

Faculté des Sciences et Techniques

Settat

THÈSE DE DOCTORAT

Pour l'obtention de grade de Docteur en Sciences et Techniques

Formation Doctorale : Physique des sciences de l'ingénieur

Spécialité : Génie Electrique et Énergétique

Sous le thème

L'optimisation de performance énergétique de bâtiment au MAROC : Techniques de conception passive

Présentée par :

BOUSSAFI Abdellah

Soutenue le : *Vendredi 02 Décembre 2022*

A la Faculté des Sciences et Techniques de Settat devant le jury composé de :

Pr. Mustapha BOUGTEB	PES	ENSA de Berrechid	Président
Pr. Abdellah BOULAL	PH	FST de Settat	Rapporteur
Pr. Malika ZAZI	PES	ENSAM de Rabat	Rapporteure
Pr. Mohamed RAFI	PH	AIAC	Rapporteur
Pr. Abderrahim FAKKAR	PES	FST de Mohammedia	Examineur
Pr. Najat OUAALINE	PES	FST de Settat	Directrice de thèse

A Malak, Saïda

A mes Parents

Résumé

Les recherches menées dans ce travail découlent de la nécessité de répondre aux problématiques actuelles liées au secteur de la construction, notamment énergétiques dans les bâtiments résidentiels : impact environnemental (émission de gaz à effet de serre, pollution de l'air), ressources limitées dans le temps (épuiement des énergies fossiles) et la flambée du coût de l'énergie. A ces problématiques s'ajoutent des défis encouragés par le programme national d'efficacité énergétique qui vise à économiser 20% d'énergie à l'horizon du 2030. Pour faire face aux enjeux énergétiques de manière plus globale et plus précise, l'utilisation de l'outil de Simulation Thermique Dynamique (STD) par les professionnels du bâtiment, devient de plus en plus un excellent outil au service du concept énergétique du bâtiment car il guide les choix architecturaux et technologiques, et il permet de vérifier les objectifs fixés lors de la phase de conception du projet. Dans une première partie des travaux, l'outil de la Simulation Thermique Dynamique a permis de déterminer les besoins annuels pour le chauffage et le refroidissement d'un modèle de logement au Maroc, et de réaliser une analyse du comportement thermo-énergétique au bâtiment, ainsi de déterminer la relation entre le confort thermique cherché par l'occupant et la consommation énergétique du bâtiment, et aussi une étape pour valider la justesse du modèle numérique de notre bâtiment de référence. Par la suite, une étude a été réalisée sur l'impact des taux des baies vitrées de bâtiment de référence sur sa consommation énergétique, et cela dans les six zones climatiques au Maroc. Afin de déterminer le ratio optimal en termes de taille des surfaces vitrées pour chaque climat et pour chaque orientation. Dans une dernière phase de travail, l'étude a mis en évidence de traiter l'optimisation plus profondément, en appliquant des techniques passives sur l'enveloppe du notre bâtiment de référence en prenant compte de l'orientation, les parois opaques extérieures et les parois vitrées. Par lequel une nouvelle variante optimale de paramètres sera identifiée pour un modèle d'un bâtiment économe situé dans la zone cinq qui conduira à un saut de classe énergétique.

Mots clés :

Optimisation de performance énergétique, Technique de conception passive, Isolation thermique, Simulation thermique-dynamique des bâtiments, Bâtiment passif, Climat chaud, Confort thermique, Transition énergétique au Maroc, Taux des baies vitrées.

Abstract

The research carried out in this work arises from the need to respond to current issues related to the construction sector, particularly energy in residential buildings : environmental impact (greenhouse gas emissions, air pollution), limited resources in time (depletion of fossil fuels) and soaring energy costs. In addition to these issues, there are also challenges posted by the national energy efficiency program which aims to save 20% of energy by 2030. To face energy challenges in a more comprehensive and precise way, the use of the dynamic thermal simulation tool (DTS) by building professionals is increasingly becoming an excellent tool at the service of the energy concept of the building, because it guides architectural and technological choices and more, it also makes it possible to verify the objectives set during the design phase of the project. In a first part of the work, this STD tool made it possible to determine the annual heating and cooling needs of a housing model in Morocco, and to carry out an analysis of the thermo-energetic behavior in the building, thus determining the relationship between the thermal comfort sought by the occupant and the building's energy consumption. And also a step to validate the accuracy of our digital model of our reference building. Subsequently, a study was carried out on the impact of the rates of the bay windows of our benchmark building on its energy consumption, and this in the six climatic zones in Morocco. In order to determine the optimal ratio in terms of the size of the glazed surfaces for each climate and for each orientation. In a final phase of work, the study showed how to deal with the optimization more deeply, by applying passive techniques to the envelope of our reference building, taking into account the orientation, the opaque exterior walls and the glass walls. By which a new optimal variant of parameters will be identified for a model of a thrifty building located in zone five which will lead to a jump in energy class.

Keywords :

Optimization of energy performance, Passive design technique, Thermal insulation, Thermal-dynamic simulation of buildings, Passive building, Hot climate, Thermal comfort, Energy transition in Morocco, Window to Wall Ration (WWR).

ملخص الأطروحة

ينشأ البحث الذي تم إجراؤه في هذه الدراسة من الحاجة إلى الاستجابة للقضايا الحالية المتعلقة بقطاع البناء، ولا سيما الطاقة في المباني السكنية: التأثير البيئي (انبعاثات غازات الاحتباس الحراري وتلوث الهواء)، والموارد المحدودة (استنفاد الوقود الأحفوري) وارتفاع تكاليف الطاقة. بالإضافة إلى هذه القضايا، هناك أيضًا تحديات يتم تشجيعها في شكل برنامج وطني لكفاءة الطاقة يهدف إلى توفير 20٪ من الطاقة بحلول عام 2030. لمواجهة تحديات الطاقة بطريقة أكثر شمولاً ودقة، أصبح استخدام أداة المحاكاة الحرارية الديناميكية من قبل متخصصي البناء بشكل متزايد أداة ممتازة في خدمة مفهوم الطاقة للمبنى، لأنها توجه الخيارات المعمارية والتكنولوجية وأكثر من ذلك، فإنه يجعل من الممكن أيضًا التحقق من الأهداف المحددة أثناء مرحلة تصميم المشروع.

في الجزء الأول من العمل، أتاحت أداة المحاكاة هذه تحديد احتياجات التدفئة والتبريد السنوية لنموذج الإسكان في المغرب، وإجراء تحليل لسلوك الطاقة الحرارية في المبنى، وبالتالي تحديد العلاقة بين الراحة الحرارية التي يسعى إليها السكان واستهلاك الطاقة في المبنى. وأيضًا خطوة للتحقق من دقة نموذجنا الرقمي لمبنى مرجعي لدينا. بعد ذلك، تم إجراء دراسة حول تأثير معدلات النوافذ الكبيرة لمبنا المعيار على استهلاك الطاقة، وهذا في المناطق المناخية الست في المغرب. من أجل تحديد النسبة المثلى من حيث حجم الأسطح الزجاجية لكل مناخ ولكل اتجاه. في المرحلة النهائية من العمل، أوضحت الدراسة كيفية التعامل مع التحسين بشكل أعمق، من خلال تطبيق تقنيات سلبية على غلاف المبنى المرجعي، مع مراعاة الاتجاه والجدران الخارجية غير الشفافة والجدران الزجاجية. من خلالها سيتم تحديد متغير أمثل جديد من المعلمات لنموذج مبنى مقتصد يقع في المنطقة الخامسة مما سيؤدي إلى قفزة في فنة الطاقة.

الكلمات الدالة:

تحسين أداء الطاقة ، تقنية التصميم السلبي ، العزل الحراري ، المحاكاة الحرارية الديناميكية للمباني ، البناء السلبي ، المناخ الحار ، الراحة الحرارية ، الانتقال الطاقوي بالمغرب ، نسبة النافذة إلى الجدار

Remerciement

Je ne saurais commencer ce rapport sans remercier **ALLAH** le Tout-Puissant, le tout miséricordieux, qui m'a donné grâce et bénédiction pour l'accomplissement de ce travail.

Je tiens à remercier Madame **Najat OUAALINE**, Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Settat, qui m'a encadrée tout au long de cette thèse et qui m'a fait partager ses brillantes intuitions. Qu'elle soit aussi remerciée pour sa gentillesse, sa disponibilité permanente et pour les nombreux encouragements qu'elle m'a prodigués.

Je remercie vivement Monsieur **Mustapha BOUGTEB** qui a accepté le rôle de Président du jury.

Merci également à Madame **Malika ZAZI**, Monsieur **Abdellah BOULAL** et Monsieur **Mohamed RAFI** d'avoir accepté d'être rapporteurs. Merci pour vos corrections, remarques et suggestions constructives.

En acceptant d'être l'examineur de mon travail, le professeur **Abderrahim FAKKAR** m'a fait un grand honneur. Qu'il trouve ici toute ma gratitude.

Je remercie très vivement tous les membres du laboratoire **IMI** que j'ai pu côtoyer et qui ont contribué directement, ou indirectement à la réalisation de cette thèse.

Mes sincères remerciements au Professeur **Abdelwahed ECHCHATBI** notre directeur de laboratoire Ingénierie Management Industriel et Innovation, et tous mes Professeurs du Département **GE&GM** à qui je dois la réussite de mon parcours universitaire et de mes expériences professionnelles.

À ma famille bien-aimée qui a toujours cru en moi, pour son irremplaçable et inconditionnel soutien : elle a toujours été à mes côtés pour me soutenir, me pousser vers l'avant et m'encourager dans les moments cruciaux de ma vie étudiante. À tous mes amis proches.

Table des matières

INTRODUCTION	1
GENERALE	1
CHAPITRE 1	6
L'ETAT DE L'ART	6
1- INTRODUCTION	7
2- CONCEPTION ECONOMIQUE	8
3- BATIMENT ET CLIMAT	9
3.1 BATIMENT A ENERGIE PASSIVE (BEPAS)	10
3.2 BATIMENT A ENERGIE ZERO (ZEB)	11
3.3 BATIMENT BASSE CONSOMMATION (BBC)	11
3.4 STRATEGIES GENERALES DU BATIMENT PASSIF	12
4- BATIMENT ET CLIMAT CHAUD	15
4.1 L'ECLAIRAGE	15
4.2 ECHANGEUR AIR-SOL (PUITS CANADIEN)	16
4.3 VENTILATION NATURELLE	17
4.4 LA FORME DU BATIMENT	19
4.5 OMBRAGE	20
5- TECHNIQUES DE CONSTRUCTION DES PAROIS EXTERIEURES DU BATIMENT DANS LES ZONES CLIMATIQUES CHAUDES	21
5.1 CONCEPTION DES MURS EXTERIEURS	22
5.2 L'ISOLATION D'ENVELOPPE DU BATIMENT	25
5.3 CONCEPTION DES FENETRAGES	27
5.4 CONCEPTION DE LA TOITURE	31
5.5 MAITRISE DES APPORTS SOLAIRES	32
5.6 OMBRAGE	34
6- LE CONFORT THERMIQUE	35
6.1 L'OCCUPANT ET LE CONFORT THERMIQUE	36
6.2 ASHRAE ET LE CONFORT THERMIQUE	37
6.3 OLGAY ET LE CONFORT THERMIQUE	38
6.4 GIVONI ET LE CONFORT THERMIQUE	38

6.5	FANGER ET LE CONFORT THERMIQUE	39
7-	CONCLUSION	40
CHAPITRE 2		41
METHODOLOGIES ET MATERIELS		41
1-	INTRODUCTION	42
2-	OUTILS POUR LA SIMULATION	42
2.1	TRNSYS SOFTWARE	42
2.2	GENOPT	44
2.3	COUPLAGE GENOPT ET TRNSYS	44
2.4	METEONORM	45
3-	DESCRIPTION DU BATIMENT ETUDIE	45
3.1	LES BAIES VITREES	46
3.2	TOITURE ET PLANCHER	47
3.3	LES PAROIS OPAQUES	48
3.4	AIR INFILTRE	49
3.5	CONFIGURATION DU CHAUFFAGE ET DE REFROIDISSEMENT	49
3.6	APPORT INTERNE	50
3.6.1	Eclairage et appareillage électrique	50
3.6.2	Occupant	50
4-	CONCLUSION	52
CHAPITRE 3		53
APPLICATION DE LA SIMULATION ENERGETIQUE DU BATIMENT A		
L'EVALUATION DU COMPORTEMENT THERMIQUE D'UN APPARTEMENT AU		
MAROC		53
1-	INTRODUCTION	54
2-	DESCRIPTION DU NOUVEAU BATIMENT	54
2.1	BATIMENT	54
2.2	DONNEES METEOROLOGIQUES	56
2.3	LES APPORTS INTERNES	58
2.3.1	Occupant	58
2.3.2	Eclairage et appareillages électriques	59
3-	SIMULATION DU BATIMENT	59
4-	RESULTATS ET DISCUSSION	60
5-	CONCLUSION	65

CHAPITRE 4	67
OPTIMISATION DE LA TAILLE, DE LA POSITION ET DE L'ORIENTATION DES FENETRES DANS UN BATIMENT TYPIQUE DANS LES SIX ZONES CLIMATIQUES DU MAROC	67
1- INTRODUCTION	68
2- METHODE ET SIMULATION	68
2.1 DONNEES METEOROLOGIQUES	69
2.1.1 Zone 1 : Agadir	70
2.1.2 Zone 2 : Tanger	71
2.1.3 Zone 3 : Fès	71
2.1.4 Zone 4 : Ifrane	72
2.1.5 Zone 5 : Settat	72
2.1.6 Zone 6 : Er rachidia	72
2.2 APPORT EXTERNE	74
2.3 OPTIMISATION	74
2.4 PLAN D'ETUDE	75
3- RESULTAT ET DISCUSSION	75
3.1 ZONE 1 : AGADIR	76
3.2 ZONE 2 : TANGER	77
3.3 ZONE 3 : FES	79
3.4 ZONE 4 : IFRANE	80
3.5 ZONE 5 : SETTAT	82
3.6 ZONE 6 : ER-RACHIDIA	84
4- CONCLUSION	86
CHAPITRE 5	87
OPTIMISATION DE L'ENVELOPPE D'UN BATIMENT SITUE DANS LA VILLE DE SETTAT	87
1- INTRODUCTION	88
2- METHODE ET SIMULATION	88
2.1 DESCRIPTION DU BATIMENT	88
2.2 CONFIGURATION POUR LA SIMULATION	88
2.3 OPTIMISATION	88
3- RESULTAT ET DISCUSSION	90
4- CONCLUSION	93
CONCLUSION GENERALE	94
BIBLIOGRAPHIE	97

Liste des figures

FIGURE 1 : Bâtiment à énergie passive	11
FIGURE 2 : Conception passive.....	14
FIGURE 3 : Les paramètres influençant sur le bâtiment	15
FIGURE 4 : Mur extérieur d'un bâtiment.....	23
FIGURE 5 : Différents types de radiation.....	33
FIGURE 6 : Le diagramme psychométrique.....	37
FIGURE 7 : Le diagramme bioclimatique d'Olgay	38
FIGURE 8 : Le diagramme de confort du Givoni.....	39
FIGURE 9 : Indice de confort.....	39
FIGURE 10 : Interface du TRNsys.....	43
FIGURE 11 : Couplage TRNsys avec Genopt.....	45
FIGURE 12 : Plan architectural du bâtiment de référence	46
FIGURE 13 : Conception d'une dalle	48
FIGURE 14 : Plan architectural du bâtiment avec différentes zones climatiques	55
FIGURE 15 : Zonage climatique du Maroc.	57
FIGURE 16 : Température annuelle de Settat	58
FIGURE 17 : Projet réaliser sous TRNsys	61
FIGURE 18 : Le comportement thermique du bâtiment sans système de chauffage et de refroidissement.....	61
FIGURE 19 : Consommation annuelle du nouveau bâtiment avec et sans HVAC	62
FIGURE 20 : Consommation énergétique mensuelle du chauffage et refroidissement.....	63
FIGURE 21 : Comparaison entre la consommation réelle et simulée du nouveau bâtiment.....	64

FIGURE 22 : Comparaison entre la consommation réelle et celle simulée du bâtiment de référence.....	65
FIGURE 23 : Les différentes radiations solaires sur une cellule vitrée.....	69
FIGURE 24 : Taux de logement pour chaque zone climatique	70
FIGURE 25 : Température Annuelle à Agadir	70
FIGURE 26 : Température annuelle à Tanger.....	71
FIGURE 27 : Température annuelle à Fès.....	71
FIGURE 28 : Température annuelle à Ifrane	72
FIGURE 29 : Température annuelle à Settat	72
FIGURE 30 : Température annuelle à Er-Rachidia.....	73
FIGURE 31 : La consommation énergétique annuelle totale, du chauffage et du refroidissement en fonction du WWR % dans la 1 ^{ère} zone climatique (AGADIR).	77
FIGURE 32 : La consommation énergétique annuelle totale, du chauffage et du refroidissement en fonction du WWR % dans la 2 ^{ème} zone climatique (TANGER)	78
FIGURE 33 : La consommation énergétique annuelle totale, du chauffage et du refroidissement en fonction du WWR % dans la 3 ^{ème} zone climatique (FES).	80
FIGURE 34 : La consommation énergétique annuelle totale, du chauffage et du refroidissement en fonction du WWR % dans la 4 ^{ème} zone climatique (IFRANE).	81
FIGURE 35 : La consommation énergétique annuelle totale, du chauffage et du refroidissement en fonction du WWR % dans la 5 ^{ème} zone climatique (SETTAT).	83
FIGURE 36 : La consommation énergétique annuelle totale, du chauffage et du refroidissement en fonction du WWR % dans la 6 ^{ème} zone climatique (ER-RACHIDIA).	84
FIGURE 37 : Consommation énergétique du chauffage initiale et optimale	91
FIGURE 38 : Consommation énergétique du refroidissement initiale et optimale	92

Liste des tableaux

<i>TABLEAU 1 : Fenêtre avec châssis métallique et simple vitrage.....</i>	<i>47</i>
<i>TABLEAU 2 : Caractéristique des matériaux d'une dalle</i>	<i>47</i>
<i>TABLEAU 3 : Caractéristique des matériaux d'un mur.....</i>	<i>49</i>
<i>TABLEAU 4 : Configuration des appareillages électriques dans le bâtiment.....</i>	<i>50</i>
<i>TABLEAU 5 : Scenario occupation du bâtiment et l'éclairage</i>	<i>51</i>
<i>TABLEAU 6 : Coordonnée géographique de la ville de Settat.</i>	<i>55</i>
<i>TABLEAU 7 : Les caractéristiques thermiques des matériaux de construction du bâtiment. ..</i>	<i>56</i>
<i>TABLEAU 8 : La consommation électrique de quelque appareillage électrique</i>	<i>59</i>
<i>TABLEAU 9 : Consommation énergétique totale du chauffage et de refroidissement.....</i>	<i>63</i>
<i>TABLEAU 10 : Localisation géographique et les données climatiques principales pour chaque zone climatique</i>	<i>73</i>
<i>TABLEAU 11 : Taux des baies vitrées optimal pour chaque orientation et chaque zone climatique.....</i>	<i>85</i>
<i>TABLEAU 12 : Les différentes variations pour l'optimisation.....</i>	<i>89</i>
<i>TABLEAU 13 : Les caractéristiques des variantes du vitrage</i>	<i>90</i>
<i>TABLEAU 14 : Comparaison entre les valeurs initiales et les valeurs optimales obtenues.....</i>	<i>91</i>
<i>TABLEAU 15 : Consommation énergétique initiale et optimale</i>	<i>93</i>

Abréviation

GES	Gaz à effet de serre
BBC	Bâtiment basse consommation
PNUE	Programme de Nations Unie pour l'Environnement
BEPAS	Bâtiment à Energie Passive
BEPOS	Bâtiment à Energie Positive
ZEB	Bâtiment à Zéro Energie
CVC	Chauffage, Ventilation et Climatisation
EAHE	Earth Air Heat Exchange
ASHRAE	American Society of heating and refrigerating and air-conditioning engineer
CCNUCC	Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
COP22	Conférence des Parties des nations unies
UE	Union Européen
CTF	Consommation Totale Finale
GPL	Gaz de pétrole liquéfié
TEP	Tonne Equivalent au Pétrole

MASEN	Agence Marocaine pour Energie Durable
ANRE	Autorité Nationale de Régulation
IRESEN	Institut de Recherche en Energie Solaire et Energie Renouvelable
AMEE	Agence Marocaine d'efficacité Energétique
TRNSYS	Transient System Simulation Tools
GENOPT	Generic Optimization
RTCM	Réglementation Thermique de Construction Marocaine
WWR	Windows to Wall ratio (taux des baies vitrées)

Introduction Générale

Au cours des dernières années, la performance énergétique des bâtiments a été identifiée comme un facteur important dans les niveaux élevés de consommation sur l'échelle internationale de combustibles fossiles. Les bâtiments ont un rôle considérable dans la quantité d'émissions nocives rejetées dans l'atmosphère, avec la responsabilité de 70 % des oxydes de soufre et de plus de 50 % du CO₂. En outre, le secteur de bâtiment est responsable d'environ 30 % de la consommation mondiale finale d'énergie (AIE, 2020). Pour faire face à ces impacts nocifs sur l'environnement, la santé humaine et surtout la prochaine génération, il y a eu des tentatives pour introduire des modèles de conceptions adaptés au climat dans les pays développés. Le but de ces conceptions est de créer et assurer une température intérieure confortable pour les occupants tout en profitant des sources d'énergie naturelles. Ce concept de conception nécessite une interaction entre l'environnement spécifique du bâtiment et les facteurs dynamiques effectifs dans le bâtiment (Hyde, 2000).

Il existe de nombreuses preuves que les émissions de gaz à effet de serre entraînent un changement climatique mondial. Par conséquent, il est urgent de mettre en œuvre des mesures environnementales dans l'environnement bâti afin d'éviter des résultats dangereux pour les prochaines générations (Taleb et Sharples, 2011). Singh et al. (2009) soutiennent que le secteur de bâtiment peut jouer un rôle important pour éviter l'impact négatif des niveaux élevés d'utilisation de combustibles fossiles. Il existe des facteurs clés auxquels le secteur de bâtiment peut s'attaquer pour parvenir à un bâtiment réactif et bien conçu, tels que la technologie, les matériaux appropriés et les aspects socioculturels. Auparavant, les bâtiments vernaculaires offraient autant que possible le confort aux occupants en appliquant des stratégies de conception architecturale soucieuses de l'environnement (Engin et al., 2007) et ces types de conceptions peuvent inspirer de nouvelles stratégies environnementales. Selon Tzikopoulos et al. (2005), l'optimisation énergétique des bâtiments peut potentiellement réduire les émissions de CO₂ de 60 % dans le monde. Par conséquent, les bâtiments sensibles au climat sont essentiels pour tous les pays avec des climats différents pour économiser de l'énergie et réduire davantage les émissions de dioxyde de carbone (Tzikopoulos et al., 2005). Dans le contexte mondial, pour réduire les émissions de CO₂, l'Accord de Paris sur les changements climatiques a été créé en tant qu'accord au sein de la CCNUCC portant sur l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre, l'adaptation et le financement à partir de 2020. L'accord de Paris entrera en vigueur en

2020, permettant à tous les pays d'agir pour empêcher les températures mondiales moyennes de dépasser 2 degrés Celsius et de profiter des nombreuses opportunités qui découlent d'une transformation mondiale nécessaire vers un développement propre et durable (Nations Unies, changement climatique, 2018). Le Royaume Marocain a renforcé son rôle dans l'action internationale sur le changement climatique recherchant l'opérationnalisation de l'accord de Paris en définissant une nouvelle politique nationale sur le climat et en accueillant le sommet de la Conférence des Parties des Nations Unies (COP22) à Marrakech en 2016.

La consommation finale totale (CTF) du Maroc a atteint 16,75 Mtep en 2019, soit une augmentation de 29,5 % par rapport à 12,93 Mtep en 2009. La CTF est largement dominée par trois secteurs – le transport (37 %), le résidentiel (25 %) et l'industrie (20 %), qui représentent ensemble plus des quatre cinquièmes de la CTF. Ce sont tous des secteurs à fort taux de croissance. Depuis 2009, le secteur des transports a crû de 46,8 %, le résidentiel de 30 % et l'industrie de 17 %.

Le Maroc compte 8.864.385 logements dont 69,8% en milieu urbain et 30,2% en milieu rural (RGPH, 2014), En 2019, le secteur résidentiel a consommé 4,19 Mtep, soit une augmentation de 29% par rapport à 2009. Le pétrole, principalement du gaz de pétrole liquéfié (GPL ou butane), est le carburant dominant avec 74% de la consommation totale du secteur, suivi de l'électricité (17%) et les biocarburants (7,5%). De 2009 à 2019, la consommation de GPL a augmenté de 32,7 % et la consommation d'électricité de 49%, remplaçant les biocarburants solides qui constituaient la principale source de cuisson et de chauffage. La consommation de formes traditionnelles de biomasse (bois et charbon de bois) a diminué de 17% dans le secteur résidentiel sur la période. Cela reflète les efforts du gouvernement marocain pour promouvoir des alternatives à la biomasse, afin de prévenir la déforestation et les problèmes de santé liés à leur utilisation, y compris les maladies respiratoires chroniques.

La consommation d'électricité a connu une croissance annuelle moyenne de 5,4 % sur la période 2002-16. En 2019, le secteur industriel est resté le plus gros consommateur d'électricité au Maroc, représentant 12,45 TWh soit 37,16% du total. Le secteur résidentiel était le deuxième en importance, avec 11,41 TWh ou 34,11 %, suivi du secteur commercial et des services publics, avec 5,86 TWh ou 17,52 %, et de l'agriculture avec 3,35 TWh ou 10 % de la consommation totale d'électricité et le transport avec 0,38 TWh ou 1,15 % de la consommation.

Des réformes institutionnelles ont soutenu la mise en œuvre de la Stratégie Nationale de l'Energie élaborée conformément aux Hautes Directives DE SA MAJESTE LE ROI Mohammed VI, Que Dieu l'Assiste, notamment la création de l'Autorité Nationale de

Régulation de l'Électricité (ANRE) et de l'Agence Marocaine pour l'Energie Durable (MASEN). MASEN agit comme un acteur majeur dédié au développement de projets intégrés d'énergies renouvelables, qui créent des synergies de R&D pré-opérationnelles, de renforcement des capacités, de formation, de compétitivité industrielle et de développement local. L'Institut de Recherche en Energie Solaire et Energies Renouvelables (IRESEN) mène un large éventail d'activités de R&D énergétique en étroite collaboration avec le secteur privé. L'Agence Marocaine pour l'Efficacité Énergétique (AMEE) est désormais en charge de la mise en œuvre des programmes d'efficacité énergétique. Les ressources humaines et financières et une bonne coordination au sein du gouvernement seront essentielles pour suivre les progrès, mettre en œuvre la stratégie nationale et assurer le succès de la transition énergétique du Maroc.

Suite à l'adoption d'objectifs nationaux ambitieux pour réduire la consommation d'énergie, un cadre d'efficacité énergétique complet et rigoureux, la loi 47-09 a été adoptée en 2011 avec l'objectif d'atténuer le fardeau du coût de l'énergie sur l'économie nationale, et d'augmenter l'efficacité énergétique dans l'utilisation de l'énergie, ainsi généraliser les audits énergétiques tout en mettant en place des codes d'efficacité énergétique spécifique aux différents secteurs.

Le Maroc a un climat diversifier selon les régions, par conséquent, envisager des méthodes de conception passive peut potentiellement contribuer à prévenir les pertes de chaleur (pertes thermiques) en mettant en œuvre une isolation appropriée, mais réduit également la charge de chaleur ou de froid requise en fournissant le chauffage et le refroidissement à partir de l'environnement naturel ou d'autres stratégies.

En outre, une conception passive innovante et complète doit être menée pour aborder la réduction d'énergie au Maroc compatible avec les conditions climatiques, l'architecture et les matériaux locaux.

Les objectifs à atteindre est de déterminer la relation entre le confort thermique chez les occupants et la surconsommation électrique des bâtiments résidentiels à Settat, aussi identifier l'influence des éléments de construction et la conception d'un bâtiment sur la consommation énergétique de chauffage et de refroidissement des bâtiments résidentiels à Settat à l'aide d'un outil de simulation thermique dynamique, ensuite évaluer l'impact des baies vitrées selon leur taille, types et orientation sur la consommation énergétique d'un bâtiment dans les six zones climatiques marocaine selon l'exigence de la réglementation thermique marocain de construction, et proposer celle la plus optimale pour cette dernière, ainsi de proposer des recommandations sur une meilleure conception de la performance énergétique dans les bâtiments résidentiels grâce à des principes de conception passive.

De ces objectifs on peut déterminer les questions de recherche suivantes :

- Quels sont les éléments qui ont une forte demande énergétique impactant sur la consommation énergétique du bâtiment ?
- Dans quelle mesure l'efficacité énergétique serait-elle améliorée pour une variété de taille des baies vitrées des logements résidentiels dans différents climats marocains ?
- Quelles sont les techniques passives qu'on doit optimiser en priorité et qui nous assure un rendement en termes d'économie d'énergie pour les bâtiments résidentiels à Settat ?

Le présent manuscrit est organisé comme suit :

Un premier chapitre passe soigneusement en revue les études et recherches les plus pertinentes qui contribuent à la réduction de la consommation d'énergie dans les bâtiments. De plus, il est tenté de présenter les enquêtes les plus récentes dans des régions similaires comme étude de cas de base pour projeter une meilleure vue d'ensemble vers le but de cette recherche.

Un deuxième chapitre décrit la conception de la recherche et décrit comment la recherche aborde les objectifs. Ainsi, présenter les outils et les données nécessaires pour réaliser cette étude de recherche.

Par un troisième chapitre, on étudie l'impact que certains choix peuvent avoir lors de la conception d'un bâtiment, sur son bilan énergétique et également sur le confort thermique de l'occupant, et ce à l'aide du logiciel de simulation thermique dynamique. Ainsi, étudier la justesse de notre modèle numérique.

La quatrième partie évalue l'impact de différentes variantes pour définir le taux des baies vitrées le plus optimal dans les six zones climatiques différentes au Maroc, et le choix de la solution la plus optimale du taux des baies vitrées se fera sur la base de la consommation minimale d'énergie entre chauffage et refroidissement à l'échelle annuelle.

Avant de conclure, on décrit la manière qui peut être mise en œuvre afin d'optimiser les performances énergétiques d'un bâtiment type appartement situé dans la ville de Settat et cela par l'amélioration de son enveloppe par des techniques passive.

Pour conclure, on présente la manière dont les questions de recherche sont abordées et répondues dans cette étude. Ce chapitre explique également le potentiel de recherches supplémentaires dans ce domaine ainsi qu'un ensemble de recommandations concernant la mise en œuvre de l'efficacité énergétique dans le secteur résidentiel au Maroc.

Chapitre 1
L'état de l'art

1- Introduction

Après l'analyse de plusieurs travaux de thèse, le secteur du bâtiment, qui est classé en deux types selon l'occupation (tertiaire et résidentiel), est responsable de plus de 40 % de la consommation mondiale d'énergie (syali, 2018). De plus, ce secteur de construction est responsable de la consommation de 17 % d'eau potable et de 25 % de bois forestiers (E Fuentes, 2018). Le secteur du bâtiment a un impact climatique causé par l'émission de CO₂ avec un taux de 33% (BERARDI, 2014). Afin de faire face à ce problème et de lutter contre ces dommages colossaux pour l'environnement et construire un nouveau monde à la hauteur du confort des générations futures, une multitude de stratégies appliquées dans le secteur du bâtiment pour une construction durable.

La conception du bâtiment en fonction de son climat est une technique généralisée de protéger l'environnement en appliquant des méthodes de construction améliorées qui consomment de la faible énergie et, par conséquent, émettent moins de gaz à effet de serre (GES). Les principales techniques pour les constructions adaptées à leur climat se basent sur l'utilisation des sources d'énergie renouvelables dans les constructions.

Dans les travaux de recherche de (HYDE, 2013) a souligné qu'il devrait y avoir des interactions idéales entre les conditions dynamiques qui ont un impact sur chaque bâtiment individuel. De nos jours, en réponse au besoin de construction consommant moins d'énergie, une multitude de techniques et méthodes ont été introduites et expérimentées dans le monde (BERARDI, 2014).

Plusieurs pays dans le monde ont eu recours, avec une demande croissante, à une conception de bâtiment durable avec une faible consommation énergétique. Il est important de cerner cette recherche en déterminant la situation énergétique de ces constructions avec l'objectif d'une consommation plus faible.

Pour atteindre cet objectif, ce chapitre étudie et présente la littérature la plus récente sur les techniques, les méthodes, les théories et les stratégies éprouvées relatives à l'efficacité énergétique des bâtiments dans sa globalité, et celles plus spécifiques aux conditions climatiques plus chaude et tempérées.

Il y a deux principaux axes importants de l'efficacité énergétique des bâtiments à considérer dans ce chapitre. Premièrement, les stratégies de conception architecturale qui incluent la géométrie du bâtiment, la typologie et les stratégies d'ombrage. Deuxièmement, ce chapitre étudie le rôle des éléments de construction dans l'optimisation énergétique et les réalisations de bâtiments à fonctionnement libre dans des conditions climatiques semi-arides et des conditions similaires.

En prenant en considération l'objectif principal de cette étude, cette recherche présentera les dernières études pertinentes qui ont été menées pour enquêter sur les sujets pertinents. Les études sélectionnées fournissent un vaste contexte pour l'optimisation énergétique. En conséquence, tous les examens de fond se répartissent en trois catégories :

- Cette partie couvre la construction durable et les bâtiments bas énergie.
- Le rôle de la conception architecturale en climat de la zone chaude et en conditions sèches.
- L'enveloppe du bâtiment en climat chaud.

