entraîne une augmentation de la charge de refroidissement du bâtiment en raison de la surchauffe estivale. On peut conclure que, dans le climat chaud semi-aride considéré dans cette étude, l'isolation

thermique des murs du bâtiment ne devrait pas être aussi élevée que celle du toit. D'autres études ont récemment estimé que la technique d'isolation thermique des murs par une lame d'air de 5 à 7cm d'épaisseur est suffisante pour les bâtiments dans les climats chauds comme celui de Marrakech, alors que le toit doit être isolé avec au moins 6 cm d'épaisseur de matériau d'isolation standard adéquat, tel que le polystyrène extrudé (Sobhy et al. 2017, Drissi et Benhamou 2018).

IV.3. Précision des modèles mathématiques élaborés

La précision des modèles élaborés est évaluée par les coefficients de corrélation (R) et le critère de Durbin-Watson (DW). Les coefficients de corrélation des modèles de régression linéaire de la charge de refroidissement sont respectivement de 0.95 et 0.92 pour les matériaux de construction Type1 et de Type2. Leurs valeurs des critères de Durbin-Watson sont 1.168 et 1.582 respectivement. Les Figures 28 montrent la corrélation entre les valeurs de la charge de refroidissement prédites ou estimées par les modèles mathématiques et celles calculées à l'aide de TRNSYS.

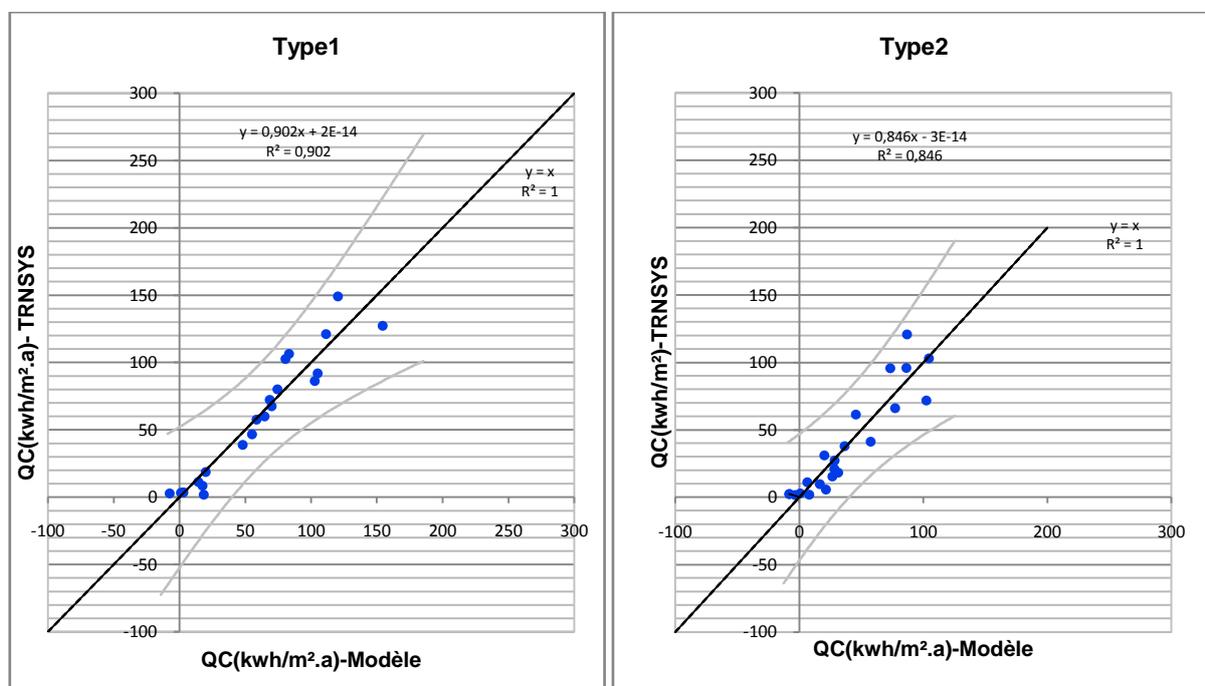


Figure 28. Courbes de corrélation des charges de refroidissement

En ce qui concerne les charges de chauffage, la précision des modèles de régression peut être évaluée par les coefficients de corrélation de 0.97 et 0.98 pour les matériaux de construction Type1 et de Type2 respectivement. Les Figures 29 présentent la corrélation entre les valeurs estimées des charges de chauffage et celles calculées. Les valeurs des critères de Durbin-Watson sont 1.740 et 1.508 pour les matériaux de construction de Type 1 et de Type 2 respectivement. Ainsi, on peut conclure que les modèles mathématiques proposés prédisent les charges de chauffage / refroidissement de la cellule du bâtiment avec une précision acceptable.

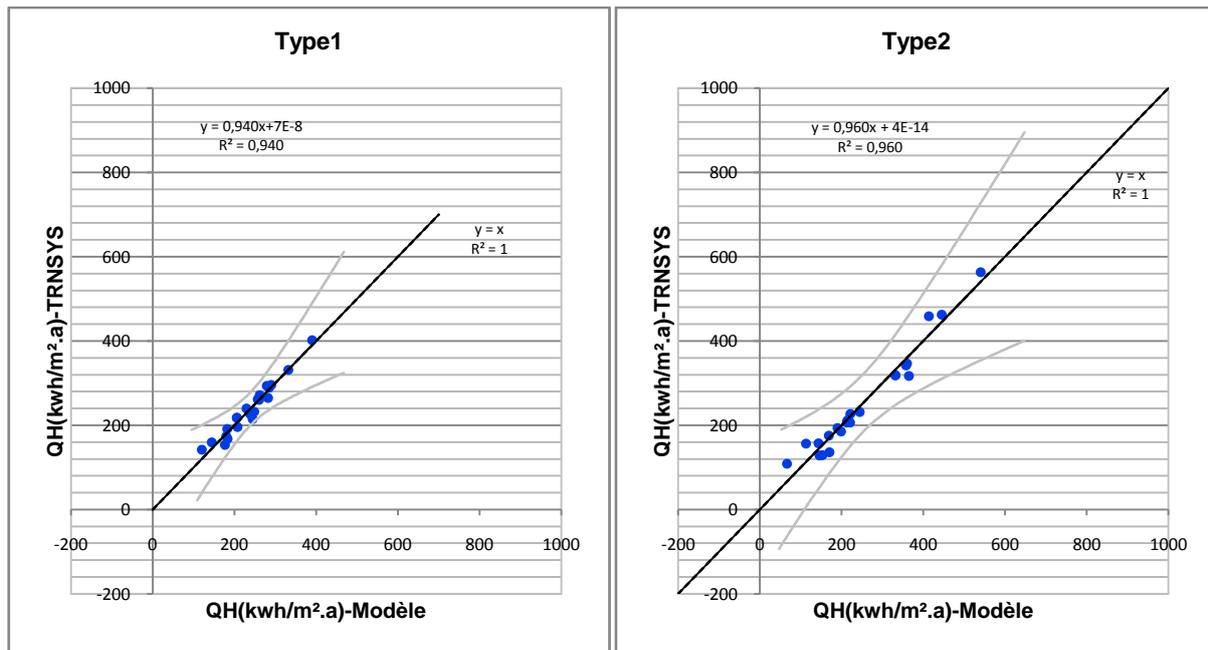


Figure 29. Courbes de corrélation des charges de refroidissement

De plus, les tests de Durbin-Watson pour les charges de chauffage/refroidissement des deux Types de matériaux de construction sont plutôt proches de 2 ($1.1 \leq DW \leq 1.7$) ce qui signifie l'absence d'autocorrélation entre les erreurs successives e_{i-1} et e_i des modèles mathématiques élaborés (cf. §. Chapitre I).

IV.4. Analyse des coefficients des modèles polynomiaux

Les coefficients (b_1 à b_7) des modèles polynomiaux désignent l'importance de chacun des paramètres étudiés (X_1 à X_7). En effet, plus le coefficient (b_i) est élevé en valeur absolue, plus le facteur (X_i) lui correspondant est décisif dans la valeur de la charge de chauffage/refroidissement et donc, de manière générale, dans l'efficacité énergétique du bâtiment. Comme il a été signalé précédemment, pour assurer une réduction de la charge thermique de la cellule du bâtiment, les facteurs (X_i) ayant des coefficients (b_i) à signes négatifs devraient être augmentés, cette augmentation se répercuterait négativement sur la somme des termes du polynôme (modèle) permettant ainsi une réduction de la charge résultante d'autant plus importante que l'augmentation du facteur est consistante. Inversement, les facteurs dont les coefficients sont de signes positifs devraient être réduits. Ceci est valable pour les deux types de matériaux de construction.

Cependant, il est à noter que l'ajustement des facteurs du bâtiment devrait obéir à d'autres limites ou contraintes relatives à la faisabilité de telle ou telle réduction ou augmentation d'un facteur ou d'un autre. D'autre part, les diagrammes de Pareto permettent d'hierarchiser l'intervention au moment de la conception des facteurs étudiés. Ainsi le concepteur se contentera d'intervenir sur seulement 2 ou trois facteurs pour améliorer la charge thermique du bâtiment à des pourcentages assez élevés. Les Figures 30 montrent les signes des différents facteurs des modèles polynomiaux normalisés pour les charges de chauffage/refroidissement et pour les deux types de matériaux de construction. Cette méthode de prédiction permet alors des économies substantielles en matière de focalisation des

techniques passives à mettre en œuvre du moins dans un contexte théorique. Dans le chapitre suivant, nous nous proposons de vérifier l'efficacité de ces techniques.

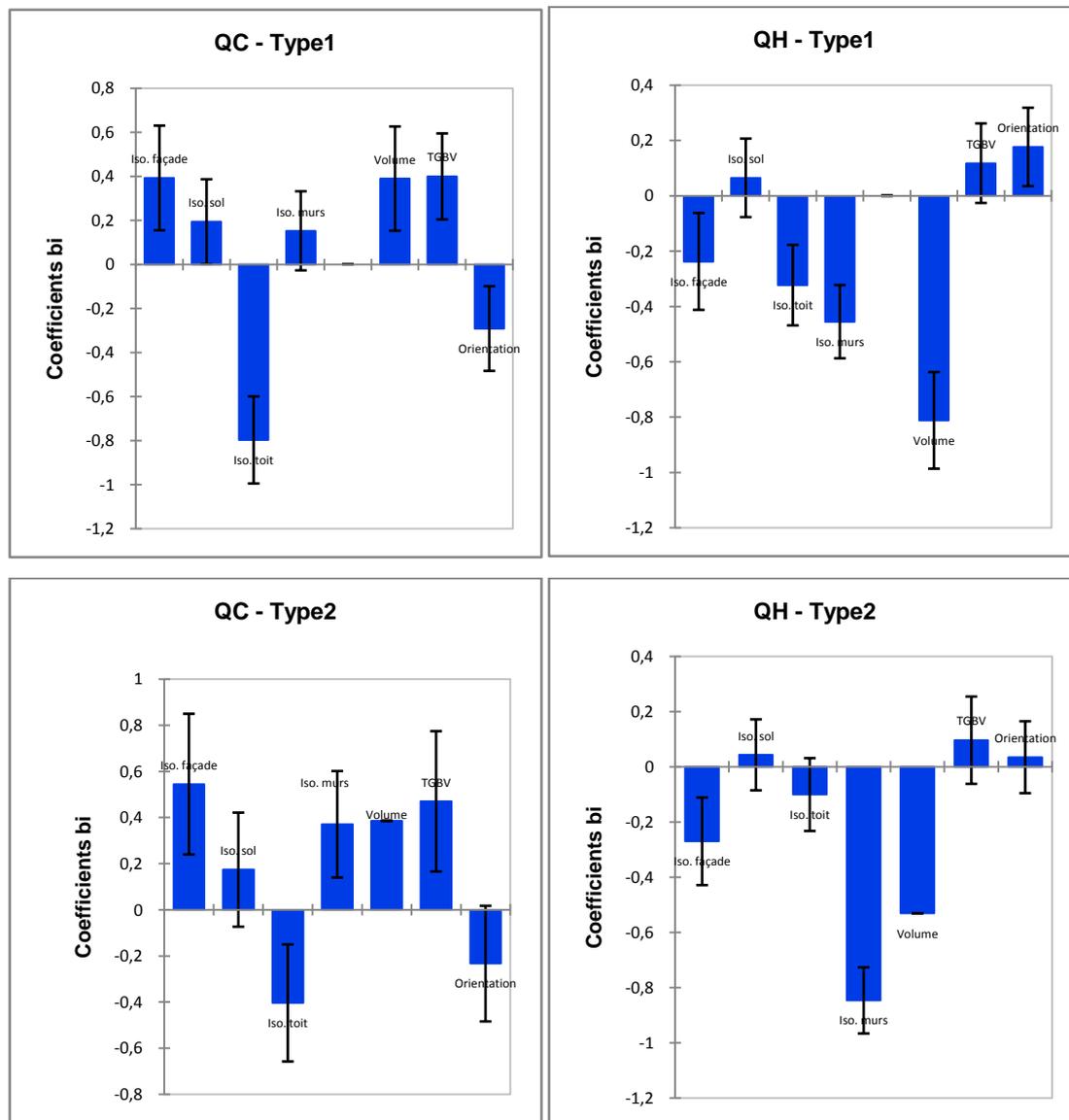


Figure 30. Valeurs des coefficients normalisés des modèles polynomiaux

V. Conclusion

Cette étude vise à identifier les paramètres des bâtiments ayant un impact important sur les charges de chauffage et de refroidissement dans les climats chauds semi-arides. À cette fin, quatre modèles de régression linéaire multiple ont été construits sur la base des résultats de simulations dynamiques à l'aide de TRNSYS pour plusieurs combinaisons de paramètres sélectionnés de la cellule d'un bâtiment. La méthode DOE a été utilisée pour minimiser le nombre de simulations dynamiques à effectuer. Les coefficients de corrélation des modèles de régression de charge thermique proposés sont supérieurs à 0.92 et les valeurs de critères Durbin-Watson correspondantes sont supérieures à 1.168.

L'analyse des résultats permet de conclure que, dans le climat semi-aride de Marrakech (Maroc), les paramètres du bâtiment ayant un impact important sur sa charge de

refroidissement sont principalement le Taux Global des Baies Vitrées (TGBV), l'isolation thermique du toit et de la façade. Le contrôle de ces trois paramètres permet d'améliorer une partie importante de la charge de refroidissement de la cellule du bâtiment construite avec la brique d'argile rouge et le parpaing. De plus, la charge de chauffage de la cellule du bâtiment peut être diminuée grâce au contrôle de trois paramètres; Parmi eux, deux sont communs aux deux matériaux de construction considérés: le TGBV et l'isolation thermique des murs. Le troisième paramètre est l'isolation thermique du toit pour la brique d'argile rouge et l'isolation de la façade principale pour le parpaing. Il convient également de noter que l'isolation thermique des murs a un impact ambivalent. En effet, cela permet de réduire considérablement la charge de chauffage du bâtiment; cependant, il provoque une surchauffe en période estivale.

Les modèles proposés offrent la simplicité et la rapidité au stade de la conception des bâtiments. Ces modèles peuvent fournir un soutien important pour la conception de bâtiments à faible consommation d'énergie dans les climats chauds tout en sachant qu'un futur travail est nécessaire pour considérer les paramètres et les typologies d'autres bâtiments ainsi que d'autres climats afin de construire des modèles mathématiques plus généralisés. Toutefois, l'analyse menée dans ce chapitre nous éclaire sur la méthodologie à suivre dans le chapitre suivant qui portera sur une étude expérimentale sur un bâtiment réel dans le même climat de Marrakech et dont nous étendrons l'examen des performances thermiques aux cinq autres climats du Maroc.

CHAPITRE IV : SIMULATION DYNAMIQUE D'UN APPARTEMENT ET PROPOSITIONS POUR AMELIORER SES PERFORMANCES ENERGETIQUES DANS LES SIX ZONES CLIMATIQUES DU MAROC

I. Introduction

Dans le chapitre précédent nous avons examiné l'effet de certains systèmes passifs sur l'efficacité énergétique d'un élément de bâtiment dans les conditions climatiques de Marrakech. Il faudrait préciser que ce chapitre a constitué une base théorique permettant de s'orienter vers les facteurs les plus influents sur les charges de chauffage / refroidissement au sein des bâtiments mais aussi de pouvoir en rajouter d'autres afin de peaufiner la méthodologie de conception d'une construction bioclimatique. En effet, dans le présent chapitre nous élargirons les résultats de l'étude théorique en rajoutant d'autres facteurs et d'autres conditions climatiques et ce dans un bâtiment grandeur nature. Une analyse des simulations thermiques dynamiques a été réalisée pour déterminer l'effet de ces paramètres sur les charges de chauffage/refroidissement ainsi que sur les heures d'inconfort au sein du bâtiment étudié. À cette fin, un appartement situé à Marrakech a été considéré comme un cas d'étude pour construire un modèle de simulation bien validé en utilisant les résultats expérimentaux du monitoring hivernal et estival. Ce modèle est ensuite utilisé pour évaluer l'impact des techniques étudiées sur les performances thermiques et les économies d'énergie de l'appartement considéré dans les six climats. Dans ce chapitre, nous tenterons d'offrir un outil, validé expérimentalement, pour la simulation thermique dynamique des bâtiments. Cet outil, de par la multitude des paramètres qu'il met en œuvre et les conditions climatiques qu'il prend en considération, peut être appliqué à d'autres bâtiments dans des climats similaires. De plus, suite aux résultats obtenus, et pour chaque climat, nous avons proposé les combinaisons idéales des techniques passives et semi passive à même d'assurer une efficacité énergétique substantielle au sein du bâtiment.

L'objectif principal de cette partie est d'analyser et évaluer l'effet de certaines techniques passives et semi-passives sur la performance énergétique d'un appartement typique dans différents climats allant du climat froid au climat désertique. A cette fin, une étude de cas typique (appartement) est considérée dans la ville de Marrakech. Un modèle numérique de cet appartement est développé sous l'environnement du logiciel TRNSYS. Ce modèle est validé en comparaison avec les résultats d'un suivi expérimental hivernal et estival de longue durée (113 jours). Ensuite, des simulations dynamiques thermiques sont réalisées pour évaluer l'impact des techniques étudiées sur la performance thermique et l'économie d'énergie de l'appartement considéré dans six climats: Atlantique, Méditerranéen, Continental, Froid, Semi-aride et Désertique. Le choix de ces climats vient du fait que nous nous proposons de mener une étude générale sur toutes les zones climatiques marocaines, telles qu'elles sont définies par l'Agence Marocaine pour l'Efficacité Énergétique. De plus, le choix de ces climats nous permet d'effectuer une évaluation du Règlement Thermique des Constructions au Maroc (RTCM, 2014), qui est actuellement à ses premières étapes de mise en œuvre. Plus précisément, cette partie vise à examiner l'impact des caractéristiques thermophysiques de l'enveloppe (l'isolation

thermique, l'absorptivité), la ventilation mécanique contrôlée (VMC), l'orientation et le couplage du bâtiment au sol sur les performances thermiques et les économies d'énergie de cet appartement en tenant compte des scénarios d'occupation dans les six climats précités.

Comme nous l'avons signalé dans la revue bibliographique, l'isolation thermique du plancher bas (l'importance de l'inertie du sol), la surchauffe à cause de l'isolation thermique de l'enveloppe dans certains climats ainsi que le coefficient d'absorption des murs extérieurs et de la toiture sont des paramètres qui ont reçu peu d'attention dans la littérature. Dans cette étude, nous avons essayé d'accorder un soin particulier à ces paramètres et de les inclure dans notre évaluation des performances thermiques du bâtiment étudié. En ce qui concerne la ventilation mécanique contrôlée, nous avons essayé de trouver la cause de son efficacité dans certains climats mais pas dans d'autres ainsi que pendant l'été mais pas l'hiver : le nombre d'heures de confort (heures où la température de l'air ambiant est comprise entre 20°C et 26°C). En plus des économies d'énergie à réaliser suite à la mise en œuvre des différentes mesures proposées, nous n'avons pas omis le confort thermique dans notre étude tant en hiver qu'en été. Aussi, nous avons essayé d'analyser l'influence de tous les paramètres capables de qualifier un bâtiment d'énergétiquement efficace.

II. Description de la météorologie

Les climats étudiés dans cette partie sont représentés par les six zones climatiques du Maroc (RTCM 2014) caractérisées par une grande variété météorologique. Les zones dénommées CZ1 à 6 sont respectivement Agadir, Tanger, Fès, Ifrane, Marrakech et Errachidia. Dans le Tableau 13 sont décrites les caractéristiques principales des climats en question.

Tableau. 13. Description des climats étudiés (Meteonorm 2014)

Zones	Villes	Type du climat	Description	T _{min} (°C)	T _{moy} (°C)	T _{max} (°C)
CZ1	Agadir	Atlantique	Climat tempéré même en hiver, parfois humide et venteux. Température quasi-constante toute l'année.	3.5	20.8	39.0
CZ2	Tanger	Méditerranéen	Hiver humide et frais. Été relativement chaud.	4.3	17.7	34.2
CZ3	Fès	Continental	Hiver froid avec des précipitations relativement abondantes. Été chaud.	0.5	18.4	41.5
CZ4	Ifrane	Froid	Climat très humide et froid. En hiver où il neige abondamment.	-5.8	11.9	32.8
CZ5	Marrakech	Semi-aride	Hiver froid et été très chaud marqué par de fortes variations de température.	2.6	20.7	43.3
CZ6	Errachidia	Désertique	Climat marqué par de fortes variations de température. L'été est très chaud, l'hiver très froid	-0.9	20.4	44.1

En effet, dans le cadre de l'élaboration du RTCM, l'AMEE a subdivisé le territoire marocain en ces zones climatiques homogènes en se basant sur l'analyse des données climatiques enregistrées par 37 stations météorologiques sur la période de 1999-2008 (10 ans).

La délimitation des zones a été effectuée selon le critère du nombre de degrés-jours d'hiver et le nombre de degrés-jours d'été. La carte du zonage final qui comprend les six zones climatiques est représentée dans la Figure 31 (RTCM 2014).

Par ailleurs, les données utilisées dans cette étude sont les données météorologiques d'une année typique (TMY), disponibles dans la base de données Meteonorm, qui incluent la température ambiante horaire, la vitesse du vent, la direction du vent, le taux d'humidité relative et l'irradiation solaire globale sur un plan horizontal. Le Tableau 13 présente quelques caractéristiques de ces climats.

