

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

UNIVERSITE SAAD DAHLAB BLIDA 1
INSTITUT D'ARCHITECTURE ET D'URBANISME



MEMOIRE DE MASTER
ARCHITECTURE BIOCLIMATIQUE

**Évaluation et amélioration d'efficacité énergétique et du
confort thermique d'une réinterprétation d'un héritage
architectural traditionnel en zone aride**

(Cas du Ksar Tafielt)

Devant le jury composé de :

Mr : Atik Tarik

Mr : Djaffar semmar

Mr : Semahi Samir

Réalisé par :

Melle : Akacem Imane

Encadré par :

Mme : Maachi Ismahan

Co-encadré par :

Mr : Derraji. L

Mr : Ouldzemirli .M

2018/2019

Remerciements

Je remercie Dieu tout puissant, de m'avoir donné le courage pour accomplir ce modeste travail

Avant de repartir, peut-être, vers de nouvelles explorations, les sentiments que l'on éprouve sont complexes : la satisfaction d'avoir mené jusqu'au bout ce que l'on avait entrepris et, en même temps, la frustration de devoir inscrire le mot « fin », alors que l'on sait que l'on n'a pas tout exploré.

La mémoire est totalement présente d'une aventure qui peut paraître au premier regard solitaire, mais dont l'aboutissement n'a été possible que par la combinaison de tant d'expertises, de tant de soutiens, de tant de coopérations et de tant de complicités.

Je remercie en premier lieu ma directrice du mémoire Mme. Maachi, pour sa disponibilité, son suivi, ses nombreux conseils et pour m'avoir offert l'opportunité de travailler sur une thématique aussi intéressante, ainsi que mon mes Co-encadreur Mer. Ouldzemirli.

Je voudrais remercier sincèrement Mr. DERRADJI Lotfi, chercheur en thermique du bâtiment au CNERIB pour avoir accepté d'être Co-encadreur de ce mémoire ainsi que de l'intérêt qu'il lui a accordé, pour la sollicitude avec laquelle il a suivi et guidé ce travail.

Je tiens aussi à remercier les membres du jury Mr. Djaffar semmar, Mr. Atik Tarik et Mr Semahi Samir d'avoir accepté d'examiner le travail de recherche du présent mémoire.

Je tiens à remercier sincèrement tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réussite de ce travail et en particulier :

Mr. Tahar Hadj sadok et Mme Lalmi Nadjia pour leurs aides ainsi que leur accompagnement tout au long de ce travail.

L'ensemble du personnel du CNERIB. Merci à Mr. Amara et Mr. Mezien pour m'avoir accueilli à plusieurs reprises dans leurs équipes, pour leurs gentillesse et leurs assistances dans les démarches administratives et l'étude expérimentale.

Mes remerciements vont également à Mr Ahmed Nouh, Mr Amara Moussa, Mr Moustafa et Mr Omar Yakoub, initiateurs et gestionnaires du ksar de Tafilelt pour leur aide dans la réalisation des différentes investigations menée sur site en mois de janvier et juillet de l'année 2019.

Une liste inévitablement bien incomplète que je ne saurais clore sans remercier infiniment ma famille, mes amies pour leur assistance et leur soutien.

Résumé

Depuis plusieurs décennies, l'Algérie fait face à un accroissement intense de réalisation de projet d'habitation, qui ne sont soumis à aucune exigence réglementaire sur le plan thermique et énergétique, ceci revient à la méconnaissance de celle-ci de la part des concepteurs, produisant des bâtiments négligeant les aspects climatiques, gros consommateurs d'énergie et très souvent inadaptées aux exigences des occupants, en termes de confort. Pour pallier à ce problème d'inconfort, l'habitant est confronté à des dépenses supplémentaires de chauffage et de climatisation.

La région du Sud Algérien, région aride est composé des Ksour une originalité architecturale et urbanistique, le savoir-faire de l'architecture vernaculaire de ces régions peut devenir la force motrice dans le développement de ces régions. Cependant ce potentiel est faiblement exploité. Pour ce faire, cela passe par une bonne connaissance du comportement des bâtiments et par leur adaptation au contexte climatique. Dans le cadre de notre contribution à cette problématique, une étude sur le comportement thermique de l'habitat du cas de ksar Tafilelt est initiée grâce un processus de diagnostic, de vérification puis de simulation. En effet la simulation des performances énergétiques du bâtiment devient de plus en plus incontournable dans les processus de conception et d'analyse des bâtiments à travers le monde.

Dans ce travail les outils de simulation des performances énergétiques ainsi que les outils d'optimisation sont utilisés pour mener des investigations sur le cas d'étude construit en matériaux locaux suivant deux principales approches. Dans la première approche le cas d'étude du bâtiment est confronté aux mesures issues de l'expérimentation sur le bâtiment réel.

Dans la seconde approche, des simulations sur des solutions d'amélioration des performances du bâtiment sont réalisées à travers l'application de la simulation dynamique comme outils d'aide à la conception des techniques d'optimisation utilisées pour implémenter les solutions de refroidissement passif dont les impacts sur le bâtiment étudié sont évalués. Enfin dans ce travail, des techniques d'analyse du bâtiment et des critères de performance sont utilisées pour caractériser et formuler des recommandations sur la conception des bâtiments dans le contexte climatique du sud algérien.

Mots clés : confort thermique, réglementation thermique algérienne, architecture vernaculaire, performances énergétiques, simulation dynamique.