2- Conception Econome

La conception passive fait référence à une série de stratégies de conception architecturale, appliquées par les architectes lors de la conception de bâtiments, pour répondre de manière adéquate aux conditions et exigences climatiques (KRONER, 1997).

(KRONER, 1997) Soutiens que la conception passive est associée à diverses méthodes et normes de conception architecturale, employées avec des ingénieurs et des architectes au stade de la conception, pour rendre le bâtiment écologiquement durable et réactif. Le terme de conception passive de bâtiments ne peut pas être séparé de la conception de bâtiments intelligents. Des conceptions intelligentes peuvent être trouvés dans des bâtiments passifs et à faible consommation d'énergie bien construits.

Les « bâtiments intelligents » sont ceux qui combinent à la fois l'intelligence active et passive, les caractéristiques actives et les stratégies de conception passives, pour offrir un confort maximal aux occupants en utilisant un minimum d'énergie (KRONER, 1997). Le terme « intelligence dans les bâtiments » suscite l'enthousiasme des architectes et des développeurs en tant que solution de conception ultime, un bâtiment qui sait s'adapter à chaque situation, libérant le concepteur du devoir de trouver des solutions passives aux problèmes de conception,

et impliquant que la résolution des conflits est déléguée du concepteur au produit final lui-même. Étant donné qu'un bâtiment intelligent utilise le moins d'énergie possible pour survivre, les perspectives d'une conception climatique durable, quel que soit le climat semblent élevées (OCHOA, 2008) leur recherche conclut qu'un paramètre de construction ne peut pas être sélectionné individuellement à des fins d'optimisation, mais il devrait y avoir un outil disponible pour les concepteurs pour évaluer la combinaison de paramètres.

En Europe et dans de nombreux autres pays développés, la réalisation d'un bâtiment à faible consommation d'énergie est un objectif gouvernemental important. En Europe, la définition du bâtiment basse consommation (BBC) a été étudiée et introduite selon quatre critères :

- Enveloppe du bâtiment.
- Énergie.
- Ventilation.
- Suivi.

Cependant, divers chercheurs ont prouvé que même le terme bâtiment basse consommation varie d'un pays à l'autre en Europe (Pitts, 2017). De plus, la Grande-Bretagne conclut que la définition et les spécifications varient considérablement, à la fois entre les pays et entre les différents types de bâtiments au sein d'un pays. Par exemple, dans de nombreuses normes, le bâtiment est exclusivement défini par sa performance énergétique. L'Allemagne, l'Autriche et la Suisse sont les pays avec le plus de définitions considérant des critères supplémentaires.

3- Bâtiment et Climat

Le premier choc pétrolier des années 1970 a créé une crise énergétique par laquelle le monde a pris conscience de l'impact négatif de la forte consommation énergétique des bâtiments (Wills, 2005). Par conséquent, de nombreuses stratégies énergétiques, de nouveaux concepts énergétiques et des bilans énergétiques ont été mis en œuvre pour réduire la consommation d'énergie dans les bâtiments et ses effets néfastes sur l'environnement (BLAXTER, 2010).

La consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment peut varier considérablement d'un pays à l'autre en fonction de plusieurs indicateurs allant du climat, de la population, des revenus, du développement économique et de la taille des ménages.

Selon le rapport du Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) de (Huovila, 2007) différentes méthodes sont disponibles pour améliorer l'efficacité énergétique des

bâtiments, elles vont d'approches technologiques inférieures à supérieures. (Huovila, 2007), suggère que les approches actuelles qui peuvent être utilisées pour optimiser l'efficacité énergétique dans les bâtiments, comprennent :

- Bâtiment à énergie passive (BEPAS) ou Passivhaus pour la version allemande
- Bâtiment à zéro énergie (ZEB)
- Bâtiments à basse consommation (BBC)
- Bâtiments à énergie plus (BEPOS)
- Eco-cité
- Aspects de rénovation

3.1 Bâtiment à énergie passive (BEPAS)

Les bâtiments à énergie passive ou les passivHaus selon la version allemande, sont spécifiés comme des constructions créant un confort thermique satisfaisant aux occupants et à très faible consommation d'énergie. PassivHaus n'a pas de méthodes de construction spécifiques, mais recommande un ensemble de normes de performance. De plus, les concepteurs peuvent sélectionner leur propre conception architecturale et leurs propres matériaux de construction pour répondre aux objectifs spécifiques de demande d'énergie. Les éléments suivants sont les caractères distinctifs d'un bâtiment à énergie passive **Figure 1** (Klingenberg, 2013):

- Hauts niveaux d'isolation
- Structure fenêtres et vitrages bien isolés
- Conception et construction sans pont thermique
- Une bonne étanchéité d'enveloppe de bâtiment contre l'air.
- Ventilation avec récupération de chaleur ou d'énergie très efficace

Selon (Liana Muller, 2013), un grand avantage de la norme des bâtiments à énergies passives est sa compatibilité facile dans différentes régions avec des conditions climatiques différentes, car l'approche générale est la même sur tous les sites. Les composants de chaque construction de bâtiment différeront d'un autre bâtiment en fonction du climat dans lequel il se trouve. Par exemple, dans les régions plus chaudes, une plus grande concentration devrait être accordée aux méthodes de refroidissement passives, y compris les éléments d'ombrage et la ventilation naturelle à travers les ouvertures. En fonction des conditions locales, toutes les méthodes de conception de maisons passives doivent être modifiées pour obtenir l'optimisation requise.

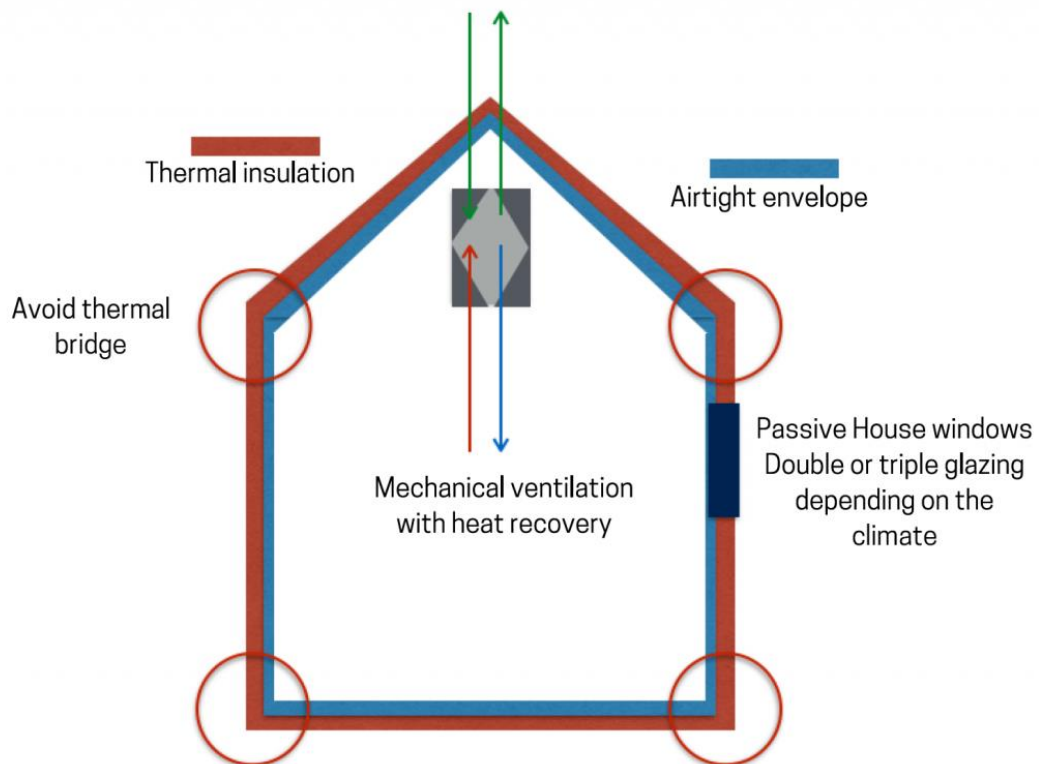


FIGURE 1 : Bâtiment à énergie passive

3.2 Bâtiment à énergie zéro (ZEB)

Les bâtiments à énergie zéro sont caractérisés comme les bâtiments qui consomment autant d'énergie qu'ils peuvent en produire annuellement. Cette approche nécessite des systèmes énergétiques de pointe, tels que des capteurs solaires et de l'énergie éolienne. En d'autres termes, les bâtiments à énergie zéro sont équipés de sources d'énergie renouvelable sur site qui génère une énergie égale à la quantité d'énergie consommée dans les bâtiments (Anna Joanna Marszal, 2009).

Cependant, cette méthode nécessite une conception compliquée et une mise en œuvre professionnelle qui se traduit par les solutions les plus difficiles pour les bâtiments durables actifs (Huovila, 2007).

3.3 Bâtiment Basse Consommation (BBC)

Sur la base d'une définition de (Huovila, 2007), le Bâtiment Basse Consommation peut être spécifié comme une approche de réduction de la consommation d'énergie de 50 %. Cela indique la quantité d'énergie que ces bâtiments utilisent par rapport au bâtiment standard construit conformément aux réglementations en vigueur en matière de construction. Autrement dit, le

bâtiment concept à 50 % ne consomme que la moitié de l'énergie de chauffage d'un bâtiment standard. La faible consommation d'énergie est basée sur un niveau accru d'isolation thermique (Thormark, 2002).

Les recherches menées par (Wojdyga, 2009) en Pologne montrent que le bâtiment à faible consommation d'énergie, sous l'angle spécifique de la construction à faible consommation d'énergie, peut s'attendre à avoir une demande de chaleur inférieure à celle du bâtiment ordinaire polonais. Il en résultera donc la réalisation d'un bâtiment basse consommation utilisant trois fois moins d'énergie (30,6 kWh/m²a) qu'un bâtiment conçu selon les normes polonaises (95,9 kWh/m²a).

3.4 Stratégies générales du bâtiment passif

Des technologies pour la construction passive ont été présentées et sont commercialisées dans le monde entier. De plus, de nombreux projets pilotes sont menés pour appliquer des stratégies de bâtiments à énergie positive, c'est-à-dire que les bâtiments produisent plus d'énergie qu'ils n'en consomment sur une année (Huovila, 2007).

Parmi toutes les stratégies proposées pour améliorer la performance des bâtiments, la mise en œuvre de la conception passive est proposée comme une solution pour diminuer le besoin de sources d'énergie externes en concevant des bâtiments résilients au climat.

Bien qu'il soit communément admis que la conception passive ne doit pas nécessairement entraîner une augmentation des coûts de construction, en effet, l'une des approches clés de la conception à faible consommation d'énergie consiste à investir dans la morphologie du bâtiment et la sélection des matériaux appropriés (par exemple, les fenêtres, murs) afin que les charges de chauffage, de refroidissement et d'éclairage soient réduites, et à leur tour, des systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation plus petits et moins coûteux sont nécessaires (DWIVEDI, 2012).

La conception architecturale et le choix des matériaux jouent un rôle clé dans l'efficacité énergétique des bâtiments résidentiels. (BENNETTS, 2003) Conclut que les conceptions architecturales appliquant des stratégies d'efficacité énergétique réduisent la consommation d'énergie de 40% jusqu'à 70%. Les conceptions architecturales se concentrent principalement sur l'efficacité énergétique sans l'intervention d'équipements mécaniques (SU, 2008). En effet, le concept de conception passive est une méthodologie pertinente pour concevoir un bâtiment respectueux de l'environnement. De nombreux experts en architecture soulignent que la

conception passive est la meilleure approche primaire vers l'efficacité énergétique des bâtiments, (KIBERT, 2012) déclare qu'en raison de la complexité de la conception des systèmes énergétiques d'un bâtiment écologique à haute performance, le point de départ doit être une prise en compte complète de la conception passive.

Selon (GONG, 2012), les stratégies de conception passive sont liées à une grande quantité d'économies d'énergie dans les bâtiments tout en étant rentables. (GONG, 2012) a calculé que l'économie moyenne d'un bâtiment de conception passive peut atteindre 50 % de l'énergie primaire totale.

Cependant, comme la mise en œuvre de la conception passive est liée à la phase de conception du projet de construction, ses principales stratégies, ainsi que l'impact de celles-ci sur la physique du bâtiment et la consommation d'énergie, doivent être bien connues à l'avance. Le concept général de conception passive (THOMAS, 2003) est décrit comme une conception architecturale pour fournir les systèmes de chauffage, de refroidissement, d'éclairage et de ventilation du bâtiment, en s'appuyant sur la lumière du soleil, le vent, la végétation et d'autres ressources naturelles sur le chantier.

En d'autres termes, selon (RODRIGUEZ-UBINAS, 2014) les stratégies de conception passive contribuent à améliorer les conditions de confort intérieur, à augmenter l'efficacité énergétique des bâtiments et à réduire leur consommation d'énergie. Il est donc important que le bâtiment consomme moins d'énergie tout en conservant le confort thermique. Le confort thermique varie d'une région à l'autre en fonction de plusieurs facteurs spécifiques (climat, systèmes CVC, temps, etc.) et de comportement des occupants au sein du bâtiment (BESSOU DO, 2010).

Certes, pour que la conception passive atteigne les objectifs d'optimisation énergétique, la première étape vers une approche durable compte sur l'adoption des stratégies passives en comprenant le climat local, les pratiques de construction locales et l'exploitation du bâtiment par les utilisateurs (ETZION, 1997).

La conception passive en général est classée comme (BAINBRIDGE, 2011) :

- Le chauffage passif pour un climat froid afin de minimiser la charge thermique dans les bâtiments.
- Le refroidissement passif pour les climats chauds afin de minimiser la charge froide.

A cet effet, selon (Chan, 2009) la forme et le tissu du bâtiment doit être conçu de manière à ce que, dans des climats ou des saisons plus chauds, les systèmes de chauffage fournissent ou

collectent et stockent la chaleur solaire, afin de pouvoir maintenir la chaleur à l'intérieur du bâtiment. En comparaison, afin de protéger le bâtiment des apports solaires et d'obtenir un espace plus frais, des systèmes de refroidissement sont utilisés. Ces stratégies d'utilisation du comportement solaire sont connues sous le nom de « conception passive solaire » (BAINBRIDGE, 2011). (Chan, 2009) Ont mené des recherches en Inde sur la base de la conception appropriée de l'orientation, de la structure, de l'enveloppe et des matériaux de construction d'un bâtiment. La recherche a conclu qu'en contrôlant les charges thermiques du gain de chaleur solaire, les conceptions solaires passives et le double vitrage sont capables de réduire la perte de chaleur totale d'environ 35%. La conception passive, y compris la conception solaire telle que discutée par (ALDOSSARY, 2015), peut être classée dans les catégories suivantes **Figure 2** :

- Enveloppe du bâtiment (matériaux de construction ou tissu). Cela concerne les murs, les fenêtres, les dalles, la masse thermique, etc.
- Conception d'agencement architectural (formulaire). Cela fait référence à des aspects de l'architecture résidentielle tels que la géométrie, la typologie, les proportions et les techniques d'ombrage en relation avec la performance énergétique.

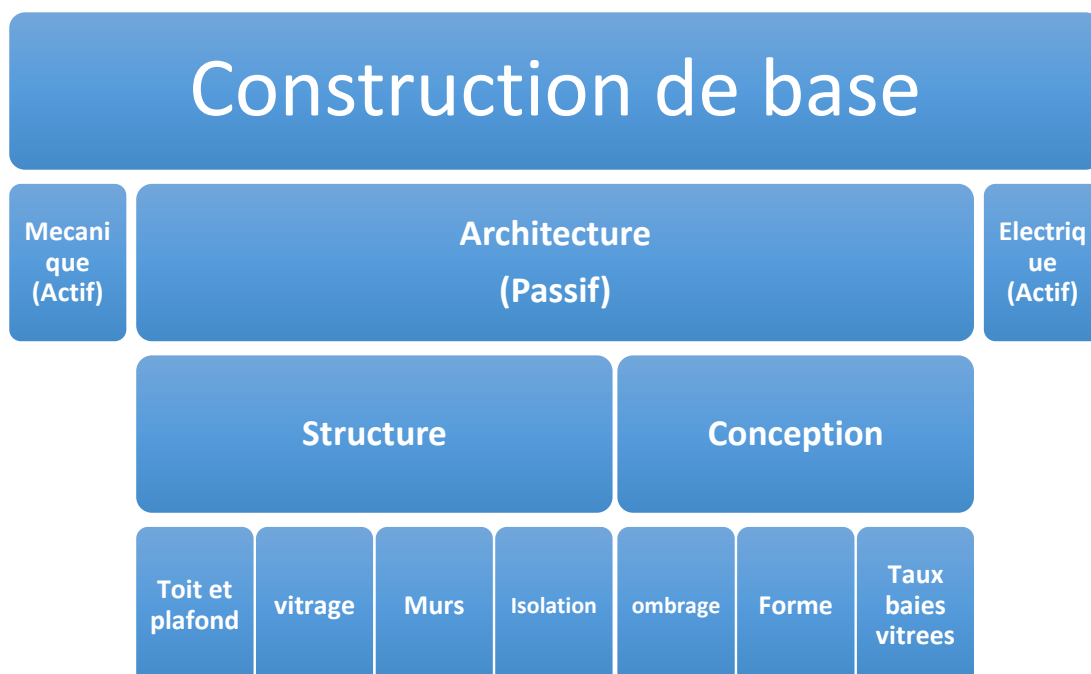


FIGURE 2 : Conception passive

4- Bâtiment et climat chaud

La réduction de la consommation d'énergie et des gaz à effet de serre sont des rôles cruciaux qui doivent être soigneusement examinés dans cette partie de la revue de la littérature. Il existe différents facteurs importants pour réaliser des bâtiments à basse consommation d'énergie, par exemple, l'utilisation d'énergies naturelles renouvelables et la réduction de la demande énergétique du bâtiment. Des approches sensées vers des conceptions appropriées, l'application de la conception des bâtiments et l'entretien des bâtiments sur la base des réglementations locales, des matériaux de construction et des traditions locales aboutissent à une architecture durable (NIROUMAND, 2013). Selon (Dilip Ahuja, 2009) les considérations relatives à l'architecture durable portent principalement sur les deux questions principales suivantes ; d'abord, ils incarnent l'idée que la conception des bâtiments doit fondamentalement tenir compte de leur relation avec l'environnement naturel, et d'autre part, ils sont préoccupés par le concept de réduction de la dépendance aux combustibles fossiles pour faire fonctionner un bâtiment. Les paramètres importants pour les solutions architecturales sont illustrés à la **Figure 3**.

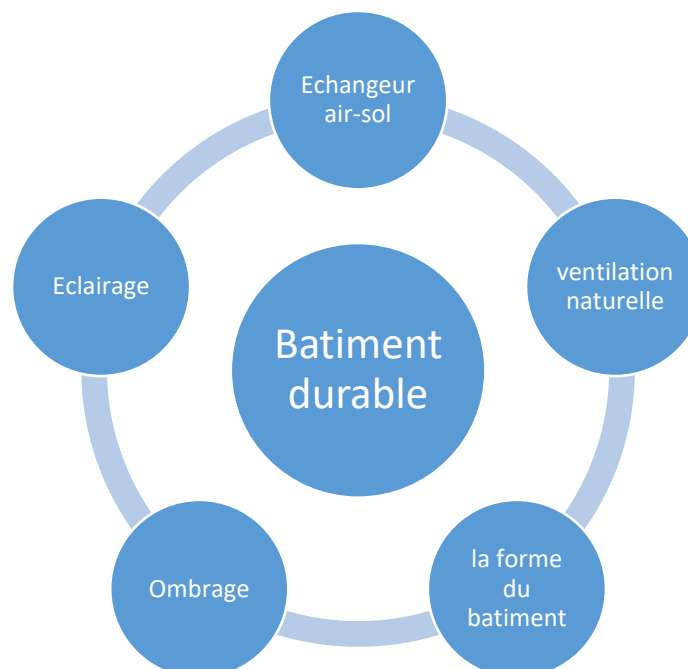


FIGURE 3 : Les paramètres influençant sur le bâtiment

4.1 L'éclairage

Un facteur important au stade de la conception des bâtiments est le facteur d'éclairage naturel, qui, en raison des avantages pour la santé et la conservation de l'énergie, doit être

soigneusement pris en compte. Pour réduire la consommation énergétique des bâtiments, l'éclairage naturel (lumière du jour) devient plus intéressant pour les concepteurs (LI D. H., 2001). Les avantages de l'éclairage naturel ont été étudiés par de nombreux chercheurs. L'objectif principal de ces chercheurs a été de promouvoir les avantages pour la santé des ménages et leurs rôles importants sur les rythmes physiologiques des personnes (CHOI, 2012). En utilisant un éclairage et des appareils efficaces, des systèmes d'eau chaude sanitaire réduisant la chaleur, des réductions des gains internes peuvent être obtenues. Par conséquent, selon (FEIST, 2007) cela permet d'économiser de l'énergie à la fois dans la production de chaleur excédentaire et dans son élimination.

(FEIST, 2007) Soutiens que le soleil peut être à la fois ennemi et ami des bâtiments. Par conséquent, une conception soignée doit tenir compte de la surchauffe pendant les saisons plus chaudes en raison d'une mauvaise conception.

Néanmoins, la forme des bâtiments et des villes est affectée par les conditions d'accès à la lumière du jour et au soleil. Selon (Richardson, 2009), la perception des occupants envers la lumière du jour dans un bâtiment est un aspect principal de la conception lorsque le contrôle de l'éclairage électrique est expliqué. Une étude de (MAHAPATRA, 2009) sur les performances de l'éclairage électrique montre que proposer des solutions pour améliorer le niveau d'éclairage naturel permet de minimiser la consommation d'énergie et par conséquent de réduire les émissions des gaz à effet de serre. L'étude a déclaré que l'électricité peut être remplacée par des ressources énergétiques naturelles, ce qui est plus important pour les régions sans réseau électrique (MAHAPATRA, 2009).

4.2 Echangeur Air-Sol (Puits Canadien)

Les échangeurs de chaleur Terre-Air (EAHE) sont une solution architecturale clé pratique pour améliorer les systèmes de refroidissement naturels. En appliquant cette méthode, on suppose qu'une contribution raisonnable peut être obtenue pour modérer les températures intérieures (HOLLMULLER, 2001). La température du sol à certaines profondeurs reste à un niveau constant tout au long de l'année, ce qui est dû à la forte inertie thermique du sol. Cela contribue à un puits de chaleur en été et à une source de chaleur en hiver (HOLLMULLER, 2001). Les stratégies pour EAHE nécessitent une compréhension globale du comportement mécanique de la chaleur et de l'humidité de la terre à l'air dans un échangeur de chaleur à air opérationnel (KUMAR, 2006). Selon (KUMAR, 2006), des recherches considérables ont été

menées pour examiner les modèles analytiques et numériques du comportement thermique, du refroidissement et du préchauffage potentiel de l'EAHE.

4.3 Ventilation naturelle

Pendant des siècles, les humains ont profité de la ventilation naturelle comme stratégie importante pour contrôler la surchauffe. La ventilation nocturne est une stratégie importante pour purger et évacuer l'air interne qui a gagné de la chaleur pendant la journée, et l'échanger avec de l'air extérieur plus frais (CAPON, 2009). Selon l'atelier de durabilité, un autre avantage de la ventilation nocturne est l'élimination de la chaleur stockée dans la masse thermique exposée. Les fenêtres doivent rester fermées pendant la journée, cependant, en ouvrant les fenêtres la nuit, cela élimine l'air chaud de l'espace intérieur et refroidit la masse thermique pour le lendemain.

De plus, un avantage de la ventilation nocturne se produit lorsque les températures de l'air diurnes dépassent le niveau de confort thermique et que les systèmes de refroidissement mécaniques ne peuvent être évités, mais que la température nocturne est fraîche. Cette stratégie peut fournir une ventilation passive par temps qui pourrait normalement être considéré comme trop chaud pour cela. Une étude menée par (Hacker, 2009) qui s'est concentrée sur la ventilation par flottabilité à travers les ouvertures du bâtiment dans laquelle trois formes ont été analysées (les fenêtres à double vitrage, le simple vitrage et le double vitrage avec débord). Les résultats ont indiqué que les fenêtres à double vitrage isolées avaient une performance moins efficace que les autres types et renaient plus de chaleur dans le bâtiment la nuit. Cependant, lorsque la ventilation naturelle a été appliquée au bâtiment, sa performance s'est beaucoup améliorée. De nombreuses recherches ont été menées pour prouver les avantages de la ventilation naturelle. À cette fin, de nombreuses stratégies ont également été examinées pour appliquer la combinaison de la ventilation naturelle et mécanique. Bien qu'il s'agisse de la future forme de ventilation, ce type de ventilation suscite un intérêt accru en raison de ses avantages possibles (KHANAL, 2011). Les cheminées solaires sont des stratégies bien ciblées sur lesquelles de nombreux chercheurs se sont concentrés. (Kwang Ho Lee, 2009) ont étudié les cheminées solaires et le concept associé d'absorptivité, et ils ont signalé qu'en améliorant les murs absorbants solaires de 0,25 à 1,0 dans les cheminées solaires, le débit d'air peut s'améliorer de 57%. (J. DeBlois, 2013) ont déclaré que la ventilation naturelle peut être favorisée dans un système de cheminée solaire en concevant un toit à pignon pour contrôler la chaleur solaire et déplacer la chaleur dans l'air à travers un canal incliné induisant un flux d'air. Une étude

analytique menée par (DAI, 2003) pour améliorer l'effet de la ventilation naturelle dans une maison solaire. Afin de mener cette analyse, ils ont appliqué une cavité de refroidissement à adsorption solide ainsi qu'une cheminée solaire. Les résultats de la recherche ont montré qu'une cheminée solaire de 2,5 m² d'une maison solaire au cours d'une journée normale est capable de générer un débit d'air de 150 kg/h (DAI, 2003). La recherche a également révélé que la cavité de refroidissement par adsorption solaire est également capable d'augmenter le taux de ventilation la nuit jusqu'à 20% (DAI, 2003).

Suite aux études mentionnées, la ventilation naturelle peut contribuer au refroidissement d'une maison. Cependant, cela dépend du climat de la maison, et l'utilisation d'un système de refroidissement qui fonctionne à l'énergie est inévitable lors des chaudes journées d'été. (RAMAN, 2001) ont testé des systèmes solaires passifs dans des conditions climatiques plus chaudes, et les résultats ont montré que la variation de température dans le bâtiment peut être modérée en utilisant un système passif. (RAMAN, 2001) ont également établi qu'un collecteur désigné sur les murs sud en combinaison avec un conduit de toit avec une surface de refroidissement par évaporation peut maintenir la température interne à environ 30C° tandis que la température extérieure atteint 42C° en été. Les recherches de (VERMA, 1986) ont conclu que les stratégies d'évaporation pour le toit avaient un impact considérable sur la température intérieure en obtenant une réduction significative de la température. Les systèmes de refroidissement mécaniques sont une méthode courante dans les climats plus chauds pour réduire les flux de chaleur. Il existe différents types de systèmes de refroidissement, allant des systèmes simples, tels que les ventilateurs de plafond qui éliminent la chaleur solaire de l'espace, aux systèmes de climatisation avancés (FEIST, 2007). Les ventilateurs de plafond peuvent augmenter la vitesse de l'air autour des personnes, mais cela n'est pas considéré comme un refroidissement passif. De plus, l'inconfort thermique peut être réduit par les ventilateurs de plafond dans les climats chauds. D'autres méthodes courantes dans des conditions climatiques plus chaudes avec des niveaux d'humidité minimaux sont les systèmes de refroidissement par évaporation qui sont largement utilisés dans des conditions climatiques chaudes. L'avantage le plus important des refroidisseurs par évaporation est leur faible consommation d'énergie ainsi que des procédures d'entretien et de fonctionnement simples. En termes de consommation d'énergie pour une résidence typique de 2000 pieds carrés, la consommation d'énergie moyenne du refroidisseur par évaporation est aussi faible que 250 kWh par rapport à 850 kWh pour les climatiseurs conventionnels, ce qui entraîne une économie d'énergie d'environ 75 % (BISHOYI, 2017).

Selon (FEIST, 2007), une autre méthode utilisée dans les systèmes de ventilation est la récupération de chaleur et le refroidissement adiabatique. Dans cette méthode, l'air évacué est modifié et devient froid, puis il passe à travers l'échangeur de chaleur et refroidit l'air entrant.

Cependant, la méthode la plus simple de ventilation naturelle est à travers les fenêtres et les ouvertures et a une grande part de stratégies de refroidissement passif. La ventilation de purge nocturne élimine également la chaleur emmagasinée de toute masse thermique exposée (MOOSAVI, 2014).

4.4 La forme du bâtiment

La recherche a établi que la forme du bâtiment est un contributeur majeur qui détermine la consommation d'énergie (OURGHI, 2007). Des études ont également montré que la forme du bâtiment peut avoir un impact significatif sur les coûts énergétiques du chauffage et du refroidissement (ALANZI, 2009). Par conséquent, il est important de considérer la forme optimale du bâtiment au stade de la conception en tenant compte des conditions climatiques locales. Selon (SCHNIEDERS, 2009), un autre rôle important de la forme optimale du bâtiment est de contrôler l'exposition au rayonnement solaire et la charge de transmission. En termes simples, la forme du bâtiment a un impact sur l'énergie solaire qu'il reçoit directement et affecte la consommation d'énergie (MINGFANG, 2002). Habituellement, pour atteindre un niveau acceptable de confort thermique en hiver, la demande d'énergie pour le refroidissement est respectivement augmentée ; cela peut être contrôlé en diminuant la chaleur solaire (c'est-à-dire le rayonnement).

La perte d'énergie résultant d'une forte demande sur les systèmes de refroidissement se produit lorsqu'une surface exposée au soleil entraîne un gain de chaleur. (R.Pacheco, 2012) ont déclaré que la surface totale exposée au soleil dans un bâtiment peut être déterminée par la forme du bâtiment. Par conséquent, cela a un impact sur les performances thermiques de l'ensemble du bâtiment. Il est important d'identifier les variables de conception, par exemple celles qui sont pertinentes pour la procédure de transfert de chaleur (Bektas Ekici, 2012). De plus, (Betul Bektas Ekici, 2011) ont identifié à la fois des paramètres influents des stratégies environnementales physiques et de conception qui ont un impact sur la demande d'énergie.

Des recherches ont également montré que le coefficient de forme du bâtiment, basé sur la demande énergétique, est lié au niveau de transfert de chaleur à travers l'enveloppe du bâtiment (ALANZI, 2009).

4.5 Ombrage

Il s'agit d'une pratique efficace dans les pays à climat chaud pour refroidir l'espace environnant d'un bâtiment afin de minimiser le besoin de systèmes de refroidissement. Les résultats d'une étude de (SIMPSON, 1998), portant sur l'évaluation de plus de 250 bâtiments en Californie, suggèrent que la plantation de trois arbres par bâtiment a un impact considérable sur l'efficacité énergétique globale des bâtiments. Les résultats ont montré que la méthode appliquée a entraîné un pic d'énergie de refroidissement et une réduction annuelle correspondante de 7,1% et 2,3% respectivement. (Yoshiki Higuchi, 2007) ont évalué l'effet de différents types d'arbres sur la réduction de l'énergie de refroidissement. Leur résultat a montré que certains types d'arbres spécifiques (par exemple, les arbres à feuilles caduques) peuvent économiser jusqu'à 20% sur l'énergie de refroidissement annuelle.

Les bâtiments sans stratégie d'ombrage peuvent avoir une demande énergétique plus élevée et éventuellement entraîner une consommation d'énergie plus élevée. Les recherches de (FARRAR-NAGY, 2000) ont évalué diverses options d'ombrages architecturaux, de fenêtres et d'ombrages de site dans des conditions climatiques chaudes pour réduire la demande d'énergie de refroidissement. La conclusion de la recherche montre qu'un bâtiment sans système d'ombrage nécessite 24% de demande de refroidissement en plus. Cela dépend du type de fenêtres, de l'orientation du bâtiment et des surplombs existants.

L'un des ombrages couramment utilisés sont les surplombs qui sont considérés comme des dispositifs d'ombrage et sont disponibles sous des formes intérieures et extérieures.

Différents systèmes de protection solaire passive étudié par (KISCHKOWEIT-LOPIN, 2002) montre qu'en considérant l'effet de la lumière du jour, les brise-soleil réduisent l'utilisation de la lumière naturelle interne dans le bâtiment, cependant, ils contribuent à minimiser la surchauffe interne. Dans une autre étude, (LI D. H., 2007) ont évalué l'effet de l'obstruction externe (bâtiment à proximité) en tant qu'ombrage sur la réduction d'énergie. L'étude a établi plusieurs nombres d'équations qui contribuent à l'hypothèse d'une réduction d'énergie par les ombrages.

Une pratique courante pour mettre en œuvre les surplombs consiste à fixer des éléments d'ombrage verticaux et horizontaux au-dessus ou sur le côté des fenêtres pour empêcher les rayons du soleil du ciel. Pour identifier les caractéristiques spécifiques du surplomb, il est important de connaître la trajectoire du soleil d'été et d'hiver, et de l'analyser soigneusement. (JORGE, 1993) Ont conçu un outil pour mesurer la taille idéale des ombrages. L'outil a

déterminé les surplombs verticaux et horizontaux. Un diagramme de nomogramme a été inventé avec des chercheurs pour les climats méditerranéens afin d'optimiser les performances d'ombrage grâce à l'amélioration du design. Ce nomogramme a été appliqué pour examiner la maniabilité des surplombs externes suggérés, mais le niveau d'erreur mesuré était d'environ 10%, ce qui est crucial pour une quantité d'erreurs importante (JORGE, 1993).

Les persiennes externes ont été étudiées dans une autre recherche de (PANÃO, 2013), il a étudié l'impact des stores pare-soleil dans une variété de bâtiments. Les résultats des études montrent que l'utilisation d'ombrages extérieurs se traduira par un meilleur confort thermique intérieur, ainsi qu'une amélioration de la conservation de l'énergie.