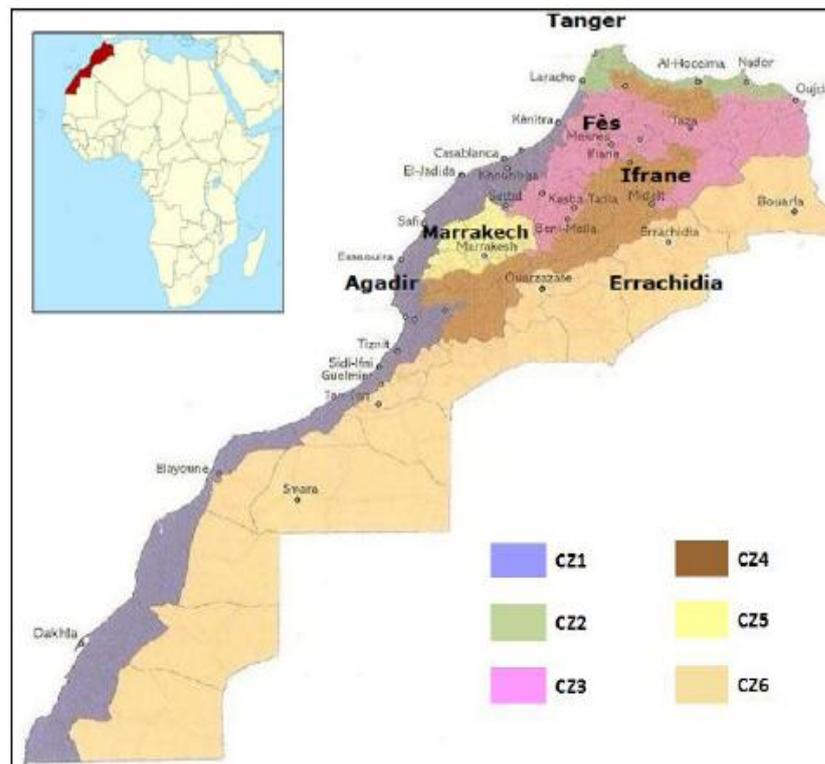


Figure 31. Zones climatiques du Maroc selon le RTCM (RTCM 2014)

D'autre part, la Figure 32 montre l'évolution de la température ambiante ainsi que l'intensité du rayonnement global incident sur un plan horizontal selon la base de données (Meteonorm 2014) pour les six zones climatiques du Maroc durant une année météorologique typique. A partir de cette figure, on constate que toutes les zones présentent leurs températures et leurs rayonnements maximum au mois de juillet sauf Agadir qui connaît l'intensité du rayonnement la plus élevée en mai. De plus, les zones d'Agadir et de Tanger se caractérisent par une stabilité de la température ambiante durant toute l'année avec une faible amplitude de variation mais une légère augmentation en été à Tanger. Les autres villes présentent pratiquement le même profil de température annuelle sauf qu'à Ifrane le maximum est aux alentours de 32°C tandis qu'il est supérieur à 40°C à Marrakech, Fès et Errachidia. Les minimums de température en début et en fin d'année sont remarquablement plus faibles à Ifrane suivie d'Errachidia. Quant au rayonnement global, toutes les zones, en été, présentent des valeurs maximales d'environ 800MJ/m², tandis qu'en hiver, à Ifrane, le rayonnement est le plus faible (250MJ/m²) suivi de Tanger (280MJ/m²) et de Fès (300MJ/m²), les autres villes, Marrakech, Errachidia et Agadir connaissent des taux de rayonnement relativement élevés de l'ordre de (400MJ/m²).

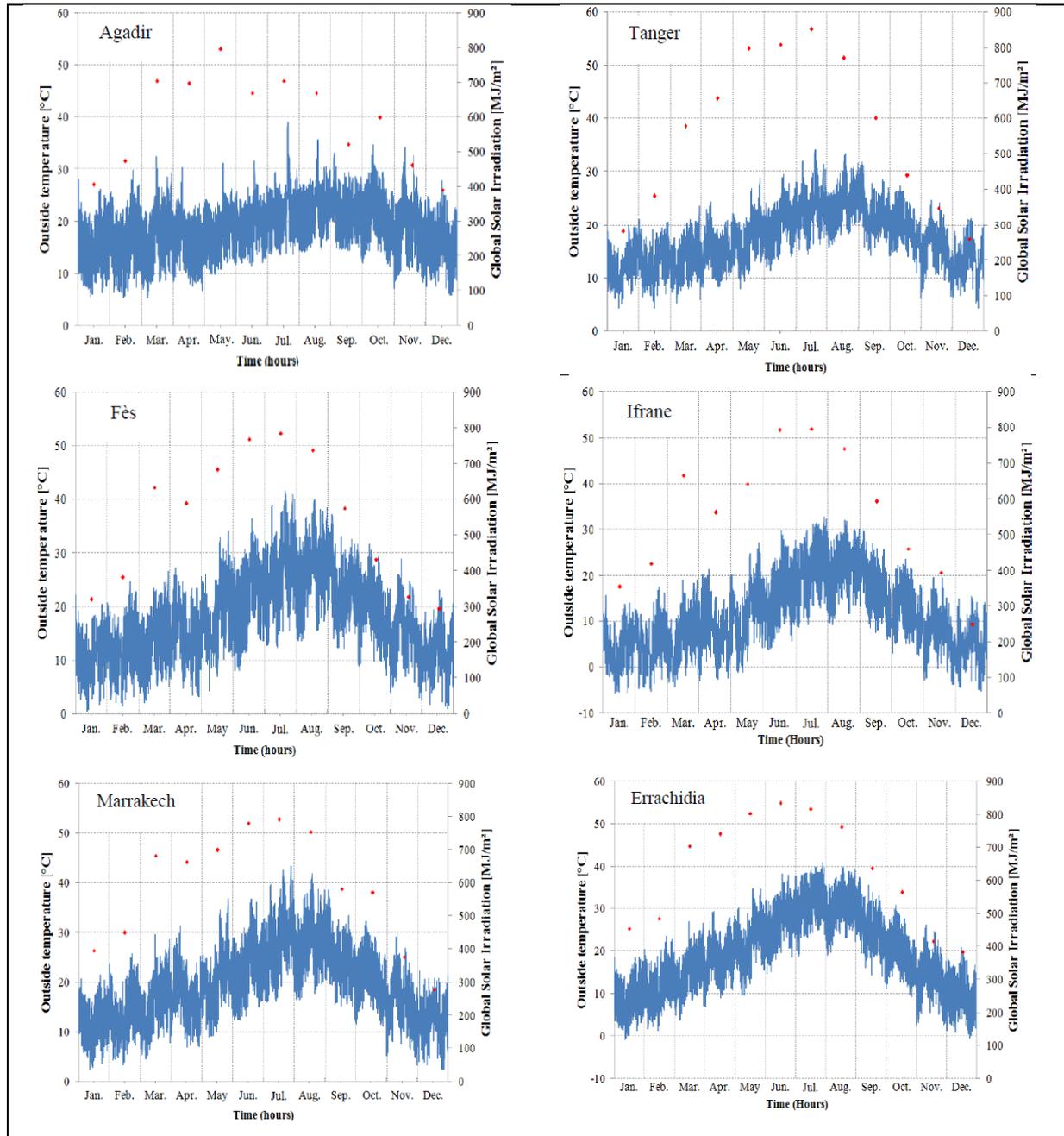


Figure 32. Température ambiante horaire (courbe) et rayonnement solaire global mensuel sur un plan horizontal (points) pour les six zones climatiques du Maroc durant une année météorologique typique (Meteonorm 2014)

III. Hypothèses de simulation et suivi expérimental

Des simulations dynamiques de l'appartement ont été réalisées en utilisant une modélisation multi-zone au moyen du modèle de bâtiment multi-zone (Type 56) du logiciel TRNSYS avec un pas de temps d'une heure (Flory-Celini 2008 ; Beckman et al. 2016 ; Buratti et al. 2013 ; Sobhy et al. 2017a). Comme indiqué sur le plan d'architecte (Fig. 18), l'appartement est subdivisé en six zones thermiques : la cuisine (zone thermique Z1), les trois chambres à coucher (Z2, Z4 et Z6), le couloir (Z3) et le salon (Z5). Afin de valider le modèle dynamique de l'appartement, les résultats de simulation ont été comparés aux résultats

expérimentaux pendant que l'appartement était inoccupé. À cette fin, les hypothèses suivantes ont été prises en compte :

- La température et l'humidité initiales de l'air à l'intérieur de toutes les zones thermiques sont respectivement prises égales à 20°C et 50%;
- Pas de gain de chaleur interne (appartement inoccupé);
- Les portes et les fenêtres ainsi que les volets roulants ont été fermés et tous les équipements électriques et à gaz ont été éteints;
- Un taux d'infiltration constant de 0,5 ACH est considéré pour toutes les zones.

Les résultats expérimentaux des deux campagnes de monitoring de l'appartement ont été réalisés pendant l'hiver et l'été 2014 pendant que l'appartement était inoccupé. La température et l'humidité de l'air intérieur ont été enregistrées toutes les 12 minutes à l'aide des enregistreurs de données (Dataloggers TESTO174H) suspendus au plafond à 1.5 m du sol au milieu de chaque zone thermique, comme indiqué sur les photos pour la zone thermique Z3 (Fig. 33).

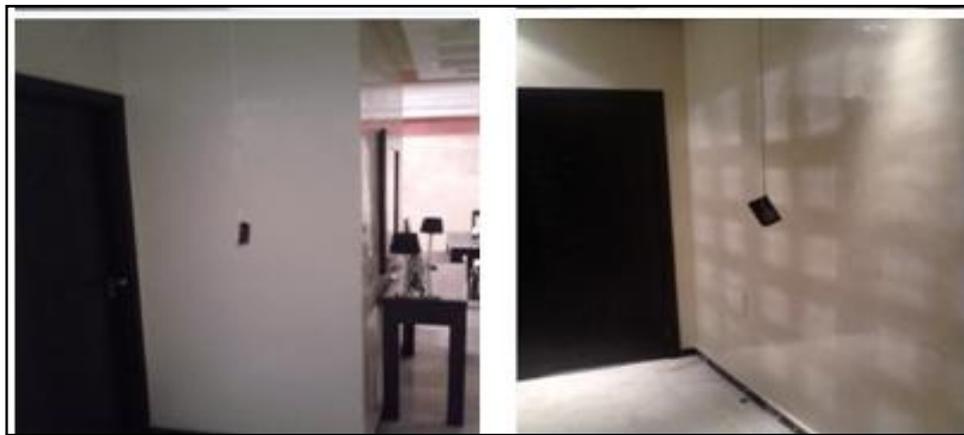


Figure 33. Positionnement des dataloggers TESTO174H (dans la zone thermique Z3)

Les incertitudes de mesure des enregistreurs de données sont de 0.5°C et 3% respectivement pour la température et l'humidité, selon le fabricant. De plus, les données météorologiques locales incluant la température ambiante, le rayonnement solaire global sur un plan horizontal et la vitesse et la direction du vent ont été enregistrées *in situ* à l'aide d'une station météorologique BWS200. La durée globale du suivi a été de 113 jours, du 01/01/2014 au 18/02/2014 (hiver) et du 30/06/2014 au 31/08/2014 (été). Cependant, pour des raisons de clarté, la comparaison des résultats de la simulation avec ceux mesurés est présentée pendant les cinq jours représentant la semaine la plus froide en hiver de l'année 2014 (du 12 au 16 janvier 2014) et les cinq jours correspondant à la semaine la plus chaude en été de la même année (du 13 au 17 juillet 2014). Les Figs. 34 (zone 3) et Figs. 35 (zone 4) présentent les températures ambiantes ainsi que les températures mesurées (par dataloggers) et simulées (par TRNSYS) pour les deux zones thermiques Z3 et Z4. Le choix de ces deux zones est basé sur le fait qu'elles représentent respectivement le meilleur et le pire des cas en termes d'écart de températures mesurées et simulées.

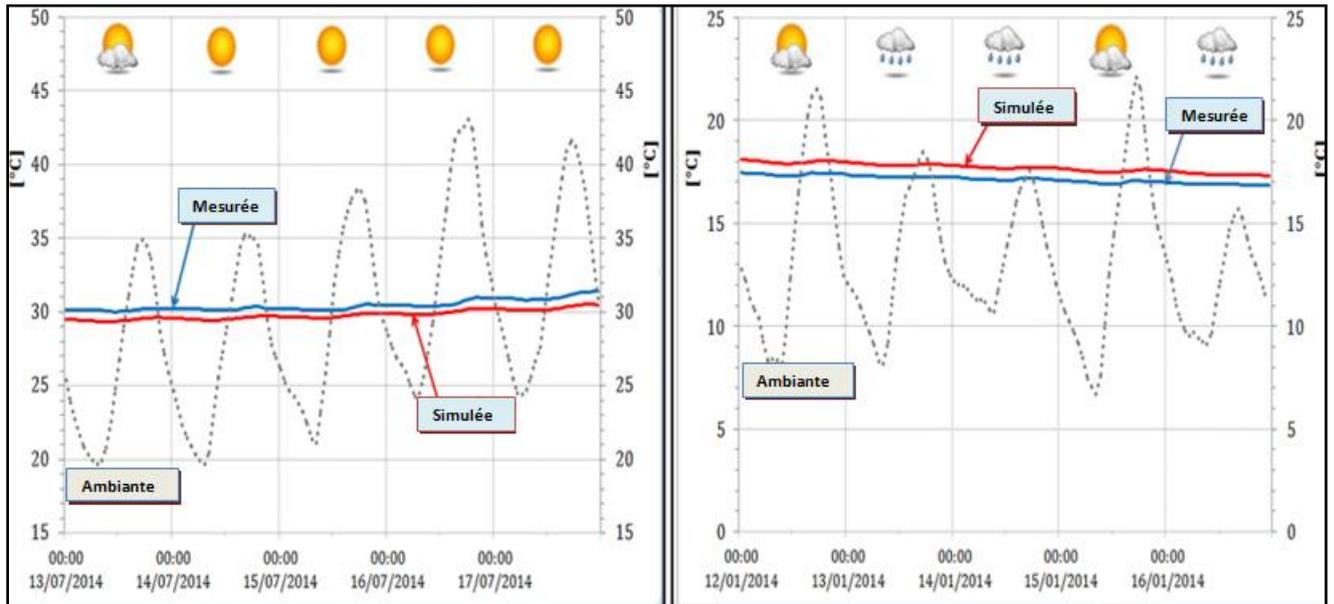


Figure 34. Températures simulées, mesurées (axe de gauche) et ambiantes (axe de droite) pendant la semaine la plus chaude (à gauche) et la semaine la plus froide (à droite) de l'année 2014 pour la zone thermique Z3

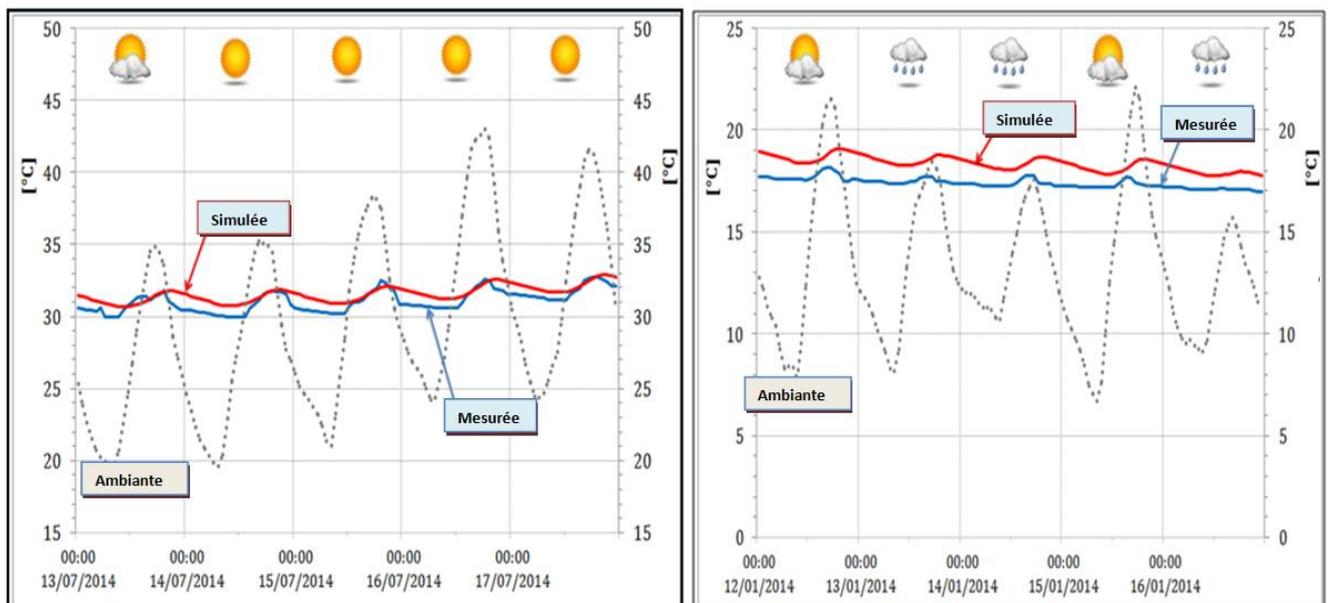


Figure 35. Températures simulées, mesurées (axe de gauche) et ambiantes (axe de droite) pendant la semaine la plus chaude (à gauche) et la semaine la plus froide (à droite) de l'année 2014 pour la zone thermique Z4

La Figure 36 présente la différence absolue maximale entre les températures mesurées et celles simulées au sein des zones thermiques de l'appartement ainsi que la distribution de cette différence. Les écarts présentés et analysés dans cette figure ont été calculés pour toute la période du suivi expérimental (113 jours). Dans l'ensemble, il ressort clairement de cette figure que la majorité des différences entre les températures mesurées et celles simulées ne dépassent pas 1.5 °C. D'autre part, pour certaines zones thermiques de l'appartement, l'écart maximal

entre les températures mesurées et celles simulées par le modèle numérique de TRNSYS est de l'ordre de 0.55 à 0.7°C en hiver et 0.9 à 1.3°C en été (Z2, Z3 et Z5). De plus, à partir de cette figure, l'écart maximal observé entre les températures expérimentales et celles simulées en été et en hiver respectivement pour Z3 est de 0.91°C et 0.65°C, alors qu'il est de 1.13°C et 1.50°C pour Z4. Ainsi, on peut noter que l'écart entre les résultats simulés et expérimentaux est toujours aux alentours de 1°C sauf pour Z4 en hiver et Z5 en été. Par conséquent, le modèle thermique développé à l'aide de TRNSYS peut être considéré comme adéquat pour l'analyse des performances énergétiques et du confort thermique de l'appartement ainsi que pour la conception des stratégies d'économie d'énergie dans les climats considérés.

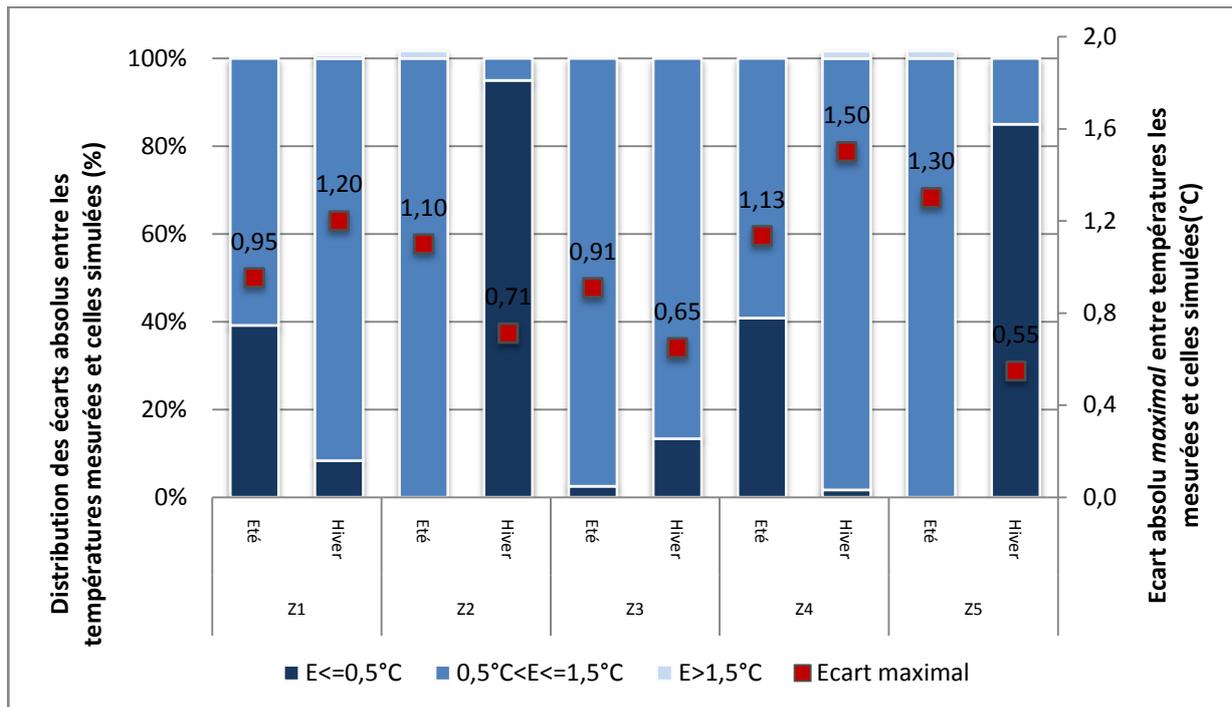


Figure 36. Ecart maximal entre les températures mesurées et celles simulées (Points) et distribution des écarts absolus entre celles-ci (Histogrammes)

III.1. Configurations architecturales, thermophysiques et comportementales

Dans cette section, différentes configurations de l'appartement étudié sont considérées. Chaque configuration correspond à la combinaison de nombreuses techniques passives (simple ou double vitrage, paroi isolée ou non etc.) pour les trois niveaux: Rez de chaussée, étage intermédiaire et dernier étage. Afin d'analyser l'impact des techniques passives et semi-passives considérées sur le comportement thermique et sur les performances énergétiques de l'appartement, onze configurations seront examinées. Les Figures 37-39 présentent une description détaillée de la composition de l'enveloppe de chaque configuration pour trois niveaux: RDC (Figure 37), étage intermédiaire (Figure 38) et dernier étage (Figure 39). Chaque configuration est représentée par un code où X représente l'orientation de la façade de l'appartement (X=W : ouest, X=S : sud). De plus, les simulations thermiques dynamiques seront envisagées dans les six climats du Maroc (RTCM 2014) et pour plusieurs orientations de la façade principale de l'appartement. Les Figure 37-39 présentent aussi les valeurs du coefficient de transmission thermique pour les parois de chacune des configurations. Ces

valeurs sont calculées par TRNSYS en utilisant les grandeurs thermophysiques des matériaux de construction indiquées par BINAYATE (2014), plus de détails sont fournis en Annexe I.