5- Techniques de construction des parois extérieures du bâtiment dans les zones climatiques chaudes

Afin d'améliorer l'énergie des systèmes de refroidissement, tout en maintenant un confort thermique raisonnable pendant les périodes chaudes de l'été, les pays du sud de l'Europe ont mis en place de nombreuses normes et stratégies (ROSSI, 2014). La majorité des recherches sur les conditions climatiques se sont fortement focalisées sur le rôle de la structure de bâtiment à forte inertie thermique, qui impacte significativement les économies d'énergie tout en maintenant la température intérieure à un niveau satisfaisant (ASTE, 2010). La structure du bâtiment joue incontestablement le rôle le plus crucial dans les bâtiments durables. La réduction de la consommation d'énergie et le maintien du confort thermique intérieur peuvent être obtenus sur une longue période de temps grâce à un tissu de construction conçu de manière appropriée. Les principales parties importantes de la structure du bâtiment comprennent les toits, les fenêtres, les portes, les murs extérieurs et les sols. De plus, l'énergie active représente l'énergie requise pour faire fonctionner les systèmes de refroidissement, l'éclairage du bâtiment, la ventilation et les autres activités internes des occupants. Par conséquent, l'utilisation globale de la consommation d'énergie pour le fonctionnement du système de refroidissement et de chauffage devait être prise en compte, car cela dépend des gains et des pertes de chaleur du bâtiment (RAMESH, 2012).

Le besoin de systèmes de chauffage et de refroidissement peut être modifié par le niveau de gain ou de perte de chaleur, ce qui entraîne une consommation d'énergie plus élevée. (RAMESH, 2012) Ont déclaré qu'une faible conductivité thermique et une conception appropriée de la capacité calorifique de l'enveloppe ou du tissu du bâtiment peuvent

potentiellement réduire le gain ou la perte de chaleur par les composants du bâtiment et entraîner une baisse de la demande d'énergie. Pour réduire les gains de chaleur solaire dans un bâtiment, les matériaux de construction ont un rôle important. Les stratégies applicables suivantes dans les matériaux de construction permettent de réduire la chaleur solaire ; isolation thermique, barrières contre les rayonnements, couleurs réfléchissantes et cavités (FEIST, 2007).

Afin d'avoir une compréhension plus cohérente de l'enveloppe du bâtiment, les paramètres suivants seront discutés séparément. En mettant l'accent sur les conditions climatiques semi-arides/tempérées, quatre paramètres principaux de l'enveloppe du bâtiment seront discutés :

- L'isolation de l'enveloppe du bâtiment
- La conception des murs extérieurs
- La conception du toit et du sol
- La conception des vitrages (fenêtres)

5.1 Conception des murs extérieurs

Lors de la conception de bâtiments durables, il est important de prendre en compte les matériaux et les stratégies de l'enveloppe du bâtiment. En conséquence, les murs extérieurs peuvent être considérés comme le tissu de construction le plus important de l'enveloppe du bâtiment. A cet effet, plusieurs techniques et méthodes ont été évaluées et introduites pour les murs extérieurs. Une étude (AL-HOMOUD, 2004) a examiné l'impact de l'isolation thermique dans divers types de bâtiments dans les pays du sud du golfe Persique. Cette recherche montre qu'un niveau élevé de gain de chaleur entraîne une réduction de la conservation de l'énergie. Cependant, cela peut être modifié positivement dans les murs extérieurs en appliquant une isolation thermique (AL-HOMOUD, 2004)

Pour déterminer l'épaisseur d'isolant thermique la plus appropriée, de nombreuses études ont été menées. Par exemple, selon (ZHU, 2009), la chaleur peut être économisée pendant la journée et évacuée plus tard la nuit en ayant un niveau optimal de masse thermique. Dans les climats plus chauds, avec des températures extérieures élevées toute la journée et un fort ensoleillement, la quantité de chaleur économisée sera supérieure à ce qui peut être libéré, par conséquent, il existe toujours une demande d'énergie pour le refroidissement (ZHU, 2009).

D'autres recherches menées par (RADHI, 2009) ont examiné Bahreïn dans le golfe Persique et ont montré que la consommation d'énergie peut être réduite de 25% en appliquant une isolation thermique dans les murs extérieurs en tenant compte de la charge de peau dominée des

bâtiments. En outre, une réduction supplémentaire de 5% de la consommation d'énergie peut être obtenue si la construction à charge interne est appliquée par les codes thermiques (RADHI, 2009). (RADHI, 2009) a conclu qu'au Moyen-Orient, la consommation d'énergie peut éventuellement être économisée d'environ 7%, ce qui entraîne une baisse potentielle des émissions de CO² de 23,4 millions de tonnes métriques. La technique à double paroi est une autre stratégie pour optimiser l'efficacité énergétique à travers les murs extérieurs. Une évaluation réalisée par (UTAMA, 2009) montre le cycle de vie énergétique (kW/m²/an) dans les immeubles multi résidentiels de la capitale indonésienne. La brique d'argile a été utilisée un paramètre constant dans les murs, mais la configuration des murs extérieurs était variée, ou en d'autres termes, ils utilisaient à la fois des murs simples et doubles avec les mêmes matériaux principaux. Les résultats ont montré qu'en termes d'énergie, la performance des doubles parois est bien meilleure que la simple paroi d'environ 40%. (UTAMA, 2009) Ont également examiné l'impact du béton et de l'argile dans les maisons familiales à Jakarta, les résultats ont démontré que la maison construite en ciment a une performance énergétique inférieure à celle de la maison construite en argile.

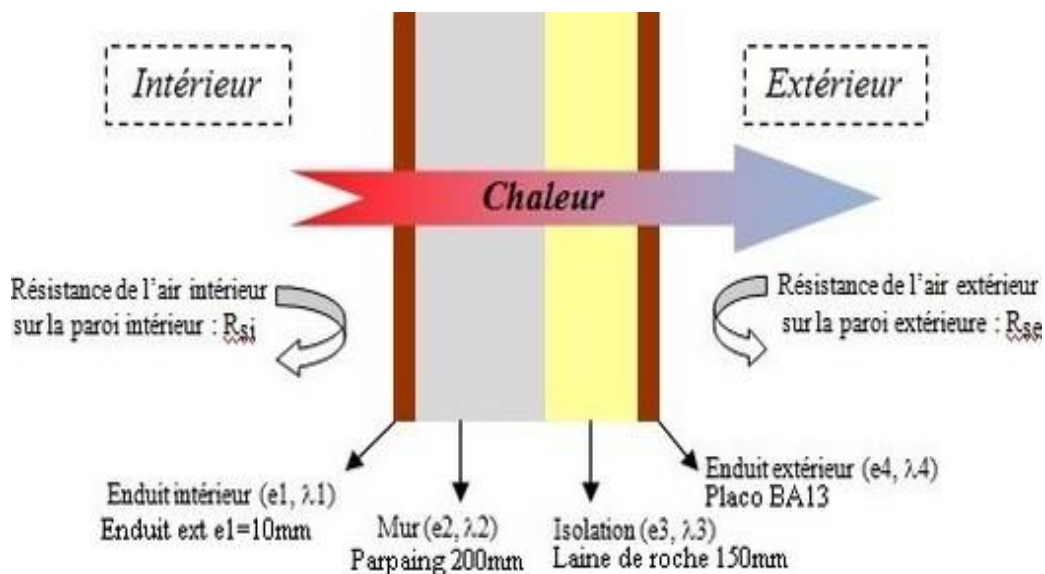


FIGURE 4 : Mur extérieur d'un bâtiment

La boue a également été examinée en tant que matériau de construction dans plusieurs études pour mesurer sa performance énergétique dans les bâtiments. Par exemple (COFFMAN, 1980) ont conclu que l'effet de refroidissement naturel de la boue rendait l'extérieur important dans les bâtiments. De même, dans une étude de (DUFFIN, 1981), les murs extérieurs faits de boue ont été identifiés comme des facteurs importants pour contrôler les conditions thermiques intérieures. Ils ont également souligné que le nombre de matériaux dans les systèmes muraux

pourrait améliorer considérablement l'efficacité énergétique ainsi que le niveau de confort (COFFMAN, 1980). Finalement, (Chel A., 2009) ont publié un rapport concernant les maisons construites en boue en Inde. Le rapport conclut que les maisons en terre contribuent à une plus grande efficacité énergétique et également en termes d'écologie, une maison qui se traduit par un niveau de confort thermique raisonnable (Chel A., 2009).

En ce qui concerne l'épaisseur de paroi et la configuration des murs extérieurs, un nombre considérable de recherches ont été menées. (BOLATTÜRK, 2006) Estime qu'en appliquant une épaisseur appropriée d'isolation des murs, un niveau considérable d'économie d'énergie peut être atteint. (BOLATTÜRK, 2006) A ajouté qu'une épaisseur d'isolant allant de 2 cm à 17 cm a la capacité de réduire la consommation d'énergie de 22% à 79%.

À la suite des recherches ci-dessus, on peut conclure que le rôle de l'épaisseur des murs extérieurs est très important dans l'optimisation énergétique. (FANG, 2000) Ont recommandé un jeu d'épaisseurs spécifiques pour les murs extérieurs tels que les murs en briques : 37 cm, les murs en béton lourd : 40 à 45 cm et les murs en béton léger : 35 à 40 cm. Il est coûteux de construire des murs épais, cependant, la réduction des coûts de consommation d'énergie à long terme compensera les coûts de construction supplémentaires et les occupants en bénéficieront à terme sur le plan économique et environnemental (SISMAN, 2007).

De plus, selon les stratégies de refroidissement passif de (FEIST, 2007), la masse thermique en particulier peut être supportée par l'épaisseur des murs extérieurs. Ceci est réalisable en stockant la chaleur pendant la journée et en l'évacuant la nuit. Les murs d'Adobe au Mexique et également dans le sud des États-Unis démontrent le stockage de la chaleur pendant la journée et son évacuation la nuit (FEIST, 2007).

Une méthode très bien documentée consiste à avoir une cavité entre les murs extérieurs car ils ont un impact significatif sur la transmission de chaleur. (NAJIM, 2014) a mené des recherches sur les murs porteurs extérieurs et les recherches confirment qu'en améliorant les caractéristiques thermiques de ces murs dans les bâtiments résidentiels, un système de refroidissement moins opérationnel est nécessaire, ce qui réduit considérablement la consommation d'énergie. De plus, cette étude souligne que l'intégration de cavités d'air dans les murs extérieurs, par rapport à d'autres méthodes, aura un impact significatif sur la performance des murs (NAJIM, 2014). Les caractéristiques physiques des murs de l'enveloppe du bâtiment auront un effet important sur la transmission de la chaleur. En raison de la capacité des murs à stocker la chaleur, ils peuvent avoir un impact sur la température intérieure en contribuant aux aspects de chauffage et de refroidissement. Pour obtenir de tels effets, une exploitation

appropriée est nécessaire (BYRNE, 2013). L'isolation des murs creux peut également être appliquée lorsqu'un refroidissement est requise dans le bâtiment, l'isolation des cavités stocke la chaleur dans la feuille extérieure du mur et libère la chaleur vers l'espace extérieur (BYRNE, 2013). La recherche démontre à quel niveau ces méthodes et stratégies sont applicables dans différentes conditions climatiques, en particulier dans des climats plus chauds, pour contribuer davantage à l'optimisation énergétique. D'autres méthodes supplémentaires telles que l'isolation cellulosique ainsi que la profondeur de la cavité sont potentiellement applicables au stade de la conception. Ces méthodes contribueront à atteindre des niveaux plus élevés d'efficacité énergétique à travers l'enveloppe du bâtiment. Une étude (Aviram DP, 2001) s'est concentrée sur les murs extérieurs en termes de profondeur de cavité. Ils ont examiné les performances de diverses profondeurs de cavité en modifiant la température de surface du sol à la base de la cavité. Alternativement, (NICOLAJSEN, 2005) a étudié l'installation d'installation de cellulose. Ils ont évalué les matériaux isolants cellulosiques en fonction de leurs performances thermiques et ont en outre effectué une analyse comparative avec des matelas de laine de roche. Leurs résultats montrent que la cellulose examinée avait une performance de masse thermique moins efficace que les matelas de laine de roche (NICOLAJSEN, 2005).

Une étude de (WANG, 2013) a examiné les murs de stockage thermique de l'eau dans les nouveaux bâtiments ainsi que dans les bâtiments rénovés. En appliquant une analyse de variance, il a été découvert que quatre facteurs de construction importants ont un impact important sur l'efficacité énergétique des bâtiments ; orientation du bâtiment, rapport de vitrage des murs sud, coefficient de forme du bâtiment, cloison interne (WANG, 2013).

5.2 L'isolation d'enveloppe du bâtiment

Fournir une isolation thermique dans les composants de l'enveloppe du bâtiment tels que les murs extérieurs et le toit optimisent l'énergie requise pour les systèmes de refroidissement et de chauffage et contribuent ainsi à réduire les coûts énergétiques (AL-HOMOUD, 2004). De plus, afin de maintenir le confort thermique sans utiliser un système de chauffage ou de refroidissement dans un bâtiment pendant une période plus longue, l'isolation thermique est une excellente solution, en particulier pendant les changements de saison (AL-HOMOUD, 2004).

Une multitude de travaux de recherche ont signalé que pour réduire la consommation d'énergie, une isolation thermique élevée du tissu du bâtiment contribue à un bâtiment durable plus efficace.

(ASTE, 2010) Affirment que l'optimisation énergétique à travers les composants de l'enveloppe peut être réalisée en appliquant une quantité considérable d'isolant et de masse thermique. (Reiter, 2010) a mené des recherches pour analyser et comparer les bâtiments résidentiels et a conclu qu'une quantité importante d'environ 50% peut être économisée en appliquant différents épaisseurs et types d'isolant. D'autres recherches menées par (Linshuang Long, 2016) ont suggéré que l'épaisseur de l'isolation joue un rôle crucial en matière d'économie d'énergie dans les maisons à ossature bois en Nouvelle-Zélande. À la suite de la recherche, il est clair que l'application d'une isolation efficace est très importante pour l'optimisation énergétique dans les nouveaux bâtiments (Linshuang Long, 2016).

Une méthode efficace pour minimiser la consommation d'énergie dans les climats plus chauds consiste à sélectionner l'enveloppe du bâtiment (matériaux) qui contribue à refroidir la température intérieure. (Gian MarcoRevel, 2014) Ont évalué l'applicabilité de ce type de systèmes qui réduisent efficacement la consommation d'énergie dans les régions aux étés chauds et aux hivers plus doux.

Pour évaluer les performances thermiques, ils ont développé une méthode expérimentale et numérique applicable à différents matériaux de construction et enveloppes de bâtiment (Gian MarcoRevel, 2014). Les matériaux suivants ont été utilisés pour la recherche : carreaux de céramique de couleur froide, façades avec peintures acryliques et membranes bitumineuses pour le système d'enveloppe. La recherche a décrit que les matériaux froids contribuent à la réduction de la température des murs de $4,7\text{ C}^\circ$, en raison d'une réduction du flux de chaleur de 50% à travers l'enveloppe du bâtiment. En outre, selon des rapports provenant de différents endroits en Europe, grâce à des matériaux froids, une économie d'énergie de 0,6 à $3,5\text{ kWh/m}^2$ peut être réalisée. Selon les résultats publiés, les façades froides ont potentiellement un impact utile sur les économies d'énergie dans les statistiques annuelles (Gian MarcoRevel, 2014). Néanmoins, il existe un risque d'appliquer ce système pendant les mois les plus froids dans les régions au climat chaud qui ont des étés chauds et des hivers froids.

Dans les recherches de (KUZMAN, 2013), des comparaisons de différents matériaux de construction ont été menées. Cela comprend les maisons passives avec différents types de construction, tels que la charpente en bois et la brique. La recherche a également examiné les avantages et les inconvénients de la majorité des matériaux de construction ordinaires. (KUZMAN, 2013) Ont appliqué un processus de hiérarchie analytique pour leurs recherches visant à évaluer l'optimisation énergétique dans différents types de construction de bâtiments,

et il a été découvert que les bâtiments en bois pouvaient considérablement optimiser la conservation de l'énergie sous la forme de bâtiments résidentiels (KUZMAN, 2013).

Étant donné que les gens ont des niveaux de confort thermique variables dans différentes régions climatiques, les préférences locales doivent être prioritaires au stade de la conception par les architectes. Dans différentes études, le confort thermique a été évalué sous différents angles, mais ils ont tous un objectif commun de trouver le meilleur moyen d'obtenir une satisfaction maximale des occupants (JiaqingXie, 2020).

5.3 Conception des fenêtrages

L'objectif de cette section est d'étudier attentivement l'état de l'art des études en ce qui concerne les fenêtres et les vitrages. Cette section traitera de trois domaines importants :

- Évaluer le rôle des fenêtres
- Le rôle de la conception des fenêtres
- L'importance du vitrage.

La majorité des concepteurs considèrent les fenêtres comme l'un des éléments de conception les plus importants pour les bâtiments durables dans les climats chauds et froids. Dans les bâtiments résidentiels modernes, la conception de grandes fenêtres est plus courante que les plus petites en raison du taux élevé de transfert de chaleur.

La lumière du jour pénètre dans l'espace intérieur par les fenêtres et fournit l'éclairage nécessaire pendant la journée (ASKAR, 2001). Un niveau approprié de conception de fenêtre qui fournit un éclairage naturel suffisant peut aider à améliorer la qualité de la santé des occupants tout en ayant un impact sur l'efficacité énergétique (ASKAR, 2001). Une conception de vitrage courante au Moyen-Orient consiste à fournir de plus grandes fenêtres dans les logements. (ASKAR, 2001) Ont mené une étude pour prouver que les nouveaux bâtiments au Moyen-Orient sont conçus avec une plus grande surface vitrée. À la suite d'une telle conception, plus d'énergie est nécessaire pour refroidir la température intérieure (ASKAR, 2001). Par conséquent, la demande d'énergie peut être réduite dans différents climats par une conception appropriée.

(LARSSON, 2002) Ont mené une étude pour explorer des méthodes potentielles pour modifier la façade extérieure des fenêtres. Selon l'étude, les récentes tentatives d'optimisation de l'efficacité énergétique et d'amélioration des stratégies de construction durable ont entraîné des modifications fondamentales de la conception des fenêtres (LARSSON, 2002). (LARSSON,

2002) Ont déclaré que les nouvelles conceptions de fenêtres avaient un impact sur les systèmes de ventilation et de chauffage naturels non conventionnels en créant une température de surface plus élevée sur la vitre intérieure de la fenêtre et un courant descendant plus faible. (ASKAR, 2001) Ont mené une étude pour étudier les méthodes de réduction de la consommation d'énergie en concevant des bâtiments à haute performance dans les bâtiments. Leur étude a montré que les fenêtres à triple vitrage sont capables de réduire la transmission du rayonnement solaire depuis les espaces extérieurs.

(PERSSON, 2006), après avoir examiné l'impact de la taille des fenêtres sur l'efficacité énergétique, confirme que les petites fenêtres orientées au sud combinées à de grandes fenêtres orientées au Nord entraînent une demande énergétique élevée pour maintenir le confort thermique requis. Les résultats de leurs recherches indiquent que bien que l'utilisation de telles conceptions affecte l'efficacité énergétique en été à des fins de refroidissement, l'effet de l'énergie de chauffage n'est pas aussi important que l'énergie de refroidissement (PERSSON, 2006). Leur recherche conclut que pour améliorer l'éclairage dans les espaces intérieurs, l'augmentation des fenêtres de la face Nord-Est bénéfique (PERSSON, 2006).

Une enquête menée par (KARLSSON, 2001) s'est concentrée sur les fenêtres extérieures et a démontré la valeur de l'émissivité thermique et son influence sur la demande d'énergie de refroidissement et de chauffage. Ils ont étudié différentes conditions climatiques et les valeurs d'importance subséquentes des faibles émittances dans ces régions. Ils ont utilisé deux bâtiments différents avec des types de construction différents. Les résultats de leurs recherches indiquent que des valeurs différentes entraînent des changements mineurs dans le niveau d'efficacité énergétique (KARLSSON, 2001). En d'autres termes, dans un bâtiment résidentiel orienté plein sud, une diminution de 2% de l'émissivité thermique et atteignant 3% aggravera la performance énergétique (KARLSSON, 2001).

Le vitrage isolant est une option approuvée pour minimiser l'effet de la chaleur solaire et ralentir le processus de transmission de la chaleur à l'intérieur. Bien sûr, il existe de nombreuses techniques pour améliorer les performances des vitrages extérieurs afin de réduire la consommation d'énergie élevée dans les bâtiments. Par exemple, les scientifiques ont démontré l'optimisation de l'énergie en appliquant différents types de plusieurs volets de châssis de fenêtre (AlešKralj, 2019).

Aujourd'hui, l'utilisation de fenêtres à double vitrage dans les bâtiments est une pratique courante dans le monde, bien que ces fenêtres extérieures diffèrent en fonction de différentes isolations. Ces isolants vont du type de verre aux types de cadres à rupture de pont thermique

(SONG, 2007). De nombreuses expériences et projets de recherche ont tenté d'améliorer la qualité de l'isolation des fenêtres à double vitrage pour obtenir une optimisation énergétique supplémentaire, par exemple, l'application d'un revêtement à faible émissivité sur les vitres, le remplissage au gaz des espaces entre les vitres, l'installation de polyuréthane comme rupture thermique dans les fenêtres (CHOW, 2013). Un certain nombre d'études montrent que les matériaux isolants, tels que les éléments à rupture de pont thermique en aluminium et en plastique épais, sont capables d'augmenter considérablement la température de surface interne la plus basse et de couvrir la plage de température minimale acceptable (SONG, 2007).

Les recherches menées par (PANÃO, 2013) ont évalué à proximité des bâtiments à énergie zéro (NZEB) en termes d'énergie minimale requise pour faire fonctionner ces types de bâtiments dans le climat méditerranéen. Les résultats de leurs recherches ont indiqué une relation directe entre l'efficacité énergétique et le niveau d'épaisseur de l'isolation. De plus, ils ont noté qu'une épaisseur appropriée varie entre 4 mm et 6 mm (PANÃO, 2013). D'autres chercheurs ont également identifié le double vitrage comme l'un des paramètres les plus cruciaux pour aborder l'efficacité énergétique dans les bâtiments et ont recommandé que, selon les valeurs U du vitrage, les épaisseurs d'isolation appropriées soient de 6 mm et 16 mm. (PANÃO, 2013) Ont conclu qu'en considérant l'énergie requise dans un bâtiment proche de zéro énergie, l'énergie demandée dépend de manière significative des aspects énergétiques primaires de chaque pays.

Comme mentionné dans les sections ci-dessus, une variété de technologies, de méthodes et de normes a influencé les économies d'énergie dans la construction. L'une des technologies est « Sealdair », dans laquelle la cavité existante dans le cadre de la fenêtre scelle l'air, ce qui entraîne une isolation thermique pour les fenêtres extérieures (CHOW, 2013). D'autres méthodes pour améliorer l'efficacité énergétique des fenêtres consistent à appliquer des revêtements à faible émissivité pour diminuer le niveau d'échange de chaleur entre les vitrages de la fenêtre extérieure (SINGH, 2008). Pour réduire le gain de chaleur interne dans diverses régions climatiques, une pratique essentielle consiste à appliquer un revêtement sur une face appropriée du vitrage (CHOW, 2013). Selon (R. Gosselin, 2008), à des fins de ventilation naturelle par les fenêtres extérieures, ces fenêtres à double vitrage équipées d'une cavité semi-ouverte sont capables d'améliorer encore les performances thermiques grâce à l'évacuation de la chaleur par fluide.

Afin de maintenir des conditions de confort maximales dans les espaces intérieurs des bâtiments, de nombreuses recherches ont été menées pour définir et confirmer les avantages et les bénéfices de la conception de fenêtres durables dans différents climats. Afin d'explorer

différents aspects de l'impact du vitrage sur la consommation énergétique du bâtiment, les normes de construction économiques, techniques et locales ont été explorées par de nombreux chercheurs (Sedigh Ziabari SH, 2019).

En 2014 (Saridar, 2004) a évalué les performances d'éclairage naturel de la configuration des façades de l'immeuble de bureaux et planifier la morphologie qui contribue à l'utilisation optimale de l'éclairage naturel, une étude qui a été réalisée sur un bâtiment tertiaire à Bierut (Liban) avec un climat en été chaud méditerranéen et avec l'aide du logiciel DOE-3, il a pu conclure que le taux des baies vitrées doit être limité à 40%.

Un an après, (Cheung, 2005) a effectué une étude sur un bâtiment résidentiel situé à Hong Kong (Chine) avec un climat subtropical afin de réduire la charge de refroidissement dont il a pu conclure que les stratégies d'amélioration de la performance thermique du mur extérieur étaient plus efficaces que celles pour les fenêtres choisies qui prouve que les baies vitrées ont un impact sur la charge de refroidissement.

(Raji, 2015) en 2015 ont étudié pour obtenir des solutions d'économie d'énergie pour la conception de l'enveloppe d'un immeuble de bureaux de grande hauteur en climat tempéré aux Pays-Bas et avec l'aide du logiciel designbuilder ils ont pu conclure qu'un double vitrage classe clair, WWR 50%, stores ouvrants, un vitrage électro chrome et une toiture végétalisée de 10 cm sont recommandés et la conception de l'enveloppe haute performance offre des économies d'énergie considérable d'environ 42% pour la consommation totale d'énergie et 64% pour le chauffage et 34% pour l'éclairage électrique. Et deux ans après ils ont analysé la consommation annuelle d'énergie d'un bâtiment de type office situé dans trois différentes régions une à Amsterdam, Netherlands avec un climat tempérante et la deuxième région c'était à Sydney, Australie avec un climat subtemperate tropical et la troisième région c'était à Singapour avec un climat tropical, et cela a fin pour obtenir un chauffage, un refroidissement, un éclairage et des ventilateurs éco énergétiques, et ils ont pu déduire que pour le climat tropical, les structures octogonales étaient les plus efficaces, suivies des structures carrées et rectangulaires. Le rapport d'aspect optimal était de 1 :2, et le WWR optimal était de 30%. L'orientation préférée des fenêtres était le sud suivi du nord.

(Sedigh Ziabari SH, 2019) ont prouvé qu'avec un WWR supérieur à 20% orienter vers l'ouest la consommation énergétique du bâtiment est la plus élevée. Cependant, un WWR de 25% offre les meilleures performances de ventilation en face nord. Dans la face sud, 30% de WWR est proposé aux côtés de 20% à la zone est du bâtiment.

5.4 Conception de la toiture

Après les murs extérieurs, le toit en tant qu'élément de l'enveloppe du bâtiment a l'impact le plus important sur l'optimisation énergétique. Les dernières études ainsi que leurs résultats seront discutés ici pour avoir une meilleure compréhension des toits sur l'optimisation énergétique de l'enveloppe du bâtiment. Dans cette section, trois types différents de toits seront discutés :

- Conception pour les toits verts.
- Conception pour les toits réfléchissants et les toits blancs.
- Les toits isolés.

Les toits verts sont l'une des stratégies pour atteindre la réduction d'énergie dans les bâtiments. D'autres termes pour les toits verts sont les toits-jardins ou les toits écologiques, ce qui signifie planté de la végétation sur le toit du bâtiment (PARIZOTTO, 2011). Une méthode importante dans la construction non refroidie consiste à concevoir un toit comme une solution efficace pour l'enveloppe du bâtiment afin de contribuer à la conservation de l'énergie et également d'améliorer les conditions thermiques internes (ZINZI, 2012). De plus, l'application de matériaux frais aidera à abaisser la température intérieure, cela est même applicable pendant les saisons plus chaudes sous les rayons directs du soleil. La fonction principale des matériaux froids dans les toits est de refléter le rayonnement solaire et, pendant la nuit, d'évacuer la chaleur.

Afin de déterminer les avantages des toits verts, de nombreuses études ont été menées pour évaluer les capacités d'efficacité énergétique des toits verts dans les bâtiments vernaculaires des régions du sud de l'Australie (COUTTS, 2013). Leurs recherches montrent qu'en utilisant la végétation, une grande quantité d'économies d'énergie peut être atteinte si les toits sont conçus en conséquence pour cibler des objectifs de performance spécifiques, tels que l'atténuation de la chaleur. Par conséquent, la végétation sur les toits verts est une bonne isolation thermique et ils se traduisent par une efficacité énergétique significative (ZINZI, 2012).

D'autres avantages des toits verts fournissent une isolation supplémentaire dans le toit en raison du sol via l'évapotranspiration qui maintient le toit (ZINZI, 2012). Selon de nombreuses études, les toits verts dans différents concepts ont été appliqués dans différents pays, et il est évident que les bâtiments peuvent bénéficier aux toits verts dans les régions aux climats variables (WILLIAMS, 2010).

Néanmoins, les toits verts sont complexes à concevoir et lorsqu'ils sont appliqués dans la pratique dans les bâtiments, les chercheurs ont donc toujours recherché des méthodes plus simples. L'une des méthodes alternatives proposées consiste à utiliser des couleurs claires sur les toits, qui reflètent les rayons du soleil. Les couleurs claires et sombres ont des différences fondamentales de gain de chaleur dans les toits (SUEHRCKE, 2008). En concevant un toit hautement réfléchissant, tel que des toits avec des surfaces de couleur blanche, la température intérieure du bâtiment sera plus froide et entraînera une baisse de la demande d'énergie pour refroidir les espaces intérieurs (YAGHOUBIAN, 2015).

(SUEHRCKE, 2008) Ont effectué des recherches dans des régions climatiques plus chaudes et ont suggéré que les couleurs de toit peuvent être classées en quatre catégories : foncé, moyen, clair et réfléchissant. Leurs recherches ont conclu qu'en appliquant des couleurs réfléchissantes et claires sur les toits, le flux de chaleur vers le bas sera fortement réduit. Le résultat de cette réduction contribue aux économies d'énergie (SUEHRCKE, 2008).

Pour l'isolation du toit, selon (FEIST, 2007), un toit de bâtiment avec capteur solaire non vitré peut aider le processus de refroidissement par refroidissement radiatif, ou alternativement avec une isolation mobile. Différentes études proposent d'utiliser des couches d'isolation, par exemple, dans une isolation à trois couches, deux couches doivent être situées sur les côtés intérieur et extérieur du toit, et le flux de chaleur périodique peut être réduit en plaçant une couche au milieu (Ozel, 2007). Si la position de l'isolation est choisie de manière appropriée, elle peut potentiellement réduire la consommation d'énergie, cependant, la position inadaptée n'entraîne aucune efficacité. De faibles valeurs de valeur thermique ainsi que la réflexion du toit peuvent augmenter de 1,5 fois la résistance thermique (valeur R) d'un toit isolé (ASHRAE, 2008).

Les recherches menées par (HALWATURA, 2008) ont comparé des toits isolés avec des toits légers dans des climats chauds et arides. Les résultats ont confirmé que les toits isolés ont une meilleure performance que les toits légers. Les détails de leur étude montrent que les isolants plus épais, c'est-à-dire 38 mm et 25 mm, fonctionnent plus efficacement que l'isolant de 25 mm qui montre une efficacité remarquable.

5.5 Maitrise des apports solaires

Cette section passe en revue les principaux facteurs de contrôle des apports solaires dans le contexte des dispositifs d'ombrage, à la fois les méthodes modernes et traditionnelles. L'objectif principal de la mise en œuvre de dispositifs d'ombrage pour contrôler l'apport solaire est d'éviter

le rayonnement solaire direct dans les espaces intérieurs à partir de l'ouverture, bien qu'une autre considération importante soit d'éviter le rayonnement réfléchi et diffus des fenêtres, comme le montre la **Figure 5**. De plus, le choix des dispositifs et méthodes d'ombrage diffère selon le type de bâtiment, les conditions de confort thermique attendues et l'emplacement du bâtiment (SANTAMOURIS, 1996). Malgré l'importance de la réduction des apports solaires dans les bâtiments, les besoins en éclairage diurne doivent être satisfaits en priorité au stade de la conception des éléments d'ombrage (SANTAMOURIS, 1996).

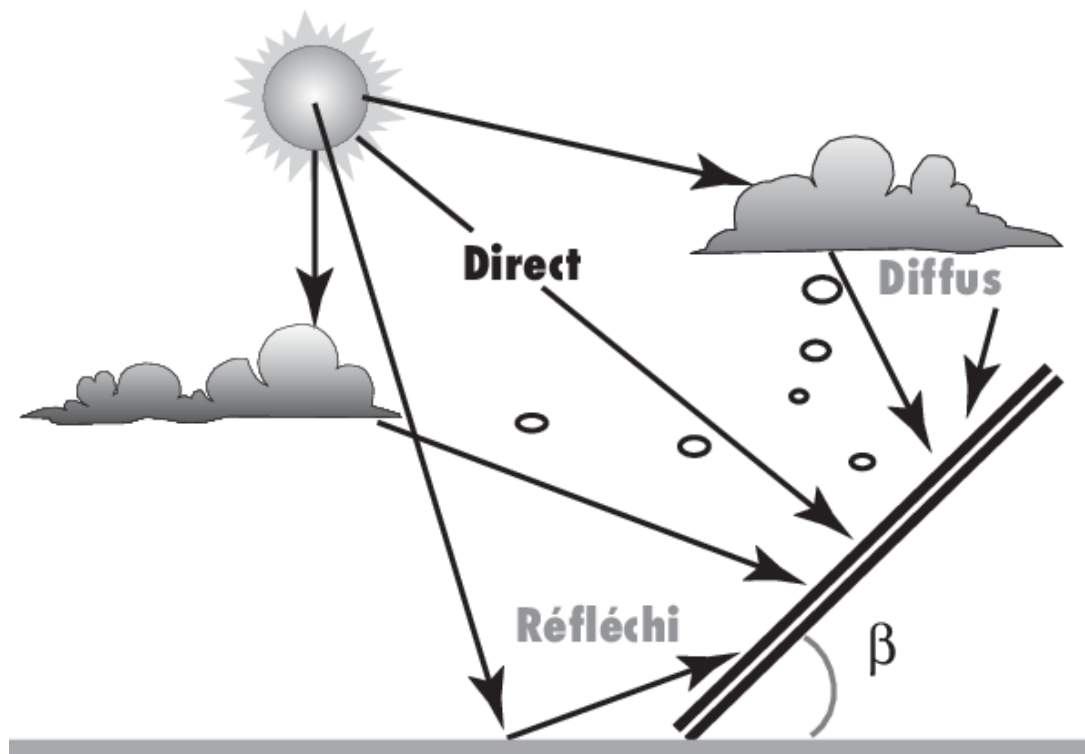


FIGURE 5 : Différents types de radiation

Les activités des occupants, le système de ventilation du bâtiment et la masse thermique jouent un rôle important dans le contrôle des gains solaires à travers l'enveloppe du bâtiment. En conséquence, selon (Thomas, 2001), les dispositifs de contrôle des apports solaires ne doivent pas être considérés comme un élément isolé, ils doivent être considérés comme un système.

Une brève définition des dispositifs de contrôle du gain solaire a été donnée par (STACK, 1999), les contrôles du gain solaire ont pour but d'empêcher la chaleur solaire d'atteindre et d'entrer dans les espaces internes du bâtiment. Par conséquent, pour atteindre cet objectif, de nombreux dispositifs et stratégies d'ombrage ont été conçus.

Selon les caractéristiques de la géométrie solaire, les dispositifs d'ombrage ont des performances identiques, bien qu'il puisse y avoir des variations de taille et de forme. En conséquence, différentes combinaisons d'ombres, par ex. vertical et horizontal suivent le même objectif, cela aidera les concepteurs à avoir plus d'options au stade de la conception (STACK, 1999).

Néanmoins, les stores agissent comme des contrôles importants des apports solaires tant que leur conception ne compromet pas la consommation d'énergie et le confort thermique requis pendant les autres saisons. Par exemple, selon (ASIMAKOPOULOS, 2013), les dispositifs d'ombrage ne doivent pas interférer avec la trajectoire du soleil en hiver, et les dispositifs d'ombrage ne doivent pas obstruer la vue des occupants à travers les fenêtres et doivent être conformes aux réglementations de ventilation naturelle pour permettre la ventilation naturelle requise des ouvertures.

La conception d'un dispositif d'ombrage n'est possible que lorsque l'emplacement du soleil par rapport à l'élévation du bâtiment peut être déterminé par l'angle d'incidence et l'angle d'ombre. Les concepteurs pourront distinguer l'altitude et l'azimut solaires lorsqu'ils connaîtront la trajectoire du soleil et son association avec la terre. Ceci est régulièrement démontré par les diagrammes de trajectoire du soleil.

5.6 Ombrage

Selon (ASHRAE, 2008), les fenêtres ombragées de l'extérieur réduisent le gain de chaleur solaire jusqu'à 80 %. Lorsque le vitrage permet le passage du rayonnement infrarouge dans l'espace intérieur, une grande partie de celui-ci est captée puis diffusée par ventilation naturelle ou ventilation mécanique (MCNICHOLL, 1994). En général, cependant, les conceptions et l'installation d'ombrages peuvent être coûteuses et techniquement difficiles à entretenir ou à réparer (O'COFAIGH, 1999).

On trouve comme dispositifs d'ombrage, les ombrage fixes et réglables, ils conviennent aux fenêtres orientées au sud, et sont placés au-dessus des fenêtres. L'emplacement du surplomb au-dessus de la fenêtre et la largeur de la projection sont importants car un emplacement approprié permet aux rayons requis de traverser les fenêtres lorsque la position du soleil dans le ciel est basse. La profondeur du porte-à-faux doit tenir compte de sa distance au-dessus de la fenêtre et de la hauteur de l'ouverture. De plus, sa longueur est calculée par la largeur de la fenêtre (LEWIS, 1992).

La performance des dispositifs d'ombrage est conçue en fonction du grand-angle d'été et du contre-angle d'hiver, cela signifie qu'ils bloquent la lumière du soleil en été et le permettent en hiver, ils sont également des éléments efficaces pour diminuer la diffusion de la lumière du jour (STACK, 1999). Des surplombs plus grands, obtenir plus d'ombre que nécessaire pour couvrir la surface de la fenêtre, ce sera une pratique appropriée dans les régions à climat chaud (O'COFAIGH, 1999). D'autres stratégies comme indiquée par (SANTAMOURIS, 1996) sont les surplombs de toit et les longs balcons qui ont un effet positif sur les températures internes dans les régions à climat chaud, dans de nombreux bâtiments.

Il existe différents types de dispositifs d'ombrage externes qui contribuent à contrôler la lumière du soleil dans les espaces internes, les dispositifs suivants sont les dispositifs d'ombrage externes les plus importants : étagères lumineuses, persiennes fixes et mobiles, volets, écrans fixes, cage à œufs et auvents.

En tant que pratique architecturale courante, on trouve le type du dispositif d'ombrage fixe est largement utilisé. L'orientation de la fenêtre doit être prise en compte pour les dispositifs d'ombrage fixes au stade de la conception. Le chemin du soleil à différentes saisons est un facteur influent sur l'efficacité des dispositifs d'ombrage fixes (LEWIS, 1992). Un emplacement commun pour les ombrages en surplomb est sur les façades sud et les ombrages latéraux sont situés dans les façades orientées est et ouest (GOULDING, 1992). Selon (M S Shahdan, 2018), l'installation d'ailettes verticales sur les façades de la face nord peut protéger le bâtiment du soleil bas en été le matin et en fin d'après-midi.

Les ombrages fixes peuvent être conçus comme des éléments structurels tels que des balcons et des éléments non structurels tels que des auvents et des persiennes. En raison de la simplicité d'installation et d'entretien de ces appareils, les occupants du bâtiment peuvent facilement choisir d'installer ces appareils pour refroidir l'intérieur du bâtiment (SANTAMOURIS, 1996).

6- Le confort thermique

Une multitude théorie existent du confort thermique dans les bâtiments, bien qu'il soit impossible de généralisé le confort thermique dans les bâtiments dans une seule définition. L'humanité est entourée par une nuance climatique dans les quatre coins du monde, ce qui rend impossible la définition d'un confort thermique spécifique qui s'adresse à tous les climats. L'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) est une norme internationale pour définir le confort thermique et est largement acceptée.

L'ASHRAE est définie en fonction de la satisfaction des personnes suivant l'état d'esprit vis-à-vis de l'environnement thermique (ISO 7330). Le confort thermique tel que recommandé doit être considéré comme une propriété environnementale qui détermine la satisfaction des besoins psychologique, thermique et physiologique. Créer un tel confort dans les bâtiments nécessite un processus important dans la phase de construction, en particulier s'il peut être atteint par une consommation d'énergie minimale. À cette fin, certaines stratégies de refroidissement passif doivent être envisagées de manière à respecter la qualité de l'air interne essentielle au confort thermique des occupants. Selon (SANTAMOURIS, 1996), toutes les stratégies de refroidissement passif ne conduisent pas nécessairement à une réduction de la température, mais contribuent à étendre la tolérance de la température intérieure en réduisant l'humidité ou en augmentant la lumière.

Le confort thermique a également été défini d'autres manières, par exemple, (HUIZENGA, 2006) définit le confort thermique comme la satisfaction des occupants avec la température du bâtiment en fonction de son environnement thermique. Cependant, (MARKUS, 1980) considèrent que le confort thermique est un état dans lequel les personnes jugent l'environnement ni trop froid ni trop chaud, une sorte de point neutre défini par l'absence de sensation d'inconfort.

Ce chapitre passe en revue le concept de confort thermique pour l'homme, et les différentes méthodes qui ont été proposées pour le mesurer. De plus, ce chapitre examinera la faisabilité d'une conception de bâtiment et d'environnement qui peut créer un confort thermique approprié pour l'occupant et également contribuer à réduire la consommation d'énergie.

6.1 L'occupant et le confort thermique

Le système de température humaine est aperçues dans l'hypothalamus du cerveau et surveille la vitesse de la température dans le sang causé par les changements métaboliques dans le corps, ces sensations transfèrent la température à la peau et au corps humain et peuvent reconnaître le niveau de confort thermique. Le corps humain a un point de consigne de 37°C, qui doit être maintenu. Si la température du corps humain descend en dessous de ce niveau, une cause physiologique réactive augmente le taux métabolique entraînant la génération de plus de chaleur, et si la température du corps humain augmente la transpiration corporelle et évapore l'humidité de la peau pour fournir un refroidissement. Lorsque la température intérieure change rapidement ou de manière inattendue, ce qui signifie que les mesures d'adaptation sont inefficaces, des sensations d'inconfort apparaissent (STACK, 1999). En raison de la variété des

« indices » de confort, il est difficile de tous les démontrer dans cette étude. Cependant, en considérant les indices de confort les plus importants et les plus largement utilisés.

6.2 ASHRAE et le confort thermique

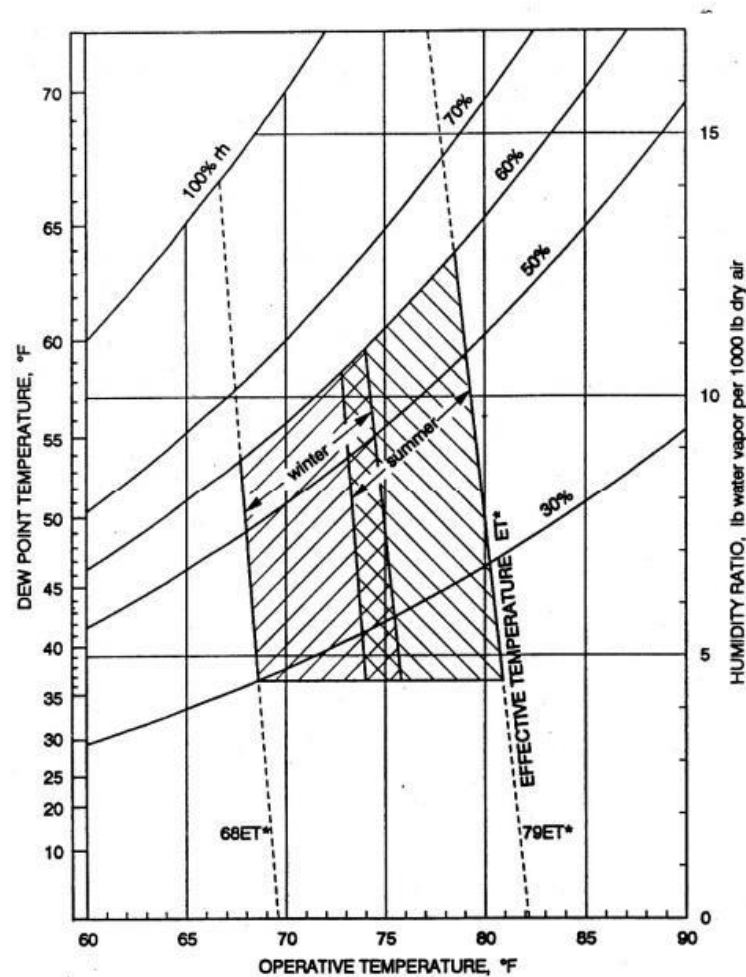


FIGURE 6 : Le diagramme psychométrique

Le confort thermique est défini comme un « état d'esprit qui exprime la satisfaction de l'environnement thermique et est évalué par une évaluation subjective » (Fundamentals, 2013). Les principaux facteurs de cette définition, comme le montre la **Figure 6**, sont l'humidité relative et la température (ANSI/ASHRAE Standard 55, 2017). Comme l'a démontré (David Evans BN, 2003), il existe cinq normes ASHRAE séquentielles qui représentent différentes zones de confort. De plus, ils présentent combien il est difficile de définir une zone de confort adaptée pour satisfaire la plupart des occupants.

6.3 Olgyay et le confort thermique

Olgyay est l'une des cartes bioclimatiques les plus utilisées dans le monde. Olgyay se réfère graphiquement à deux facteurs climatiques pour présenter la zone de confort. Ces deux facteurs sont l'humidité relative H_R et la température de bulbe sec T_{SA} , qui sont tracées sur l'axe XY. La carte bioclimatique d'Olgyay a été attribuée aux bâtiments à fonctionnement libre et pendant la ventilation naturelle uniquement. Il a également été suggéré que la plage de confort thermique pendant l'été peut être étendue pour des températures et une humidité plus élevées lors de l'augmentation de la vitesse du vent **Figure 7**.

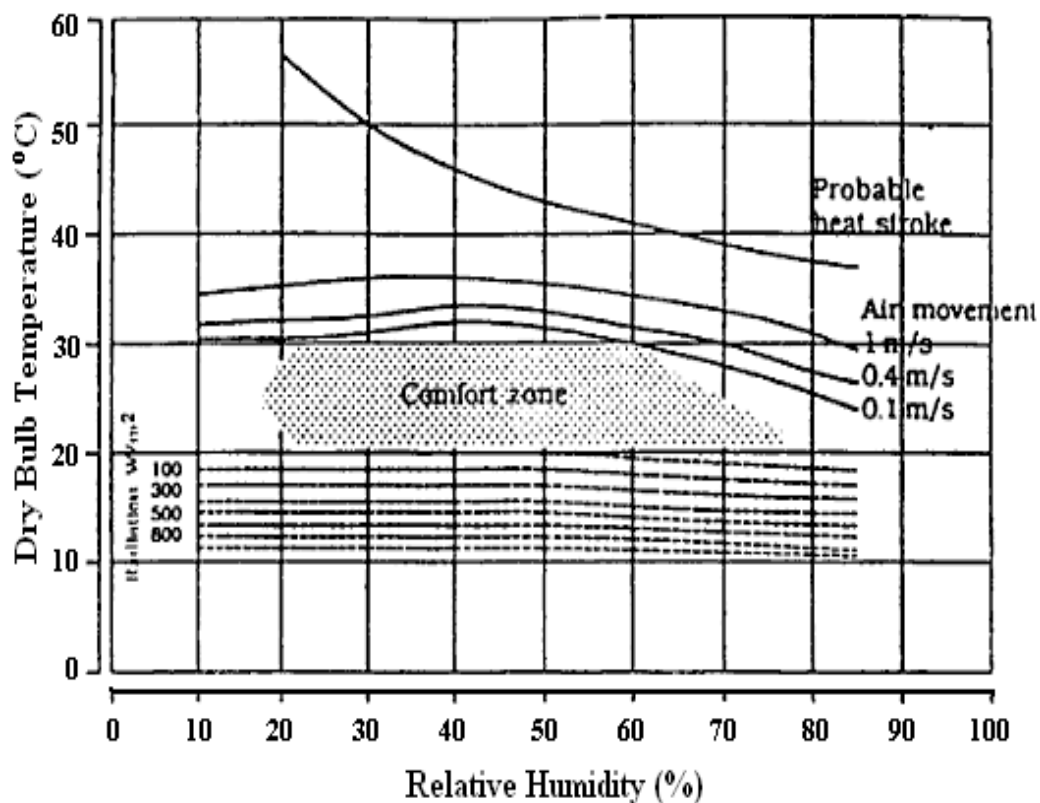


FIGURE 7 : Le diagramme bioclimatique d'Olgyay

6.4 Givoni et le confort thermique

Givoni a créé un graphique avancé avec plus d'avantages que le graphique d'Olgyay qui était applicable lorsque les températures extérieure et intérieure étaient proches l'une de l'autre. En plus d'utiliser la température extérieure pour établir un indice de confort, Givoni a approximé la température interne en utilisant d'autres facteurs différents, tels que l'heure de ventilation diurne, la masse thermique et le refroidissement par évaporation **Figure 8** (Givoni, 1998).

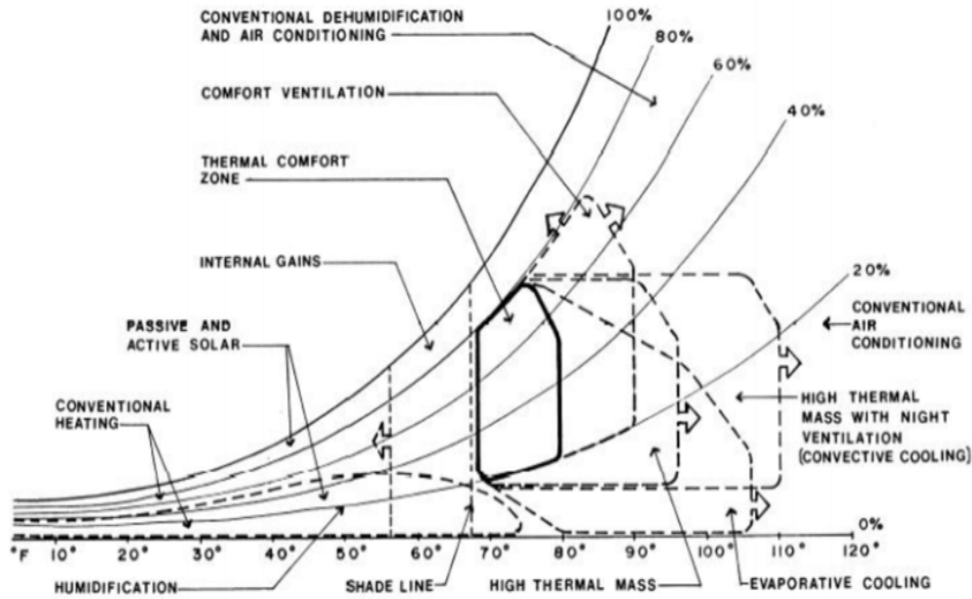


FIGURE 8 : Le diagramme de confort du Givoni

6.5 Fanger et le confort thermique

Afin d'évaluer le confort humain, (Fanger, 1970) a appliqué un autre modèle mathématique et a supposé que l'équation du bilan thermique peut conduire à une mesure du confort thermique humain. Le niveau de confort peut être déterminé à partir du vote d'un sujet sur un classement de sept points **Figure 9**.

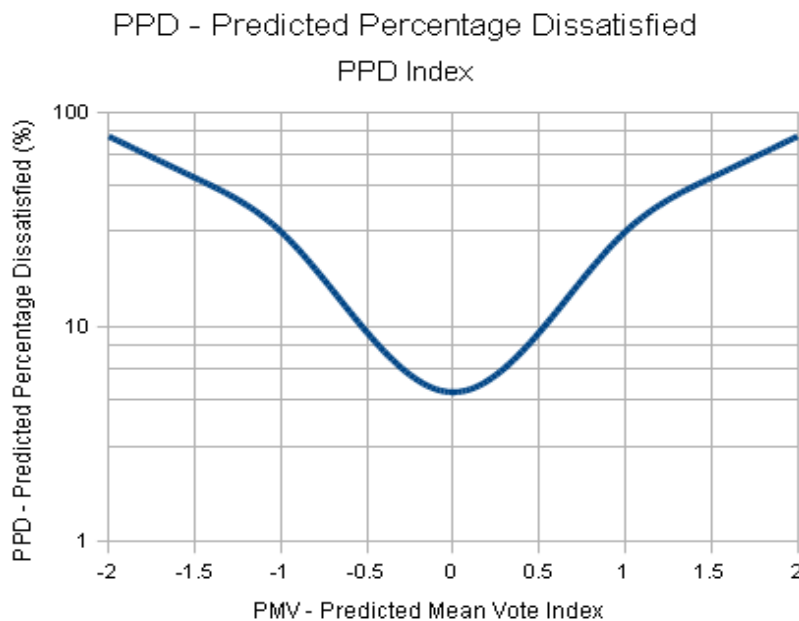


FIGURE 9 : Indice de confort

7- Conclusion

Par ce chapitre nommé l'état de l'art, on a pu donner une vision générale sur les dernières recherches et études pertinentes qui ont été réalisées dans différents aspects géo-climatiques. Dans un premier temps, ce chapitre s'est concentré sur les études relatives à la conception optimale et aux stratégies pouvant être mises en œuvre dans les bâtiments afin d'atteindre l'optimisation énergétique et le confort thermique des bâtiments. Deuxièmement, par cet état de l'art, on a passé en revue les recherches menées concernant la conception efficace de structure d'une construction dans diverses régions du monde. Bien que plusieurs techniques aient été envisagées, toutes les stratégies ne sont pas adaptées ou applicables au climat.

En conséquence, les recherches et les études examinées dans ce chapitre peuvent potentiellement contribuer à la mise en œuvre d'une étude pouvant être modifiée pour s'adapter au climat et aux pratiques de construction marocaine.

Chapitre 2
Méthodologies et
Matériels

1- Introduction

La méthodologie de recherche est un moyen de résoudre systématiquement les problèmes de recherche. Lorsqu'il est question de méthodologie de recherche, il ne s'agit pas seulement de la méthode de recherche, mais également de considérer la logique derrière les méthodes utilisées dans le contexte d'une étude de recherche et d'expliquer pourquoi une technique ou une méthode particulière est utilisée et pourquoi les autres ne le sont pas.

L'approche de recherche de cette étude est une approche déductive, par conséquent, la conception de la recherche quantitative est adoptée pour atteindre le but et les objectifs de cette recherche.

Cette recherche portera sur les études paramétriques et la modélisation par simulation des bâtiments en explorant les performances énergétiques de demande en chauffage et en refroidissement de divers composants qui compose l'enveloppe du bâtiment du bâtiment.

Avec l'objectif d'optimiser la performance des parois extérieures de la construction, on aura besoin d'un ensemble des outils qui seront utiles à la réalisation de ce travail de recherche.

2- Outils pour la simulation

2.1 TRNsys Software

Le logiciel (TRNSYS) « *TRaNsient SYstem Simulation program* » que décrit dans le manuel d'utilisation du code est un environnement de simulation complet et extensible pour la simulation transitoire de systèmes, y compris les bâtiments multizones. Il permet de valider de nouveaux concepts énergétiques, des simples systèmes d'eau chaude sanitaire à la conception et la simulation des bâtiments et de leurs équipements, en passant par les stratégies de contrôle, le comportement des occupants, les systèmes d'énergie alternative (éolien, solaire, photovoltaïque, hydrogène), etc. TRNSYS les applications comprennent : les systèmes solaires (solaires thermiques et photovoltaïques), les bâtiments à faible consommation d'énergie et les systèmes CVC avec des caractéristiques de conception avancées (ventilation naturelle, chauffage/refroidissement par dalle, double façade, etc.), systèmes d'énergie renouvelable, etc.

TRNSYS se compose d'une suite de programmes : Le studio de simulation TRNSYS, le moteur de simulation (TRNDll.dll) et son exécutable (TRNExe.exe), l'interface visuelle de données d'entrée du bâtiment (TRNBuild.exe) et l'éditeur utilisé pour créer le stand- seuls programmes redistribuables appelés applications TRNSED (TRNEdit.exe). L'interface visuelle principale est le TRNSYS Simulation Studio. À partir de là, vous pouvez créer des projets en glissant-déposant des composants dans l'espace de travail, en les connectant ensemble et en définissant les paramètres de simulation globaux. Le studio de simulation comprend également un gestionnaire de sortie à partir duquel vous contrôlez quelles variables sont intégrées, imprimées et/ou tracées, et un gestionnaire de journaux/erreurs qui vous permet d'étudier en détail ce qui s'est passé lors d'une simulation.

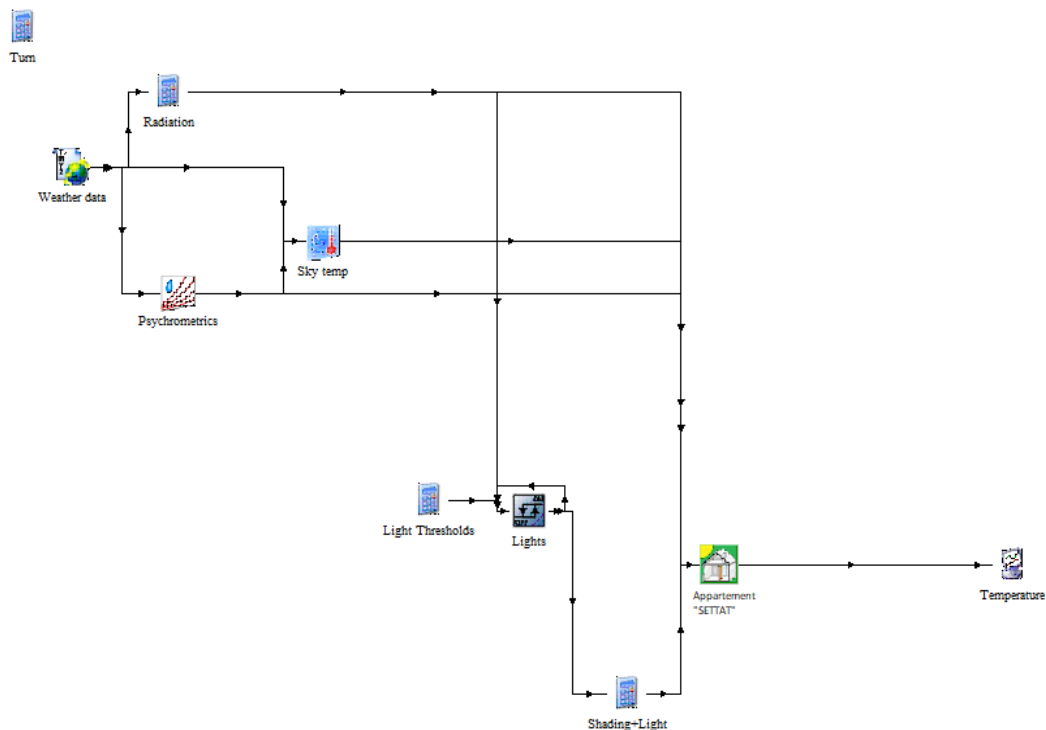


FIGURE 10 : Interface du TRNsys

TRNsys type 56, Ce composant modélise le comportement thermique d'un bâtiment divisé en différentes zones thermiques. Pour utiliser ce composant, un programme de prétraitement séparé doit d'abord être exécuté. Le programme TRNBUILD lit et traite un fichier contenant la description du bâtiment et génère deux fichiers qui seront utilisés par le composant TYPE 56 lors d'une simulation TRNSYS. Le fichier contenant la description du bâtiment traité par TRNBUILD peut être généré par l'utilisateur avec n'importe quel éditeur de texte ou avec le programme interactif TRNBUILD.

2.2 GenOpt

GenOpt (Wetter, 2009) est un programme d'optimisation pour minimiser une fonction-objectif évaluée par un programme de simulation externe tel que TRNSYS. Il assure la détermination des valeurs de variables choisies qui minimisent une fonction-objectif. Pour ce faire, GenOpt génère automatiquement des fichiers d'entrées pour TRNSYS. Ces fichiers sont basés sur des modèles préétablis (Template) de fichier d'entrées de TRNSYS. GenOpt exécute TRNSYS, récupère la valeur de la fonction-objectif à partir du fichier de résultats de TRNSYS et détermine une nouvelle série de variables d'entrée pour la prochaine itération. Ce processus est assuré par un algorithme d'optimisation. GenOpt propose une librairie d'algorithmes laissant à l'utilisateur la liberté de choisir celui qui convient le mieux à son problème.

L'optimisation est toujours considérée comme un problème de minimisation de la fonction objective, et s'écrit généralement sous cette forme :

$$\begin{cases} \min f(x) \\ g(x) \leq 0 \\ h(x) = 0 \\ x \in S \subset \mathcal{R}^n \end{cases}$$

- f est la fonction objective
- x est le vecteur des variables d'optimisation, $n \in \mathbb{N}$
- g sont les contraintes d'inégalités
- h sont les contraintes d'égalités
- S est l'espace de recherche

Dans GenOpt, les variables d'optimisation peuvent être continues et/ou discrètes. Dans la suite, nous considérons les optimisations à plusieurs variables ($n > 1$) et à contraintes d'inégalité.

2.3 Couplage Genopt et TRNsys

GenOpt fonctionne en remplaçant les noms de variables dans les fichiers d'entrée (DCK et BUI) par différentes valeurs sélectionnées par l'algorithme d'optimisation. Pour ce faire, il lit les fichiers dits "Modèles" (qui restent inchangés) et écrit de nouveaux fichiers d'entrée à chaque optimisation **Figure 11**.

Pour commencer, on fait une copie du fichier DCK créé par le Studio de simulation (GenOpt-Type56.dck) et on le renomme en GenOpt-DeckTemplate.dck. On réalise ensuite une copie du fichier BUI (GenOpt-Type56.bui) et on le renomme en GenOpt-BuildingTemplate.bui.

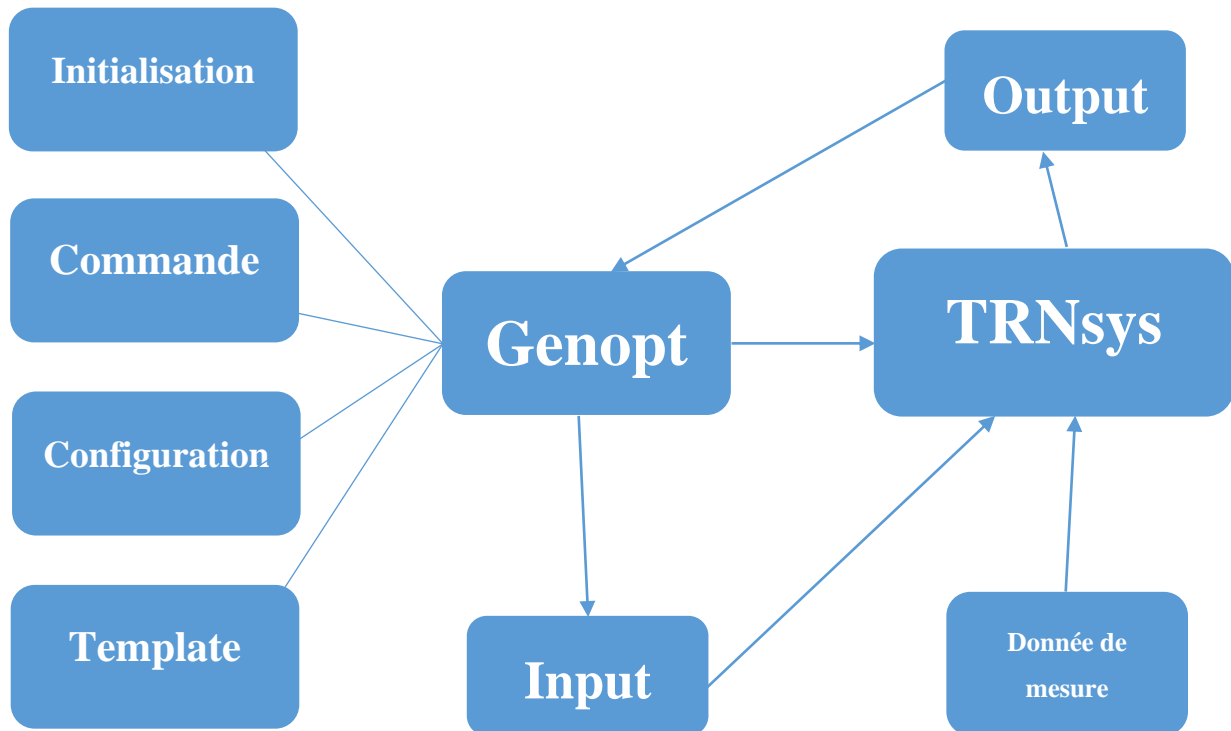


FIGURE 11 : Couplage TRNsys avec Genopt

2.4 Meteonorm

(Meteonorm, 2014) Est un logiciel collaboratif qui facilite les exports des données météorologiques nécessaires pour la modélisation du bâtiment, vers TRNSYS ainsi que vers de nombreux autres logiciels de simulation en Énergie solaire et Bâtiment. Il s'adresse aux ingénieurs, architectes, enseignants, concepteurs et toute personne qui s'intéresse à l'énergie solaire et à la climatologie.

3- Description du bâtiment étudié

Le bâtiment de référence est un appartement marocain avec une construction standard en termes d'enveloppe du bâtiment, composée de trois pièces, il s'agit d'un appartement au 5^{ème} étage d'un immeuble de six niveaux.

L'emplacement géographique de l'appartement de référence est basé sur un bâtiment dans la vie réelle dans la ville de Settat oriente vers l'est, avec les coordonnées suivantes, Latitude : 33° 00' 00" Nord et longitude : 7° 37' 00" Est, à une altitude de 290 m au-dessus du niveau de la mer.

La superficie totale du bâtiment est de 70 m². L'ensemble de l'espace climatisé est chauffé. L'unité comprend un salon, une cuisine, deux chambres et WC et salle de bain **Figure 12**.

Les matériaux de construction attribués en fonction des matériaux disponibles dans la bibliothèque de matériaux du logiciel de simulation TRNsys. La propriété physique des matériaux est ajustée en fonction des valeurs spécifiées selon les matériaux locaux.