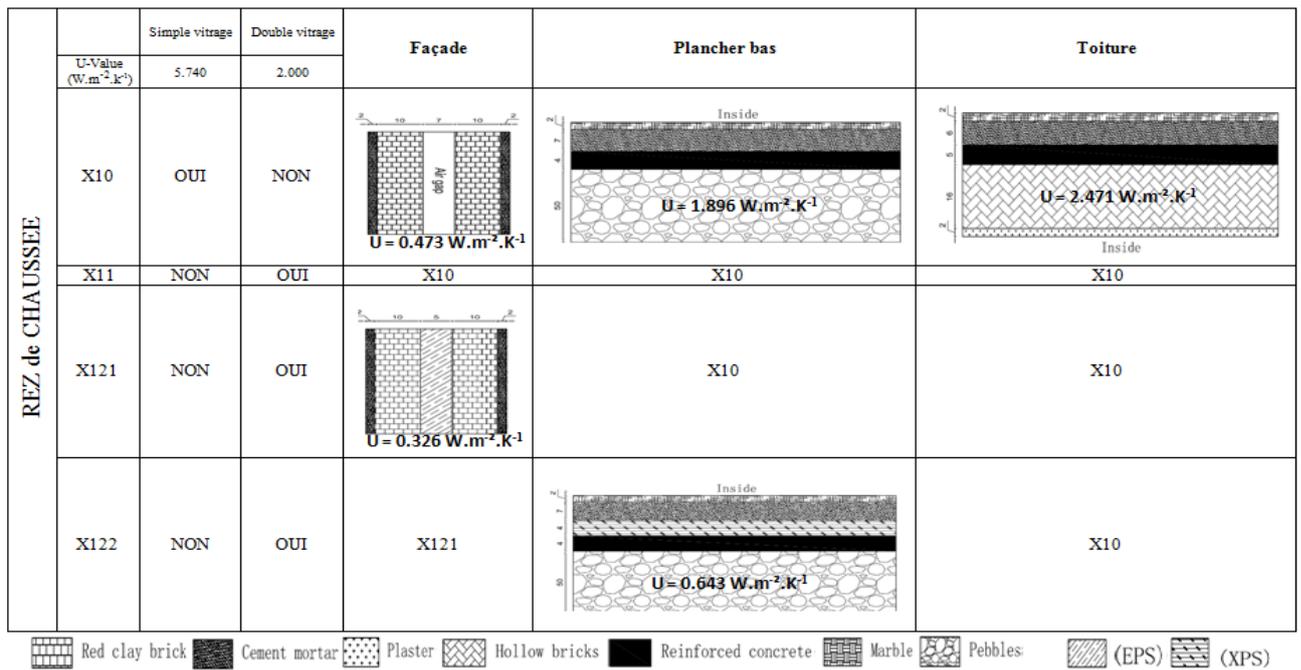


Figure 37. Configurations de l'appartement ADAM au RDC

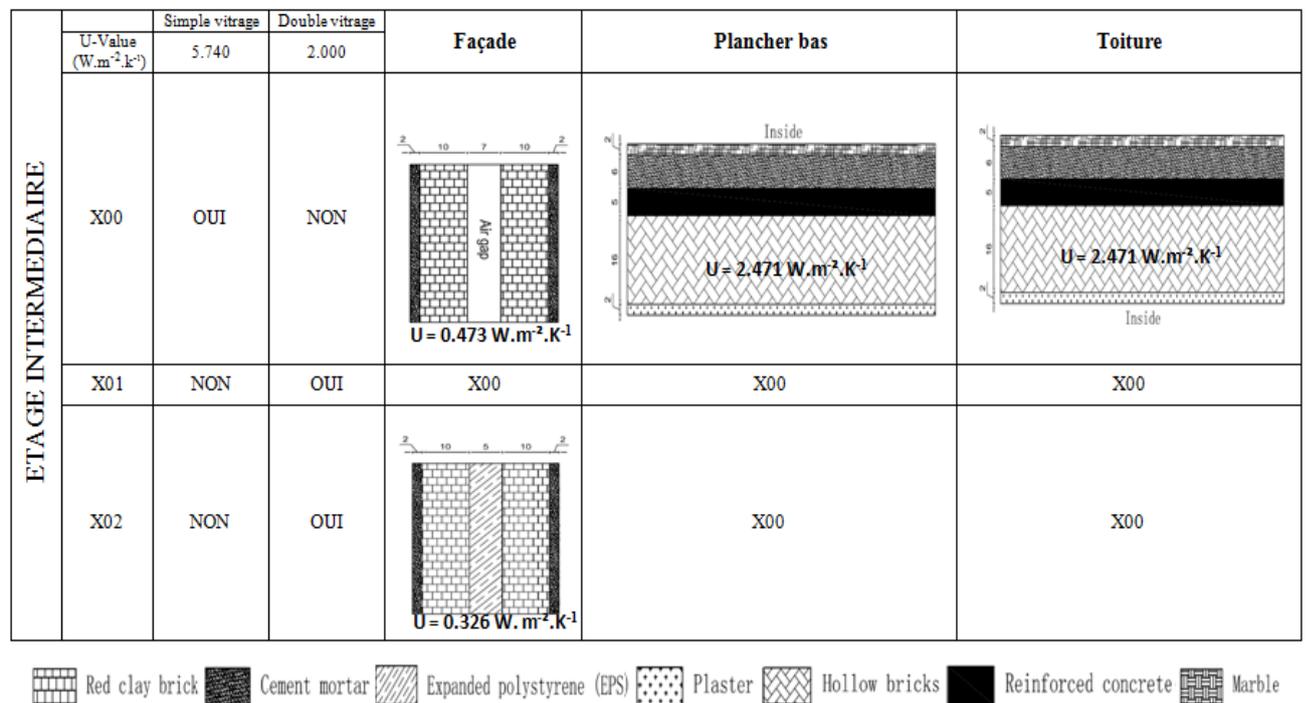


Figure 38. Configurations de l'appartement ADAM à l'étage intermédiaire

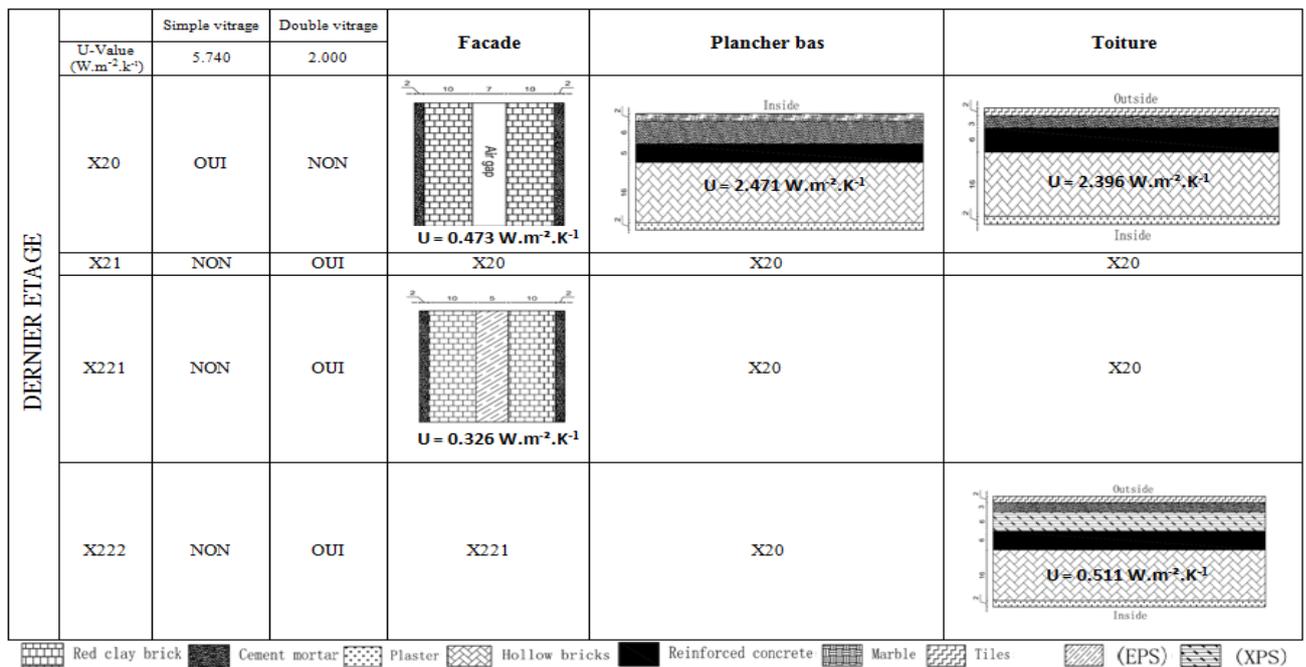


Figure 39. Configurations de l'appartement ADAM au dernier étage

III.2. Propriétés thermophysiques

Les propriétés thermophysiques des matériaux de construction ont été établies selon la base de données du logiciel BINAYATE (2015) dédié à l'application du RTCM. Cependant, la conductivité thermique équivalente de la lame d'air de 7 cm dans la cavité de la double cloison de la façade de l'appartement a été calculée selon la méthode décrite dans la recherche de Sobhy et al. (2017a). Comme cette conductivité thermique équivalente dépend de la température des surfaces internes de la paroi de la cavité, il a été vérifié que la valeur du coefficient de transmission thermique de l'enveloppe de l'appartement calculée est concluante en la comparant aux mesures *in situ*. Ces dernières ont été réalisées à différents endroits de la façade pendant une longue période conformément à la norme (ISO 9869 2014) en utilisant l'appareil de mesure GreenTEG®. La valeur mesurée du coefficient de transmission thermique de la façade est de 0.491 W/m².K avec une précision de ±5% alors que celle calculée est de 0.473 W/m².K.

La Figure 40 montre l'évolution des températures des surfaces interne (T_{in}) et externe (T_{out}) de la façade de l'appartement ainsi que le flux thermique à travers celle-ci. La valeur du coefficient U est déduite par le logiciel GreenTEG par un simple calcul utilisant la loi d'Ohm par analogie. Par ailleurs, des pics sporadiques du coefficient U peuvent être constatés pour des valeurs très proches de T_{in} et T_{out} et pour des flux thermiques quasi-nuls. Toutefois, la valeur prise en considération en fin du processus est la moyenne des valeurs de U excluant les valeurs anormalement hautes sur toute la période du calcul d'autant plus que la norme (ISO 9869 2014) exige une différence minimale de 5°C entre T_{in} et T_{out} pour avoir une valeur plus juste du coefficient U.

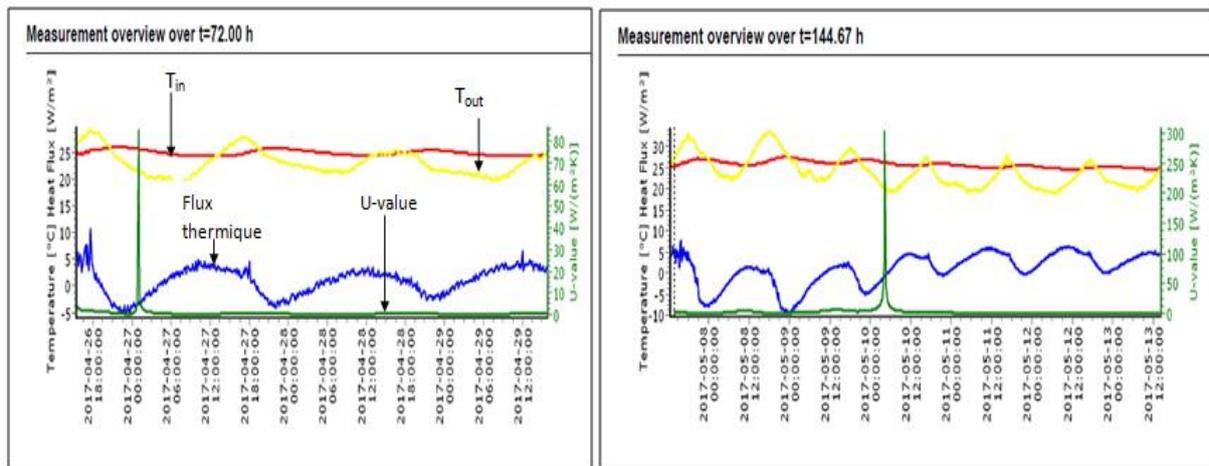


Figure 40. Calcul du coefficient de transmission thermique de la façade de l'appartement dans la zone Z5 (à gauche) et Z4 (à droite) par l'appareil Greenteg® selon la norme (ISO 9869 2014)

III.3. Consigne de chauffage / refroidissement

Les points de consigne pour le calcul des charges thermiques de l'appartement étaient fixés à 20°C et 26°C pour le chauffage et le refroidissement respectivement selon la norme marocaine (NM ISO 7730 2010). De plus, pour calculer les charges thermiques de l'appartement, il est essentiel de prendre en compte les gains solaires directs. À cette fin, un calendrier d'ouverture des dispositifs d'ombrage (volets roulants) des fenêtres a été introduit. Ainsi, ces équipements sont ouverts respectivement de 9h00 à 18h00 et de 20h00 à 11h00 pendant la saison de chauffage (du 1er novembre au 30 avril) et de refroidissement (du 1er avril au 31 octobre). Ils sont fermés autrement et leur facteur d'ombrage est fixé à 0.9 selon le modèle numérique validé.

III.4. Scénarios d'occupation et de ventilation

Il est supposé que l'appartement est occupé par 6 personnes pendant les week-end (samedi et dimanche) et par quatre personnes pendant le reste de la semaine. En outre, l'appartement est équipé de divers appareils électriques et à gaz (éclairage artificiel, télévision, ordinateur, cuisinière, four, réfrigérateur et machine à laver) dont les puissances rayonnantes et la durée quotidienne de fonctionnement sont indiquées dans le tableau.

Tableau. 14. Puissance et durée de fonctionnement des appareils électroménagers au sein de l'appartement

	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Durée de fonctionnement (heures/jour)
Puissance (W)							
Ordinateur	0	0	0	0	140	0	2
Ecran TV	0	0	0	0	80	0	7
Eclairage	20	20	10	20	30	10	6
Cuisinière	500	0	0	0	0	0	3
Four	2700	0	0	0	0	0	1
Lave linge	2100	0	0	0	0	0	1
Réfrigérateur	136	0	0	0	0	0	12

En outre, l'appartement est ventilé mécaniquement lorsque la température de l'air extérieur (T_{out}) est inférieure au point de consigne de refroidissement (26°C) pendant la saison chaude ou supérieure au point de consigne de chauffage (20°C) pendant la saison froide. La quantité d'air introduite a été fixée à 4 ACH et 1 ACH en été et en hiver respectivement ainsi qu'un taux invariable d'infiltration de 0.5 ACH est considéré durant toute l'année (Sick et al. 2014).

III.5. Indices d'inconfort thermique

Afin d'évaluer l'inconfort thermique, des simulations dynamiques de l'appartement inconditionné et compte tenu du scénario d'occupation, ont été effectuées. Ensuite, au sein de chaque zone thermique de l'appartement, les calculs horaires de la température opérative inférieure à 20°C ou supérieure à 26°C (heures d'inconfort) ont été réalisés selon la norme marocaine (NM ISO 7730 2010). Les indices d'inconfort thermique pour l'hiver (I_w) et pour l'été (I_s) sont définis par le rapport entre les heures d'inconfort et le nombre total d'heures de la saison, comme suit :

$$I_w(\%) = \frac{N_w}{NT_w} * 100 \quad \text{Eq. IV.1}$$

$$I_s(\%) = \frac{N_s}{NT_s} * 100 \quad \text{Eq. IV.2}$$

L'inconfort thermique est calculé pendant la période du 1er mai au 31 octobre pour l'été et du 1er novembre au 30 avril pour l'hiver. De plus, pour des raisons de précision, il est à noter que seules les températures opératives du salon (Z5) et des chambres (Z2, Z4 et Z6) sont prises en compte dans le calcul des indices d'inconfort thermique étant donné que celui-ci est plus significatif dans ces zones, car les occupants ont tendance à y passer plus de temps de leur journée. Il convient aussi de noter que lors du calcul des indices d'inconfort thermique, la ventilation était désactivée.

IV. Analyse et discussion des résultats

IV.1. Comportement thermique de l'appartement conditionné

IV.1.1. Isolation de la façade

Afin d'évaluer l'effet de l'isolation thermique de la façade sur le comportement thermique de l'appartement ADAM considéré au dernier étage, la comparaison entre deux configurations est effectuée : La première configuration correspond à l'isolation thermique de la façade avec de l'EPS et du double vitrage (W221, Fig. 39) et la seconde, qui est le cas de référence, est l'état actuel de l'appartement avec une façade munie d'une lame d'air et d'un simple vitrage (W20, Fig. 39). La Figure 41 montre les charges de chauffage et de refroidissement de l'appartement pour les deux configurations. Les variations relatives de ces charges thermiques sont également présentées.

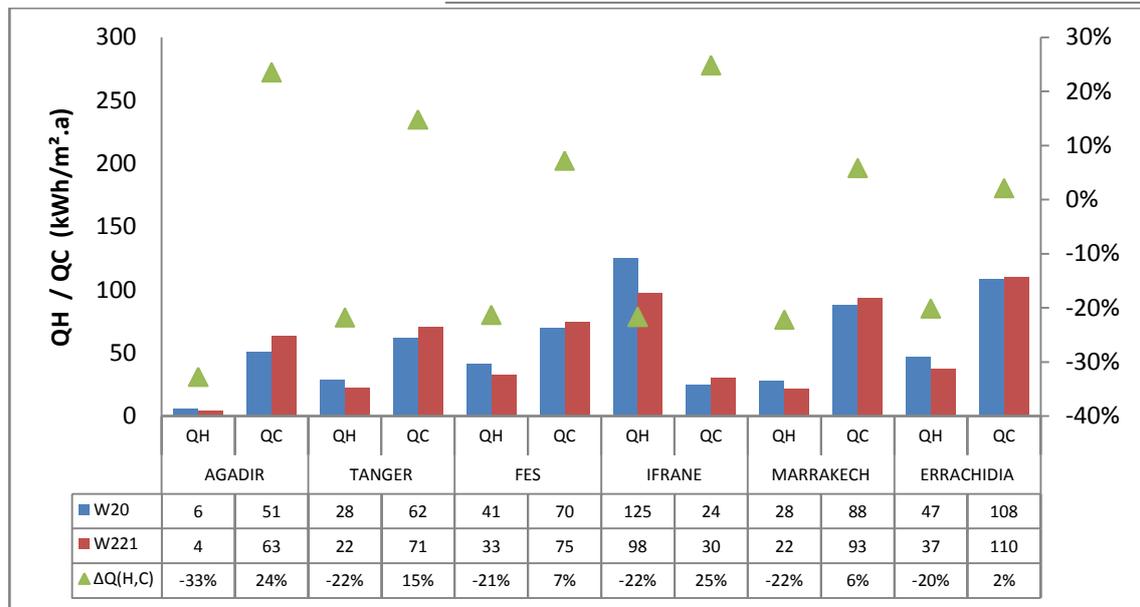


Figure 41. Charges de chauffage/refroidissement pour les deux configurations W20 et W221 (histogrammes) ainsi que leur écart relatif (Points) pour les six zones climatiques du Maroc

A partir de cette figure, on peut voir que pour tous les climats, l'isolation thermique de la façade avec double vitrage entraîne environ 22% de réduction de la demande d'énergie en hiver. Cependant, dans toutes les zones climatiques, cette isolation provoque une surchauffe estivale nettement perceptible dans les charges de refroidissement qui augmentent de 25% à Agadir et Ifrane et de 15% à Tanger. En conséquence, l'isolation de la façade a un effet ambivalent entre l'été et l'hiver sur les exigences thermiques globales de l'appartement. Une analyse approfondie de la charge thermique totale de l'appartement permet de montrer que l'isolation de la façade est principalement bénéfique dans les climats extrêmes. En effet, isoler la façade en climat froid (Ifrane) permet d'économiser 14% de la demande énergétique totale et 5% en climat désertique (Errachidia), contrairement au climat continental (Fès) et au climat semi-aride (Marrakech) où la réduction est seulement de 3% et 1% respectivement. De plus, dans les climats tempérés d'Agadir et de Tanger, cette forte isolation thermique de la façade associée au double vitrage n'est pas favorable car elle augmente la demande thermique globale dans ces deux climats respectivement de 3% et 18%.

Afin d'analyser de près l'impact de la technique de la lame d'air dans l'isolation thermique, les besoins énergétiques de l'appartement avec (W20) et sans (W20s) ce système (la lame d'air), ont été calculés. La valeur de la transmittance de la façade de la configuration W20s est $U = 0.796 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. La Figure 42 montre les charges de chauffage/refroidissement de ces deux configurations ainsi que leurs variations relatives. Cette figure met en évidence l'effet positif (dépendant du climat) de la lame d'air en tant qu'isolant thermique. En effet, l'absence de cette technique entraîne une augmentation des charges de chauffage et de refroidissement, respectivement, de 4% à 16% et de 2% à 6%.

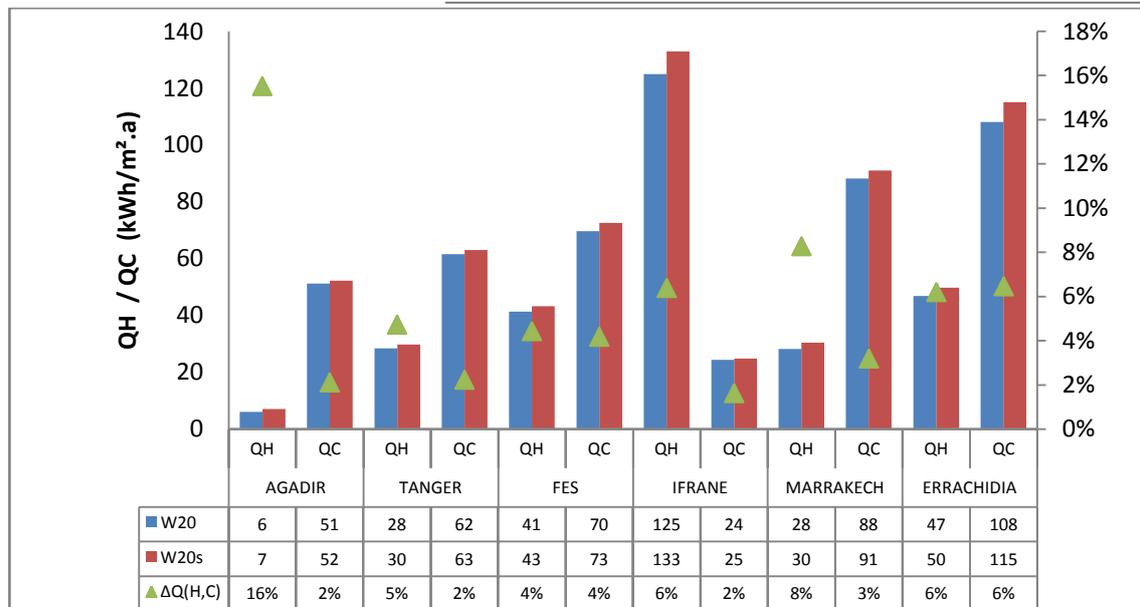


Figure 42. Charges de chauffage/refroidissement pour les deux configurations W20 et W20s (histogrammes) ainsi que leur écart relatif (Points) pour les six zones climatiques du Maroc

L'impact bénéfique du système de la lame d'air se distingue spécialement dans les climats extrêmes comme on peut le voir sur la Fig. 42 pour la charge de chauffage à Ifrane (climat froid) et pour la charge de refroidissement à Errachidia (climat désertique) et Marrakech (semi-aride). À la suite de cette analyse, on peut conclure que la façade munie d'une lame d'air de 7 cm est suffisante pour atteindre un niveau acceptable d'efficacité énergétique au sein de l'appartement en évitant la surchauffe causée par une forte isolation thermique. Il convient de rappeler que la conductivité thermique effective de la lame d'air a été calculée conformément à la méthode suivie par (Sobhy et al. 2017a) qui prend en compte à la fois le transfert de chaleur par convection et par rayonnement au sein des parois internes de la façade.