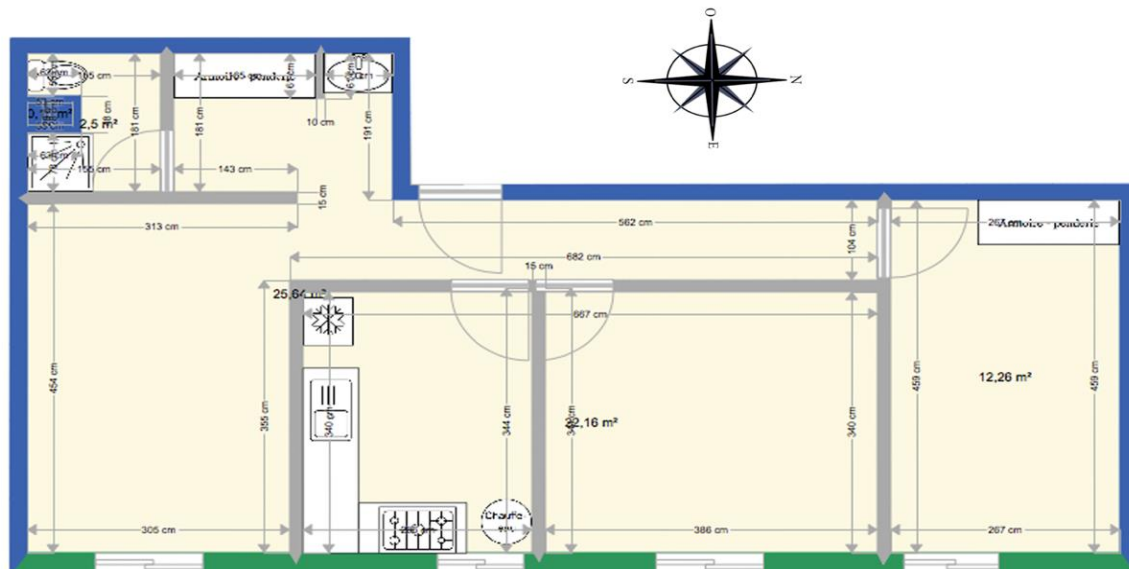


FIGURE 12 : Plan architectural du bâtiment de référence

3.1 Les baies vitrées

Les parois vitrées de l'appartement du cas de référence, ce sont des fenêtres à simple vitrage en métal avec verre clair. D'après le rapport fenêtre/étage, il est clair qu'un facteur de lumière du jour de 2 a été attribué à ce bâtiment. Les dimensions des fenêtres ouvrantes représentent 18% de la superficie totale de la surface du bâtiment. La hauteur de toutes les fenêtres est toujours de 1,5 m. Le **Tableau 1** montre d'autres détails de la fenêtre tels que mentionnés par le fabricant.

$$WWR(\%) = \frac{\text{Surface des baies vitrées}}{\text{surface totale des façades}}$$

TABLEAU 1 : Fenêtre avec châssis métallique et simple vitrage

	VALEUR	UNITE
EPAISSEUR	8	mm
COEFFICIENT DE TRANSFERT THERMIQUE U	5,8	w/m ² K
VISIBLE TRANSMITANCE	90	%
COEFFICIENT DE GAIN DE CHALEUR SOLAIRE	86	%

3.2 Toiture et plancher

Le sol et la toiture est un ensemble d'une structure composé de cinq parties et on la nomme : la dalle, ainsi on détaillera chaque couche et chaque partie par ordre à partir de la toiture au plancher : 2cm de plâtre + 16cm de dalle béton + 6cm de mortier de ciment + carrelage de 1cm d'épaisseur.

TABLEAU 2 : Caractéristique des matériaux d'une dalle

	EPAISSEUR (CM)	CONDUCTIVITE THERMIQUE Λ (W/M.K)	CAPACITE THERMIQUE CP(J/KG.K)	DENSITE P(KG/M ³)
CIMENT	2	0,72	780	2000
PLATRE	2	0,9	910	1800
DALLE EN BETON	16	1,6	1000	2300
CARRELAGE	1	0,84	840	1700

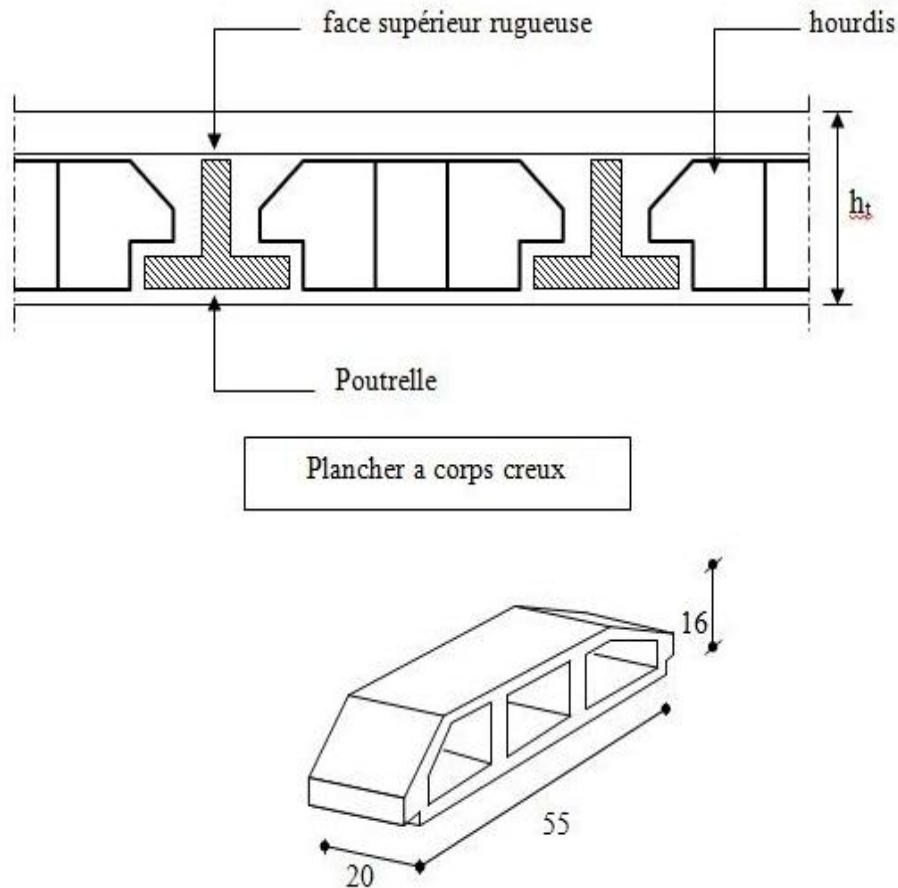


FIGURE 13 : Conception d'une dalle

3.3 Les parois opaques

Dans notre étude, les parois opaques sont les murs, l'élément principal qui protège le bâtiment des intempéries climatiques. Le bâtiment se compose par des murs adjacents au d'autre partie du bâtiment, comme indiqué sur la **Figure 12** en bleu et le plafond et la planche sont considérés comme des parties adiabatiques du bâtiment, tandis que le mur avec les fenêtres comme il est indiqué en vert sur la **Figure 12**, est une surface externe.

Le mur extérieur composé de trois parties (2cm de mortier de ciment + brique d'argile rouge d'une épaisseur de 15cm + 2cm de mortier de ciment), et les murs intérieurs composés de trois parties (mortier de ciment d'une épaisseur de 2cm + brique rouge de 10cm + 2cm de mortier de ciment).

Le **Tableau 3** suivant présente les différents détails sur les matériaux de construction de l'enveloppe qui sera utile comme donnée pour la simulation.

TABLEAU 3 : Caractéristique des matériaux d'un mur

	EPAIS SEUR (CM)	CONDUCTIVI TE THERMIQUE Λ(W/M.K)	CAPACITE THERMIQU E CP(J/KG.K)	DENSITE P(KG/M³)
BRIQUE CREUSE 10	10	0,179	760	884
BRIQUE CREUSE 15	15	0,197	760	640
CIMENT	2	0,72	780	2000

3.4 Air infiltre

Le taux d'infiltration est l'un des facteurs les plus importants pour prédire la performance énergétique des bâtiments. L'une des principales raisons de cette importance est la perte et les gains de chaleur par les infiltrations sont comparables au transfert de chaleur à travers une enveloppe bien ou mal isolée. Cela signifie que l'estimation des infiltrations du modèle est d'une grande importance. Cependant, cela ne peut être identifié avec précision qu'en appliquant un test de soufflerie (ASHRAE, 2005). Cela peut être appliqué une fois la construction terminée.

Pour cette étude, le taux d'infiltration a été attribué comme un taux fixe basé sur le taux moyen d'infiltration de nouveaux bâtiments marocains construits autour de 0,6 ACH.

3.5 Configuration du chauffage et de refroidissement

Il est nécessaire que les bâtiments soient équipés d'un thermostat pour contrôler la température interne. Notre bâtiment de référence n'est pas équipé de thermostats, par conséquent, les points de consigne de température dans la simulation ont été élaborés en fonction de la température de consigne moyenne. Le système du chauffage a été fixe entre 19 C° et 20 C°, et le système du refroidissement il a été fixe pour une valeur comprise entre 22 C° et 23 C°.

3.6 Apport interne

3.6.1 Eclairage et appareillage électrique

L'éclairage artificiel est une source de chaleur sensible, dont il faut tenir compte dans notre étude de cas, on retrouve dans notre bâtiment de référence l'utilisation de deux types de lampes, les lampes à incandescence (la chambre et le salon) et les lampes fluorescentes (cuisine, couloir et dans la salle de bain) respectivement avec une puissance de 25 W/m² et 8 W/m².

Notre appartement comprend également des équipements électriques qui constituent à la fois des sources de chaleur sensible et latente. Comme décrit dans le **Tableau 4** suivant de certains équipements avec leur puissance et leur nombre d'heures d'utilisation par jour.

TABLEAU 4 : Configuration des appareillages électriques dans le bâtiment

EQUIPEMENT	GAIN (W)		DUREE (H/JOUR)	NOMBRE D'EQUIPEMENT
	Sensible heat	Latent heat		
REFRIGERATEUR	500	-	10	1
TV	175	-	4	1
ORDINATEUR	250	-	3	3
ASPIRATEUR	50	-	0,5	1
FER A REPASSE	230	270	0,5	1

3.6.2 Occupant

Afin de déterminer les contributions internes des occupants, nous avons réalisé deux scénarios d'occupation, l'un pour la semaine et l'autre pour le week-end (samedi et dimanche) en tenant compte du fait que l'appartement est occupé par une famille composée de deux adultes et deux enfants **Tableau 3**. Le logiciel de simulation TRNsys représente une variété de types de gains d'occupant en référence à la norme 7730.

TABLEAU 5 : Scenario occupation du bâtiment et l'éclairage

Zone	Occupation (Person/m ²)	Illuminance (Lux)	scenario
Séjour	0,15	200	
Chambre a couché	0,16	100	
Bain	0,5	150	
Cuisine	0,23	250	
Couloir	0,17	150	

4- Conclusion

Après avoir déterminé la méthodologie de travail et les outils nécessaires pour la réalisation de cette étude de recherche, on passera à la première phase qui est la création du bâtiment de référence et l'étalonnage du logiciel de simulation tout en déterminant les facteurs influençant avec plus d'impact sur la consommation énergétique du bâtiment. Ensuite, la deuxième phase consiste à proposer un cas optimisé à travers l'évaluation de l'impact des baies vitrées selon leur taille, types et orientation sur la consommation énergétique d'un bâtiment dans les six zones climatiques marocaine comme la déterminer la réglementation thermique marocain de construction, et proposer celle la plus optimale pour chaque zone climatique. Au cours de la troisième phase, le scénario de base est encore optimisé en appliquant des mesures supplémentaires en proposant des recommandations sur une meilleure conception de la performance énergétique dans les bâtiments résidentiels grâce à des principes de conception passive.

Chapitre 3

Application de la simulation énergétique du bâtiment à l'évaluation du comportement thermique d'un appartement au MAROC

1- Introduction

Avant d'entamer la problématique principale, par ce chapitre, et comme on a mentionné dans le chapitre dernier, on va essayer de modéliser notre modèle numérique de notre bâtiment de référence, ainsi en réalisant des simulations afin d'étudier l'impact que certains choix peuvent avoir lors de la conception d'un bâtiment, sur son bilan énergétique et également sur le confort thermique de l'occupant et ce à l'aide du logiciel de simulation thermique TRNsys. Et aussi vérifier la justesse de notre modèle simulé avec le modèle réel, et ce en comparant la consommation énergétique annuelle du bâtiment simulé avec la consommation énergétique annuelle à prélever sur les factures énergétiques du bâtiment, nous vérifions donc que la moyenne de tous les écarts soit aussi proche que possible de zéro. On réalisera une autre étude en parallèle qui consiste à faire une même étude sur un autre bâtiment avec d'autres paramètres (enveloppe, orientation, superficie, géométrie,...), afin de comparer les résultats de la simulation de la consommation énergétique des deux bâtiments et la comparant avec la consommation réelle basé sur les factures énergétiques.

Tout d'abord une description de l'exemple d'étude de cas, où nous donnerons toutes les données nécessaires à la simulation de notre nouvel habitat. La section suivante décrit la simulation des bâtiments et leurs résultats. Et avant de conclure on comparera les résultats simulé avec celle prélevé des factures des deux bâtiments.

Tout d'abord, on va commencer ce chapitre par présente le nouveau bâtiment.

2- Description du nouveau bâtiment

2.1 Bâtiment

L'immeuble pris comme cas d'étude est situé à Settat, Maroc **Tableau 6**, et il s'agit d'un type d'appartement d'une superficie nette de 110 m².

L'appartement que nous avons pris en considération comme bâtiment de référence pour notre étude, comprends trois chambres, une cuisine, un salon, une salle de bain et un couloir comme le montre la **Figure 14** qui illustre le plan architectural de ce bâtiment de référence.

TABLEAU 6 : Coordonnée géographique de la ville de Settat.

VILLE	ALTITUDE(M)	LONGITUDE	LATITUDE
SETTAT	365	-7,6160	33,0010

Ainsi le bâtiment a deux façades, l'une orientée à l'est et l'autre au sud, avec un ratio global fenêtre/mur de 17,5%.

$$WWR(\%) = \frac{\sum \text{Surface des baies vitrées}(m^2)}{\sum \text{surface totale des façades}(m^2)}$$



FIGURE 14 : Plan architectural du bâtiment avec différentes zones climatiques

Les murs extérieurs (non isolés) sont composés de trois couches (2 cm de mortier de ciment, brique d'argile rouge d'une épaisseur de 15 cm et 2 cm de mortier de ciment) d'une épaisseur totale de 19 cm. Les murs intérieurs sont composés de trois couches (2 cm de mortier de ciment, 10 cm de brique d'argile rouge et 2 cm de mortier de ciment) d'une épaisseur totale de 14 cm.

Le toit et le sol est un ensemble appelé la dalle, et dans notre cas d'étude nous avons une dalle en béton armé massif d'une épaisseur totale de 30 cm composée de cinq couches (du toit au sol : 2 cm de plâtre, 16 cm dalle béton, 6 cm de mortier de ciment et 1cm de carrelage). En ce qui concerne les fenêtres sont en châssis métallique avec simple vitrage et sont équipées de stores extérieurs. Le **Tableau 7** suivant nous montre les différentes propriétés thermo physiques des éléments de construction de bâtiments (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, 2007)

TABLEAU 7 : Les caractéristiques thermiques des matériaux de construction du bâtiment.

MATERIAUX	CONDUCTIVITE THERMIQUE (W/M.K)	CAPACITE THERMIQUE CP(J/KG.K)	DENSITE P(KG/M³)
BRIQUE CREUSE 10	0,179	760	884
BRIQUE CREUSE 15	0,197	760	640
CEMENT	0,72	780	2000
PLATRE	0,9	910	1800
DALLE EN BETON	1,6	1000	2300
CARRELAGE	0,84	840	1700

2.2 Données météorologiques

Le Maroc se positionne au nord-ouest de l'Afrique sur la côte atlantique et celle de la Méditerranée ce qui lui confère une grande variété climatique dans différentes régions du royaume, ainsi en se basant sur des critères de rayonnement, d'humidité et de température, le

RTCM pour subdiviser le Royaume marocain en six zones climatiques **Figure 15** (RTCM, 2014).

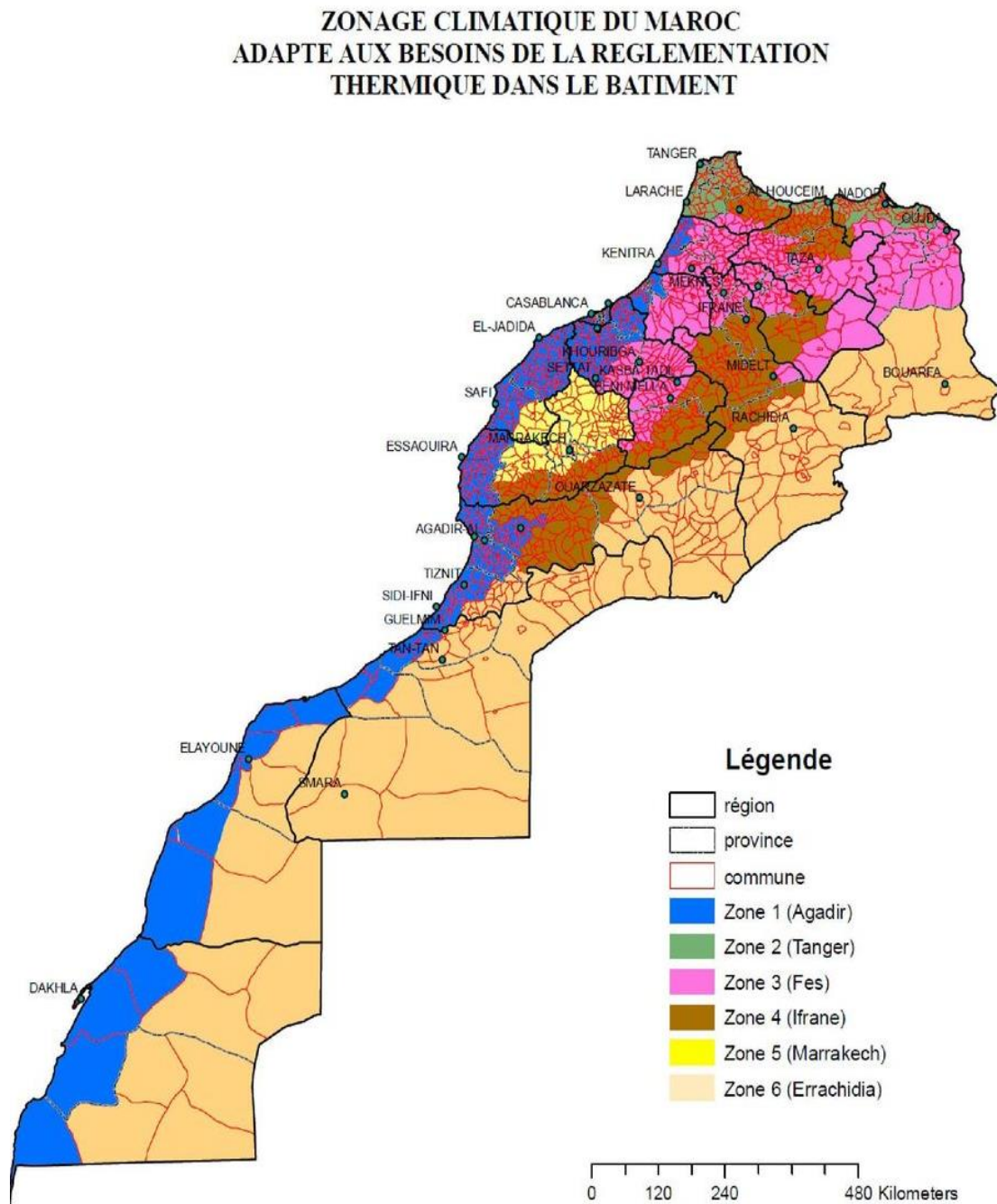


FIGURE 15 : Zonage climatique du Maroc.

La ville de SETTAT est dotée d'un climat semi-aride (très chaud en période estivale et très froid en période hivernale) avec une température moyenne annuelle de 18,1 C° **Figure 16**.

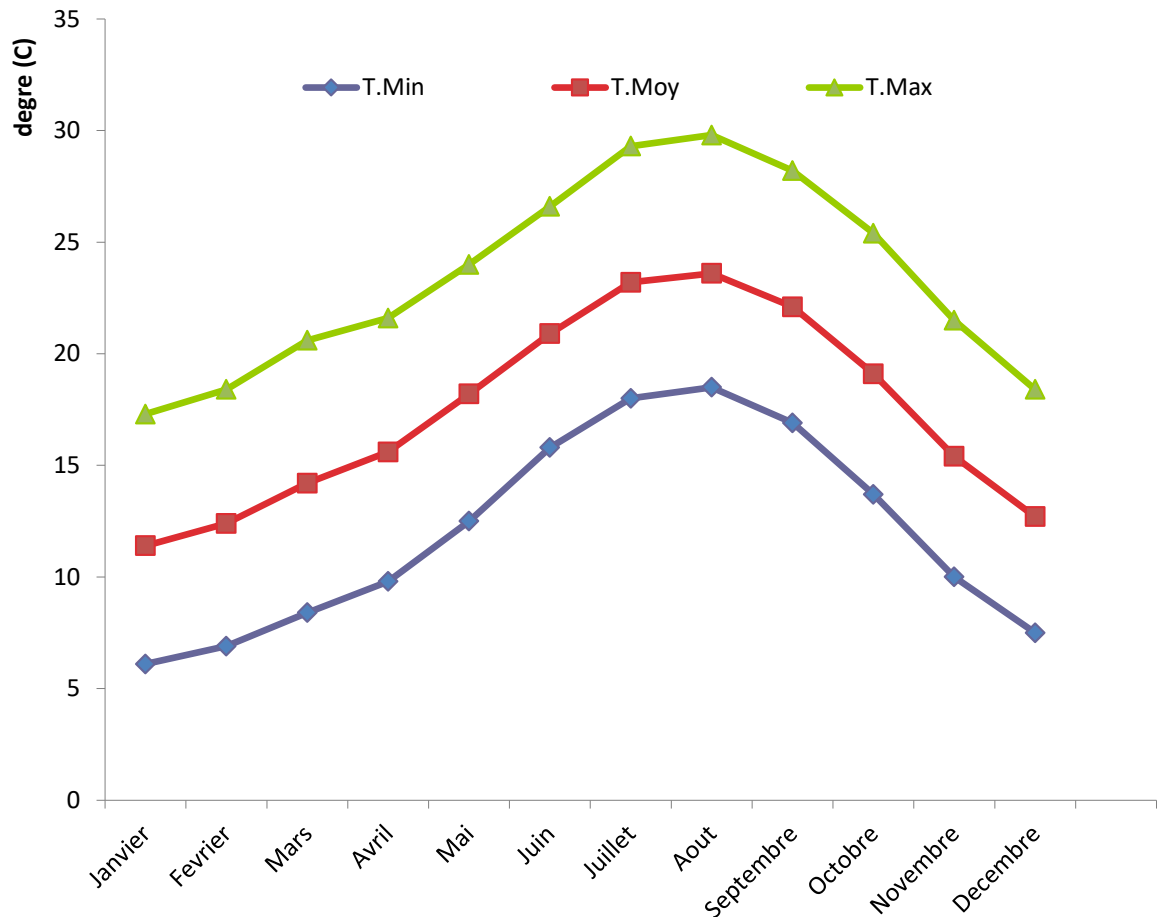


FIGURE 16 : Température annuelle de Settat

Afin de réaliser notre simulation sous le logiciel TRNsys, il est nécessaire d'introduire des données météorologiques collectées via le logiciel (Meteonorm, 2014) dans lesquelles nous aurons la vitesse et la direction du vent, la température ambiante horaire, l'ensoleillement global et l'humidité relative.

2.3 Les Apports internes

2.3.1 Occupant

Afin de déterminer les contributions internes des occupants, nous avons réalisé deux scénarios d'occupation, l'un pour la semaine et l'autre pour le week-end (samedi et dimanche) en tenant compte du fait que l'appartement est occupé par une famille composée de deux adultes et deux enfants. Le logiciel de simulation TRNsys représente une variété de types de gains d'occupant en référence à la norme (7730, 2010).

2.3.2 Eclairage et appareillages électriques

L'éclairage artificiel est une source de chaleur sensible, dont il faut tenir compte dans notre étude de cas, on retrouve dans notre bâtiment de référence l'utilisation de deux types de lampe, les lampes à incandescence (la chambre et le salon) et les lampes fluorescentes (cuisine, couloir et dans la salle de bain) respectivement avec une puissance de 25 W/m² et 8 W/m².

Notre appartement comprend également des équipements électriques qui constituent à la fois des sources de chaleur sensible et latente. Comme décrit dans le **Tableau 8** suivant de certains équipements avec leur puissance et leur nombre d'heures d'utilisation par jour.

TABLEAU 8 : La consommation électrique de quelque appareillage électrique

EQUIPEMENT	GAIN (W)		DUREE (H/JOUR)	NOMBRE D'EQUIPEMENT
	Sensible heat	Latent heat		
REFRIGERATEUR	500	-	10	1
TV	175	-	4	1
ORDINATEUR	250	-	3	3
ASPIRATEUR	50	-	0,5	1
FER A REPASSER	230	270	0,5	1

3- Simulation du bâtiment

Notre habitat est équipé d'un système de chauffage et de climatisation tout en respectant les consignes de la norme NM ISO 7730 qui consiste à régler une température de 20 C° en période hivernale et une température de 26 C° en période estivale.

Afin de réaliser la simulation du bâtiment, nous avons travaillé avec un logiciel de simulation thermique dynamique TRNSYS **Figure 17**.

Le bilan énergétique en tant que flux de chaleur conducteur et convectif vers le nœud d'air ; est calculé par le modèle de bâtiment multizone de type56, et défini par cette équation :

$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_{(surf,i)} + \dot{Q}_{(inf,i)} + \dot{Q}_{(vent,i)} + \dot{Q}_{(g,c,i)} + \dot{Q}_{(cplg,i)}$$

Avec,

\dot{Q}_i : Le flux de chaleur conducteur et convectif.

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

$\dot{Q}_{(inf,i)}$: Les gains d'infiltration.

$\dot{Q}_{(vent,i)}$: Les gains de ventilation.

$\dot{Q}_{(g,c,i)}$: Les gains convectifs internes.

$\dot{Q}_{(cplg,i)}$: Les gains convectifs dus à l'écoulement de l'air.

Et les flux de chaleur radiative vers les murs et les fenêtres sont définis :

$$\dot{Q}_{(r,wi)} = \dot{Q}_{(g,r,i,wi)} + \dot{Q}_{(sol,wi)} + \dot{Q}_{(long,i)} + \dot{Q}_{(wall-gain)}$$

Avec,

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

$\dot{Q}_{(g,r,i,wi)}$: Les gains radiatifs internes reçus par un mur.

$\dot{Q}_{(long,i)}$: Les gains solaires à travers les fenêtres reçues par les murs.

$\dot{Q}_{(wall-gain)}$: Le flux de chaleur radiatif entre un murs et d'autre murs et fenêtres.

4- Résultats et discussion

Dans la première phase, nous avons simulé nos bâtiments de base sans tenir compte des paramètres du système de chauffage et de refroidissement. Ainsi nous avons obtenu le comportement thermique de cet habitat tel qu'il est décrit sur la **Figure 18** sous la forme d'un graphique qui présente la température de chaque zone du bâtiment à l'échelle annuelle.

D'après une analyse de ce graphique thermique, on observe une température basse qui atteint 14 C° pour la période hivernale et une température élevée de 30 C° pour la période estivale.

Dans une seconde phase, nous avons simulé nos bâtiments en introduisant les paramètres du système de chauffage et de refroidissement avec une consigne de 20 C° pour la période hivernale et de 26 C° pour la période estivale comme préconisée par la norme NM ISO 7730.

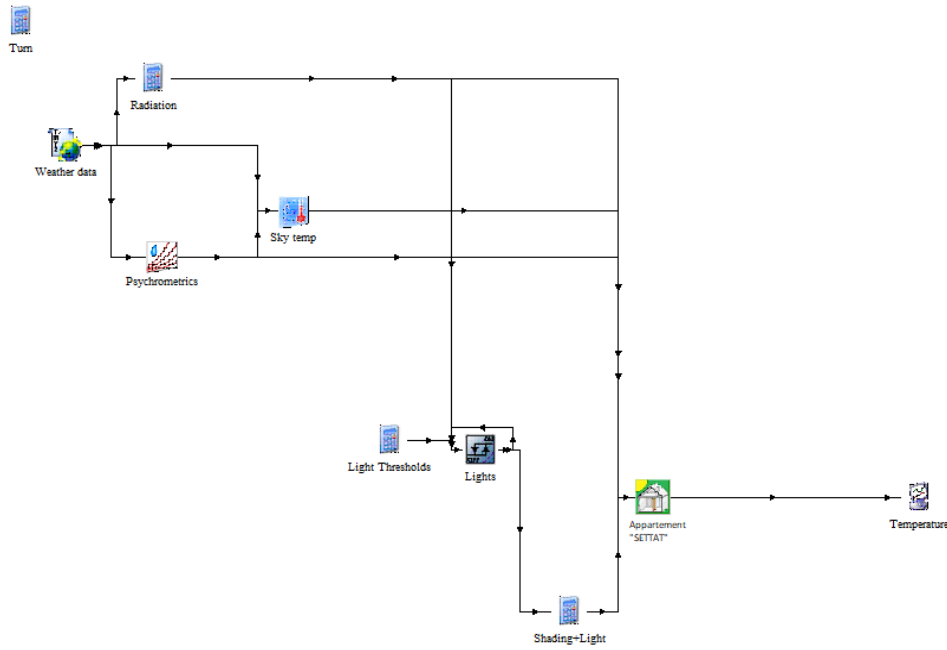


FIGURE 17 : Projet réaliser sous TRNsys

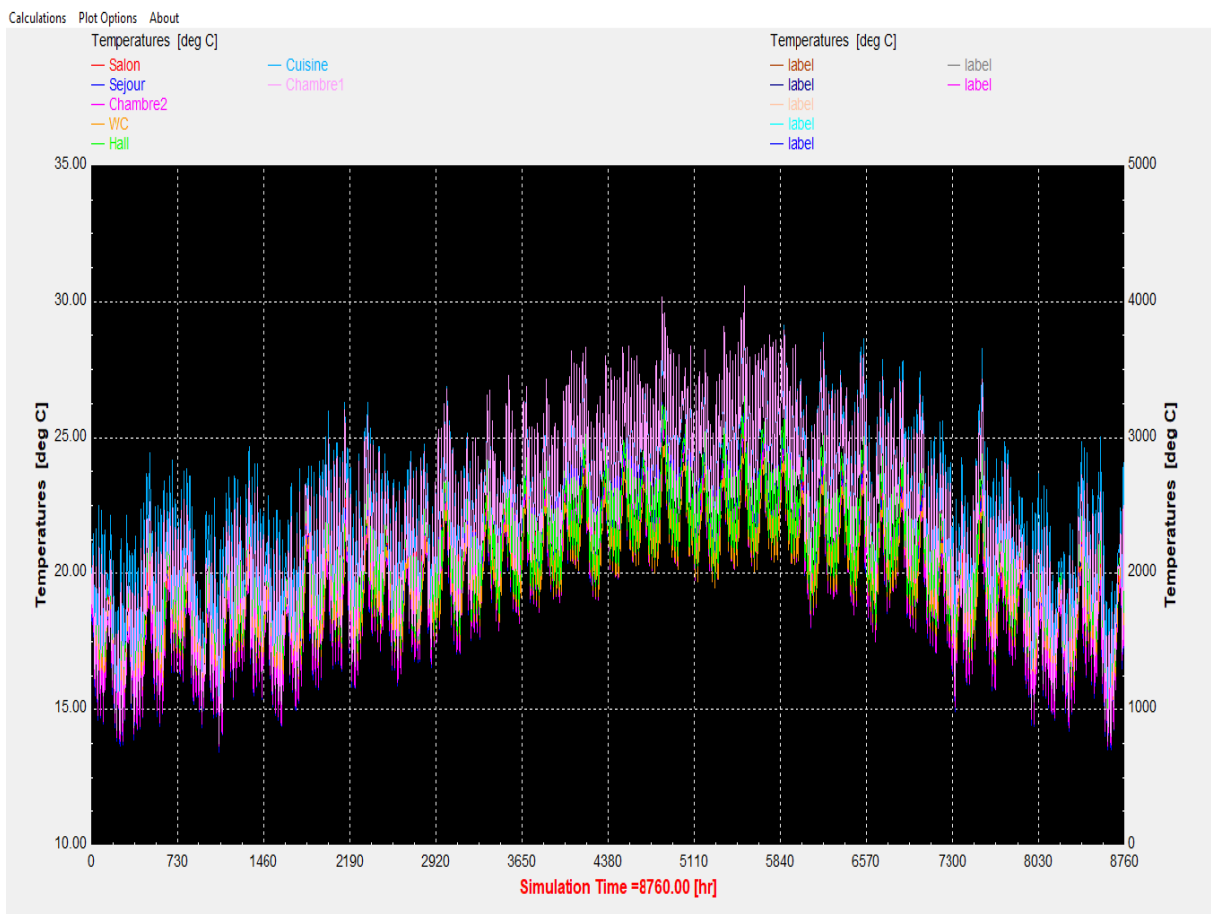


FIGURE 18 : Le comportement thermique du bâtiment sans système de chauffage et de refroidissement.

La **Figure 19** présente le graphique de la consommation énergétique annuelle du nouveau bâtiment, la courbe bleue décrit la consommation sans le système de chauffage et de refroidissement tandis que la courbe rouge décrit la consommation du bâtiment avec le système de chauffage et de refroidissement.