Malgré cela, la source de la surchauffe reste ambiguë et des investigations supplémentaires devraient être menées pour déterminer avec précision si elle est causée plutôt par le double vitrage ou par l'isolation thermique de la façade. À cette fin, les charges de refroidissement des configurations combinant alternativement deux types d'isolation thermique (EPS ou lame d'air) et deux types de vitrage de fenêtres (simple ou double vitrage) ont été comparées. La Figure 43 montre ces charges de refroidissement des configurations W21 et W20 ainsi que leurs variations relatives. On peut voir à partir de cette figure que le double vitrage associé à une isolation par lame d'air augmente la charge de refroidissement sous tous les climats. Le degré de cette augmentation dépend fortement du climat car elle est quelque peu élevée dans les climats modérés (Agadir et Tanger) et presque proche de zéro dans le climat désertique d'Errachidia.

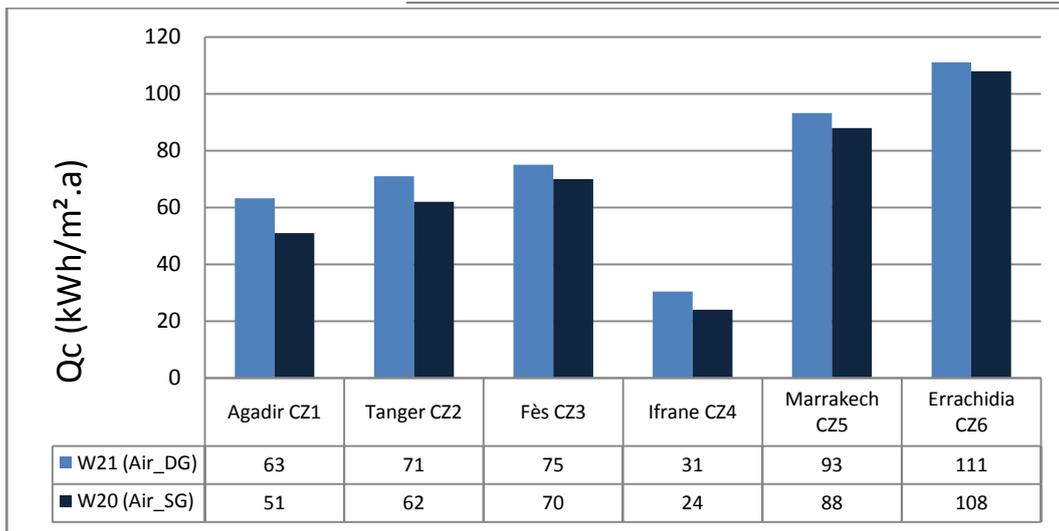


Figure 43. Charge de refroidissement des configurations W21 (lame d'air et double vitrage) et W20 (lame d'air et simple vitrage) pour les six climats du Maroc

Il convient de noter que le double vitrage associé à l'isolation thermique légère de la façade (par une lame d'air) génère une augmentation relative de la charge de refroidissement comprise entre 3% et 21%. La combinaison du double vitrage avec une isolation thermique relativement élevée (5 cm d'EPS) entraîne une surchauffe estivale plus élevée, comme le montre la Figure 44.

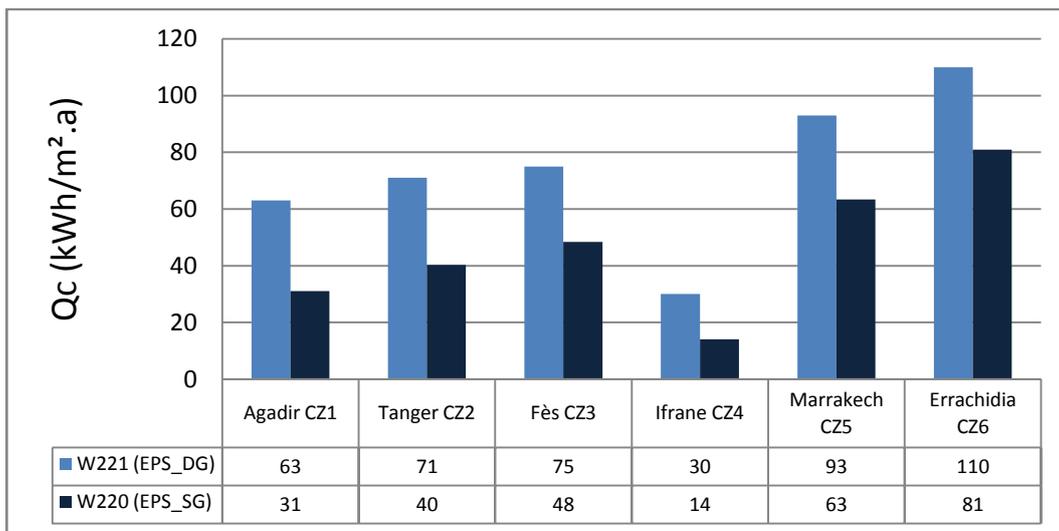


Figure 44. Charge de refroidissement des configurations W221 (EPS et double vitrage) et W220 (EPS et simple vitrage) pour les six climats du Maroc

Encore une fois, la plus grande augmentation de la charge de refroidissement se produit dans les climats modérés. Cette augmentation est plus prononcée dans le climat désertique et le climat semi-aride. Ici, l'isolation thermique relativement élevée de la façade empêche le refroidissement nocturne, contrairement à l'isolation thermique par la lame d'air. On peut donc en conclure que la surchauffe est essentiellement due au double vitrage mais favorisée par une isolation thermique élevée de la façade. La Figure 45 confirme cette conclusion car les charges de refroidissement de l'appartement avec double vitrage associée à une isolation thermique par l'EPS (W221) ou par lame d'air (W21) restent inchangées.

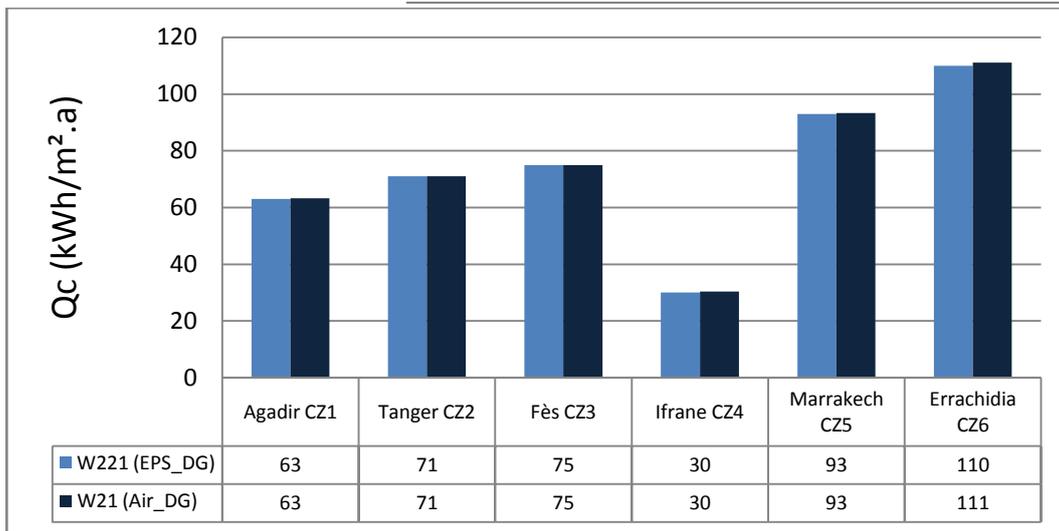


Figure 45. Charge de refroidissement des configurations W221 (EPS et double vitrage) et W21 (lame d'air et double vitrage) pour les six climats du Maroc

Enfin, il convient de rappeler que le TGBV de l'appartement est relativement élevé (29%) et que la surface vitrée est orientée vers l'ouest. De plus, le toit de l'appartement manque ici d'isolation thermique, ce qui favorise encore plus la surchauffe estivale.

En conclusion, à Agadir et à Tanger, il est fortement recommandé d'utiliser du simple vitrage. A Ifrane du double vitrage vu la charge de chauffage élevée dans cette zone. Par ailleurs, à Fès, Marrakech et Errachidia, on constate l'effet ambivalent du double vitrage entre charge de chauffage et de refroidissement dans ces zones climatiques. Par conséquent, la diminution de la charge thermique totale par le double vitrage n'est pas significative et le bénéfice de cette technique ne peut être justifié économiquement dans ces trois zones climatiques comme le montre la Figure 46. Cependant, il est important de noter que le double vitrage agit fortement sur la température opérative de l'appartement. Ainsi, en été, même si le double vitrage augmente la charge de refroidissement, il réduit la température opérative à travers la réduction de la température des surfaces internes des zones thermiques de l'appartement.

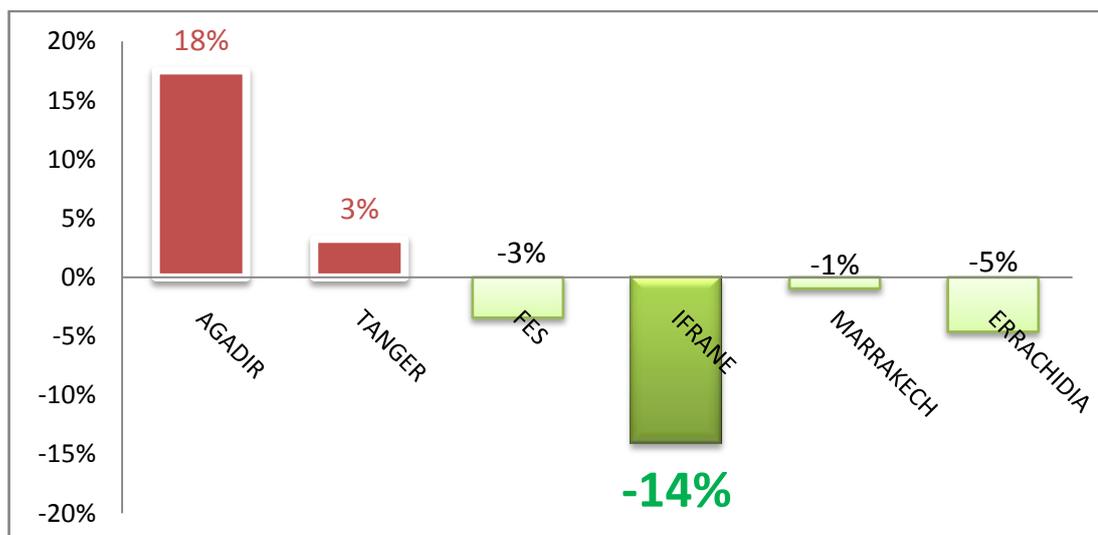


Figure 46. Variation relative de la charge thermique totale de l'appartement ADAM entre les configuration W20 (simple vitrage) et W21 (double vitrage) pour les six climats du Maroc

IV.1.2. Isolation du toit

Afin d'analyser l'effet de l'isolation thermique de la toiture de l'appartement sur les besoins en énergie de chauffage / climatisation de l'appartement étudié, une comparaison de deux configurations représentant l'appartement avec isolation de toit au dernier étage (W222, Fig. 39) et sans isolation de toit (W221, Fig. 39) a été réalisée. Les charges de chauffage et de refroidissement pour ces deux configurations ainsi que leur variation relative sont présentées à la Figure 47.

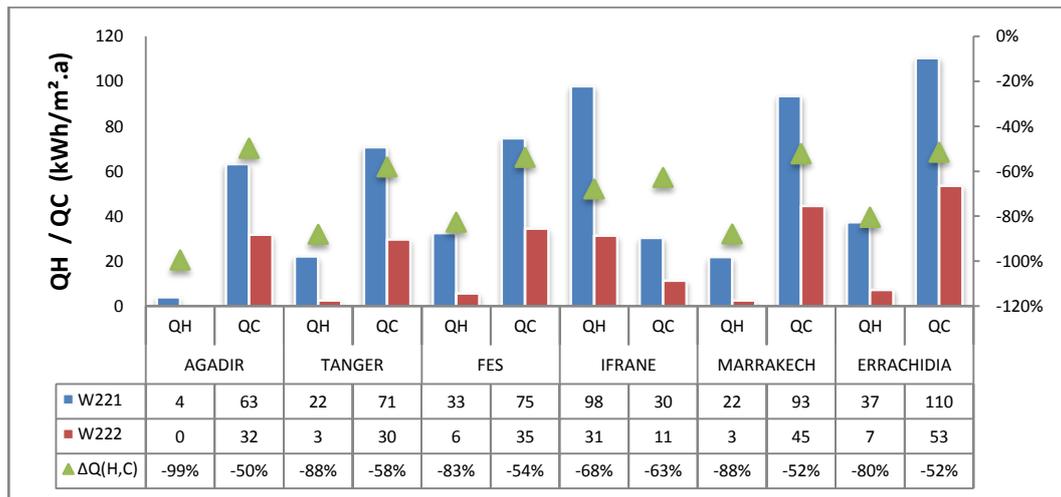


Figure 47. Charges de chauffage/refroidissement pour les deux configurations W221 et W222 (histogrammes) ainsi que leur écart relatif (Points) pour les six zones climatiques du Maroc

On peut voir sur cette figure que l'isolation du toit est très bénéfique aussi bien pour la réduction des charges de chauffage que de refroidissement. En effet, cette isolation permet de diminuer la demande en énergie de chauffage d'au moins 68% dans tous les climats. La réduction la plus importante est obtenue dans le climat désertique (Errachidia), le climat semi-aride (Marrakech), continental (Fès) et méditerranéen (Tanger). D'autre part, la diminution absolue la plus élevée de la charge de chauffage correspond au climat froid d'Ifrane. De plus, l'isolation thermique du toit de l'appartement entraîne une réduction importante de la charge de refroidissement dans tous les climats. Il est intéressant de noter que l'isolation thermique du toit de l'appartement ne provoque aucune surchauffe contrairement à l'isolation de la façade. En outre, on peut déduire de la Figure 47 que la charge thermique globale de l'appartement est réduite de 53% à 67% dans tous les climats étudiés. Ainsi, l'isolation thermique du toit est fortement recommandée étant donné les importantes économies d'énergie qui en résultent, ceci est en accord avec plusieurs auteurs, entre autres : (Mastouri et al. 2017, Dabaieh et al. 2014, Benhamou et Bennouna 2013, Sobhy et al. 2014, 2017a, Givoni 2011).

IV.1.3. Isolation du plancher sur terre plein

L'isolation thermique du plancher bas est obligatoire dans de nombreux codes énergétiques des bâtiments à travers le monde, y compris celui du Maroc. En effet, le RTCM (2014) impose que cette partie de l'enveloppe ait une résistance thermique supérieure à certaines valeurs seuils selon les zones climatiques (CZi) à l'exception d'Agadir (climat atlantique) et de Tanger (climat méditerranéen). Il est évident que l'isolation thermique du

plancher bas peut être avantageuse pour réduire les besoins de chauffage. Néanmoins, cela peut provoquer une surchauffe entraînant une augmentation de la charge de refroidissement.

En effet, comme nous l'avons mentionné dans le chapitre de l'état de l'art, il a été constaté que cette isolation thermique augmente remarquablement la charge de refroidissement dans le climat semi-aride. Par conséquent, il est intéressant d'examiner l'impact de cette isolation thermique sur la demande de chauffage et de refroidissement de l'appartement situé au rez-de-chaussée et sous d'autres climats. A cette fin, une comparaison entre les charges de chauffage/refroidissement de deux configurations représentant respectivement l'appartement avec (W122, Fig. 37) et sans isolation de son plancher bas (W121, Fig. 37) a été réalisée. Pour chacun des six climats considérés, les besoins de chauffage/refroidissement pour les deux configurations de l'appartement sont illustrés dans la Figure 48.

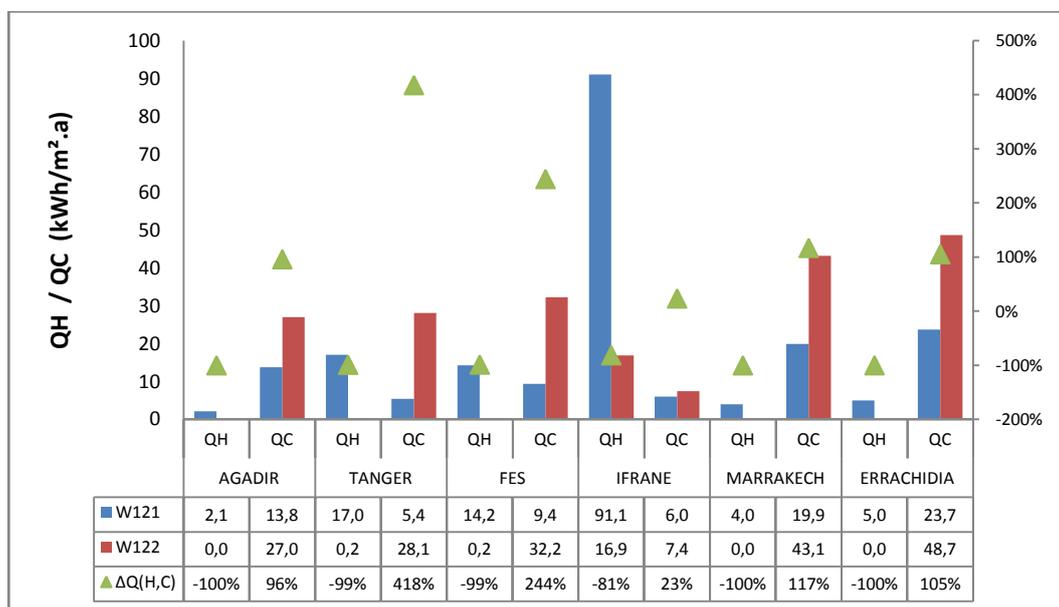


Figure 48. Charges de chauffage/refroidissement pour les deux configurations W121 et W122 (histogrammes) ainsi que leur écart relatif (Points) pour les six zones climatiques du Maroc

Selon cette figure, grâce à l'isolation thermique du plancher bas, la charge de chauffage est complètement effacée dans tous les climats sauf dans celui d'Ifrane (climat froid) où elle est réduite de 81%. Par ailleurs, cette figure montre que la charge de refroidissement est négativement affectée par cette technique passive. En fait, cette isolation double ou même triple la charge de refroidissement dans tous les types de climats considérés. La Figure 49 présente la variation relative de la charge thermique totale de l'appartement.

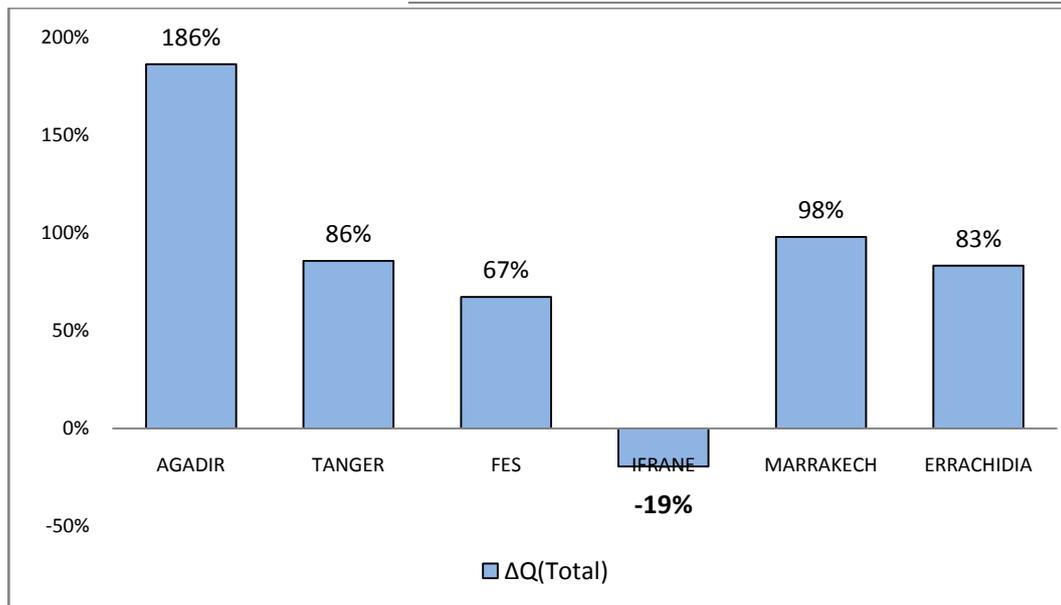


Figure 49. Variation relative de la charge thermique totale de l'appartement ADAM entre les configurations W121 et W122

A partir de cette figure, à l'exception d'Ifrane (climat froid) où les besoins thermiques globaux sont réduits de 19%, on constate que dans les autres climats, l'appartement acquiert une augmentation significative de la charge thermique globale allant de 67% à Fès à 186% à Agadir. Il est clair que l'isolation thermique du plancher bas présente une ambivalence vis-à-vis des charges de chauffage et de refroidissement dans tous les climats sauf à Ifrane où le climat est caractérisé par un hiver très froid. De ce fait, il faut maintenir le plancher bas thermiquement couplé au sol dans les climats chauds et modérés afin de profiter de l'inertie thermique du sol.

IV.1.4. Ventilation mécanique contrôlée

Les simulations dynamiques de l'appartement ADAM sont effectuées en tenant compte du scénario de ventilation décrit dans la section III. 4 de ce chapitre. L'objectif ici est d'examiner l'impact de cette ventilation mécanique sur les performances thermiques de l'appartement situé au dernier étage du moment que ce niveau conduit à la charge de refroidissement la plus élevée dans les six climats considérés. Cependant, la VMC est une technique hybride. Par conséquent, la consommation d'électricité des ventilateurs fournissant de l'air frais provenant de l'extérieur dans le scénario VMC doit être prise en compte. A cette fin, le bénéfice et l'efficacité de cette technique semi-passive est calculé en termes d'économie d'énergie électrique pour faire face au besoin de refroidissement de l'appartement.

Dans cette section, nous avons considéré que la VMC est assurée par un système de ventilation dont il va falloir calculer la puissance électrique nominale. Au fait, en considérant un moteur électrique de rendement de 80% et une perte de charge globale dans le bâtiment de l'ordre de 50Pa et étant donné que le volume de l'appartement est de 297m^3 et que le débit d'air frais souhaité est de 4ACH soit $1187\text{m}^3.\text{h}^{-1}$, la relation charge-puissance donnée par l'équation (EQ. IV.3) permet de fixer la puissance du système de ventilation à 20W pour les six zones climatiques étudiées.

$$P_{abs} = \frac{q * p}{\eta} \quad \text{EQ. IV. 3}$$

D'autre part, actuellement au Maroc la nouvelle génération des climatiseurs disponibles sur le marché sont dotés de coefficient saisonnier d'efficacité énergétique (SEER) variant de 2.5 à 8. Dans cette étude, afin de mettre à l'épreuve le potentiel de ventilation de chacune des zones climatiques du Maroc, nous avons opté pour un refroidissement assuré par des climatiseurs de haute performance avec un SEER de 8.

L'économie d'énergie relative en termes de consommation électrique est présentée dans la Figure 50. L'analyse de cette figure montre l'effet bénéfique de la VMC sur l'économie d'énergie de l'appartement dans tous les climats. En effet cette économie d'énergie en termes de consommation d'électricité est plus importante dans les climats continentaux à froid dans les région d'Agadir, Tanger, Ifrane et Fès où la VMC permet d'économiser respectivement environ 18%, 21%, 16% et 14% de l'énergie électrique. En revanche, dans les climats chauds de Marrakech et d'Errachidia, la VMC présente une rentabilité critique avec seulement 1% d'économie d'énergie électrique d'autant plus qu'il faudrait prendre en considération le microclimat urbain qui risque de favoriser cette criticité.