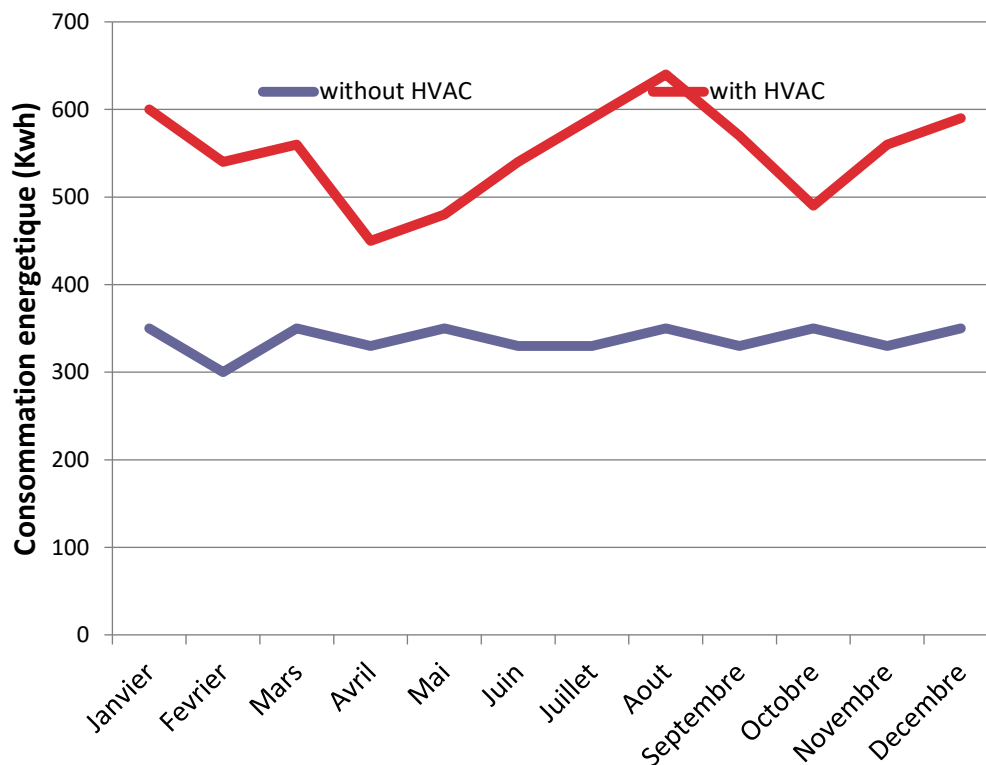


FIGURE 19 : Consommation annuelle du nouveau bâtiment avec et sans HVAC

On remarque sur le graphique **Figure 19** que la consommation normale de la maison a presque doublé en utilisant le système de chauffage et de climatisation tout en dépassant le seuil recommandé par le RTCM.

Le graphique suivant **Figure 20** présente la consommation énergétique du chauffage séparément de celle du refroidissement. En calculant la consommation électrique primaire du chauffage et celle du refroidissement **Tableau 9**, notez les résultats dans l'ordre d'égalité énergétique avec 10,54 kWh/m²/an pour le chauffage et 12,90 kWh/m²/an pour le refroidissement.

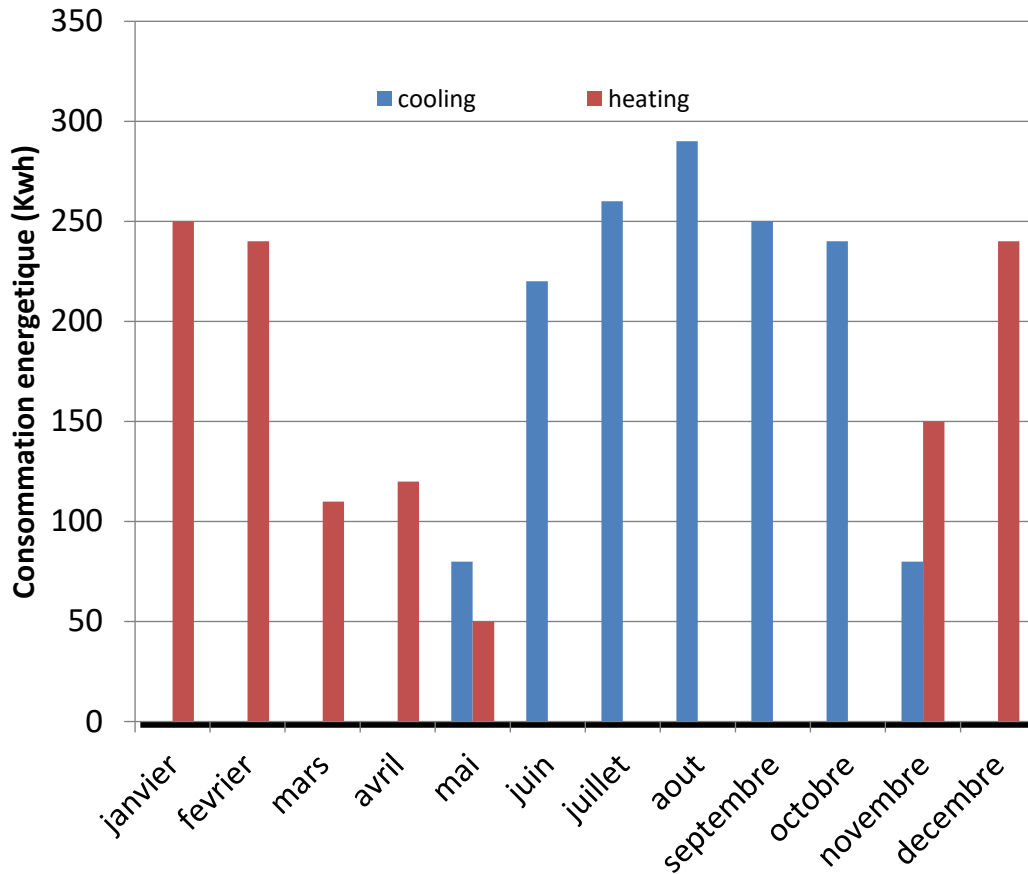


FIGURE 20 : Consommation énergétique mensuelle du chauffage et refroidissement

Ainsi, une analyse comparative a été réalisée entre les résultats de la consommation électrique simulée des deux bâtiments avec celle effectivement prélevée sur leur compteur électrique du bâtiment sur une période d'un an (de janvier 2019 à janvier 2020).

TABLEAU 9 : Consommation énergétique totale du chauffage et de refroidissement

	CHAUFFAGE (KWH/M²/YR)	REFROIDISSEMENT (KWH/M²/YR)
CONSUMMATION ENERGETIQUE	10,54	12,90

Figure 21 le graphique suivant décrit la comparaison énergétique simulée et réelle du nouveau bâtiment.

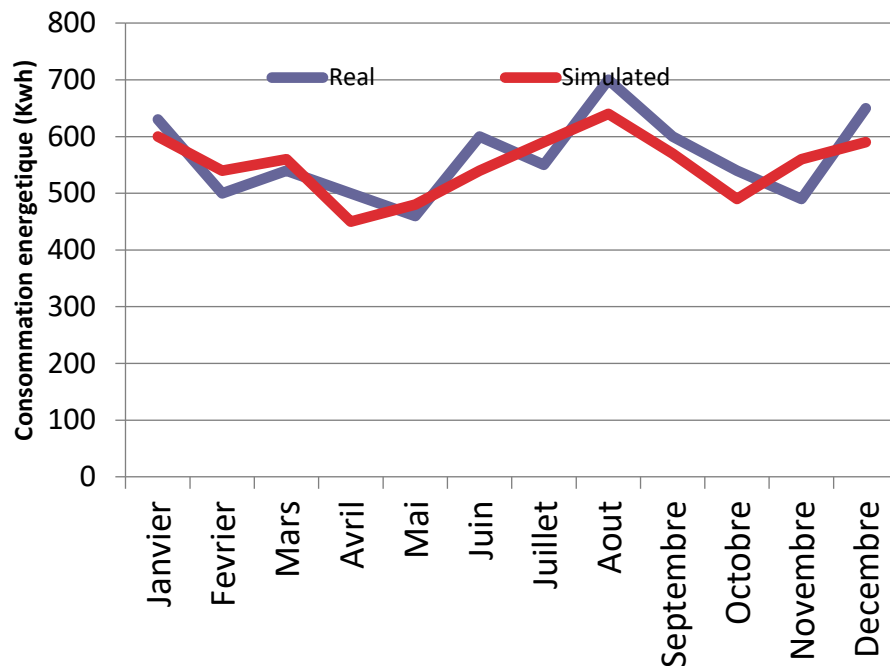


FIGURE 21 : Comparaison entre la consommation réelle et simulée du nouveau bâtiment

La **Figure 22** décrit la consommation totale du bâtiment de référence, et affiche également celle réellement enregistrée des factures énergétiques du bâtiment.

Après avoir analysé les deux consommations d'énergie simulées et réelles comme le montrent la **Figure 22** nous remarquons que la différence est si proche de zéro, ce qui peut expliquer et affirmer que le modèle simulé est un modèle juste.

On peut déduire de ces résultats que la surconsommation qui dépasse le seuil préconisé par le RTCM est principalement due au système de chauffage et de refroidissement, ce qui explique l'existence d'une corrélation entre l'occupant et la surconsommation, car il cherche toujours à réguler la température de son environnement intérieur afin de créer un habitat sain et confortable, ainsi son objectif est de nous protéger des intempéries de l'environnement extérieur.

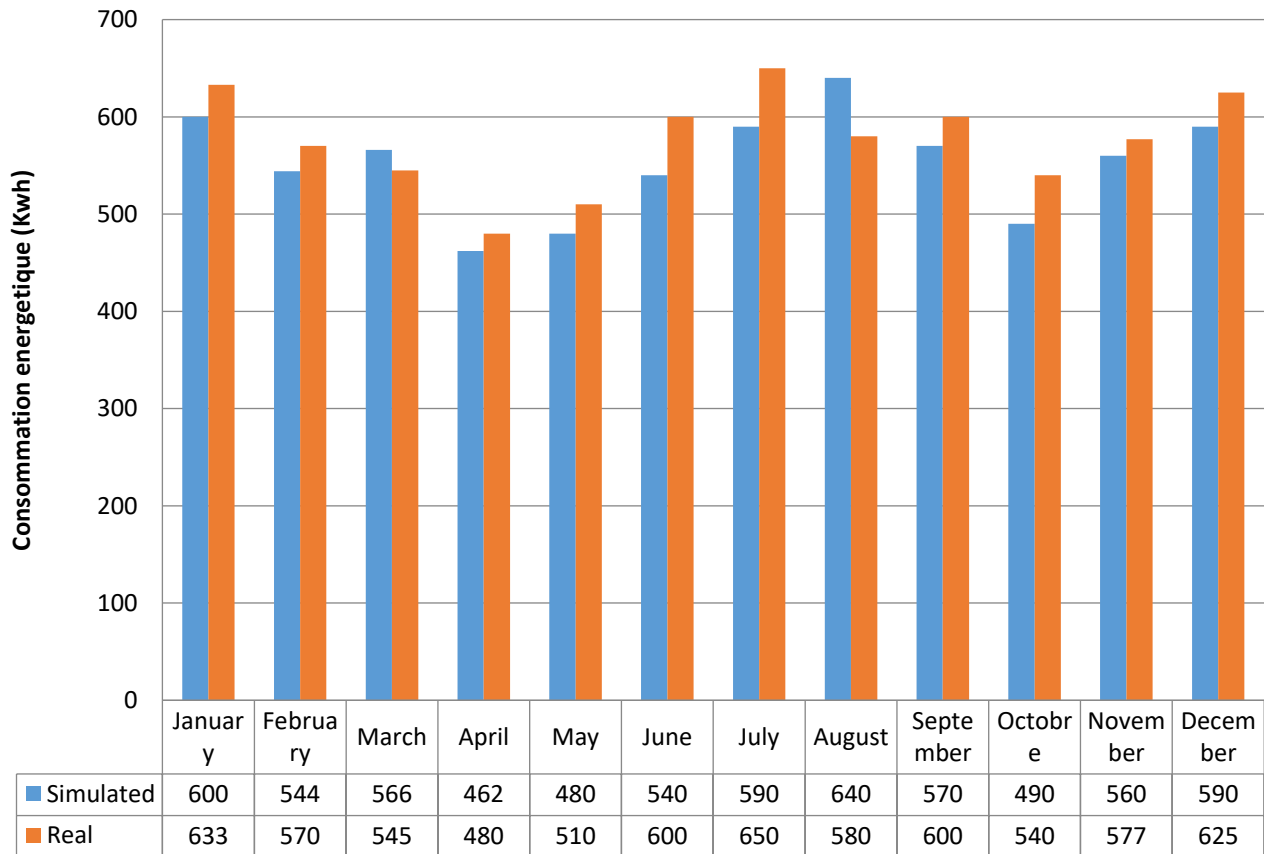


FIGURE 22 : Comparaison entre la consommation réelle et celle simulée du bâtiment de référence

5- CONCLUSION

Ce travail est une étude qui a été réalisée sur un immeuble de référence et un autre nouveau bâtiment de type appartement afin de prouver l'existence d'une corrélation entre le confort thermique recherché par l'occupant et la surconsommation énergétique du bâtiment. On a montré également (en comparant empiriquement les résultats) que cette surconsommation est principalement due au système de chauffage et de refroidissement. Et aussi de valider la justesse et la finesse du modèle simulé du bâtiment de référence.

Une meilleure conception basée sur l'amélioration des éléments passifs du bâtiment peut nous aider à créer des conditions de vie confortables tout en réduisant et en contrôlant la consommation d'énergie dans le bâtiment.

Et en perspective pour la suite de ces travaux, la réalisation d'une étude paramétrique de solutions de rénovation énergétique pour ce bâtiment ; et ceci au niveau de :

- Le choix de la variante la plus optimale de l'enveloppe de ce bâtiment.
- Également le choix de la variante de fenêtre optimale en termes de taille et de type pour ce bâtiment.

Chapitre 4

Optimisation de la taille, de la position et de l'orientation des fenêtres dans un bâtiment typique dans les six zones climatiques du MAROC

1- Introduction

Parmi les éléments qui jouent un rôle crucial en influençant la charge énergétique des bâtiments, il y a les baies vitrées. Au Maroc, plusieurs études ont été réalisées pour minimiser la charge énergétique du bâtiment en agissant sur plusieurs paramètres qui influencent la demande énergétique, mais il y a une absence d'étude approfondie sur l'influence de l'orientation, de la taille et de la position des fenêtres sur la consommation énergétique d'un bâtiment. Ce travail évalue l'impact de différentes variantes pour définir le taux des baies vitrées le plus optimal dans les six zones climatiques différentes au Maroc, et le choix de la solution la plus optimale du taux des baies vitrées se fera sur la base de la consommation minimale d'énergie entre chauffage et refroidissement à l'échelle annuelle. Le logiciel TRNSYS est l'outil utilisé dans ce travail afin de réaliser des simulations thermiques avec les différentes variantes selon la taille, la position et l'orientation des fenêtres selon chaque zone climatique, et par lequel on pourrait déterminer l'excitation de l'impact des fenêtres sur la consommation énergétique du bâtiment et déterminer également le modèle des baies vitrées idéal selon la construction standard pour chaque zone climatique au Maroc.

2- Méthode et simulation

Les fenêtres sont considérées comme un facteur de performance important pour le confort des bâtiments, qu'ils soient résidentiels, tertiaires ou administratifs. L'éclairage, l'air frais et la vue sont des facteurs critiques pour des raisons de santé, et pour des raisons psychologiques, ainsi (Elwan, 2020) ont étudié l'impact d'un type de fenêtre sur la ventilation du bâtiment. Ainsi, les fenêtres doivent alors apporter lumière et chaleur ou fraîcheur, tout en limitant les déperditions de chaleur dans les pays du nord et, à l'inverse, en évitant la surchauffe dans les pays du sud.

Plusieurs aspects doivent être pris en compte afin de déterminer le rapport optimal des surfaces vitrées à la surface de la façade de l'enveloppe du bâtiment. Ce ratio ne doit pas dépasser un seuil qui conduira à un gain de chaleur important, et aussi une diminution de ce ratio de surfaces vitrées entraînera une diminution de l'éclairage naturel du bâtiment **Figure 23**.

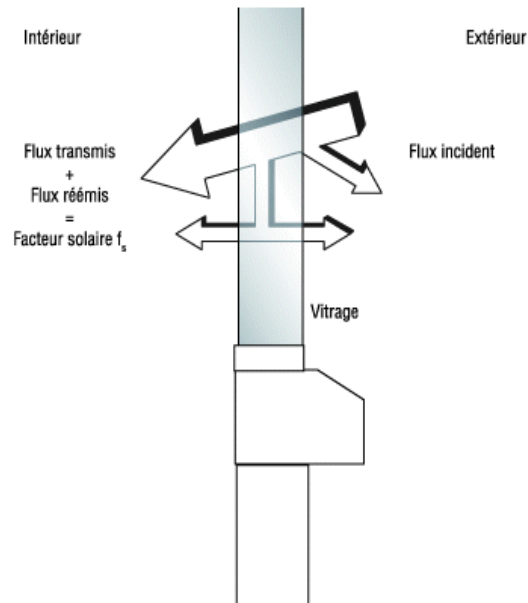


FIGURE 23 : Les différentes radiations solaires sur une cellule vitrée

2.1 Données météorologiques

Les données climatiques nécessaires à la réalisation d'une modélisation de bâtiment sont fournies par une base de données climatique constituée de fiches individuelles au format Excel avec des données météorologiques de différentes localisations géographiques. Ces fichiers ont été obtenus dans notre étude à l'aide du logiciel métronome, afin de collecter les valeurs dont nous aurons besoin pour notre étude telle que le rayonnement global, la température de l'air ambiant, l'éclairement diffus et la vitesse de l'air extérieur à l'air.

Le Maroc est un pays de la zone subtropicale du nord-ouest de l'Afrique, avec un climat très différent selon les régions. Il y a des zones côtières qui bénéficient d'un climat méditerranéen et des zones méridionales et orientales qui bénéficient d'un climat désertique. Ainsi, en général, le climat du Maroc adopte toute une nuance climatique, on retrouve un climat méditerranéen au nord, océanique à l'ouest, continental à l'intérieur et saharien au sud.

Le rayonnement solaire varie entre 3 KWh/m²/J et 6 KWh/m²/J (nationale, n.d.).

Le Maroc est divisé en six zones climatiques (AMEE, 2014), une ville de référence est attribuée pour chaque zone climatique, par exemple pour la zone 1 est la ville d'Agadir, la zone 2 la ville de Tanger, la zone 3 la ville de Fès, la zone 4 la ville d'Ifrane, la zone 5 la ville de Settat et zone 6 la ville d'Er-Rachidia.

La **Figure 24** suivante décrit la répartition du parc immobilier dans chaque zone climatique du Maroc.

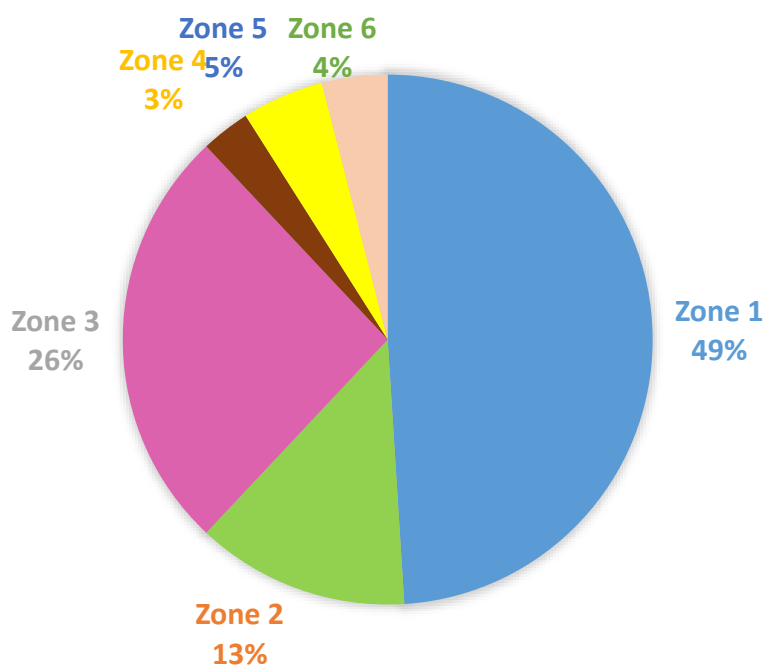


FIGURE 24 : Taux de logement pour chaque zone climatique

2.1.1 Zone 1 : Agadir

Agadir bénéficie d'un climat de steppe, les températures sont fortement influencées par le front alizé présent tout au long de l'année, et varient peu entre l'hiver et l'été. Selon la classification de Köppen-Geiger, le climat est de type BSh. Agadir affiche 19.8 C° de température en moyenne sur toute l'année avec un record de chaleur de 49,1 C° en 2009.

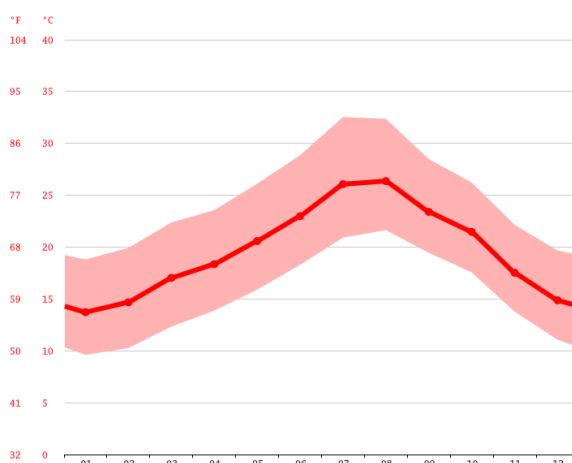


FIGURE 25 : Température Annuelle à Agadir

2.1.2 Zone 2 : Tanger

Climat méditerranéen, tempéré par l'influence océanique avec un hiver, printemps et l'automne doux et humide, et un été chaud et sec. Le climat de Tanger est de type méditerranéen, tempéré par l'influence océanique : L'automne, l'hiver et le printemps sont doux, voire frais (18 degrés en journée et 7 degrés la nuit) et très humide, et avec un été assez chaud avec une température de 30 C° en journée et sec.

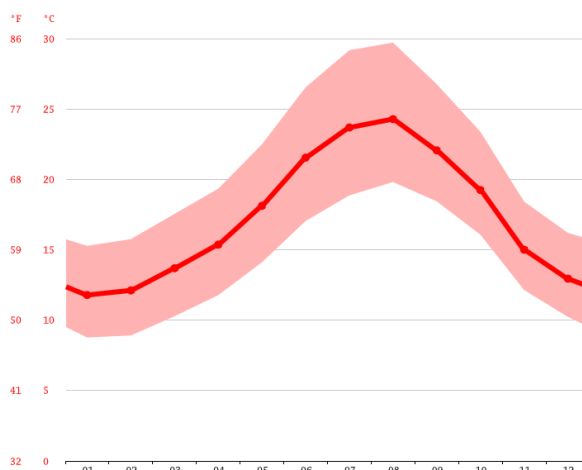


FIGURE 26 : Température annuelle à Tanger

2.1.3 Zone 3 : Fès

Climat continental avec des variations extrêmes entre les différentes saisons, les étés sont secs et très chauds, et les hivers avec beaucoup de pluie.

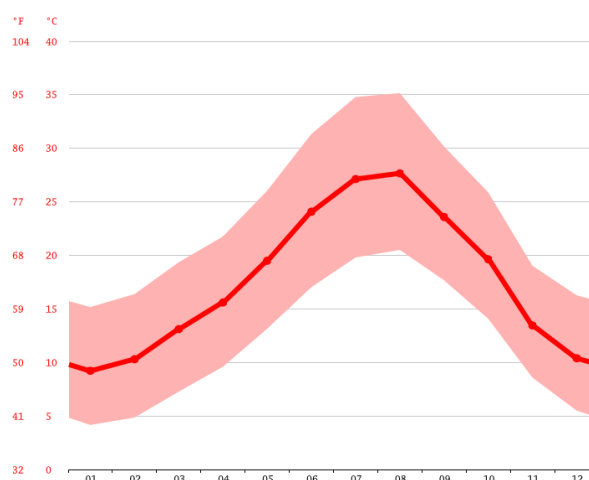


FIGURE 27 : Température annuelle à Fès

2.1.4 Zone 4 : Ifrane

Climat très humide et tempéré sous l'influence du climat méditerranéen, avec un hiver neigeux par lequel il détient le record du froid enregistré sur le continent africain avec une température de $-23,9\text{ C}^{\circ}$.

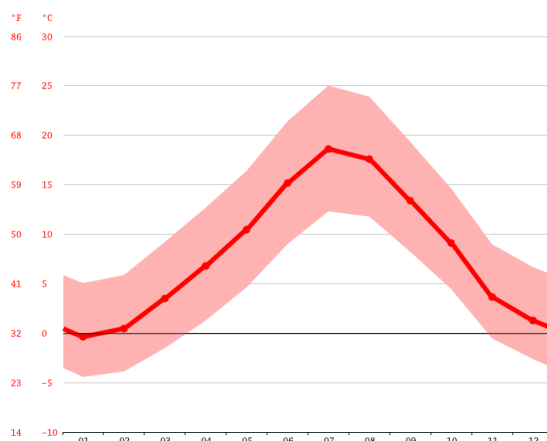


FIGURE 28 : Température annuelle à Ifrane

2.1.5 Zone 5 : Settât

Settât possède un climat méditerranéen chaud semi-aride avec été sec (Csa) selon la classification de Köppen-Geiger. Sur l'année, la température moyenne à Settât est de $17,4\text{ C}^{\circ}$.

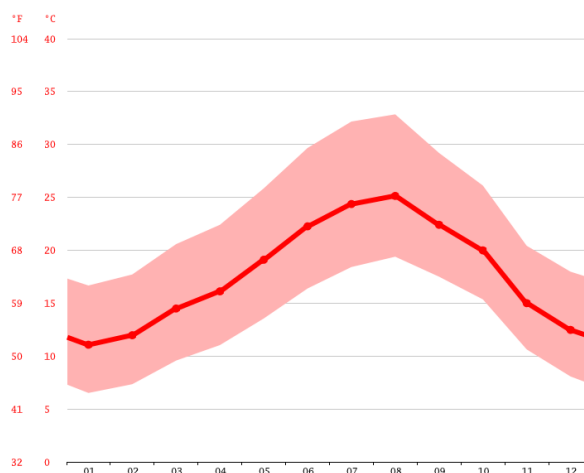


FIGURE 29 : Température annuelle à Settât

2.1.6 Zone 6 : Er rachidia

Climat désertique chaud et clair toute l'année avec des étés courts et torrides et des hivers frais.

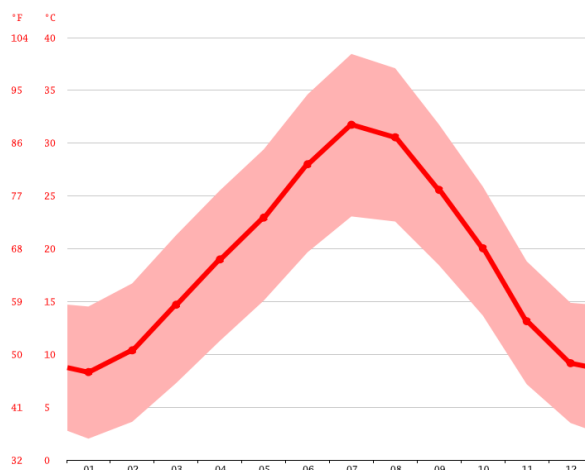


FIGURE 30 : Température annuelle à Er-Rachidia

TABLEAU 10 : Localisation géographique et les données climatiques principales pour chaque zone climatique

LOCATION	COORDONNÉES	TEMPÉRATURE MOYENNE ANNUELLE (C)	GHI KWH/M ²	DHI KWH/M ²	BNI KWH/M ²	DJU CHAUFFAGE T(BASE) :18°	DJU REFRIGÉRATION T(BASE) : 21°
AGADIR	30°25'N, 9°36'O	17,21	2059	542	2342	426	682,2
TANGER	35°46'N, 5°48'O	18,13	1908	530	2178	582,4	1064,8
FES	34°03'N, 4°58'O	18,40	1930	546	2167	911,3	1601,8
IFRANE	33°32'N, 5°06'O	11,86	2021	533	2370	3616	43,72
SETTAT	33°00'N, 7°37'O	17,33	1955	561	2159	858,9	1006,6
ER-RACHIDIA	31°55'N, 4°25'O	19,30	2103	520	2434	805,7	2311,9

2.2 Apport externe

Un bâtiment est toujours exposé au soleil tout au long de l'année ce qui se traduit par des apports solaires, ce flux se propage principalement à travers les parois vitrées par conduction et rayonnement Equation 2, et les parois opaques, Equation 3, comme les parois par le phénomène de conduction.

$$Q_{win} = A_{win} \cdot U_{win} (T_{ex} - T_{in}) + A_{win} \cdot SHGC \cdot I_t$$

$$Q_{wall} = A_{wall} \cdot U_{wall} (T_{ex} - T_{in})$$

Q_{wall} : La quantité de chaleur transférée à travers le mur (J)

Q_{win} : La quantité de chaleur transférée à travers la fenêtre (J)

A_{wall} : la superficie du mur (m²)

A_{win} : La superficie de surface vitrée (m²)

U_{wall} : coefficient de transfert de chaleur du mur

U_{win} : coefficient de transfert de chaleur de la fenêtre

T_{ex} : Température extérieure

T_{in} : Température intérieure

SHGC : coefficient de gain de chaleur solaire du vitrage des fenêtres

I_t : Intensité du rayonnement solaire

2.3 Optimisation

Avec GenOpt qui est un programme d'optimisation qui sert à minimiser une fonction objective évaluée par un logiciel de simulation. Pour cela, il génère automatiquement des données d'entrée pour le logiciel TRNsys, après avoir récupéré la valeur de la fonction objective à partir des résultats du TRNsys afin de déterminer une nouvelle série d'entrées. Ce processus est utilisé par un algorithme d'optimisation.

Dans ce travail de recherche, la valeur optimale des tailles de fenêtres est celle par laquelle nous minimiserons la consommation d'énergie de chauffage et de refroidissement. La fonction objective est déterminée comme suit :

$$f: \min[E_{tot}(WWR)]$$

Avec

$$E_{TOT} = E_C + E_H$$

E_{TOT} : *Energie totale*

E_C : *Energie consommée par le système de refroidissement*

E_H : *Energie consommée par le système de chauffage*

WWR : *Taux des baies vitrées*

2.4 Plan d'étude

Ensuite, nous avons étudié avec le même modèle numérique du bâtiment, et nous avons fait varier le pourcentage des parois vitrées de 0% à 100% sur les quatre orientations : Nord, Sud, Est et Ouest et dans les différentes zones climatiques marocaines. Et pour déterminer la valeur optimale des WWR pour chaque orientation et pour chacune des six zones climatiques marocaines, nous collecterons les données de charge de chauffage et de refroidissement ainsi que celle de l'éclairage artificiel, et nous déterminerons ensuite le pourcentage des plus WWR approprié et le plus optimal pour chaque zone.

3- Résultat et discussion

Comme nous l'avons vu précédemment dans le tableau dans le chapitre précédent, que la consommation énergétique de notre bâtiment est déterminée avec une valeur élevée de 6910 KWh/an, ce qui ne répond pas aux préconisations du RTCM, et qui nous a poussé à réaliser cette étude et d'intervenir passivement sur la consommation énergétique en déterminant la surface idéale des parois vitrées pour chaque zone climatique marocaine, afin de minimiser sa consommation énergétique annuelle.

Les résultats suivants décrivent la surface optimale des parois vitrées pour chaque zone climatique au Maroc

3.1 Zone 1 : AGADIR

Les différentes valeurs énergétiques du chauffage (E_H) et de refroidissement (E_C), ainsi celle du totale de ces derniers en fonction de WWR dans la première zone climatique sont présentées dans la **Figure 31**.

On a pu déterminer la valeur optimale du WWR pour une consommation minimale dans chaque orientation.

Après une analyse préliminaire des graphiques de la **Figure 31**, on constate que les fenêtres orientées vers l'Ouest et l'Est contribuent à la consommation totale d'énergie la plus élevée, suivis par celles orientées vers le Sud et le Nord.

Dans toutes les orientations, l'utilisation énergétique de refroidissement et du chauffage est l'aspect principal de la consommation énergétique, à l'exception de l'orientation vers le nord où on remarque que la consommation du chauffage est plus élevée que celle du refroidissement, et cela est expliqué par le fait qu'en période hivernale, le bâtiment orienté vers le nord ne profite pas des gains solaires directs (DNI) sauf du rayonnement solaire diffus (DHI) avec un WWR optimal de 10% par lequel la consommation du chauffage a atteint les 25,74 KWh/m²/an et celle du refroidissement de 11,72 KWh/m²/an.

Les deux orientations l'Est et l'Ouest ont un aspect énergétique presque identique en termes de chauffage et de refroidissement avec un taux de WWR optimal de 12,5% par lequel la consommation du chauffage (E_H) atteint les 13,32 KWh/m²/an pour l'orientation l'est et de 10,29 KWh/m²/an pour l'orientation l'ouest et une consommation de refroidissement de 21,17 KWh/m²/an pour l'orientation l'est et de 27,09 KWh/m²/an pour l'orientation l'ouest.

Au sud, le bâtiment présente la meilleure combinaison énergétique entre le chauffage et le refroidissement avec une consommation énergétique globale la plus basse avec un taux de WWR optimal de 17,5%. Et cela s'explique par le fait qu'en sud et dans la période hivernale, le bâtiment capte un maximum de rayonnement solaire direct et diffus dont la valeur de ces apports solaire est élevée dans cette région avec un DNI de 1994 KWh/m²/an et d'un DHI de 606 KWh/m²/an.