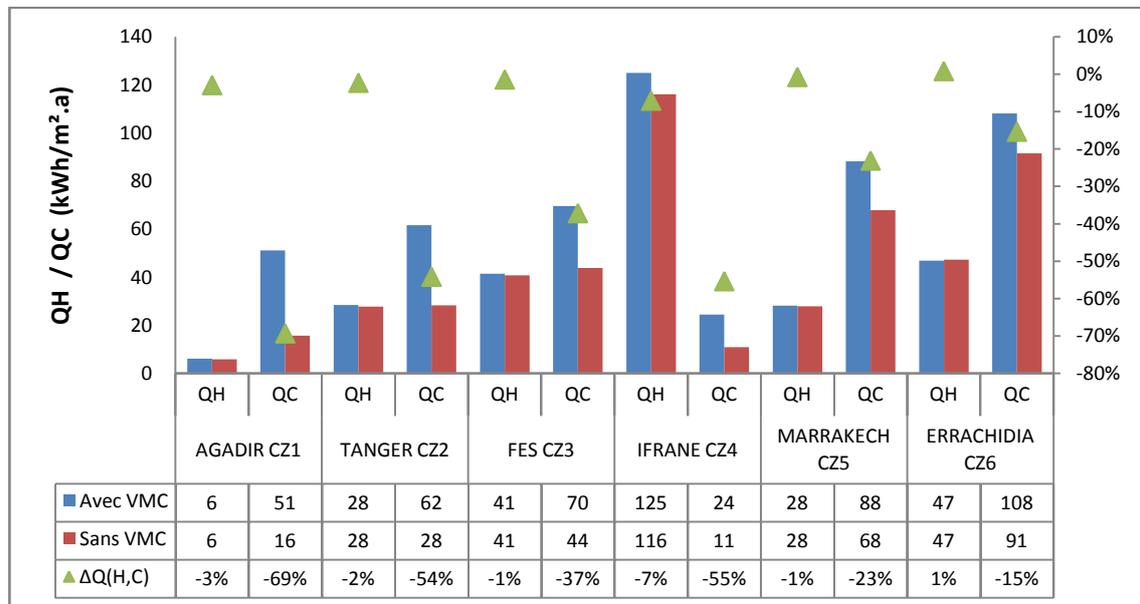


Figure 50. Charges de chauffage/refroidissement avec et sans VMC (histogrammes) ainsi que leur écart relatif (Points) pour les six zones climatiques du Maroc

Cela est dû à la faible valeur des heures de confort thermique extérieures, comme on peut le voir sur la Figure 51, ainsi qu'à la demande de refroidissement essentiellement élevée dans ces deux climats (Marrakech et Errachidia). De plus, il convient de noter que la VMC n'a pas d'effet significatif sur la charge de chauffage. Pour une analyse plus approfondie, les Figures 51 montrent clairement que pendant la saison estivale, le potentiel de refroidissement de l'air extérieur est élevé et se situe entre 300 et 400 heures dans les climats modérés à froids à savoir : Agadir, Tanger et Ifrane tandis qu'il est relativement faible (entre 10 et 200 heures) dans les villes de Fès, Marrakech et Errachidia. De plus, cette figure montre que le potentiel de chauffage de l'air extérieur est très faible dans tous les climats se situant entre 0 et 50 heures, sauf celui d'Agadir où ce potentiel est entre 100 et 150 heures. Quoiqu'il en soit, la charge de chauffage est extrêmement faible dans ce climat (Agadir). On peut donc en conclure que la

VMC n'est pas le meilleur moyen de réduire la charge de chauffage dans le cas des climats du Maroc.

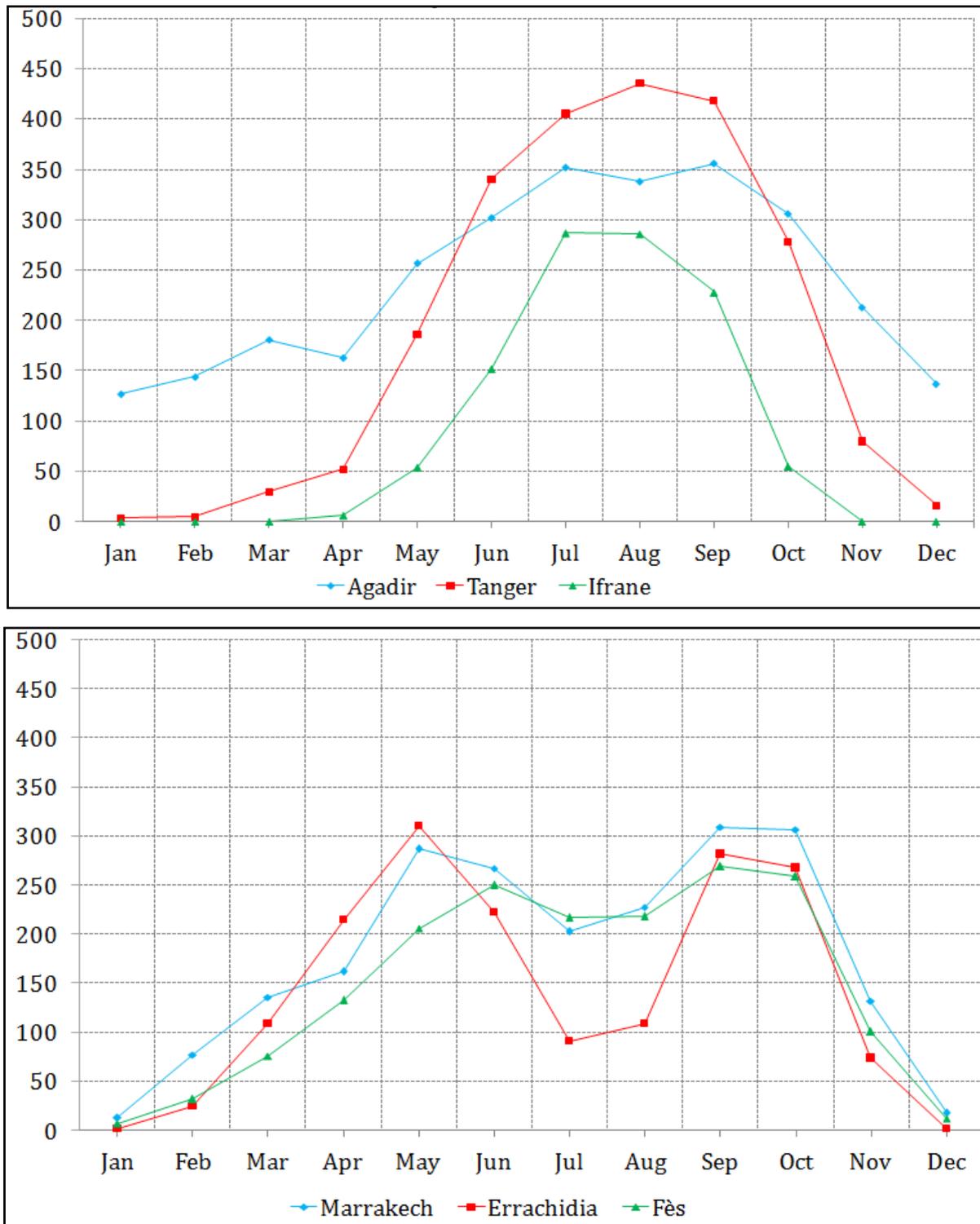


Figure 51. Nombre d'heures de confort thermique dans les climats du Maroc selon la base de données (Meteonorm 2014)

IV.1.5. Impact de l'étage

Afin d'évaluer l'impact du niveau du plancher bas de l'appartement étudié sur ses besoins thermiques, une comparaison entre ses charges globales de chauffage / refroidissement dans 3 positions différentes (Rez de chaussée, étage intermédiaire et dernier étage) est réalisée

dans les six climats considérés. La Figure 52 montre les charges thermiques de l'appartement situé respectivement dans le RDC, l'étage intermédiaire et l'étage supérieur (configurations W10, W00 et W20, Figs. 37-39).

A partir de cette figure, on peut voir que l'appartement du dernier étage a la charge thermique globale la plus élevée qui dépasse $140\text{kWh/m}^2.\text{a}$ à Ifrane (climat froid) et Errachidia (climat désertique) alors qu'il est d'environ $110\text{kWh/m}^2.\text{a}$ à Marrakech et Fès et $50\text{kWh/m}^2.\text{a}$ à Agadir. Au niveau intermédiaire, l'appartement nécessite une charge thermique remarquablement moindre dans la plupart des climats (Tanger, Fès, Marrakech, Errachidia et Ifrane) par rapport au niveau du dernier étage. Dans presque tous les climats, les très faibles valeurs de la charge thermique globale de l'appartement de l'étage intermédiaire par rapport au dernier étage indiquent les pertes thermiques élevées et / ou les gains solaires à travers le toit (non isolé). Dans le climat tempéré d'Agadir, ces pertes et gains ne sont pas significatifs, du fait que les charges thermiques du dernier étage et celui intermédiaire sont égales. En ce qui concerne l'appartement du RDC, la charge thermique est similaire à celle de l'étage intermédiaire à Fès et à Tanger, mais beaucoup plus faible à Agadir, Marrakech et Errachidia alors qu'il est plus élevée à Ifrane.

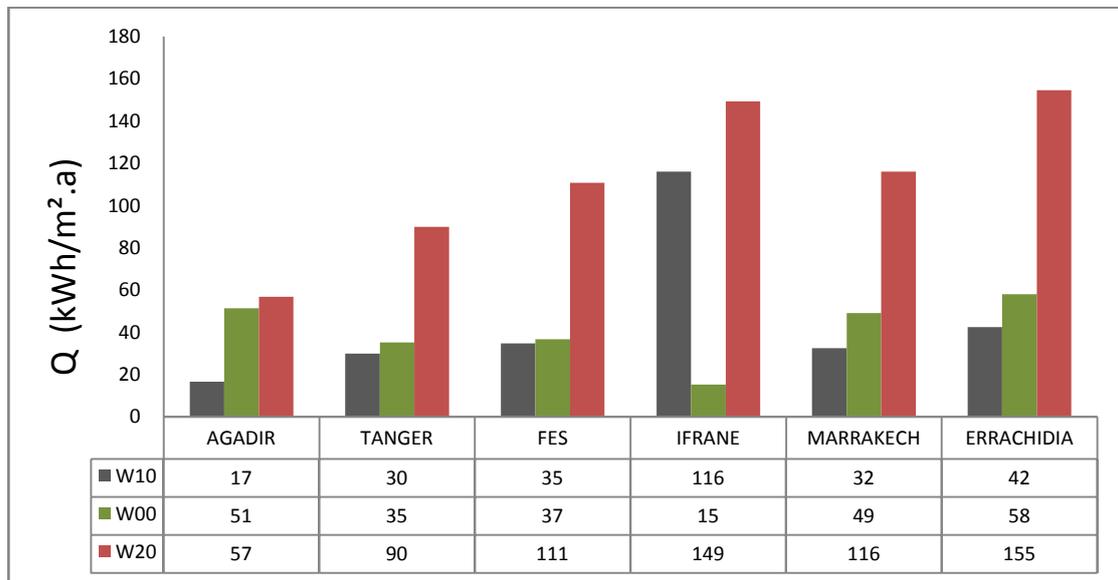


Figure 52. Charges thermique globale de l'appartement ADAM pour les trois étages (W10 :RDC, W00 :Intermédiaire et W20 : dernier étage) dans les six zones climatiques du Maroc

Les valeurs relativement faibles de la charge thermique de l'appartement du RDC à Agadir, Marrakech et Errachidia confirment l'effet bénéfique du couplage sol-appartement dans ces climats comme il a été précédemment illustré dans la section IV. 1. 3. En outre, la valeur élevée de la charge thermique globale de l'appartement du RDC est à Ifrane, qui est similaire au niveau supérieur, ce qui indique des pertes thermiques importantes à travers le toit dans ce climat froid.

IV.1.6. Orientation

Afin d'évaluer l'impact de l'orientation de la façade de l'appartement ADAM sur ses performances énergétiques, des simulations ont été effectuées pour plusieurs orientations de

l'appartement du dernier étage. Pour des raisons de clarté, seules les charges thermiques totales de quatre orientations (ouest, sud, est et nord) sont rapportées sur les Figure 53.

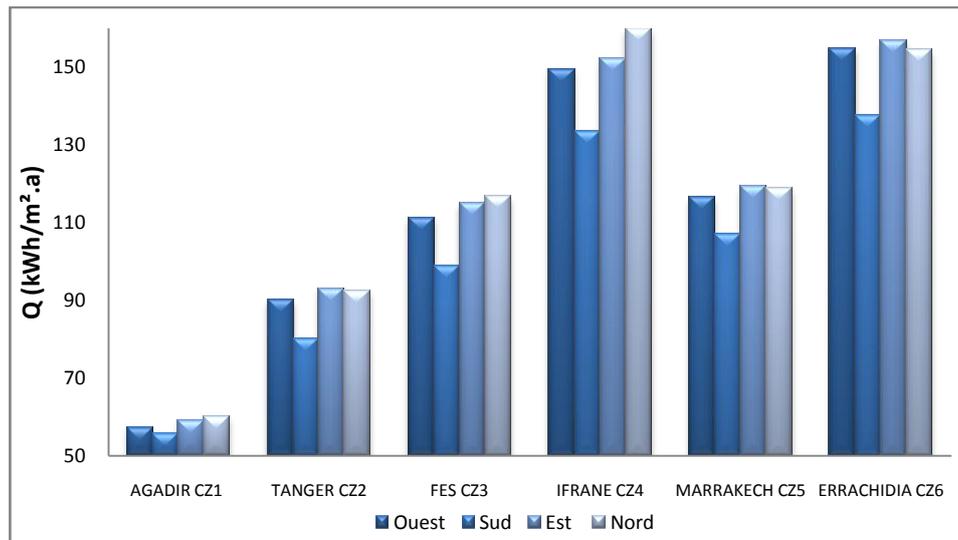


Figure 53. Charges thermiques totales de l'appartement ADAM selon l'orientation de sa façade

La Figure 53 présente la charge thermique annuelle correspondant aux différentes orientations des façades considérées dans les six climats étudiés. On peut voir à partir de cette figure que, évidemment pour tous ces climats, l'orientation sud est la meilleure en termes de besoins énergétiques pour le chauffage / refroidissement. Les orientations défavorables sont celles de l'est et du nord. Cependant, les besoins en énergie de chauffage / refroidissement du bâtiment sont pratiquement les mêmes pour toutes les orientations de la façade autres que celle du sud dans tous les climats. Néanmoins, dans le climat atlantique d'Agadir, la charge thermique totale est presque insensible à l'orientation de la façade alors que dans le climat froid d'Ifrane, l'orientation nord présente la plus grande charge thermique, supérieure de 20% à celle correspondant à l'orientation sud. Pour une analyse détaillée de l'impact de l'orientation de la façade sur les charges de chauffage/refroidissement, une comparaison des orientations sud (la meilleure) et ouest (la réelle) est effectuée et les résultats sont présentés sur la Figure 54. L'impact positif de l'orientation sud sur la charge de chauffage de l'appartement dans tous les climats ressort clairement de cette figure. L'augmentation relative du besoin de chauffage du bâtiment due au changement de l'orientation de sa façade de l'ouest au sud dépend du climat. En effet, cette réduction est plus élevée dans le climat atlantique (Agadir) en raison de la faible charge initiale de chauffage alors qu'elle est plus basse dans le climat froid (Ifrane) car elle correspond à la charge de chauffage la plus élevée. La réduction relative de la charge de chauffage de la façade sud par rapport à celle orientée ouest dans les autres climats (Tanger, Marrakech, Errachidia et Fès) est modérée et varie entre 29% et 34%. En ce qui concerne la charge de refroidissement, l'orientation de la façade de l'appartement de l'ouest au sud ne génère pas d'impact significatif sauf pour les climats froids et atlantiques d'Ifrane et d'Agadir où la charge de refroidissement est légèrement réduite de 5% ou de 6% respectivement. On peut en conclure que l'orientation sud de la façade de l'appartement entraîne une réduction sensible de la charge thermique et peut donc améliorer de manière significative l'efficacité énergétique de ce type de bâtiment sous tous les climats pourvu qu'il soit protégé des rayonnements solaires directs en utilisant des dispositifs d'ombrage externes appropriés.

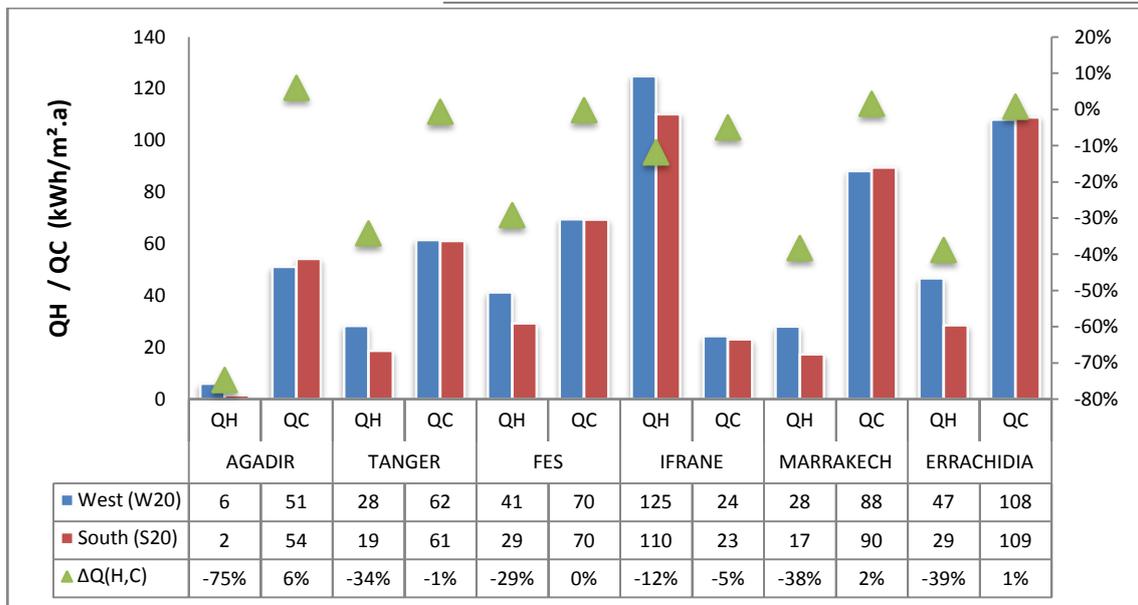


Figure 54. Charges de chauffage/refroidissement (histogrammes) et leurs variations relatives (points) de l'appartement ADAM pour les orientations sud et ouest

IV.1.7. Coefficient d'absorption

Afin de pousser davantage l'investigation sur les facteurs ayant un impact sur les charges de chauffage/ refroidissement de l'appartement ADAM, l'absorptivité des murs extérieurs s'avère, selon la revue de littérature non sans impact sur le besoin de l'appartement en matière de chauffage et de refroidissement dans les climats étudiés.

En effet, les murs extérieurs de l'appartement étudié sont peints en couleur rouge foncé. La couleur rouge est obligatoire pour les façades des bâtiments dans presque toutes les villes intérieures marocaines (Marrakech et Errachidia et leurs régions) alors que dans les autres villes, les façades des bâtiments sont en principe peintes en blanc (Ifrane, Fès, Tanger et Agadir). De plus, il est courant dans les bâtiments marocains d'utiliser des carreaux de couleur sombre pour les terrasses. La performance thermique de ces bâtiments est, à coup sûr, affectée par l'absorption solaire qui en résulte. Par conséquent, une étude de sensibilité sur la charge de chauffage/refroidissement de l'appartement ADAM au coefficient d'absorption de la façade et du toit a été réalisée. La façade et le toit sont considérés comme ayant une absorptivité solaire de 0.3 et 0.4 (valeurs minimales) ou de 0.8 et 0.9 (valeurs maximales) respectivement. Les résultats de simulation sont présentés dans les Figures 55.

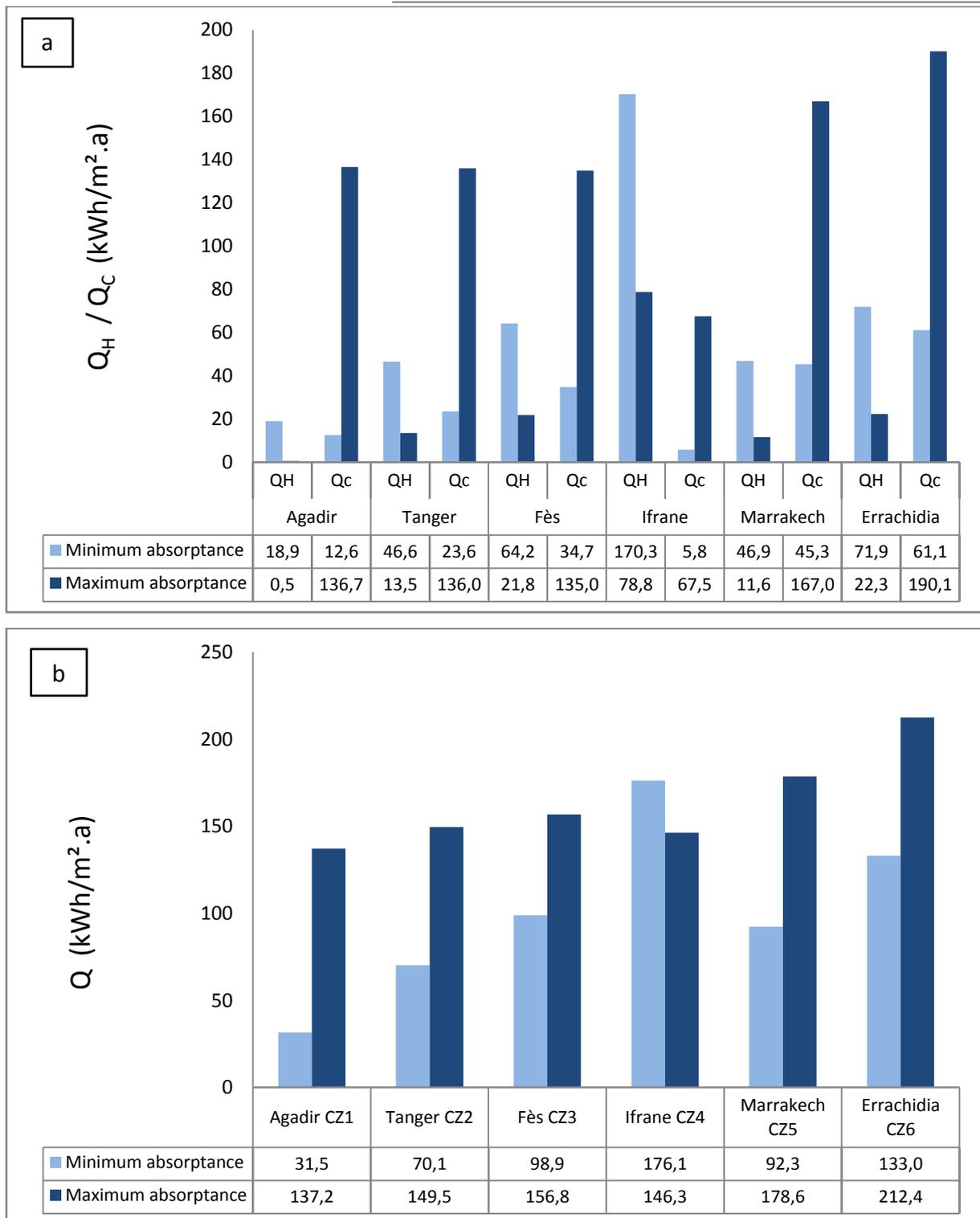


Figure 55. Evolution des charges de chauffage/refroidissement (a) et de la charge thermique totale (b) de l'appartement ADAM selon l'absorptivité solaire de la façade et du toit respectivement 0,3 et 0,4 (minimum absorptance) ou 0,8 et 0,9 (maximum absorptance)

A partir de la Figure 55-a, on peut voir l'effet positif des valeurs maximales du coefficient d'absorption sur la charge de chauffage dans tous les climats. La façade et le toit de couleur foncée réduisent considérablement la charge de chauffage de l'appartement à moins de 20 kWh/m².a dans tous les climats sauf à Ifrane où il est réduit seulement à 78 kWh/m².a. Cependant, un effet négatif des valeurs maximales du coefficient d'absorption solaire sur la

charge de refroidissement dans tous les climats est observé. Au fait, la charge de refroidissement de l'appartement est fortement augmentée en changeant le coefficient d'absorption solaire de la façade et du toit du minimum au maximum. Cette augmentation est essentiellement due aux gains solaires importants dans le toit de l'appartement, comme indiqué plus haut dans la section (IV. 1. 2). En outre, l'effet du coefficient d'absorption de la façade et du toit de l'appartement sur sa charge thermique totale dans les six climats considérés est représenté sur la Figure 55-b. Cette figure montre clairement que la réduction de la charge de chauffage due à l'augmentation de l'absorptivité solaire de la façade et du toit de l'appartement est éliminée par l'augmentation considérable de la charge de refroidissement dans tous les climats, sauf à Ifrane.