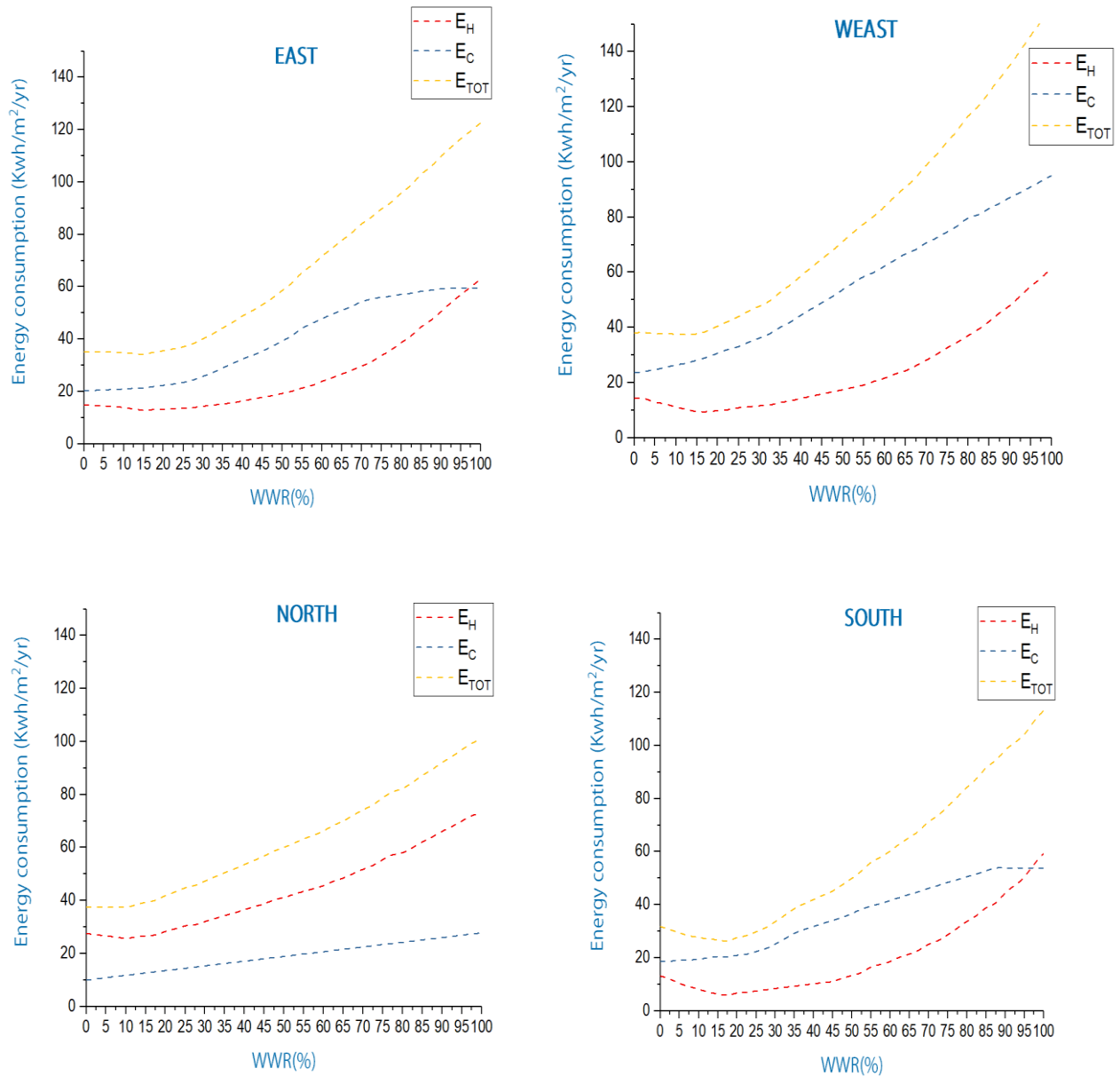


FIGURE 31 : La consommation énergétique annuelle totale, du chauffage et du refroidissement en fonction du WWR % dans la 1^{ère} zone climatique (AGADIR).

3.2 Zone 2 : TANGER

Comme on a vu précédemment, la **Figure 32** présente les valeurs énergétiques du chauffage (E_H) et de refroidissement (E_C), ainsi celle du totale de ces derniers en fonction de WWR dans la deuxième zone dont on a pu déterminer la valeur optimale du WWR pour une consommation minimale dans chaque orientation.

Après une analyse préliminaire des graphiques de la **Figure 32**, on remarque que les fenêtres orientées vers l'ouest et l'est et le nord contribuent à la consommation totale d'énergie la plus élevée, suivie par celle orientée vers le sud.

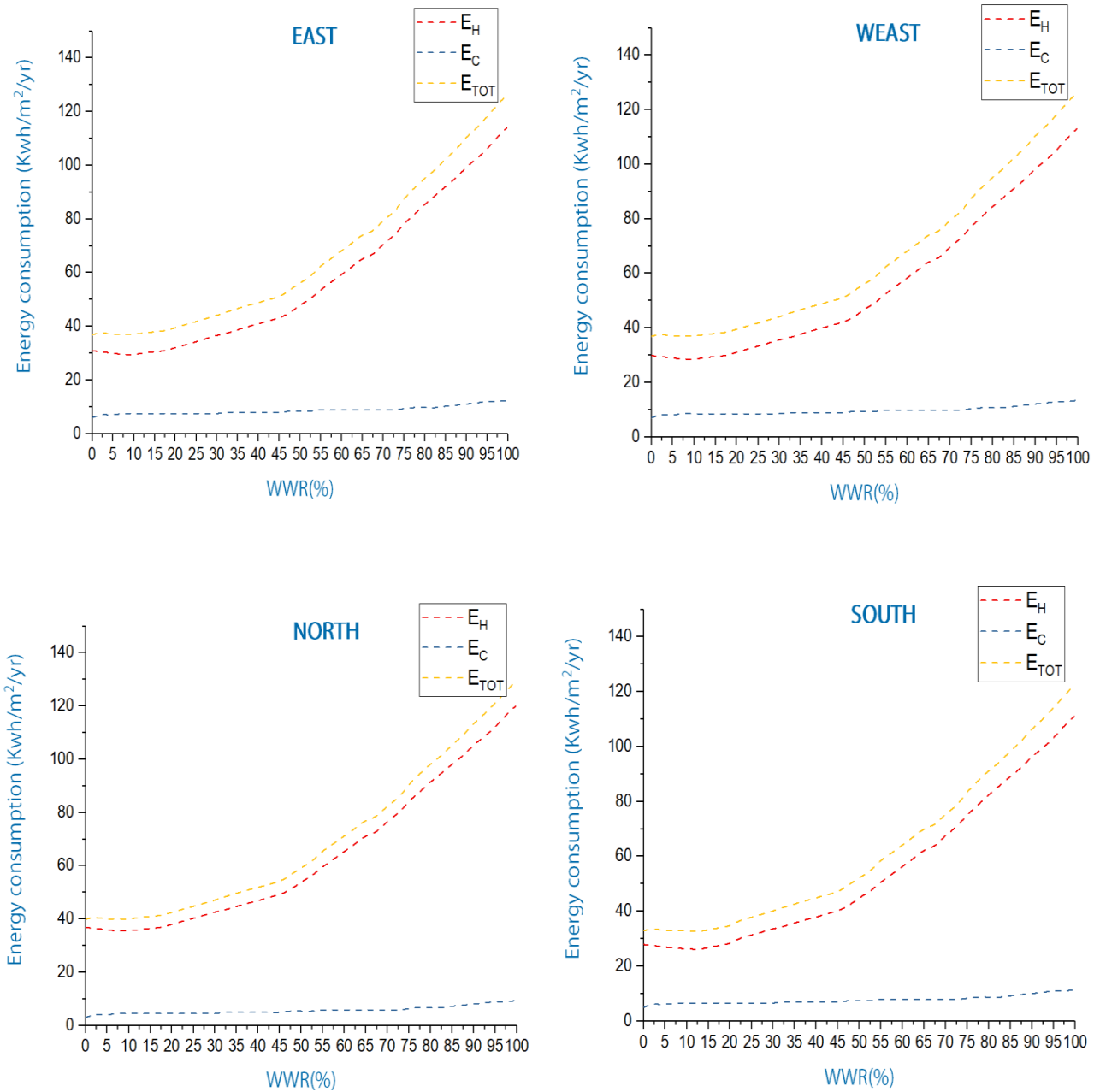


FIGURE 32 : La consommation énergétique annuelle totale, du chauffage et du refroidissement en fonction du WWR % dans la 2^{ème} zone climatique (TANGER).

Dans toutes les orientations, l'utilisation énergétique du chauffage est l'aspect principal de la consommation énergétique, et on remarque que la consommation du chauffage est plus élevée, et cela bien sûr comme on l'a vu précédemment pour les façades nord en hiver, le bâtiment ne

profite pas des gains solaires directs (DNI) sauf du rayonnement solaire diffus (DHI) avec un WWR optimal de 7,5% par lequel la consommation du chauffage a atteint les 36,87 KWh/m²/an et celle du refroidissement de 6,85 KWh/m²/an.

Les deux orientations l'Est et l'Ouest ont un aspect énergétique presque identique en termes de chauffage et de refroidissement avec un taux de WWR optimal de 10% par lequel la consommation du chauffage (E_H) atteint les 29,85 KWh/m²/an pour l'orientation l'est et de 28,53 KWh/m²/an pour l'orientation l'ouest et une consommation de refroidissement de 9,10 KWh/m²/an pour l'orientation l'est et de 10,14 KWh/m²/an pour l'orientation l'ouest.

Au sud, le bâtiment présente une consommation énergétique identique que celle d'Est et de l'ouest entre le chauffage et le refroidissement avec une consommation énergétique globale la plus basse avec un taux de WWR optimal de 12,5%.

Dans cette zone climatique, et avec le type de bâtiment référence et suivant le scénario des occupants, l'orientation sud n'a pas été si efficace en termes de consommation minimale.

3.3 Zone 3 : FES

Afin de déterminer le taux des baies vitrées optimal pour la troisième zone climatique, la **Figure 33** illustre le rapport entre la consommation énergétique du chauffage et celle du refroidissement au taux des surfaces vitrées du bâtiment.

Après une analyse globale des graphiques de la **Figure 33**, on déduit que les façades orientées vers le Sud, l'Ouest et l'Est sont approximativement identiques en termes de consommation du chauffage et de refroidissement, une consommation énergétique du chauffage entre 31 - 37 kWh/m²/an et une consommation énergétique pour le refroidissement entre 24 - kWh/m²/an. Contrairement à celle illustre pour la façade orientée vers le nord qui a l'ordre de 43 kWh/m²/an pour le chauffage et de 16 kWh/m²/an pour le refroidissement. En revanche, la consommation énergétique annuelle dans sa globalité est approximativement identique pour toutes les orientations avec une consommation entre 57,32 kWh/m²/an et 62,58 kWh/m²/an.

Pour toutes les orientations, la consommation énergétique du chauffage et de refroidissement est l'aspect principal de la consommation principale sauf pour l'orientation du Nord, là où le chauffage est le vecteur principal de la consommation énergétique globale du bâtiment.

Le taux optimal déduit après cette analyse de ces quatre graphiques du WWR pour la consommation énergétique minimale est de 10%, 10%, 12,5% et 7,5% qui sont respectivement aux orientations l'Est, l'Ouest, le Sud et le Nord.

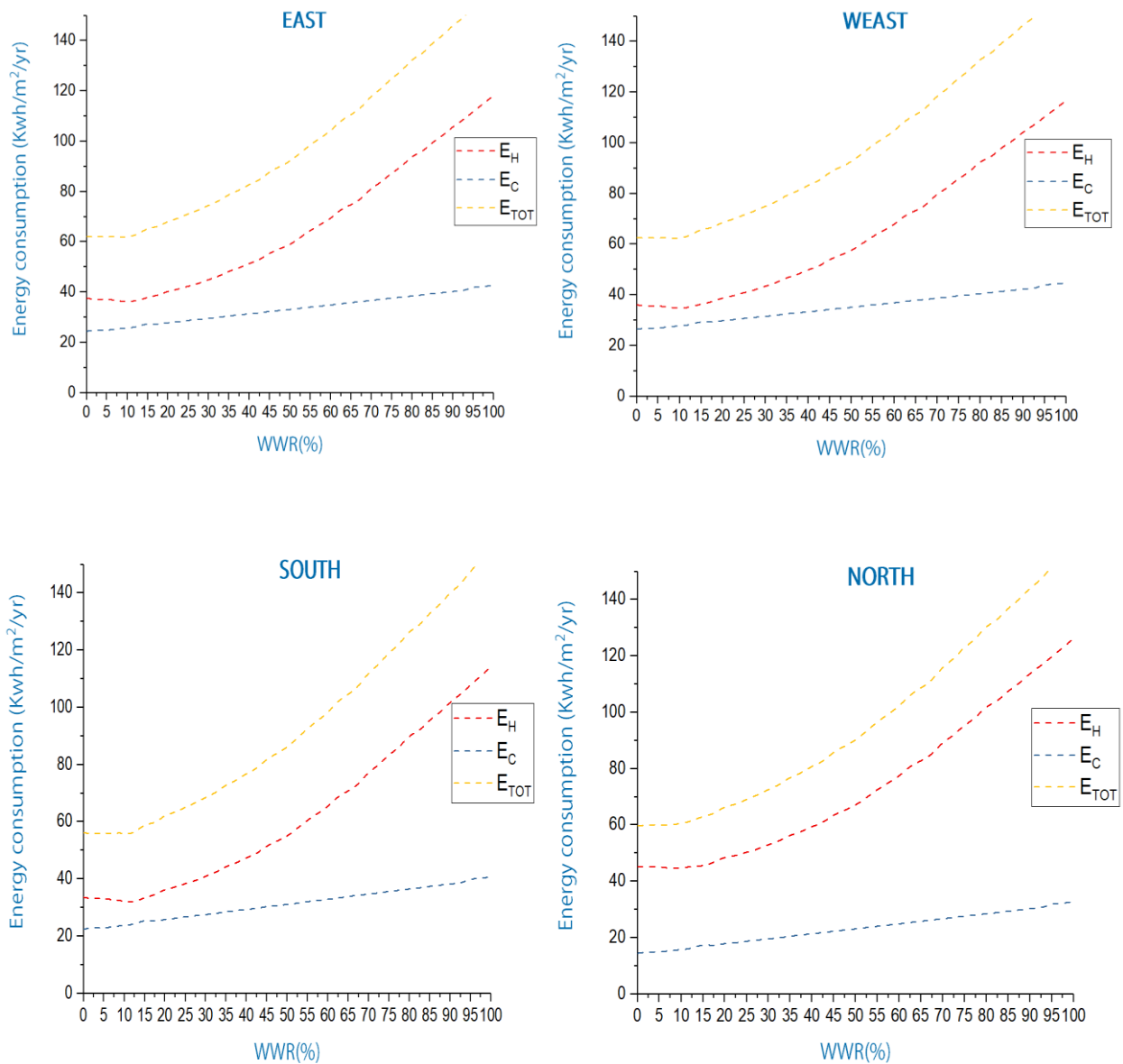


FIGURE 33 : La consommation énergétique annuelle totale, du chauffage et du refroidissement en fonction du WWR % dans la 3^{ème} zone climatique (FES).

3.4 Zone 4 : IFRANE

La zone suivante est connue pas son climat extrêmement froid en période hivernale, la **Figure 34** présente les différentes variantes des surfaces vitrées WWR (%) en fonction de la consommation énergétique de ce bâtiment étudié dans cette zone climatique.

Après une courte analyse, il était bien distingué de remarquer la consommation très élevée du chauffage pour toutes les orientations avec une consommation énergétique annuelle supérieure à 100 kWh/m²/an.

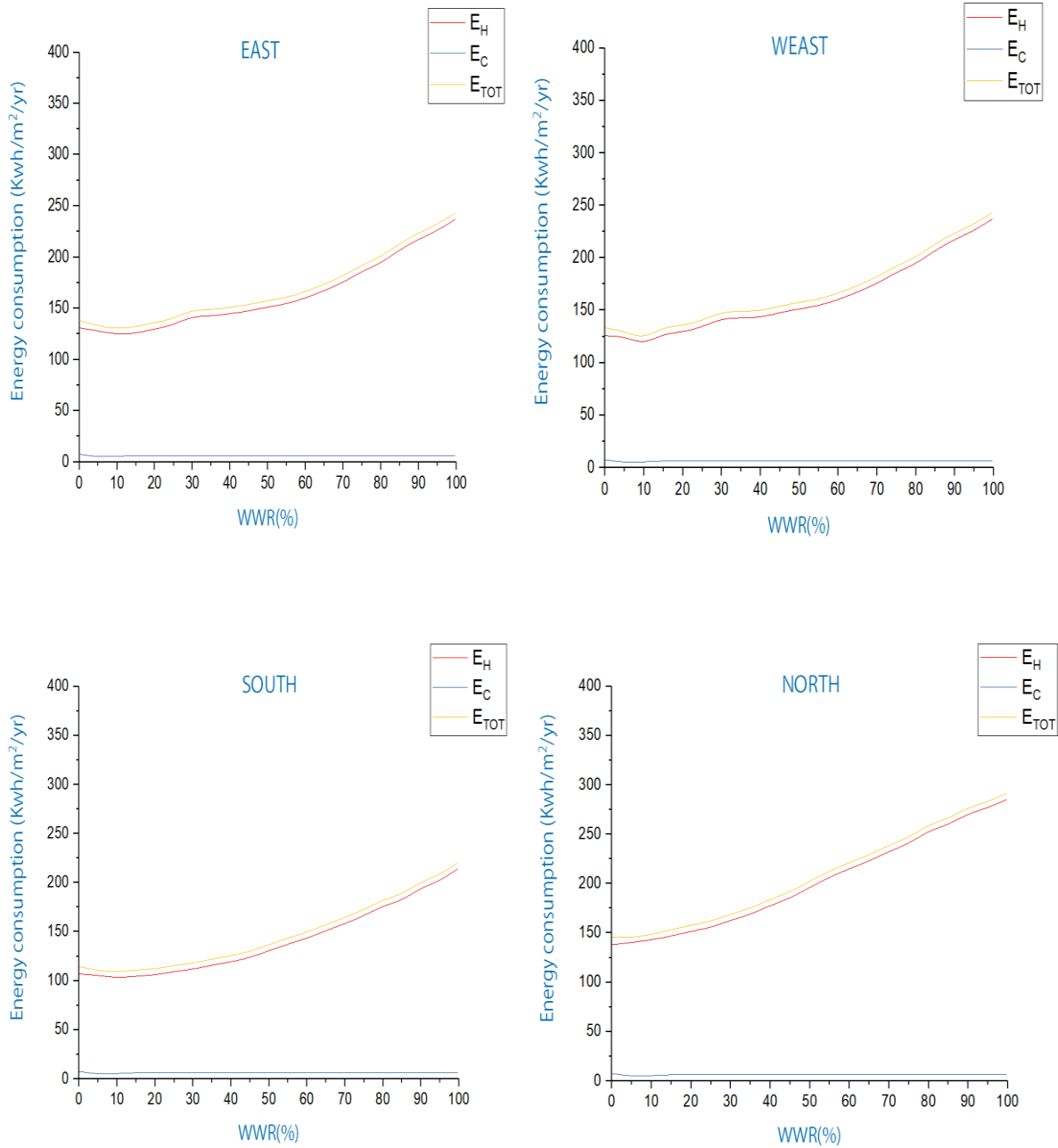


FIGURE 34 : La consommation énergétique annuelle totale, du chauffage et du refroidissement en fonction du WWR % dans la 4^{eme} zone climatique (IFRANE).

Comme on a constaté avant, dans les zones précédentes, les orientations l'Est et l'Ouest sont approximativement très similaires. A ce qui concerne la facette vers le Sud, on remarque qu'elle est moins énergivore que les autres orientations.

En variant le taux des surfaces vitrées, on déduit que l'influence de ce taux n'est pas très significative pour la consommation énergétique annuelle du bâtiment.

Les trois façades l'Est, l'Ouest et le Sud, ils ont pu atteindre une légère réduction énergétique pour un taux de WWR 10%, et cela peut être expliquer par le fait que ces orientations sont subites à un rayonnement solaire pendant la journée par lequel ils ont pu emmagasiner de la chaleur dans la structure du bâtiment pour être restituée pendant la nuit.

L'orientation du Nord, a pu atteindre une consommation minimale pour un taux de surface vitrée de 5%, et cela peut être expliqué par l'utilisation des rayonnements solaires diffus pendant la journée qui sera aussi restituée la nuit.

3.5 Zone 5 : Settat

Les différentes valeurs énergétiques du chauffage (E_H) et de refroidissement (E_C), ainsi celle du totale de ces derniers en fonction de WWR dans la cinquième zone climatique sont présentées dans la **Figure 35**, dont on a pu déterminer la valeur optimale du WWR pour une consommation minimale dans chaque orientation.

Avec la même vision analytique préliminaire des graphiques de la **Figure 35**, on constate que le bâtiment oriente vers le Nord contribue à la consommation totale d'énergie la plus élevée, suivie par celles orientées vers l'Est, l'Ouest et le sud.

Dans toutes les orientations, l'utilisation énergétique du chauffage est l'aspect principal de la consommation énergétique, le bâtiment oriente vers le nord ne profite pas des gains solaires directs (DNI) sauf du rayonnement solaire diffus (DHI) avec un WWR optimal de 7,5% par lequel la consommation du chauffage a atteint les 37,19 KWh/m²/an et celle du refroidissement de 8,3 KWh/m²/an.

Les deux orientations l'Est et l'Ouest ont un aspect énergétique presque identique en termes de chauffage et de refroidissement avec un taux de WWR optimal de 10% par lequel la consommation du chauffage (E_H) atteint les 34,54 KWh/m²/an pour l'orientation l'est et de 32,10 KWh/m²/an pour l'orientation l'ouest et une consommation de refroidissement de 15 KWh/m²/an pour l'orientation l'est et de 18 KWh/m²/an pour l'orientation l'ouest.

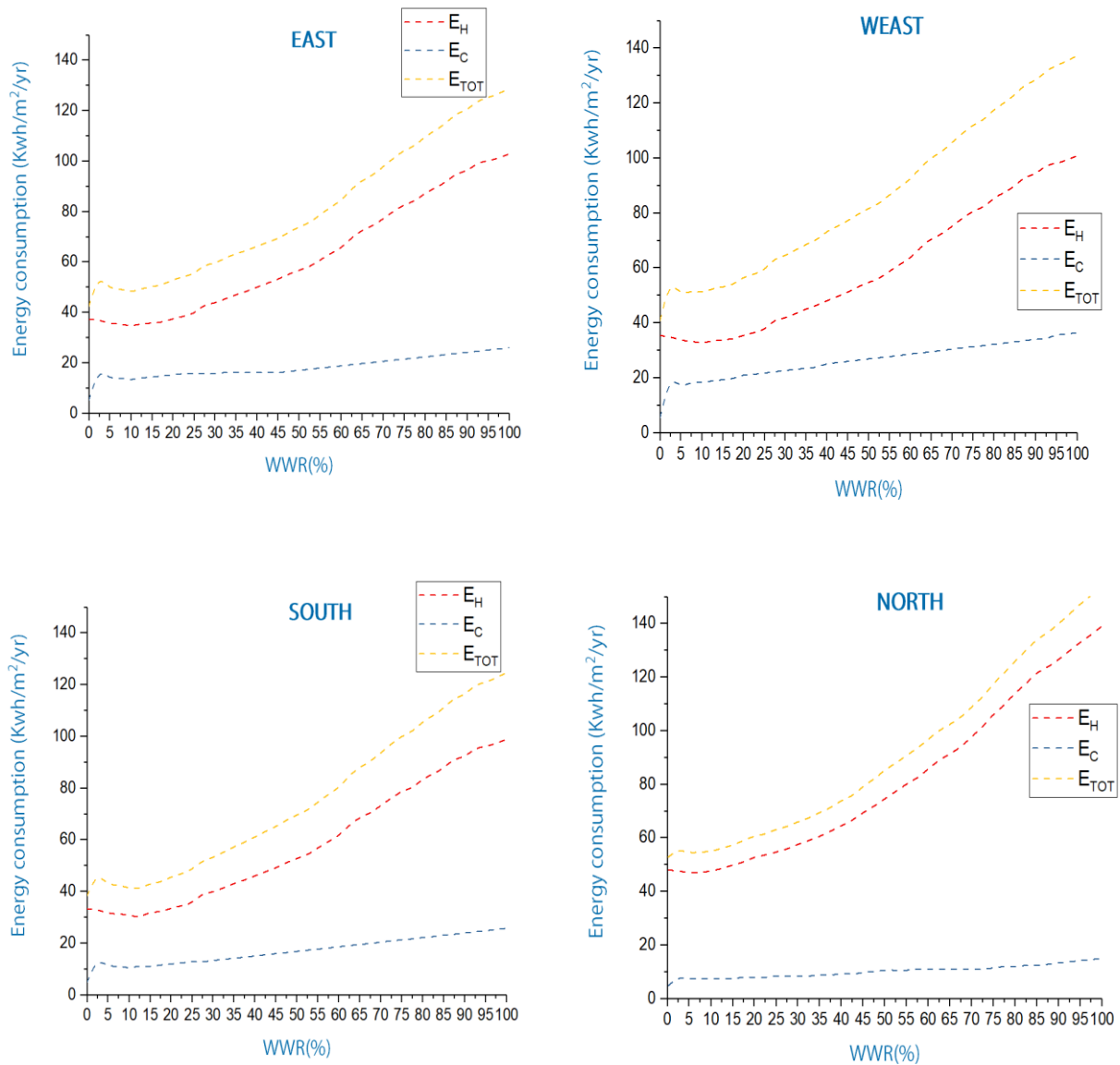


FIGURE 35 : La consommation énergétique annuelle totale, du chauffage et du refroidissement en fonction du WWR % dans la 5^{eme} zone climatique (SETTAT).

Au sud, le bâtiment présente la meilleure combinaison énergétique entre le chauffage et le refroidissement avec une consommation énergétique globale la plus basse avec un taux de WWR optimal de 12,5% par lequel elle a pu consommer une énergie minimale pour le chauffage à l'ordre de 30,6 KWh/m²/an et une consommation minimale d'énergie refroidissante à l'ordre de 11,8 KWh/m²/an. Et cela s'explique par le fait qu'en sud et dans la période hivernale, le bâtiment capte un maximum de rayonnement solaire direct et diffus qui seront

restitués pendant la nuit, et à l'été le rayonnement solaire pour cette orientation est faible par rapport à l'Est et à l'Ouest.

3.6 Zone 6 : Er-Rachidia

La sixième zone climatique est la zone la plus chaude du Maroc, la **Figure 36** décrit l'impact des taux WWR % sur la consommation énergétique du chauffage et de refroidissement à Er-Rachidia.

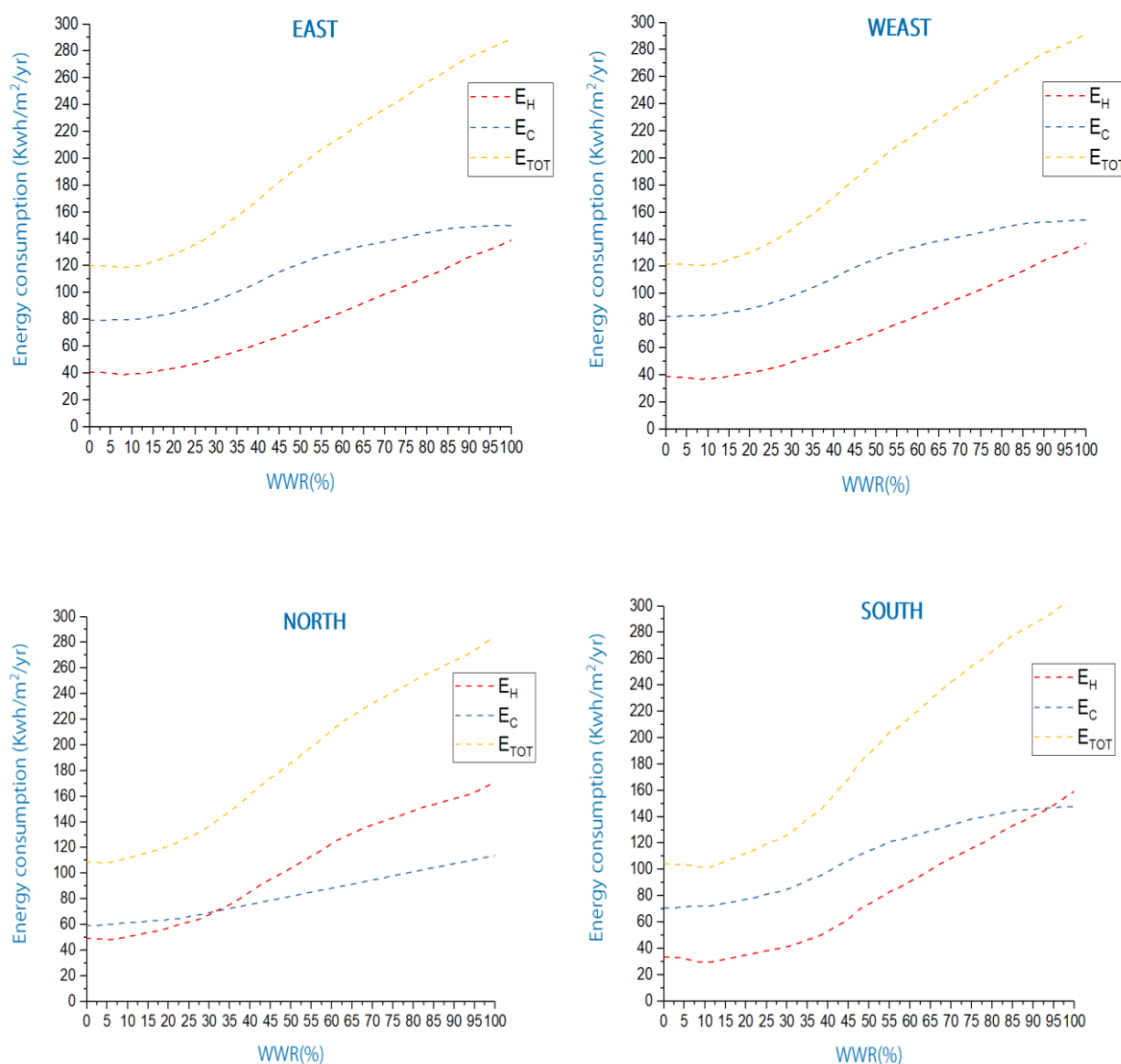


FIGURE 36 : La consommation énergétique annuelle totale, du chauffage et du refroidissement en fonction du WWR % dans la 6^{eme} zone climatique (ER-RACHIDIA).

Les orientations Est et Ouest sont approximativement identiques en termes de consommation énergétique, la surface vitrée la plus optimale pour ces orientations est de 7,5%. La différence entre les deux orientations sait qu'à l'ouest, on remarquera une baisse quantité d'énergie du chauffage avec une valeur de 36,90 KWh/m²/an, contre celle à l'est avec une valeur de 38,78 KWh/m²/an, ainsi pour le refroidissement on constate un effet inverse qui se traduit par une consommation de refroidissement plus faible à l'est de 79,46 KWh/m²/an que celle du l'ouest avec une valeur de 83,70 KWh/m²/an.

Le sud est l'orientation la plus idéale pour réaliser une optimisation de consommation énergétique avec un taux des surfaces vitrées de 10%, le bâtiment a pu atteindre des niveaux de consommation les plus faible de chauffage et de refroidissement avec une consommation respectivement de 29,48 KWh/m²/an, et 72,15 KWh/m²/an.

Au nord, le bâtiment a pu avoir la plus faible consommation énergétique du refroidissement a l'ordre de 60,14 KWh/m²/an avec un taux des surfaces vitrées WWR de 5%, et aussi, on trouve dans cette orientation une valeur la plus élevée de la consommation énergétique du chauffage a l'ordre de 48,73 KWh/m²/an.

Après cette analyse des résultats de simulation, nous présentons dans le **Tableau 11**. La valeur la plus optimale des surfaces vitrées pour chaque zone climatique ainsi que leur orientation.

TABLEAU 11 : TAUX DES BAIES VITRÉES OPTIMAL POUR CHAQUE ORIENTATION ET CHAQUE ZONE CLIMATIQUE

ZONE CLIMATIQUE	WWR (%)			
	SUD	EST	OUEST	NORD
ZONE 1: AGADIR	17,5%	12,5%	12,5%	10%
ZONE 2: TANGER	12,5%	10%	10%	7,5%
ZONE 3: FES	12,5%	10%	10%	7,5%
ZONE 4: IFRANE	10%	10%	10%	5%
ZONE 5: SETTAT	12,5%	10%	10%	7,5%
ZONE 6: ER-RACHIDIA	10%	7,5%	7,5%	5%

4- Conclusion

Les valeurs de taux des baies vitrées ont été déterminées pour différents climats et orientations, et cela pour un bâtiment résidentiel type appartement avec des composants l'enveloppe standard.

Dans la zone 1, représentée par Agadir, on a pu déterminer le taux optimal de la surface vitrée pour chaque orientation, avec 17,5% pour l'orientation sud, 12,5% pour les deux orientations Est et Ouest ainsi 10% pour l'orientation du nord.

A ce qui concerne la ville de Tanger de la zone 2 et celle de Fès de la zone 3 ont connu du même résultat d'optimisation, avec un taux de 12,5% pour l'orientation du Sud et 10% pour les deux orientations l'Est et l'Ouest et 7,5% pour l'orientation nord.

La 4^{ème} zone représentée par la ville d'Ifrane, on a pu déterminer un taux optimal qu'il n'avait pas un impact très important sur la consommation énergétique dans sa globalité avec un taux de 10% pour les trois orientations Est, Ouest et Sud, et un taux de 5% pour l'orientation du Nord. Enfin pour finir, la dernière zone présentée par la ville d'Er-Rachidia avec un taux de surface vitrées de 10% pour l'orientation du Sud et 7,5% pour les deux orientations l'Est et l'Ouest et 5% pour l'orientation du Nord.

Par cette étude, on a constaté que d'après les valeurs obtenues du taux optimal des surfaces vitrées, que la taille de ces baies joue un rôle important dans la consommation énergétique annuelle.

La prochaine étude de recherche serait menée à étudier l'impact du taux des baies vitrées sur la consommation énergétique du bâtiment dans la 4^{ème} zone présentée par la ville du Settat, en ajoutant d'autres variables qui corréle comme le type du vitrage et les matériaux de construction d'enveloppe en introduisant des isolants .

Chapitre 5

**Optimisation de l'enveloppe d'un
bâtiment situe dans la ville de
Settat**

1- Introduction

L'amélioration de la performance énergétique d'un bâtiment se fait généralement via la modélisation énergétique et cela suivant une méthodologie basée sur la simulation afin d'évaluer la minimalisation de la demande énergétique par le système du chauffage et de refroidissement dans un bâtiment.

Ce chapitre suivant décrit la manière qui peut être mise en œuvre afin d'optimiser les performances énergétiques d'un bâtiment type appartement situé dans la ville de Settât et cela par l'amélioration de son enveloppe.

2- Méthode et simulation

2.1 Description du bâtiment

Le bâtiment qui fait sujet d'étude est notre bâtiment de référence, comme déjà décrit dans le chapitre 2. Avec un petit récapitulatif, un bâtiment résidentiel type appartement situé à Settât, en 5^{ème} niveau d'un immeuble composé de 6 niveaux, orienté vers l'Est avec une superficie de 70 m².

2.2 Configuration pour la simulation

Vu que ce chapitre est la suite de l'étude réalisée sur notre bâtiment de référence, on considère le même scénario initial par lequel on a réalisé la simulation de notre bâtiment de référence dans le chapitre précédent.

2.3 Optimisation

La décision de travailler avec un algorithme pour l'optimisation est l'un des choix à prendre avec le plus grand soin. D'après plusieurs études d'optimisation, on constate que les algorithmes génétiques, les algorithmes d'optimisation de recherche directe, et les algorithmes hybrides sont les plus utilisés pour traiter les problèmes d'optimisation des performances. En se basant sur la littérature et les études antérieures, l'algorithme hybride se compose de l'algorithme Particle Swarm Optimization with Constriction Coefficient, qui est un algorithme stochastique basé sur la population et de l'algorithme Hooke-Jeeves, qui est un algorithme de recherche directe. Cet algorithme combiné entre ces deux types effectue d'abord une optimisation d'essaim de particules, puis passe à l'algorithme Hooke-Jeeves pour afficher des

résultats avec finesse. Le principal avantage de cet algorithme est que la recherche globale de l'algorithme Particle Swarm Optimization with Constriction Coefficient augmente les chances de s'approcher du minimum global, plutôt que de se retrouver piégé dans un minimum local. L'algorithme cerne la recherche localement.

L'objectif est de réduire la consommation énergétique en termes du chauffage et du refroidissement dans le bâtiment. La fonction objective est ainsi définie comme suit :

$$E_{TOT} = \frac{Q_H}{\eta_H} + \frac{Q_C}{\eta_C}$$

Avec

E_{TOT} : *Energie totale*

Q_H : Charge énergétique du système du chauffage

Q_C : Charge énergétique du système du refroidissement

η_H : Rendement du système du chauffage

η_C : Rendement du système du refroidissement

TABLEAU 12 : Les différentes variations pour l'optimisation

PARAMETRE	MIN	MAX	V.INIT	PAS DE CAL.	UNITE
L'ISOLANT MUR	14	18	0	2	cm
TAILLE DES BAIES VITREES	10	80	18	1	%
VITRAGES	1	3	1	1	-
ORIENTATION	0	359	90	1	DEG
PROFONDEUR DE L'AUVENT	20	50	10	1	cm

Les différents paramètres de conception qui ont été sélectionnés pour l'étude d'optimisation de l'enveloppe sont :

- L'orientation
- Taille des baies vitrées
- Type des vitrages
- Profondeur des auvents
- L'épaisseur de l'isolant pour le mur extérieur de la façade du bâtiment.

Le **Tableau 12** suivant présente les différentes variations de chaque paramètre avec le pas de calcul ainsi sa valeur initiale.

Le **Tableau 13** suivant présente les caractéristiques thermiques pour chaque type de vitrage.

TABLEAU 13 : Les caractéristiques des variantes du vitrage

VITRAGE	U W/M ² K	FACTEUR SOLAIRE FS%	TRANSMISSION LUMINEUSE %
SIMPLE	5,8	86	90
DOUBLE	2,8	76	81
TRIPLE	1,9	68	74

3- Résultat et discussion

Le **Tableau 14** présente les valeurs initiales et celles sélectionnées comme valeurs optimales, on remarque que pour l'isolation de la surface, on a eu l'utilisation d'un isolant de type laine de roche avec une épaisseur de 16 cm comme la valeur la plus optimale. Ensuite en ce qui concerne les surfaces vitrées, on a eu les fenêtres double vitrage avec un taux de 21% avec un auvent d'une profondeur de 47cm comme valeur la plus optimale pour les fenêtrages, et pour l'orientation on a eu une orientation Sud/Ouest avec 224 degrés comme la meilleure orientation pour cette configuration.

TABLEAU 14 : Comparaison entre les valeurs initiales et les valeurs optimales obtenues

PARAMETRE	V.INIT	V.OPT	UNITE
L'ISOLANT MUR	0	16	cm
TAILLE DES BAIES VITREES	18	21	%
VITRAGE	1	2	-
ORIENTATION	90	224	DEG
PROFONDEUR DE L'AUVENT	10	47	cm

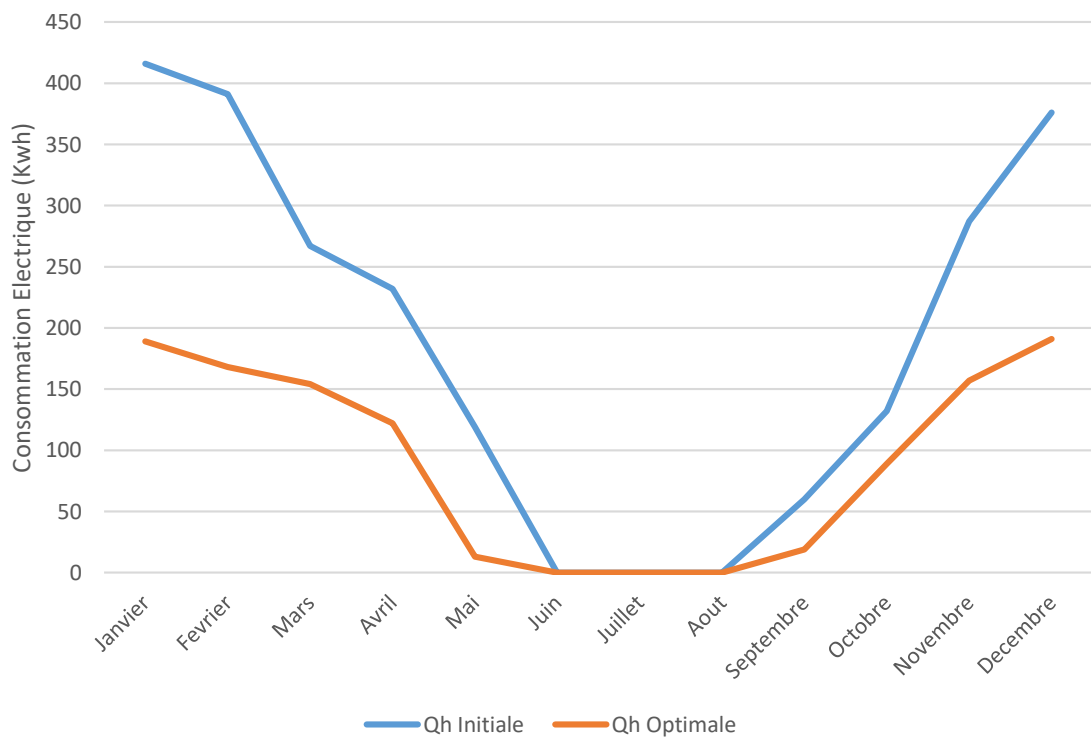


FIGURE 37 : Consommation énergétique du chauffage initiale et optimale

D'après la nouvelle configuration du bâtiment avec les nouvelles variantes optimales, la **Figure 37** présente le nouveau comportement énergétique du système du chauffage avec celui de la configuration initiale, et on constate qu'on a pu réduire cette consommation avec un taux significatif et cela on peut expliquer par le fait qu'avec l'orientation optimale identifier avec les nouveaux caractéristiques optimales des baies vitrées, le bâtiment bénéficiera durant la période hivernale d'un gain solaire important qui sera emmagasiné et restitué après dans les soirs hivernaux connus par leur température froide, et il sera protégé pendant la période estivale contre les canicules connus pendant cette période dans cette région, **Figure 38** présente les températures initiales du bâtiment et celle optimale.

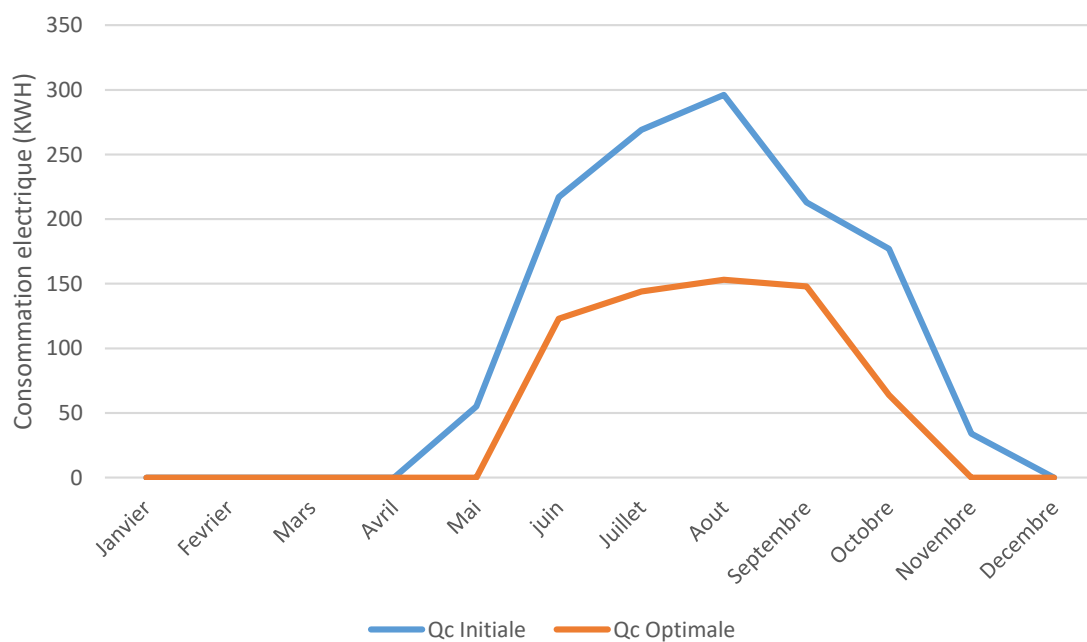


FIGURE 38 : Consommation énergétique du refroidissement initiale et optimale

La consommation totale E_{tot} , a été réduite de 51,04% par rapport aux valeurs initiales, avec une réduction de 51,67% pour la consommation énergétique du système du chauffage la **Figure 37** présente la consommation mensuelle du système de chauffage et une réduction à l'ordre de 49,89% pour la consommation énergétique du système de refroidissement, la **Figure 38** décrit le comportement de la consommation énergétique mensuelle du système de refroidissement.

TABLEAU 15 : Consommation énergétique initiale et optimale

	VALEUR INITIALE	VALEUR OPTIMALE	REDUCTION
CONSOMMATION ENERGETIQUE DU CHAUFFAGE : Q_H (KWH/M²/YR)	32,57	15,74	51,67%
CONSOMMATION ENERGETIQUE DU REFROIDISSEMENT : Q_C (KWH/M²/YR)	18,01	9,02	49,89 %
CONSOMMATION ENERGETIQUE TOTALE : E_{TOT} (KWH/M²/YR)	50,58	24,76	51,04%

Après ce résultat, on a réalisé une analyse paramétrique de 20 exécutions pour voir si le système converge vers un minimum qu'aucun de ces derniers n'a arrivé a réalisé des résultats inférieurs à celui optimise.

4- Conclusion

On déduit du **Tableau 15** que la conception optimale de l'enveloppe par des techniques passives conduit à une économie de 51,04 % de la consommation annuelle d'énergie du chauffage et de climatisation du bâtiment étudié, ce qui peut être considéré comme une quantité importante. De plus, la conception optimale de l'enveloppe conduit également à un meilleur niveau de confort thermique pour les occupants du bâtiment.

Conclusion Générale

Le changement climatique, l'épuisement des énergies fossiles ainsi que la pollution, sont des problèmes majeurs qui font la une, amenant à une prise de conscience à la transition énergétique. C'est la raison pour laquelle on a commencé à introduire des mesures d'efficacité énergétique dans tous les secteurs notamment celui du bâtiment résidentiel. A ces problématiques s'ajoutent également des défis encouragés sous forme d'un programme national d'efficacité énergétique qui vise à économiser 20% d'énergie à l'horizon du 2030.

Pour faire face aux enjeux énergétiques de manière plus globale et plus précise, l'utilisation de l'outil de simulation thermique dynamique devient de plus en plus un excellent outil au service du concept énergétique du bâtiment, pour avoir une meilleure visibilité sur les choix à adopter de point de vue architecturaux et technologiques, et également de valider les objectifs fixés en termes d'efficacité énergétique lors de la phase de conception du projet.

Les principales contributions dans ce travail de recherche peuvent être résumées comme suit :

Dans une première partie des travaux, l'outil Transient System Simulation (TRNSYS) a permis de déterminer les besoins annuels pour le chauffage et le refroidissement d'un modèle de logement au Maroc. Le modèle de travail a été construit de manière à permettre une analyse du comportement thermo-énergétique au bâtiment, et de prouver l'existence d'une corrélation entre le confort thermique recherché par l'occupant et la surconsommation énergétique du bâtiment et montrer également (en comparant empiriquement les résultats) que cette surconsommation est principalement due au système de chauffage et de refroidissement et aussi de valider la justesse et la finesse du modèle simulé du bâtiment de référence.

Par la suite, la ligne d'optimisation a commencé avec un l'objectif de minimisation de la consommation énergétique, pour cela, les valeurs de taux des baies vitrées ont été déterminées pour différents climats et orientations, et cela pour un bâtiment résidentiel type appartement avec des composants de l'enveloppe standard, ainsi on a constaté que d'après les valeurs obtenues du taux optimal des surfaces vitrées, que la taille de ces baies joue un rôle important dans la consommation énergétique annuelle.

Dans une dernière phase de travail, et après l'analyse des résultats d'optimisation obtenus précédemment, l'étude a mis en évidence de traiter l'optimisation plus profondément, en appliquant des techniques passives sur l'enveloppe de notre bâtiment de référence en prenant compte de l'orientation, les parois opaques extérieures et les parois vitrées. Cependant, on a pu

déterminer un modèle de bâtiment qui peut atteindre une économie de 51,04 % de la consommation annuelle d'énergie du chauffage et de climatisation, ce qui peut être considéré comme une quantité importante. De plus, la conception optimale de l'enveloppe conduit également à un meilleur niveau de confort thermique pour les occupants du bâtiment.

Perspective de recherche

Ce travail a permis d'identifier plusieurs pistes de recherches :

- Adapter l'optimisation de performance énergétique suivie au cours de cette recherche pour chaque type de construction résidentielle et cela dans la 5eme zone climatique marocaine.
- Elargir cette optimisation pour les différentes zones climatiques au Maroc.
- Introduisant des techniques de conception pour un bâtiment active (BEPOS) pour un modèle standard de construction marocain pour chaque zone climatique marocaine.
- Réalisation d'une étude d'optimisation de performance énergétique dans le secteur du bâtiment tertiaire au Maroc en intégrant des techniques de conception passive.

Bibliographie

- 7730, N. I. (2010). *ergonomics of the thermal-analytical*. Moroccan institute for standardization IMANOR.
- ALANZI, A. e. (2009). mpact of building shape on thermal performance of office buildings in Kuwait. *Energy Conversion and Management*, 50, 822-828.
- ALDOSSARY, N. (2015). *Domestic sustainable and low energy design in hot climatic regions*. Thesis, University of Cardiff, Cardiff.
- AlešKralj, a. (2019). Investigations of 6-pane glazing: Properties and possibilities. *Energy and Buildings*, 190, 61-68.
- AL-HOMOUD, M. S. (2004). The effectiveness of thermal insulation in different types of buildings in hot climates. *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 27, 235-247.
- AMEE. (2014). *Reglementation thermique de construction au Maroc (RTCM)*.
- Anna Joanna Marszal, P. H. (2009). Zero energy building (ZEB) definition-A literature review. *Proceedings joint actions climate change*, 40, 8-10.
- ANSI/ASHRAE Standard 55. (2017). *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. the American National Standards Institute.
- ASHRAE, h. (2008). *Residential Cooling and Heating Load Calculations*.
- ASIMAKOPOULOS, D. A. (2013). *Passive Cooling of Buildings*. Taylor & Francis.

- ASKAR, H. P. (2001). Windows for buildings in hot arid countries. *Applied Energy*, 70, 77-101.
- ASTE, N. A. (2010). Beyond the EPBD: the low energy residential settlement Borgo Solare. *Applied Energy*, 87, 629-642.
- Aviram DP, F. A. (2001). Thermal properties of a variable cavity wall. *Build. Environ.*, 36(9), 1057-1072.
- BAINBRIDGE, D. &. (2011). Passive Solar Architecture: Heating, Cooling, Ventilation, Daylighting and More Using Natural Flows. *Chelsea Green Publishing*.
- Bektas Ekici, B. &. (2012). A study on the optimum insulation thicknesses of various types of external walls with respect to different materials, fuels and climate zones in Turkey. *Applied Energy*, 92, 211-217.
- BENNETTS, H. e. (2003). Understanding Sustainable Architecture. *Taylor & Francis*.
- BERARDI, U. G. (2014). State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy*, 115, 411-428.
- BESSOUDO, M. T. (2010). Indoor thermal environmental conditions near glazed facades with shading devices – Part I: Experiments and building thermal model. *Building and Environment*, 45, 2506-2516.
- Betul Bektas Ekici, U. T. (2011). Prediction of building energy needs in early stage of design by using ANFIS. *Expert Systems with Applications: An International Journal*, 38(5), 5352-5358.
- BISHOYI, D. A. (2017). Experimental performance of a direct evaporative cooler in composite climate of India. *Energy and Buildings*, 153, 190-200.
- BLAXTER, L. H. (2010). *How To Research*. Berkshire, England: McGraw-Hill Education.
- BOLATTÜRK, A. (2006). Determination of optimum insulation thickness for building walls with respect to various fuels and climate zones in Turkey. *Applied thermal engineering*, 26, 1301-1309.
- BYRNE, A. B. (2013). Transient and quasi-steady thermal behaviour of a building envelope due to retrofitted cavity wall and ceiling insulation. *Energy and Buildings*, 61, 356-365.
- CAPON, R. a. (2009). Modelling climate change adaptation measures to reduce overheating risk in existing dwellings. *Eleventh International IBPSA Conference*.

- Centre Scientifique et Technique du Batiment, R.-u. (2007). *Determination des caractéristiques thermiques des matériaux*.
- Chan, E. H. (2009). The market for green building in developed Asian cities—the perspectives of building designers. *Energy Policy*, 37(8), 3061-3070.
- Chel A., T. G. (2009). Thermal performance and embodied energy analysis of a passive house – case study of vault roof mud-house in India. *Applying Energy*, 86, 1956-1969.
- Cheung, C. F. (2005). Energy efficient envelope design for high rise Apartments. *Energy and Buildings*, 37(1), 37-48.
- CHOI, J.-H. B. (2012). Impacts of indoor daylight environments on patient average length of stay (ALOS) in a healthcare facility. *Building and environment*, 50, 65-75.
- CHOW, T.-T. &. (2013). Liquid-filled solar glazing design for buoyant water-flow. *Building and Environment*, 60, 45-55.
- COFFMAN, C. D. (1980). Are adobe walls optimal phase-shift filters? *Advances in Applied Mathematics*, 1, 50-66.
- COUTTS, A. M. (2013). Assessing practical measures to reduce urban heat: Green and cool roofs. *Building and Environment*, 70, 266-276.
- DAI, Y. J. (2003). Enhancement of natural ventilation in a solar house with a solar chimney and a solid adsorption cooling cavity. *Solar Energy*, 74(1), 65-75.
- David Evans BN, M. P. (2003). Hierarchy of evidence: a framework for ranking evidence evaluating healthcare interventions. *Clinical nursing*.
- Dilip Ahuja, M. T. (2009). Sustainable energy for developing countries. *Open edition journal*, 2.
- DUFFIN, R. &. (1981). Temperature control of buildings by adobe wall design. *Solar Energy*, 27, 241-249.
- DWIVEDI, A. S. (2012). How To Make Energy Efficient Building. *Manager's Journal on Future Engineering and Technology*, 8.
- E Fuentes, a. (2018). a review of domestic hot water consumption profiles for application in systems and building energy performance analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1530-1547.

- Elwan, M. M. (2020). *The role of traditional Lattice window "Mashrabiya" in delivering single-sided ventilation-A CFD Study* (Vol. 68). International Journal of Engineering Trends and Technology.
- ETZION, Y. P. (1997). Adaptive architecture: integrating low- energy technologies for climate control in the desert. *Automation in Construction*, 6, 417-425.
- FANG, X. &. (2000). Numerical simulation and sensitivity analysis of lattice passive solar heating walls. *Solar energy*, 69, 55-66.
- Fanger, P. (1970). *Thermal Comfort*. Copenhagen: Danish Technical Press.
- FARRAR-NAGY, S. R. (2000). Impacts of shading and glazing combinations on residential energy use in a hot dry climate. *Proceedings of the 2000 ACEEE Summer Study of Energy Efficiency in Buildings*, 1(63).
- FEIST, W. (2007). What is a passive house. *Passive House Institute*.
- Fundamentals, A. (2013). *ASHRAE Handbook - Fundamentals*. Atlanta.
- Gian MarcoRevel, a. (2014). Cool products for building envelope – Part I: Development and lab scale testing. *Solar Energy*, 105, 770-779.
- Givoni, B. (1998). *Climate Considerations in Building and Urban Design*. USA: Van Nostrand Reinhold.
- GONG, X. A. (2012). Optimization of passive design measures for residential buildings in different Chinese areas. *Building and Environment*, 58, 46-57.
- GOULDING, J. R. (1992). *Energy In Architecture*. London: London : B.T. Batsford.
- Hacker, R. C. (2009). Modelling climate change adaptation measures to reduce overheating risk in existing dwellings. *The Air infiltration and Ventilation Centre*.
- HALWATURA, R. &. (2008). Thermal performance of insulated roof slabs in tropical climates. *Energy and Buildings*, 40, 1153-1160.
- HOLLMULLER, P. &. (2001). Cooling and preheating with buried pipe systems: monitoring, simulation and economic aspects. *Energy and Buildings*, 33, 509-518.
- HUIZENGA, C. e. (2006). ir quality and thermal comfort in office buildings: results of a large indoor environmental quality survey. *Proceedings of Healthy Buildings*.

- Huovila, P. (2007). *Buildings and Climate Change: Status, Challenges, and Opportunities*. UNEP/Earthprint, 2007.
- HYDE, R. (2013). Climate responsive design: A study of buildings in moderate and hot humid climates. *Taylor & Francis*.
- J. DeBlois, M. B. (2013). simulation home cooling load reductions for a novel opaque roof solar chimney configuration. *Applied Energy*.
- JiaqingXie, a. (2020). Review on occupant-centric thermal comfort sensing, predicting, and controlling. *Energy and Buildings*, 226.
- JORGE, J. P. (1993). A practical tool for sizing optimal shading devices. *Building and Environment*, 28, 69-72.
- KARLSSON, J. &. (2001). Annual energy window performance vs. glazing thermal emittance—the relevance of very low emittance values. *Thin Solid Films*, 392, 345-348.
- KHANAL, R. &. (2011). Solar chimney—A passive strategy for natural ventilation. *Energy and Buildings*, 43, 1811-1819.
- KIBERT, C. J. (2012). *Sustainable Construction: Green Building Design and Delivery*. Wiley.
- KISCHKOWEIT-LOPIN, M. (2002). An overview of daylighting systems. *Solar Energy*, 73, 77-82.
- Klingenberg, K. (2013). All-in-One Design Tool Solution for Passive Houses and Buildings—Monthly Energy Balance and Hygrothermal Simulation. *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XII International Conference*.
- KRONER, W. M. (1997). An intelligent and responsive architecture. *Automation in Construction*, 6, 381-393.
- KUMAR, R. K. (2006). Heating and cooling potential of an earth-to-air heat exchanger using artificial neural network. *Renewable Energy*, 31, 1139-1155.
- KUZMAN, M. K. (2013). Comparison of passive house construction types using analytic hierarchy process. *Energy and Buildings*, 64, 258-263.
- Kwang Ho Lee, R. K. (2009). Enhancement of natural ventilation in buildings using a thermal chimney. *Energy and Buildings*, 41(6), 615-621.
- LARSSON, U. &. (2002). Experimental investigation of downdraught from well-insulated windows. *Building and Environment*, 37, 1073-1082.

- LEWIS, O. J. (1992). *Energy Conscious Design - A Primer for Architects*. London: B.T Balsford Ltd.
- LI, D. H. (2001). Evaluation of lighting performance in office buildings with daylighting controls. *Energy and Buildings*, 33, 793-803.
- LI, D. H. (2007). Daylighting and energy implications due to shading effects from nearby buildings. *Applied Energy*, 84, 1199-1209.
- Liana Muller, T. B. (2013, September). Passive house at the acrossroads: the past and the present of a voluntary standard that managed to bridge the energy efficiency gap. *Energy Policy*, 60.
- Linshuang Long, H. Y. (2016). The roles of thermal insulation and heat storage in the energy performance of the wall materials: a simulation study, *Science Reports. nature*.
- M S Shahdan, a. (2018). External shading devices for energy efficient building. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci*, 117.
- MAHAPATRA, S. C. (2009). Evaluation of various energy devices for domestic lighting in India: technology, economics and CO 2 emissions. *Energy for Sustainable Development*, 13, 271-279.
- MARKUS, T. A. (1980). *Buildings, Climate, and Energy*. Pitman Pub.
- MCNICHOLL, A. &. (1994). *Daylighting in Buildings*. Energy Research Group University College, Dublin.
- Meteonorm. (2014). Récupéré sur www.meteonorm.com.
- MINGFANG, T. (2002). Solar control for buildings. *Building and Environment*, 37(7), 659-664.
- MOOSAVI, L. E. (2014). THERMAL PERFORMANCE OF ATRIA: AN OVERVIEW OF NATURAL VENTILATION EFFECTIVE DESIGNS. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 654-670.
- NAJIM, K. B. (2014). External load-bearing walls configuration of residential buildings in Iraq and their thermal performance and dynamic thermal behaviour. *Energy and Buildings*, 84, 169-181.
- nationale, D. g. (s.d.). Récupéré sur www.meteomaroc.ma

- NICOLAJSEN, A. (2005). thermal transmittance of a cellulose loose-fill insulation material. *Building and Environment*, 40, 907-914.
- NIROUMAND, H. Z. (2013). A guideline for assessing of critical parameters on Earth architecture and Earth buildings as a sustainable architecture in various countries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 130-165.
- OCHOA, C. E. (2008). Strategic decision-making for intelligent buildings: Comparative impact of passive design strategies and active features in a hot climate. *Building and Environment*, 43, 1829-1839.
- O'COFAIGH, E. O. (1999). *A GREEN VITRUVIUS: principles and practice of sustainable architectural design*. London: James & James.
- OURGHI, R. A.-A. (2007). A simplified analysis method to predict the impact of shape on annual energy use for office buildings. *Energy Conversion and Management*, 48, 300-305.
- Ozel, M. a. (2007). Optimum Location and Distribution of Insulation Layers on Building Walls with Various Orientations. *Building and Environment*, 42, 3051-3059.
- PANÃO, M. J. (2013). How low should be the energy required by a nearly Zero-Energy Building? The load/generation energy balance of Mediterranean housing. *Energy and Buildings*, 61, 161-171.
- PARIZOTTO, S. &. (2011). Investigation of green roof thermal performance in temperate climate: A case study of an experimental building in Florianópolis city, Southern Brazil. *Energy and Buildings*, 43, 1712-1722.
- PERSSON, M.-L. R. (2006). Influence of window size on the energy balance of low energy houses. *Energy and Buildings*, 38, 181-188.
- Pitts, A. (2017). Passive House and Low Energy Buildings: Barriers and Opportunities for Future Development within UK Practice. *Sustainability*, 9.
- R. Gosselin, C. (2008). A computational method for calculating heat transfer and airflow through a dual-airflow window. *Energy and Buildings*, 40(4), 452-458.
- R.Pacheco, J. (2012). Energy efficient design of building: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(6), 3559-3573.

- RADHI, H. (2009). Can envelope codes reduce electricity and CO2 emissions in different types of buildings in the hot climate of Bahrain? *Energy*, 34, 205-215.
- Raji, B. T. (2015). An assessment of energy-saving solutions for the envelope design of high-rise buildings in temperate climates: A case study in the Netherlands. . *Energy and Buildings*, 124, 210-221.
- RAMAN, P. M. (2001). A passive solar system for thermal comfort conditioning of buildings in composite climates. *Solar Energy*, 70, 319-329.
- RAMESH, T. P. (2012). Life cycle energy analysis of a residential building with different envelopes and climates in Indian context. *Applied Energy*, 89, 193-202.
- Reiter, S. (2010). Life Cycle Assessment of Buildings – a review. *Sustainability Workshop and Third Plenary Meeting*.
- Richardson, I. T. (2009). Domestic lighting: A high-resolution energy demand model. *Energy and buildings*, 41(7), 781-789.
- RODRIGUEZ-UBINAS, E. M. (2014). assive design strategies and performance of Net Energy Plus Houses. *Energy and Buildings*, 83, 10-22.
- ROSSI, M. &. (2014). External walls design: The role of periodic thermal transmittance and internal areal heat capacity. *Energy and Buildings*, 68, 732-740.
- RTCM. (2014). *Règlement Général de Construction Fixant Les Règles de Performance Énergétique de Constructions Au Maroc*.
- SANTAMOURIS, M. &. (1996). *Passive Cooling of Building*. London: James & James.
- Saridar, S. M. (2004). *The impact of façade design on daylighting performance in office buildings: the case of Beirut, Lebano*. Doctoral thesis, University of Newcastle.
- SCHNIEDERS, J. (2009). *Passive Houses in South West Europe*. Passivhaus Institut.
- Sedigh Ziabari SH, Z. H. (2019). Comparative study on the influence of window to wall ratio on energy consumption and ventilation performance in office building of temperate humid climate: a case study in rash. *Space Ontol Int J*, 8(2), 33-42.
- SIMPSON, J. R. (1998). Simulation of tree shade impacts on residential energy use for space conditioning in Sacramento. *Atmospheric Environment*, 32, 69-74.
- SINGH, M. e. (2008). Different glazing systems and their impact on human thermal comfort— Indian scenario. *Building and Environment*, 43, 1596-1602.

- SISMAN, N. K. (2007). Determination of optimum insulation thicknesses of the external walls and roof (ceiling) for Turkey's different degree-day regions. *Energy Policy*, 35, 5151-5155.
- SONG, S.-Y. J.-H. (2007). Evaluation of inside surface condensation in double glazing window system with insulation spacer: A case study of residential complex. *Building and environment*, 42, 940-950.
- STACK, A. G. (1999). *Shading systems: solar shading for the European climates*. University College Dublin, Energy Research Group. Dublin: European Commission Directorates - General for Research and Energy & Transport.
- SU, B. (2008). Building Passive Design and Housing Energy Efficiency. *Architectural Science Review*, 51, 277-286.
- SUEHRCKE, H. P. (2008). Effect of roof solar reflectance on the building heat gain in a hot climate. *Energy and Buildings*, 40, 2224-2235.
- syali, k. a. (2018). A review of Data-Driven building energy consumption prediction studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1192-1205.
- Thomas, R. F. (2001). *Photovoltaics and Architecture*. London: Spon Press.
- THOMAS, R. M. (2003). Blending Qualitative and Quantitative Research Methods in Theses and Dissertations. *SAGE Publications*.
- Thormark, C. (2002). A low energy building in a life cycle—its embodied energy, energy need for operation and recycling potential. *Building and Environment*, 37(4), 429-435.
- TRNSYS. (s.d.). *TRNSYS, a transient simulation program*. Madison: University of Wisconsin-Madison. Solar Energy Laboratory.
- UTAMA, A. &. (2009). Indonesian residential high rise buildings: A life cycle energy assessment. *Energy and Buildings*, 41, 1263-1268.
- VERMA, R. B. (1986). The comparative performance of different approaches to passive cooling. *Building and Environment*, 21, 65-69.
- WANG, W. T. (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*, 64, 218-223.
- Wetter, M. (2009). *Generic Optimization Program User Manual Version 3.0*.

- WILLIAMS, N. S. (2010). Green roofs for a wide brown land: Opportunities and barriers for rooftop greening in Australia. *Urban Forestry & Urban Greening*, 9, 245-251.
- Wills, D. H. (2005). Black Gold, The End of Bretton Woods and the Oil-Price Shocks of the 1970s . *The Independent Review*, 9(4).
- Wojdyga, K. (2009). An investigation into the heat consumption in a low-energy building. *Renewable Energy*, 34(12), 2935-2939.
- YAGHOUBIAN, N. A. (2015). Influence of plant coverage on the total green roof energy balance and building energy consumption. *Energy and Buildings*, 103, 1-13.
- Yoshiki Higuchi, M. U. (2007). EFFECTS OF TREES ON THE ROOM TEMPERATURE AND HEAT LOAD OF RESIDENTIAL BUILDING. *Building Simulation*.
- ZHU, L. e. (2009). Detailed energy saving performance analyses on thermal mass walls demonstrated in a zero energy house. *Energy and Buildings*, 41(3), 303-310.
- ZINZI, M. &. (2012). Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region. *Energy and Buildings*, 55, 66-76.