On peut donc en conclure que la façade et le toit devraient être dotés d'un faible coefficient d'absorption solaire (couleurs claires) dans tous les climats sauf à Ifrane (climat froid) où une forte absorptivité solaire est recommandée. Comme presque tous les gains solaires de l'appartement proviennent de sa toiture, ces recommandations doivent être appliquées en priorité à la couleur des tuiles ou à celle du revêtement utilisé.

IV.2. Confort thermique de l'appartement non conditionné

Dans cette partie, les indices d'inconfort thermique au sein des zones de l'appartement ADAM sont estimés à l'aide des équations IV. 1-2. Par ailleurs, pour des raisons pratiques, comme mentionné dans la section III. 5 de ce chapitre, ces indices sont calculés pour la zone Z5 (le salon) ainsi que pour les zones Z2, Z4 et Z6 (les chambres à coucher). De plus, il a été constaté que Z2 et Z4 présentent la même tendance de leurs indices d'inconfort thermique. Ainsi, l'évaluation a été limitée à Z2.

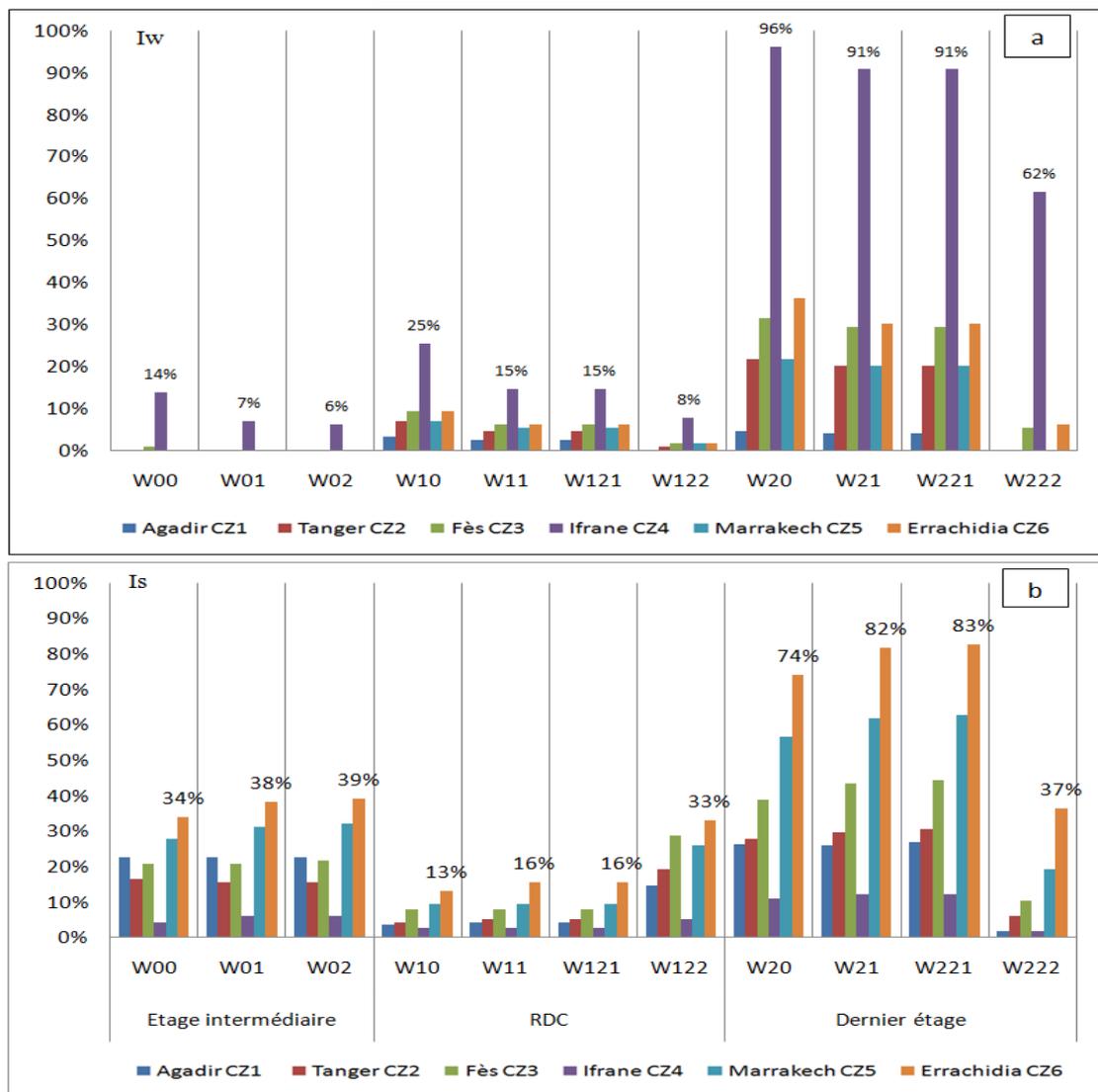


Figure 56. Indices d'inconfort thermique hivernal (a) et estival (b) pour la zone Z5

Les Figures 56 montrent les indices d'inconfort thermique dans la zone Z5 pour les différentes configurations de l'appartement ADAM dans les six climats étudiés. Évidemment, en période de chauffage (Fig. 56-a), l'indice d'inconfort dans le climat froid d'Ifrane est le plus élevé; cet indice est considérablement réduit par l'isolation thermique de l'enveloppe de l'appartement. La Figure 56-b montre que cette isolation thermique entraîne souvent une légère surchauffe car l'indice d'inconfort est légèrement augmenté pendant la période de refroidissement sauf pour l'isolation thermique du toit pour laquelle cet indice est extrêmement faible. Cependant, l'effet bénéfique de l'isolation thermique de l'enveloppe en termes de réduction de l'indice d'inconfort thermique pendant la période de chauffage prévaut. En outre, dans le climat désertique d'Errachidia, l'isolation thermique de l'enveloppe de l'appartement entraîne une surchauffe importante à mesure que l'indice d'inconfort augmente pendant la période de refroidissement (Fig. 56-b). La surchauffe estivale est également induite par l'isolation thermique du plancher bas dans le cas de l'appartement situé au rez-de-chaussée ou par l'isolation thermique de la façade dans le cas de l'appartement situé au dernier étage. D'autre part, il est intéressant de noter la réduction significative de l'indice d'inconfort pendant la période de refroidissement grâce à l'isolation thermique du toit. Cette isolation thermique a un grand effet bénéfique sur les indices d'inconfort liés aussi bien au chauffage qu'au

refroidissement. En effet, l'ajout de l'isolation thermique du toit permet de surmonter la surchauffe estivale due à l'isolation de la façade, en empêchant les énormes gains solaires à travers le toit exposé. On peut donc en conclure que l'isolation thermique du toit exposé dans un climat désertique est obligatoire alors que l'isolation thermique de la façade ne l'est pas. Pour cette dernière, la technique de la lame d'air peut être suffisante.

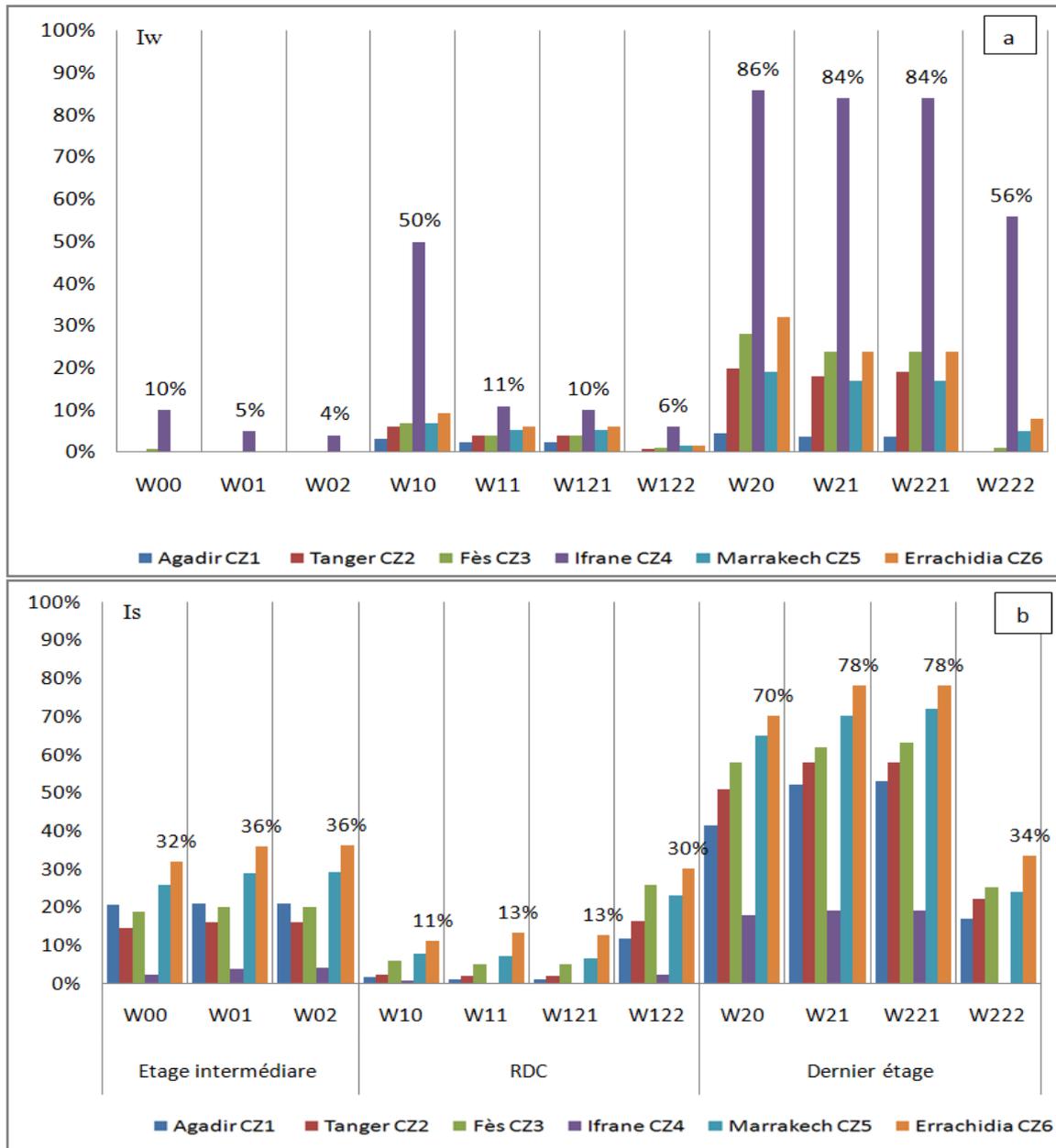


Figure 57. Indices d'inconfort thermique hivernal (a) et estival (b) pour la zone Z6

Pour les périodes de chauffage et de refroidissement, les indices d'inconfort thermique au sein des chambres Z6 et Z2 sont présentés respectivement dans les Fig. 57-58. Ces figures montrent que les indices d'inconfort thermique présentent des allures similaires à celle du salon (Z5). Cependant, il est à noter que les chambres de l'étage intermédiaire sont légèrement plus confortables pendant la saison de chauffage dans le climat froid d'Ifrane. En revanche, les chambres de l'appartement au rez-de-chaussée sont très inconfortables dans cette zone climatique vu que l'indice d'inconfort hivernal de cet étage prend sa valeur la plus élevée dans la chambre Z6, où 50% des heures de la saison chaude sont inconfortables. Ceci est attribué au

TGBV de cette chambre qui est plus grand que celui du salon (Z5) et de l'autre chambre Z2. De plus, la moitié de la surface vitrée de Z6 est orientée vers le nord et induit donc plus de pertes thermiques. Passer du simple au double vitrage permet de réduire de manière significative l'indice d'inconfort hivernal dans Z6, qui passe de 50% à 11% (Fig. 57-a).

La même tendance est observée dans Z5 (Fig. 56-a) et Z2 (Fig. 58-a). Cependant, dans ces deux pièces, l'indice d'inconfort hivernal est moins prononcé, car leur TGBV présente approximativement la même valeur et a la même orientation ouest. En outre, comme cela a été indiqué dans la section IV.1.1, il est observé que le système de la lame d'air combiné au double vitrage est suffisant pour assurer un bon confort thermique en hiver pour tous les étages. En effet, l'isolation thermique EPS de 5 cm n'introduit aucune variation significative de l'indice d'inconfort hivernal. De plus, il est clair que l'indice d'inconfort thermique estival est significativement réduit grâce à l'isolation thermique élevée du toit dans la configuration W222 de l'appartement du dernier étage sous tous les climats.

Il convient de noter, enfin, que cette isolation thermique a un effet bénéfique important sur les indices d'inconfort aussi bien en hiver qu'en été. En effet, l'isolation thermique du toit évite la surchauffe estivale due à l'isolation de la façade (EPS et double vitrage) qui empêche la pénétration des énormes gains solaires à travers le toit exposé comme il a été indiqué ci-dessus. En résumé, la comparaison des indices d'inconfort thermique dans les différents climats étudiés conduit aux remarques suivantes:

- La surchauffe estivale due à l'isolation thermique de la façade est présente à tous les étages du climat désertique (Errachidia) et semi-aride (Marrakech) sauf au niveau du rez-de-chaussée. Cependant, cette surchauffe n'est présente que dans l'appartement du dernier étage dans les climats méditerranéen (Tanger) et continental (Fès) ou dans le niveau intermédiaire dans le climat froid (Ifrane);
- L'isolation du plancher bas dans le cas d'un appartement au rez-de-chaussée entraîne une surchauffe estivale dans tous les climats étudiés. Cette surchauffe est très prononcée dans les climats désertique, semi-aride et continental. Cependant, dans les climats froids, l'effet bénéfique de l'isolation thermique du plancher bas sur le confort thermique hivernal surpasse et compense son effet négatif dû à la surchauffe estivale.
- L'isolation thermique du toit de l'appartement du dernier étage est fortement favorable pour le confort thermique d'hiver et d'été dans tous les climats.

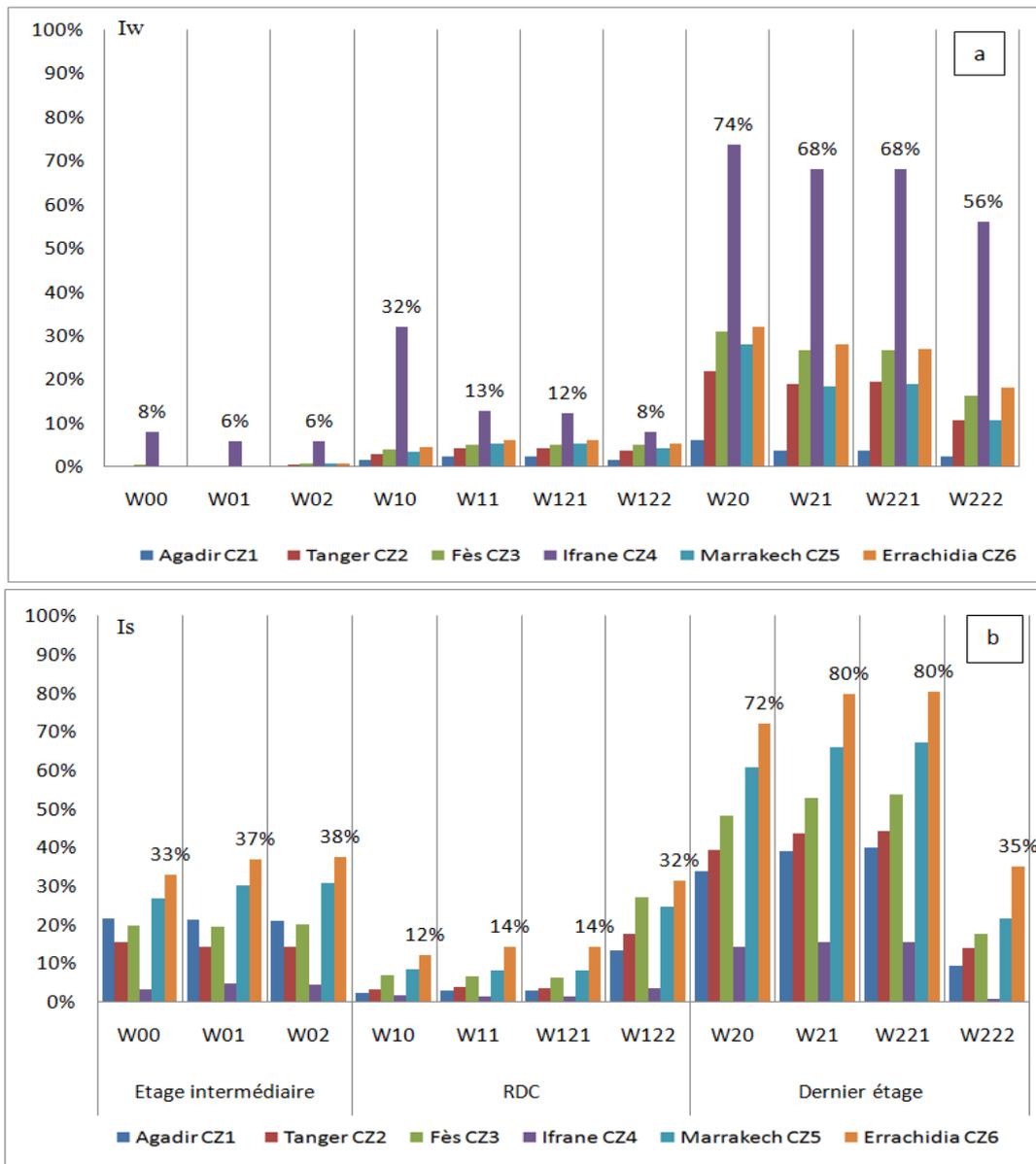


Figure 58. Indices d'inconfort thermique hivernal (a) et estival (b) pour la zone Z2

IV.3. Meilleure combinaison des techniques passive et semi-passive

Les sections précédentes ont été consacrées à examiner l'effet de chaque système passif et semi-passif considéré sur la performance thermique de l'appartement ADAM. Cependant, les interactions entre ces systèmes peuvent être importantes. Afin de mettre en évidence ces interactions, la meilleure combinaison de systèmes passifs pour chaque climat est sélectionnée et présentée dans le Tableau 15: L'appartement est considéré au niveau du dernier étage avec une façade orientée ouest et selon les résultats des sections précédentes, sa façade est faite de double mur isolé de 7 cm de lame d'air combinée à un vitrage simple dans tous les climats sauf dans le climat froid (Ifrane) où l'isolation thermique de la façade est renforcée avec du double vitrage et une isolation thermique de 5cm d'EPS au lieu de la lame d'air de 7cm. De plus, le toit est thermiquement isolé en utilisant 6cm de XPS dans tous les climats. En outre, la ventilation mécanique contrôlée (VMC) est utilisée compte tenu de son effet bénéfique sur la charge thermique globale. Le scénario de la gestion des dispositifs d'ombrage mobiles (volets roulants), de la ventilation mécanique contrôlée et de l'occupation de l'appartement sont ceux

décrits dans les sections III. 3 et III. 4. En outre, selon la conclusion de la section IV. 1. 7, les meilleures valeurs d'absorption des murs extérieurs et du toit, pour chaque climat, sont adoptées.

Tableau. 15. Combinaison des techniques passives et semi-passive selon le climat

		Zones climatiques						
		Agadir	Tanger	Fès	Ifrane	Marrakech	Errachidia	
Système passifs et semi-passif	Isolation thermique	Toit	x	x	x	x	x	x
		Façade				x		
	minimum absorptance	Toit	x	x	x		x	x
		Façade	x	x	x		x	x
	maximum absorptance	Toit				x		
		Façade				x		
	Double vitrage					x		
Ventilation mécanique contrôlée		x	x	x	x	x	x	

La Figure 59 présente les charges thermiques annuelles de l'appartement en adoptant les combinaisons décrites dans le Tableau 15 dans les six climats considérés. Ces charges thermiques sont comparées au cas de référence où tous les systèmes passifs et semi-passifs manquent à l'exception de la lame d'air.

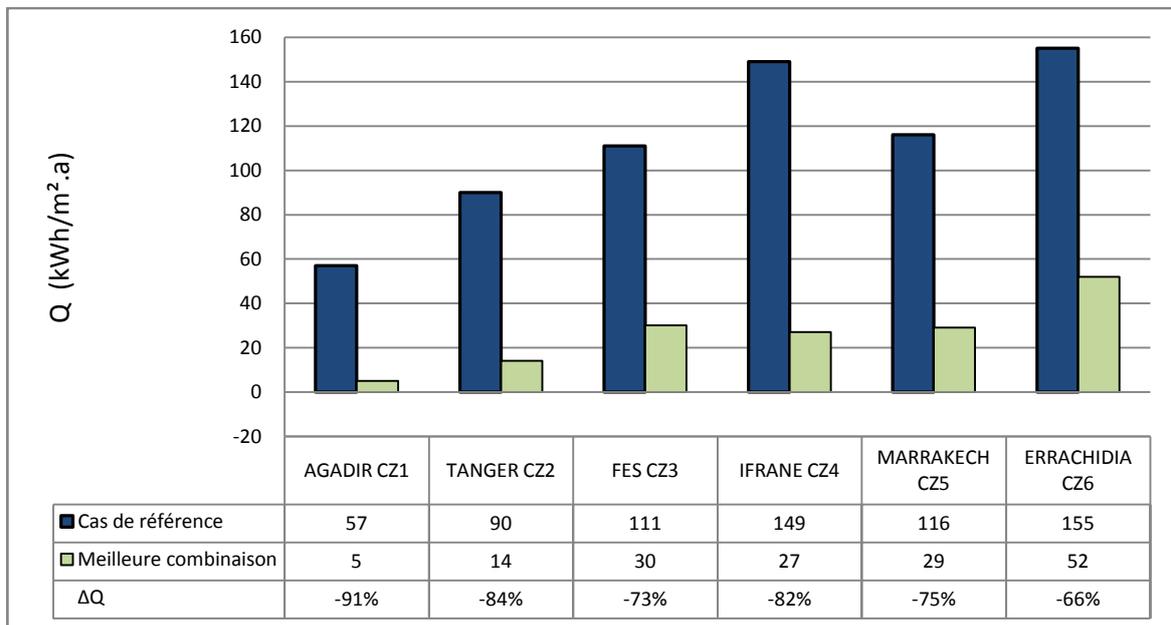


Figure 59. Charge thermique totale annuelle de l'appartement ADAM avec la meilleure combinaison des techniques passives et semi-passive comparée au cas de référence

A partir de cette figure, on peut voir que les charges thermiques de l'appartement sont significativement diminuées par l'intégration des systèmes passifs et semi-passifs considérés. Les réductions les plus importantes sont obtenues dans le climat atlantique (Agadir), méditerranéen (Tanger) et froid (Ifrane) où la charge thermique annuelle est réduite de 91%, 84% et 82% respectivement. La charge thermique résiduelle de l'appartement après intégration des techniques passives et semi-passive est très faible dans les climats atlantique et

méditerranéen. En effet, cette charge est infiniment petite dans le premier, alors qu'elle est inférieure au seuil de Passivhaus de $15\text{kWh} / \text{m}^2\cdot\text{a}$ dans le second. Dans le climat froid, elle est beaucoup plus élevée mais reste inférieure au seuil RTCM de la zone climatique Ifrane CZ4 (RTCM 2014). Un comportement similaire est observé dans le climat continental (Fès) et semi-aride (Marrakech). Une analyse détaillée des charges de chauffage et de refroidissement de l'appartement après l'intégration des systèmes passifs et semi-passifs montre qu'à Tanger, où ces charges thermiques sont du même ordre, la charge de refroidissement est abaissée de 92% par rapport au cas de référence alors que la réduction relative de la charge de chauffage est de 75%.

En revanche, à Ifrane, où la charge de chauffage est énorme par rapport à celle de refroidissement, la première est beaucoup plus réduite (84%) que la seconde (65%). D'autre part, dans les climats de Fès et de Marrakech, où la charge de refroidissement prévaut, sa réduction relative est supérieure à celle de la charge de chauffage. Il est donc clair que les systèmes passifs et semi-passif considérés donnent satisfaction du point de vue efficacité énergétique dans différents climats allant du froid au semi-aride. Concernant le climat désertique d'Errachidia où la réduction relative de la charge thermique de l'appartement est plus faible (66% par rapport au cas de référence), la charge thermique résiduelle reste élevée même si elle est largement inférieure au seuil défini par l'approche performantielle du RTCM ($65\text{kWh}/\text{m}^2\cdot\text{a}$) (RTCM 2014). Dans ce climat (désertique), la charge de refroidissement n'est pas suffisamment réduite comme pour les autres climats. En effet, ceci est attribué au faible potentiel de refroidissement de l'air extérieur à Errachidia comme cela a été explicité précédemment (Fig. 51).

Enfin, il est important de mentionner que la charge thermique annuelle de l'appartement intégrant les techniques passives et semi-passive est très inférieure au seuil de l'approche performantielle défini par le RTCM dans tous les climats. Ce seuil pour les bâtiments résidentiels est de 40, 46, 48, 64, 61 et $65\text{kWh} / \text{m}^2\cdot\text{a}$ respectivement pour les zones climatiques d'Agadir, Tanger, Fès, Ifrane, Marrakech et Errachidia (RTCM 2014).

V. Conclusion

Le comportement thermique et la performance énergétique d'un appartement typique (nommé appartement ADAM) situé dans un immeuble de cinq étages à Marrakech ont été abordés. Tout d'abord, une simulation dynamique de l'appartement à l'aide du logiciel TRNSYS a été réalisée et ses résultats ont été validés avec succès par rapport aux résultats expérimentaux obtenus à partir des suivis de longue période en été et en hiver (113 jours). Par la suite, de nombreuses techniques passives et semi-passive ont été appliquées à l'appartement et leurs performances énergétiques ont été évaluées à l'aide du modèle validé dans six conditions climatiques différentes allant du climat froid au climat désertique. Les techniques considérées sont: l'isolation thermique de l'enveloppe ainsi que son coefficient d'absorption solaire, la ventilation mécanique contrôlée, l'étage de l'appartement et son orientation. Les résultats numériques conduisent à la conclusion qu'à l'exception du climat froid, une isolation thermique élevée de la façade de l'appartement n'est pas recommandée. En effet, dans tous les autres climats considérés, cette isolation conduit à une surchauffe estivale et peut augmenter jusqu'à 18% la charge thermique totale de l'appartement. Dans ces climats, la technique d'isolation thermique par une lame d'air de 7cm était suffisante pour atteindre un niveau

d'efficacité énergétique acceptable dans l'appartement étudié, en plus d'éviter la surchauffe estivale. En ce qui concerne l'isolation thermique du plancher bas, il a également été démontré qu'elle augmente la charge thermique de l'appartement dans les climats chauds et modérés d'au moins 67%. Par conséquent, il est conclu que l'isolation thermique du plancher bas est nécessaire seulement dans le climat froid où la charge de chauffage est fondamentalement énorme et celle de refroidissement faible. Cependant, l'isolation thermique du toit (6cm de XPS) est fortement recommandée dans toutes les conditions climatiques, car elle réduit les besoins de l'appartement en énergie pour le refroidissement et le chauffage d'au moins 53%. De plus, il a été prouvé que cette technique ne provoque pas de surchauffe. Un autre paramètre intéressant sur le toit est la couleur des tuiles. En fait, des couleurs claires avec une absorption solaire de 0.3 à 0.4 sont suggérées dans les climats modérés à désertiques tandis que pour les climats froids, des tuiles de couleur foncée doivent être considérées.

De plus, afin de bénéficier du potentiel de refroidissement de l'air ambiant, une stratégie de ventilation contrôlée a été mise en place. Elle consiste à introduire de l'air extérieur à l'intérieur de l'appartement pendant les heures dites de confort thermique (lorsque la température extérieure est comprise entre 20°C et 26°C). Il a été constaté que cette ventilation est très bénéfique dans toutes les conditions climatiques, car elle réduit la charge thermique de l'appartement jusqu'à 60%.

En outre, une analyse de confort thermique de l'appartement non conditionné avec différentes mesures d'efficacité énergétique a été menée dans les six climats étudiés. Le confort thermique de l'appartement est indiqué par des indices d'inconfort en été et en hiver et il conduit aux remarques suivantes:

- La surchauffe estivale due à l'isolation thermique de la façade est présente à tous les niveaux dans les climats désertiques et semi-arides, à l'exception du rez-de-chaussée. Cependant, cette surchauffe n'est présente que dans l'appartement du dernier étage dans les climats méditerranéen et continental ou dans le niveau intermédiaire pour le climat froid;
- L'isolation du plancher bas conduit à une surchauffe estivale dans presque tous les climats étudiés. Cette surchauffe est très prononcée dans les climats désertique, semi-aride et continental. Cependant, dans le climat froid, l'effet bénéfique de l'isolation thermique du plancher bas sur le confort thermique hivernale surpasse son effet négatif dû à la surchauffe estivale ;
- L'isolation thermique du toit de l'appartement (du dernier étage) améliore le confort thermique aussi bien en hiver qu'en été et dans tous les climats.

La meilleure combinaison de toutes les mesures d'efficacité énergétique étudiées pour chaque condition climatique a été évaluée par comparaison avec un cas de référence qui représente l'appartement réel mais au dernier étage. Il en résulte que les techniques recommandées conduisent à un appartement économe en énergie car son énergie de refroidissement et de chauffage est réduite de plus de 66% selon les conditions climatiques. De plus, la charge thermique de l'appartement qui en résulte est constamment inférieure aux exigences du RTCM (2014).

CONCLUSION GENERALE

Le Maroc a instauré la stratégie énergétique nationale, lors des assises de l'énergie en mars 2009, et a retenu comme objectifs principaux la diminution de la consommation d'énergie de 15% à l'horizon de 2030 par la mise en œuvre de mesures d'efficacité énergétique dans les trois principaux secteurs économiques : l'industrie, le transport et le bâtiment et l'installation de plus de 42% de la capacité de production électrique à partir de ressources propres et renouvelables telles que le solaire thermique et photovoltaïque, l'éolien et l'hydroélectrique. Étant donné la nécessité de découper ces objectifs stratégiques en objectifs opérationnels, le champ de la recherche scientifique dans le domaine de l'énergétique devrait être considéré comme un acteur tout aussi indispensable dans cette démarche de développement national que les autres aspects : financier, juridique, institutionnel etc. C'est dans cette optique que s'inscrit ce travail dont l'objectif principal est la contribution à la conception de solutions d'économie d'énergie au sein des bâtiments.

Afin d'aborder cette question, il était nécessaire, avant tout, de passer en revue l'état de l'art et la bibliographie disponibles en la matière. A cette étape, nous avons décrit le volet passif de l'efficacité énergétique dans le bâtiment, en d'autres termes l'analyse des techniques relatives à l'aspect des échanges thermiques au sein des bâtiments particulièrement les techniques le plus largement traitées dans la littérature telles que l'isolation thermique, l'architecture, les matériaux de construction, les techniques semi-passives etc. ainsi que le passage en revue de certaines techniques statistiques d'analyse de données. Nous avons en effet exposé la méthodologie de recherche expérimentale basée sur les plans d'expériences et sur les différents modèles mathématiques servant à exprimer la variable de sortie (la charge thermique dans notre cas) en fonction des facteurs à impact direct sur cette dernière. En outre, nous avons souligné la nécessité d'une conception de combinaisons spéciales de l'ensemble des techniques passives et semi-passives selon les spécificités techniques, architecturales et climatiques du bâtiment en question vu la contrainte de mettre en œuvre des mesures énergétiquement efficaces standards indépendamment des dissemblances de chaque type de bâtiment et de climat.

Tout d'abord, une approche théorique utilisant des méthodes mathématiques d'analyse de données à savoir : les plans d'expérience et la régression linéaire a été mise en œuvre en vue de prédire, à l'aide de modèles mathématiques, les charges thermiques (refroidissement/chauffage) d'une cellule de bâtiment dans le climat chaud et semi-aride de Marrakech ainsi que de classer, par ordre d'importance, les facteurs à haut impact sur les performances énergétiques du bâtiment dans cette zone climatique.

Ensuite, nous avons analysé et évalué l'effet de certaines techniques passives et semi-passives sur la performance énergétique d'un appartement typique dans différents climats allant du climat froid au climat désertique. A cette fin, une étude de cas typique (nommé : Appartement ADAM) est considérée dans la ville de Marrakech. Un modèle numérique de l'appartement a été développé à l'aide de TRNSYS et validé par un suivi expérimental de longue durée (113 jours en été et en hiver). Afin de pouvoir mener une étude générale sur toutes les zones climatiques marocaines, telles qu'elles sont définies par l'Agence Marocaine pour l'Efficacité Énergétique, des simulations dynamiques thermiques ont été effectuées pour

évaluer l'impact des techniques étudiées sur la performance thermique et l'économie d'énergie de l'appartement considéré dans six climats: Atlantique, Méditerranéen, Continental, Froid, Semi-aride et Désertique. De plus, le choix de ces climats nous a permis d'effectuer une évaluation du Règlement Thermique des Constructions au Maroc (RTCM, 2014), qui est actuellement à ses premières étapes de mise en œuvre. Les principaux résultats concernant l'efficacité énergétique des bâtiments de type appartement dans les six climats du Maroc, peuvent se résumer comme suit :

- L'isolation thermique du toit exposé est indispensable dans tous les climats ;
- Le double vitrage et l'isolation thermique du plancher sur terre-plein ne sont nécessaires que dans les climats froids ;
- Pour des TGBV dépassant 25%, le double vitrage cause une surchauffe estivale importante s'il n'est pas protégé des rayonnements solaires directs ;
- L'isolation thermique de la façade génère une surchauffe considérable au sein du bâtiment pour les climats entre modérés et chauds. Cependant, la technique de la double cloison avec une lame d'air comme isolant est suffisante pour ces climats ;
- L'orientation de la façade du bâtiment a un impact sur son efficacité énergétique dépendant du climat ;
- La ventilation mécanique contrôlée est efficace pour réduire la charge de refroidissement mais pas celle du chauffage ;
- L'absorptivité élevée de l'enveloppe du bâtiment a un impact bénéfique sur sa consommation d'énergie de chauffage dans les climats froids, contrairement aux climats chauds et modérés où des couleurs claires de l'enveloppe sont recommandées.

Enfin, notons que les mesures d'efficacité énergétique proposées dans cette étude sont entièrement applicables et largement utilisées dans le monde entier. Cependant, rappelons qu'elles ne sont pas toujours correctement mises en œuvre. En effet, l'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment est souvent utilisée à tort comme une mesure corollaire de l'efficacité énergétique et du confort thermique du bâtiment sans tenir compte de son effet ambivalent tel qu'il a été établi dans cette recherche aussi bien pour les murs extérieurs que pour les planchers bas notamment dans les climats modérés et chauds. D'autre part, les utilisateurs n'accordent pas beaucoup d'importance au coefficient d'absorption de l'enveloppe qui a un impact considérable sur la performance énergétique du bâtiment comme cela a été confirmé dans cette étude. En outre, ces résultats pourraient servir de guide pratique pour la mise en œuvre de mesures d'efficacité énergétique dans les bâtiments aux premiers stades de la conception et de la construction.

En guise de perspectives de ce travail et pour améliorer l'étude théorique développée ici, d'autres modèles mathématiques devraient être établis tels que le modèle quadratique et le modèle à interaction des facteurs. De plus, pour la partie expérimentale, nous pensons qu'il serait intéressant de procéder à l'application de ces résultats dans d'autres types de bâtiments résidentiels ou tertiaires ayant des scénarios d'occupation différents. Concernant le volet économique, le retour sur investissement des mesures d'efficacité énergétique proposées dans

cette thèse devrait être évalué et les résultats de leurs meilleures combinaisons validés et suivis expérimentalement dans les six climats du Maroc. Enfin, des propositions devraient être formulées pour que ce travail puisse contribuer à l'amélioration du Règlement Thermique des Constructions au Maroc.

REFERENCES

- Al-ajmi F, and Hanby V I (2008). Simulation of Energy Consumption for Kuwaiti Domestic Buildings. *Energy and Buildings*, doi:10.1016/j.enbuild.2007.10.010.
- Al-Sallal K (1998). Sizing Windows to Achieve Passive Cooling, Passive Heating, and Daylighting in Hot Arid Regions. *Renewable Energy*, doi:10.1016/S0960-1481(98)00091-3.
- AMEE, Agence Marocaine pour l'Efficacité Energétique (2015). "Stratégie de formation en efficacité énergétique dans le bâtiment".
- Andersen B, Eidorff S, Lund H, Pedersen E, Rosenorn S, Valbjorn O. (1977). "Meteorological data for design of building and installation: a reference year". (extract), report no. 66, 2nd ed. Denmark: Thermal Insulation Laboratory.
- Aranda. A, G. Ferreira, M. D. Mainar-Toledo, S. Scarpellini, and E. Llera Sastresa, (2012). "Multiple regression models to predict the annual energy consumption in the Spanish banking sector," *Energy Build.*, vol. 49, pp. 380–387.
- Argiriou A, Lykoudis S, Kontoyiannidis S, Balaras CA, Asimakopoulos D, Petrakis M. (1999). "Comparison of methodologies for TMY generation using 20 years data for Athens, Greece". *Sol Energ*; 66:33-45.
- Arkar C. et MEDEVED S. (2005). "Influence of accuracy of thermal property data of a phase change material on the result of a numerical model of a packed bed latent heat storage with spheres ". *Thermochimica acta* (192-201).
- Arkar C. et MEDEVED S. (2007) "Free cooling of buildings using PCM heat integrated into the ventilation system". *Solar energy* (1078-1087).
- Asadi. S, M. Hassan, and A. Beheshti. (2012). "Development and validation of a simple estimating tool to predict heating and cooling energy demand for attics of residential buildings," *Energy Build.*, vol. 54, pp. 12–21.
- Asadi. S, S. Amiri, and M. Mottahedi. (2014). "On the development of multi-linear regression analysis to assess energy consumption in the early stages of building design," *Energy Build.*, vol. 85, pp. 246–255.
- Ashouri Milad, Fariborz Haghghat, Benjamin C.M. Fung ,Amine Lazrak , Hiroshi Yoshino. (2018). "Development of Building Energy Saving Advisory: A Data Mining Approach". *Energy & Buildings*, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.04.052.
- ASHRAE. (1997) chap. 24: Thermal and water vapor transmission data in *Handbook of Fundamentals*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta.
- Asim M, Jonathan Dewsbury and Safwan Kanan (2016). "TRNSYS Simulation of a Solar Cooling System for the Hot Climate of Pakistan". *Energy Procedia*, doi:10.1016/j.egypro.2016.06.233.
- Aviram D P, Fried A N and Roberts J J (2001). "Thermal Properties of a Variable Cavity Wall". *Building and Environment*, doi:10.1016/S0360-1323(00)00042-1.
- Aydinalp-Koksal. M and V. I. Ugursal, (2008) "Comparison of neural network, conditional demand analysis, and engineering approaches for modeling end-use energy consumption in the residential sector," *Appl. Energy*, vol. 85, no. 4, pp. 271–296,.

- Bansal, V. et al., (2011). "Performance analysis of integrated earth–air-tunnel-evaporative cooling system in hot and dry climate. *Energy & Buildings*", vol 47, pp.525–532.
- Beckman W A, Lars Broman, Alex Fiksel, Sanford A Klein, Eva Lindberg, Mattias Schuler and Jeff Thornton (1994). TRNSYS The Most Complete Solar Energy System Modeling and Simulation Software. *Renewable Energy*, doi:10.1016/0960-1481(94)90420-0.
- Benhamou B and Amin Bennouna (2013). Energy Performances of a Passive Building in Marrakech : Parametric Study. *Energy Procedia*, doi:10.1016/j.egypro.2013.11.064.
- Bilbao J, Miguel A, Franco JA, Ayuso A. (2004). "Test reference year generation and evaluation methods in the continental Mediterranean area". *J Appl Meteorol*; 43:390-400.
- BINAYATE Software, par AMEE (2015), "Assessment of the buildings energy performance and control of the conformity with the Moroccan Thermal Regulation for Construction. <http://www.amee.ma/index.php/fr/expertise/efficacite-energetique/batiment>. Consulté le 30/05/2016.
- Bolattürk A (2008). "Optimum Insulation Thicknesses for Building Walls with Respect to Cooling and Heating Degree-Hours in the Warmest Zone of Turkey". *Building and Environment*, doi:10.1016/j.buildenv.2007.02.014.
- Boumhaout M, Lahcen Boukhattem, Hassan Hamdi, Brahim Benhamou and Fatima Ait Nouh (2017). "Thermomechanical Characterization of a Bio-Composite Building Material: Mortar Reinforced with Date Palm Fibers Mesh". *Construction and Building Materials*, doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.12.217.
- Buratti C, Moretti E, Belloni E and Cotana F (2013). "Unsteady Simulation of Energy Performance and Thermal Comfort in Non-Residential Buildings". *Building and Environment*, doi:10.1016/j.buildenv.2012.09.015.
- Byrne A, Gerard Byrne, Anna Davies and Anthony James Robinson (2013). "Transient and Quasi-Steady Thermal Behaviour of a Building Envelope due to Retrofitted Cavity Wall and Ceiling Insulation". *Energy and Buildings*, doi:10.1016/j.enbuild.2013.02.044.
- Catalina. T, V. Iordache, and B. Caracaleanu. (2013). "Multiple regression model for fast prediction of the heating energy demand" *Energy Build.*, vol. 57, pp. 302–312.
- Chater B. (2013). "Les énergies renouvelables et lutte contre les défis des changements climatiques". http://www.agrimaroc.net/jma_2008/energies_reouvelables.pdf. Consulté le 19/05/2017.
- Chlela. F (2008). "Développement d'une méthodologie de conception de bâtiments à basse consommation d'énergie". Thèse de doctorat. Université de la Rochelle. France.
- Chlela. F, A. Husaunndee, C. Inard, and P. Riederer. (2009). "A new methodology for the design of low energy buildings," *Energy Build.*, vol. 41, no. 9, pp. 982–990.
- CSN EN 15251 (2007). "Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings- Addressing Indoor Air Quality , Thermal Environment , Lighting and Acoustics Contents". <https://www.en-standard.eu/csn-en-15251>. Consulté le 14/09/2017).
- Dabaieh M, Wanas O, HEGAZYc M A and JOHANSSON E (2014). "Reducing cooling demands in a hot dry climate; a simulation study for non-insulated passive cool roof thermal performance in residential buildings". *Energy and Buildings*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.034>

- Daouas. N (2011). "A study on optimum insulation thickness in walls and energy savings in Tunisian buildings based on analytical calculation of cooling and heating transmission loads," *Appl. Energy*, vol. 88, no. 1, pp. 156–164.
- Delwati Muhannad, Bart Merema, Hilde Breesch, Lieve Helsen, and Maarten Sourbron. (2017). "Impact of demand controlled ventilation on system performance and energy use". *Energy & Buildings*. doi: 10.1016/j.enbuild.2018.06.015.
- Dong. X, V. Soebarto, and M. Griffith. (2014). "Strategies for reducing heating and cooling loads of uninsulated rammed earth wall houses," *Energy Build.*, vol. 77, pp. 323–331.
- Drissi Lamrhari. M and Benhamou. B (2017). "Numerical and analytical methods in predicting the building's heating and cooling demands for hot semi-arid climates" *IEEE Explore, IRSEC'17, Tanger 4-7 Décembre 2017*. doi:
- Drissi Lamrhari. M and Benhamou. B (2018). "Thermal behavior and energy saving analysis of a flat with different energy efficiency measures in six climates" *Journal of Buildig Simulation*. doi : <https://doi.org/10.1007/s12273-018-0467-3>.
- Durbin. W and G. S. Watson. (1951). "Testing for serial correlation in least squares regression. II." *Biometrika*, vol. 38, no. 1–2, pp. 159–178,.
- Ebrahimpour A and Mehdi Maerefat (2011). "Application of Advanced Glazing and Overhangs in Residential Buildings". *Energy Conversion and Management*, doi:10.1016/j.enconman.2010.06.061.
- Ecomédia (2018). <https://www.leconomiste.com/flash-infos/importations-forte-hausse-de-la-facture-energetique-en-2017>. Consulté le 02/02/2018.
- Ekomy Ango. S (2011). Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment : développement d'un système actif à matériaux à changement de phase. Thèse de doctorat. Arts et Métiers, Paris - France.
- Fang Z, Nan Li, Baizhan Li, Guozhi Luo and Yanqi Huang (2014). "The Effect of Building Envelope Insulation on Cooling Energy Consumption in Summer". *Energy and Buildings*, doi:10.1016/j.enbuild.2014.03.030.
- Fang. T and R. Lahdelma. (2016). "Evaluation of a multiple linear regression model and SARIMA model in forecasting heat demand for district heating system," *Appl. Energy*, vol. 179, pp. 544–552.
- Fanger P O (1970). *Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering*: McGraw-Hill Book Company, USA.
- Farhanieh B and Sattari S (2006). Simulation of Energy Saving in Iranian Buildings Using Integrative Modelling for Insulation. *Renewable Energy*, doi:10.1016/j.renene.2005.04.004.
- Festa R, Ratto CF. (1993). "Proposal of a numerical procedure to select reference years". *Sol Energ*; 50:9-17.
- Florides. G. A, S.A. Tassou, S.A. Kalogirou, L.C. Wrobel (2002). Measures used to lower building energy consumption and their cost effectiveness. *Applied Energy*, vol 73 (2002) pp. 299–328.
- Flory-Celini C (2008). Modélisation et Positionnement de Solutions Bioclimatiques Dans Le Bâtiment Résidentiel Existant. Thèse de doctorat. Université Claude Bernard, Lyon - France.

- Foucquier. A, S. Robert, F. Suard, L. Stéphan, and A. Jay. (2013). "State of the art in building modelling and energy performances prediction: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 23, pp. 272–288.
- Georges. L, M. Berner, and H. M. Mathisen. (2014). "Air heating of passive houses in cold climates: Investigation using detailed dynamic simulations," *Build. Environ.*, vol. 74, pp. 1–12.
- Givoni B (1976). *Man, Climate and Architecture*. 2nd Edition. Harvard University Press, Cambridge, MA, U.S.A.
- Givoni B (2011). *Indoor Temperature Reduction by Passive Cooling Systems*. Solar Energy, doi:10.1016/j.solener.2009.10.003.
- Gong X, Yasunori Akashi and Daisuke Sumiyoshi (2012). *Optimization of Passive Design Measures for Residential Buildings in Different Chinese Areas*. *Building and Environment*, doi:10.1016/j.buildenv.2012.06.014.
- Goupy J, Creighton L (2006). *Introduction aux plans d'expériences*. Dunod, 3^{ème} édition. pp13-14.
- Hall IJ, Prairie RR, Anderson HE, Boes EC. (1978) "Generation of typical meteorological year for 26 SOLMET stations". Sandia Laboratories Report, SAND 78-1601. Albuquerque, New Mexico.
- Harmak Reda 2016, *Enquête du ministère de l'habitat : tout sur le logement au Maroc*. <http://lavieeco.com/news/economie/enquete-du-ministere-de-lhabitat-tout-sur-le-logement-au-maroc.html#urKi2Y2AaMWelysG.99>. Consulté le 01/02/2016.
- HCP, Haut Commissariat au Plan (2017). https://www.hcp.ma/downloads/Maroc-en-chiffres_t13053.html. Consulté le 07/03/2017.
- Hester N, Ke Li, John R. Schramski and John Crittenden (2012). *Dynamic Modeling of Potentially Conflicting Energy Reduction Strategies for Residential Structures in Semi-Arid Climates*. *Journal of Environmental Management*, doi:10.1016/j.jenvman.2011.12.002.
- Hollmuller, P. & Lachal, B. (2014). "Air-soil heat exchangers for heating and cooling of buildings: Design guidelines, potentials and constraints, system integration and global energy balance". *Applied Energy*, 119, pp.476–487.
- Hygh.J. S, J. F. DeCarolis, D. B. Hill, and S. Ranji Ranjithan. (2012). "Multivariate regression as an energy assessment tool in early building design" *Build. Environ.*, vol. 57, pp. 165–175.
- IAE (2016). *Energy Efficiency Indicators highlights - 2016* (free publication). <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/energy-efficiency-indicators-highlights-2016.html>. Consulté le 18/08/2017.
- Incropera F.P., D.P. DeWitt (1985). "Fundamentals of heat and mass transfer", John-Wiley and Sons.
- ISO 9869-Part 1: Heat flow meter method. (2014). "Thermal Insulation – Building Elements In-Situ Measurement of Thermal Resistance and Thermal Transmittance". <https://www.iso.org/standard/59697.html>. Consulté le 19/12/2017.
- ISO/CEI. (2005). "Ergonomics of the thermal environment -- Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria".

- Jaber S and Salman Ajib (2011). Optimum, Technical and Energy Efficiency Design of Residential Building in Mediterranean Region. *Energy and Buildings*, doi:10.1016/j.enbuild.2011.03.024.
- Jaffal, I, C. Inard, and C. Ghiaus. (2009). "Fast method to predict building heating demand based on the design of experiments," *Energy Build.*, vol. 41, no. 6, pp. 669–677,.
- Janjai S, Deeyai P. (2008). "Comparison of methods for generating typical meteorological year using meteorological data from a tropical environment". *Energy and Buildings*. doi:10.1016/j.apenergy.2008.08.008.
- Kaynakli O (2012). A Review of the Economical and Optimum Thermal Insulation Thickness for Building Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, doi:10.1016/j.rser.2011.08.006.
- Khabbaz M, Brahim Benhamou, Karim Limam, Pierre Hollmuller, Hassan Hamdi, and Amin Bennouna (2016). "Experimental and Numerical Study of an Earth-to-Air Heat Exchanger for Air Cooling in a Residential Building in Hot Semi-Arid Climate". *Energy and Buildings*, doi:10.1016/j.enbuild.2016.04.071.
- Kharesh M, Al-Khawaja M (2016). "Retrofitting measures for reducing buildings cooling requirements in cooling-dominated environment: Residential house". *Applied Thermal Engineering*. Vol. 98 pp. 352–356.
- Kolaitis D I, Emmanouil Malliotakis, Dimos A. Kontogeorgos, Ioannis Mandilaras, Dimitrios I. Katsourinis and Maria A. Founti (2013). "Comparative Assessment of Internal and External Thermal Insulation Systems for Energy Efficient Retrofitting of Residential Buildings. *Energy and Buildings*". doi:10.1016/j.enbuild.2013.04.004.
- Korolija, I, Y. Zhang, L. Marjanovic-Halburd, and V. I. Hanby. (2013). "Regression models for predicting UK office building energy consumption from heating and cooling demands," *Energy Build.*, vol. 59, pp. 214–227.
- Kossecka. E and J. Kosny. (2002). "Influence of insulation configuration on heating and cooling loads in a continuously used building," *Energy Build.*, vol. 34, no. 4, pp. 321–331.
- Krüger E, Eduardo González Cruz and Baruch Givoni (2010). Effectiveness of Indirect Evaporative Cooling and Thermal Mass in a Hot Arid Climate. *Building and Environment*, doi:10.1016/j.buildenv.2009.12.005.
- Krüger. E, B. Givoni, and C. Laroca, (2011) "Simplified method for yearlong thermal analysis of building prototypes," *Renew. Energy*, vol. 36, no. 2, pp. 699–708,.
- Kumar A and B M Suman (2013). Experimental Evaluation of Insulation Materials for Walls and Roofs and Their Impact on Indoor Thermal Comfort under Composite Climate. *Building and Environment*, doi:10.1016/j.buildenv.2012.09.023.
- Kusuda T and Achenbach PR (1965). "Earth Temperature and Thermal Diffusivity at Selected Stations in the United States". *ASHRAE Transactions*, Vol. 71, Part 1.
- Lam. J. C, K. K. W. Wan, D. Liu, and C. L. Tsang. (2010). "Multiple regression models for energy use in air-conditioned office buildings in different climates," *Energy Convers. Manag.*, vol. 51, no. 12, pp. 2692–2697.
- Larsen. S. F, C. Filippín, S. González (2012). "Study of the energy consumption of a massive free-running building in the Argentinean northwest through monitoring and thermal simulation", *Energy and Buildings*, Vol. 47, pp. 341-352.

- Magli, S, C. Lodi, F. M. Contini, a. Muscio, and P. Tartarini (2015). "Dynamic analysis of the heat released by tertiary buildings and the effects of urban heat island mitigation strategies" *Energy Build.*
- Mastouri H, Brahim Benhamou, Hassan Hamdi (2013). Pebbles Bed Thermal Storage for Heating and Cooling of Buildings. *Energy Procedia*, doi:10.1016/j.egypro.2013.11.079.
- Mastouri H, Brahim Benhamou, Hassan Hamdi, and Elie Mouyal. (2017). Thermal Performance Assessment of Passive Techniques Integrated into a Residential Building in Semi-Arid Climate. *Energy and Buildings*, doi:10.1016/j.enbuild.2017.03.022.
- Melo. A. P, M. Fossati, R. S. Versage, M. J. Sorgato, V. A. Scalco, and R. Lamberts. (2016). "Development and analysis of a metamodel to represent the thermal behavior of naturally ventilated and artificially air-conditioned residential buildings," *Energy Build.*, vol. 112, pp. 209–221.
- Merema Bart, Muhannad Delwati, Maarten Sourbron, Hilde Breesch. (2018). "Demand controlled ventilation (DCV) in school and office buildings: Lessons learnt from case studies". *Energy Build.* doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.065>
- Meteonorm. (2014). V7.0.22.8. Disponible sur www.meteonorm.com. Consulté le 15/07/2015.
- Ministère de l’Energie, des Mines, de l’Eau et de l’Environnement. (2009). "Loi 47/09 relative à l’efficacité énergétique". <http://www.mem.gov.ma/SitePages/TestesReglementaires/Loi47-09.pdf>. Consulté le 15/07/2015.
- NM ISO 7730. 2010. Institut Marocain de Normalisation, Ergonomie des ambiances thermiques - Détermination analytique et interpretation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des criteres de confort thermique local. http://www.imanor.gov.ma/?keyword-type=course_id&s=NM+ISO+7730. consulté le 19/12/2017.
- Osterman. E, V. V. Tyagi, V. Butala, N. A. Rahim, and U. Stritih. (2012). "Review of PCM based cooling technologies for buildings," *Energy Build.*, vol. 49, pp. 37–49,.
- Ozel M (2013). Determination of Optimum Insulation Thickness Based on Cooling Transmission Load for Building Walls in a Hot Climate. *Energy Conversion and Management*, doi:10.1016/j.enconman.2012.10.002.
- Parti. M (1980). "The Total and Appliance Specific Conditional Demand for Electricity in the Household Sector", *Bell J. Econ.*, vol. 11, no. 1, pp. 309–321,.
- Pascal G. – GlassX. (2010). Les matériaux à changement de phase – Les cahiers techniques du bâtiment N°295 -.
- Piselli C, Saffari M, Alvaro de Gracia, Pisello A L, Cotana F, Luisa F. Cabeza (2017). "Optimization of roof solar reflectance under different climate conditions, occupancy, building configuration and energy systems". *Energy Build.*, <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.enbuild.2017.06.045>.
- Reindl, W. A. Beckman, J. A. Duffie. (1990). "Diffuse fraction correlations ", *Solar Energy*, Vol. 45, pp. 1-7.
- Romani. Z, A. Draoui, and F. Allard. (2015) "Metamodeling the heating and cooling energy needs and simultaneous building envelope optimization for low energy building design in Morocco," *Energy Build.*, vol. 102, pp. 139–148.

- RT (2012). "Réglementation Thermique Française (Version 2012)". Disponible sur <http://www.rt-batiment.fr/>. Consulté le 28/04/2016.
- RTCM (2014). Règlement Général de Construction Fixant Les Règles de Performance Énergétique de Constructions Au Maroc. Morocco, Bulletin officiel N°6306-2014. <http://www.amee.ma/index.php/ar/publicationsetmedias/publications>. Consulté le 25/04/2017.
- Rutledge.D and a. S. Barros (2002). "Durbin-Watson statistic as a morphological estimator of information content," *Anal. Chim. Acta*, vol. 454, no. 2, pp. 277–295.
- Sadineni S B, Srikanth Madala and Robert F Boehm (2011). Passive Building Energy Savings: A Review of Building Envelope Components. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, doi:10.1016/j.rser.2011.07.014.
- Saman. W. et al. – Thermal performance of PCM thermal storage unit for a roof integrated solar heating system. (2005). *Solar energy* – (341-349).
- Sameni. S, Mark Gaterell, Azadeh Montazami, Abdullahi Ahmed (2015)." Overheating investigation in UK social housing flats built to the Passivhaus standard" *Building and Environment*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.030>.
- Santamouris. M, D. Kolokotsa. (2013). "Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art", *Energy and Buildings*, Vol. 57, pp. 74-94.
- Sick. F, S. Schade, A. Mourtada, D. Uh, and M. Grausam. (2014) "Dynamic building simulations for the establishment of a moroccan thermal regulation for buildings," *J. Green Build.*, vol. 9, no. 1, pp. 145–165.
- Sobhy Issam, Abderrahim Brakez and Brahim Benhamou (2014). Effect of Thermal Insulation and Ground Coupling on Thermal Load of a Modern House in Marrakech. In *Proceedings of 2014 International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2014*, doi:10.1109/IRSEC.2014.7059797.
- Sobhy Issam, Abderrahim Brakez and Brahim Benhamou (2017-a). Analysis for Thermal Behavior and Energy Savings of a Semi-Detached House with Different Insulation Strategies in Hot Semi Arid Climate. *Journal of Green Building*,12:72-106.
- Sobhy Issam (2017-b). Modélisation dynamique d'un bâtiment résidentiel à Marrakech et propositions pour améliorer ses performances énergétiques PP 84-85. Thèse de doctorat. Université Cadi Ayyad, Marrakech - Maroc.
- Soupart-Caron. A (2015). Stockage de chaleur dans les matériaux à changement de phase. PhD Thesis. Université Grenoble-Alpe - France.
- Stazi F, Ambra Vegliò, Costanzo Di Perna and Placido Munafò (2013). Experimental Comparison between 3 Different Traditional Wall Constructions and Dynamic Simulations to Identify Optimal Thermal Insulation Strategies. *Energy and Buildings*, doi:10.1016/j.enbuild.2013.01.032.
- Stazi F, Elisa Tomassoni and Costanzo Di Perna (2016). Super-Insulated Wooden Envelopes in Mediterranean Climate: Summer Overheating, Thermal Comfort Optimization, Environmental Impact on an Italian Case Study. *Energy & Buildings*, doi:10.1016/j.enbuild.2016.12.042.
- Suehrcke H, Eric L. Peterson and Neville Selby (2008). Effect of Roof Solar Reflectance on the Building Heat Gain in a Hot Climate. *Energy and Buildings*, doi:10.1016/j.enbuild.2008.06.015.

- TRNSYS (2010). University of Wisconsin Madison, "TRNSYS 17".
- Van Hooff T, Blocken B, Hensen J L M, and Timmermans H J P (2014). On the Predicted Effectiveness of Climate Adaptation Measures for Residential Buildings. *Building and Environment*, doi:10.1016/j.buildenv.2014.08.027.
- Wang, J. Kuckelkorn, F.-Y. Zhao, H. Spliethoff, and W. Lang. (2016). "A state of art of review on interactions between energy performance and indoor environment quality in Passive House buildings," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, no. October.
- Wang. W, Z. Tian, Y. Ding. (2013). "Investigation on the influencing factors of energy consumption and thermal comfort for a passive solar house with water thermal storage wall", *Energy and Buildings*, Vol. 64, pp. 218-223.
- Wati. E, P. Meukam, and M. K. Nematchoua. (2015). "Influence of external shading on optimum insulation thickness of building walls in a tropical region". *Appl. Therm. Eng.*, vol. 90, pp. 754–762,.
- Yaşar Y and Sibel MaçKa Kalfa (2012). The Effects of Window Alternatives on Energy Efficiency and Building Economy in High-Rise Residential Buildings in Moderate to Humid Climates. *Energy Conversion and Management*, doi:10.1016/j.enconman.2012.05.023.
- Yun. k, R. Luck, P. J. Mago, and H. Cho. (2012). "Building hourly thermal load prediction using an indexed ARX model," *Energy Build.*, vol. 54, pp. 225–233.
- Zermout. R (2011). Utilisation de l'énergie géothermique de surface pour la climatisation dans le bâtiment. Mémoire de Magister. Université Mouloud MAMMERI, Tizi Ouzou. Algérie.
- Zhang Yan , Xuemei Bai , Franklin P. Mills , John C.V. Pezzey (2018). "Rethinking the role of occupant behavior in building energy performance": A review. *Energy & Buildings*, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.05.017

ANNEXES

I. Annexe I: Caractéristiques thermophysiques des couches de la façade de l'appartement

Tableau A.1. Description des caractéristiques thermophysiques des couches constitutives de la façade de l'appartement.

	Couches	Mortier	Brique rouge	Lame d'air	Brique rouge	Mortier	Total
Façade	Epaisseur (cm)	2	10	7	20	2	41
	λ (W/m.K)	1.8	0.18	0.14	0.18	1.8	0.473
	ρ (kg/m³)	2500	918	1.2	918	2500	–

Tableau A.2. Description des caractéristiques thermophysiques des couches constitutives du plafond et du plancher bas de l'appartement.

	Couches	Plâtre	Brique hourdis	Béton armé	Mortier	Marbre	Total
Plafond	Epaisseur (cm)	2	16	5	6	2	31
	λ (W/m.K)	0.57	1.17	2.3	1.8	2.9	2.471
	ρ (kg/m³)	1150	1372	2350	2500	2600	–
Plancher bas	Couches	Marbre	Mortier	Béton armé	Brique hourdis	Plâtre	Total
	Epaisseur (cm)	2	6	5	16	2	31
	λ (W/m.K)	2.9	1.8	2.3	1.17	0.57	2.471
	ρ (kg/m³)	2600	2500	2350	1372	1150	–

II. Annexe II : Transferts thermiques conductif dans une paroi de bâtiment (TRNSYS 2010)

TRNSYS modélise les parois à travers les fonctions de transfert de Mitalas et Arsenault. Cette méthode est basée sur l'analyse des échanges de chaleur, qui permet de calculer avec une bonne précision la conduction dans les parois en régime transitoire. La Figure A.1 présente les flux de chaleur et les températures qui caractérisent le comportement thermique d'un mur ou d'une fenêtre.

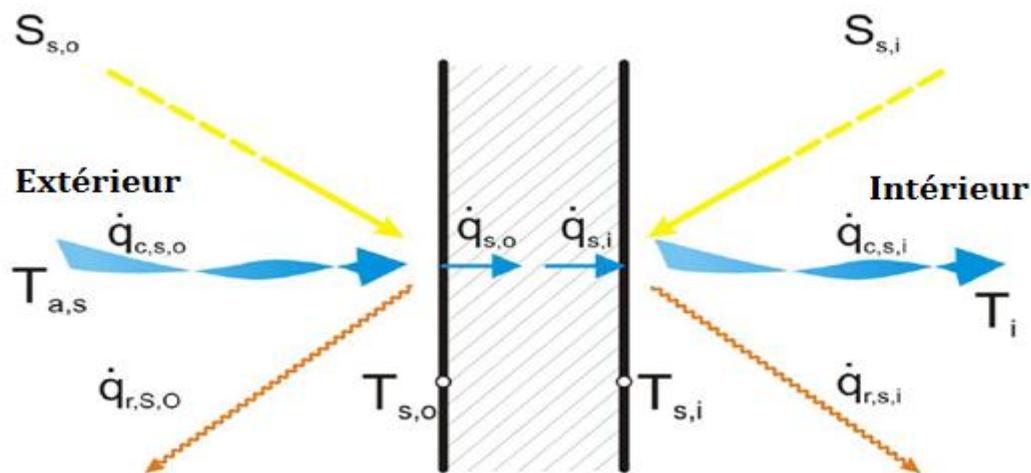


Figure A.1. Flux de chaleur et températures d'une paroi de bâtiment (TRNSYS 2010)

La nomenclature utilisée dans cette figure est la suivante :

$S_{s,i}$: Rayonnement de courte longueur d'onde absorbé par la surface intérieure (les gains solaires et radiatifs)

$S_{s,o}$: Rayonnement de courte longueur d'onde absorbé par la surface extérieure (gains solaires) ;

$\dot{q}_{r,s,i}$: Flux net radiatif de grande longueur d'onde échangé avec toutes les autres surfaces de la zone.

$\dot{q}_{r,s,o}$: Flux net radiatif échangé avec toutes les surfaces extérieures à la zone.

$\dot{q}_{w,g,i}$: Gain dans la paroi ou dans la surface de la fenêtre défini par l'utilisateur.

$\dot{q}_{s,i}$: Flux conductif dans le mur vers la surface interne.

$\dot{q}_{s,o}$: Flux conductif dans le mur à partir de la surface externe.

$\dot{q}_{c,s,i}$: Flux convectif à partir de la surface interne du mur vers l'air de la zone.

$\dot{q}_{c,s,o}$: Flux convectif à partir de la surface externe du mur vers l'air ambiant.

$T_{s,i}$: Température de la surface interne du mur.

$T_{s,o}$: Température de la surface externe du mur.

T_i : Température du nœud de la zone i.

$T_{a,s}$: Température de l'air ambiant.

Pour une paroi, le transfert de chaleur par conduction au niveau des surfaces est donné par les équations A.1-2.

$$\dot{q}_{s,i} = \sum_{k=0}^{n_{b_s}} b_s^k \cdot T_{s,o}^k - \sum_{k=0}^{n_{c_s}} c_s^k \cdot T_{s,i}^k - \sum_{k=1}^{n_{d_s}} d_s^k \cdot \dot{q}_{s,i}^k \quad (\text{Eq. A.1})$$

$$\dot{q}_{s,o} = \sum_{k=0}^{n_{a_s}} a_s^k \cdot T_{s,o}^k - \sum_{k=0}^{n_{b_s}} b_s^k \cdot T_{s,i}^k - \sum_{k=1}^{n_{d_s}} d_s^k \cdot \dot{q}_{s,o}^k \quad (\text{Eq. A.2})$$

Ces équations de séries temporelles en termes de température de surface et de flux de chaleur sont évaluées à des intervalles de temps égaux. L'exposant k se rapporte à la limite de la série chronologique telle que l'heure courante est k = 0 et le temps suivant est k = 1, etc. La base de temps sur laquelle ces calculs sont effectués est spécifiée par l'utilisateur dans la description du bâtiment sous TRNBuild. La paroi est considérée comme une boîte noire, et elle est définie par quatre coefficients qui représentent son comportement thermique. Ces coefficients de la série chronologique (a_s , b_s , c_s et d_s) sont déterminés dans le programme TRNBUILD en utilisant les fonctions de la « transformé en Z ». En effet, le calcul de ces coefficients intègre les propriétés thermophysiques de chaque couche constituant la paroi.

La méthode de la fonction de transfert de Mitalas et Arsenault peut être décrite comme un moyen pour évaluer « l'histoire thermique » d'une paroi. Le nombre de pas de temps (k), relié à la base de temps (défini par l'utilisateur) indique si la paroi est lourde avec une masse thermique élevée ou si seulement quelques pas de temps doivent être considérés pour décrire son comportement thermique. Si la base de temps de la paroi considérée est supérieure au pas de temps de simulation, le calcul des coefficients de la matrice de fonction de transfert sera arrêté. Par conséquent, une telle paroi "mince" peut être remplacée par une définition de la résistance en négligeant la masse thermique.