ملخص

ولعدة عقود ، ظلت الجزائر تواجه زيادة مكثفه في بناء مشاريع الإسكان ، التي لا تخضع لأي متطلبات تنظيميه من حيث الحرارة والطاقة ، وهذا يرقى إلى الافتقار إلى المعرفة بها من جانب المصممين ، وإنتاج المباني التي تهمل الجوانب المناخية ، والمستهلكين الطاقة الثقيلة وغالبا ما تكون غير مناسبة لمتطلبات شاغليها ، من حيث الراحة. لتخفيف هذه المشكلة من عدم الراحة ، ويواجه الساكن مع تكاليف اضافيه من التدفئة وتكييف الهواء.

منطقة جنوب الجزائر ، وتتألف المنطقة القاحلة من السور المعمارية والأصالة الحضرية ، والدراية المعمارية لهذه المناطق يمكن ان تصبح القوه الدافعة في تنميه هذه المناطق.

غير ان هذه الإمكانيّة تستغل بقدر ضعيف. وهذا يتطلب معرفه جيده بسلوك المباني وتكيفها مع السياق المناخي. وكجزء من مساهمتنا في هذه المشكلة ، يتم الشروع في دراسة عن السلوك الحراري للموئل في حاله القصر تـافيلالت من خلال عمليه التشخيص والتحقق والمحاكاة. في الواقع ، فان محاكاة أداء الطاقة في المبني أصبحت أكثر وأكثر اهميه في عمليات تصميم وتحليل المباني في جميع انحاء العالم.

وفي هذا العمل ، تستخدم أدوات محاكاة أداء الطاقة وإدارات التحسين للتحقيق في حاله الدراسة التي شيدت في المواد المحلية بعد نهجين رئيسيين. وفي النهج الأول، تواجه حاله دراسة المبني التدابير الناجمة عن التجريب علي المبني الفعلي.

وفي النهج الثاني ، تجري عمليات محاكاة لحلول تحسين أداء المباني من خلال تطبيق المحاكاة الدينامية كادات للمساعدة في تصميم تقنيات التحسين المستخدمة تنفيذ حلول التبريد السلبية التي يتم تقييم اثارها علي المبني. وأخيرا ، في هذا العمل ، تستخدم تقنيات تحليل المباني ومعايير الأداء لتوصيف وتقديم توصيات بشأن تصميم المباني في السياق المناخي لجنوب الجزائر.

الكلمات المفتاحية: الراحة الحرارية ، التنظيم الحراري الجزائري ، الهندسة المعمارية العامية ، أداء الطاقة، المحاكاة الديناميكية

Abstract

For several decades, Algeria has faced an intense increase in the construction of housing projects, which are not subject to any regulatory requirements in terms of thermal and energy, this amounts to the lack of knowledge of it during their design, producing buildings that neglect the climate, which are energy consuming and often unsuitable for the requirements of the occupants, in terms of comfort. To address this discomfort problem, they often use additional heating and cooling costs.

The region of southern Algeria, arid region is composed of the Ksour an architectural and urban originality, the know-how of the vernacular architecture of these regions can become the driving force in the development of these regions.

However this potential is lowly explored. This requires a good knowledge of the behaviour of buildings and their adaptation to the climate context. As part of our contribution to this problem, a study on the thermal behavior of the habitat of the case of ksar Tafilet is initiated through a process of diagnosis, verification and simulation. Indeed, the simulation of the energy performance of the building is becoming more and more essential in the processes of design and analysis of buildings around the world.

In this work, energy performance simulation tools and optimization tools are used to investigate the case of a study constructed in local materials following two main approaches. In the first approach the case of the study of the building is confronted with the measures resulting from the experimentation on the actual building.

In the second approach, simulations of building performance improvement solutions are carried out through the application of dynamic simulation as tools to help design the optimization techniques used to implement passive cooling solutions whose impacts on the building are being evaluated. Finally, in this work, building analysis techniques and performance criteria are used to characterize and make recommendations on building design in our climate context.

Key words: thermal comfort, Algerian thermal regulation, vernacular architecture, energy performance, dynamic simulation.

Introduction	1
Introduction générale.....	2
Problématique de recherche.....	3
Hypothèses	4
Objectif.....	4
Méthodologie de recherche.....	4
Structure du mémoire	6
Introduction	8
I.1L’habitat et les paramètres du confort thermique	8
I.1.1 Le confort thermique.....	8
I.1.1.1 Définition	8
I.1.1.2Les paramétrés lies au confort thermique.....	9
I.1.1.2.1 Les facteurs lies a l’environnement.....	9
I.1.1.1.2 Les facteurs liés à l’individu	11
I.1.2 Le confort thermique dans l’approche bioclimatique	12
I.1.2.1 L’implantation	12
I.1.2.2 Le zonage climatique	12
I.1.2.3 La forme de l’enveloppe (compacité).....	14
I.1.2.4 L’orientation du bâtiment.....	15
I.1.2.5 La ventilation naturelle	15
I.1.3 Stratégies bioclimatiques pour améliorer le confort thermique.....	16
I.1.3.1 Le confort d’hiver	16
I.2 Les performances thermiques	17
I.2.1 L’isolation thermique	17
I.2.1.1 Systèmes d’isolation.....	18
I.2.1.1.1 Système d’isolation thermique par l’intérieur	18
I.2.1.1.2 Système d’isolation thermique par l’extérieur.....	18
I.2.1.2 Les différents types d’isolants.....	18
1.2.1.3 Exemple d’isolant en phase d’expérimentation	19
I.2.2 Caractéristiques thermiques des matériaux.....	20
I.2.2.1 La conductivité thermique	20

I.2.2.2 La capacité thermique	20
I.2.2.3 La résistance thermique	21
I.2.2.4 L'inertie thermique	21
I.3 Architecture et énergie	21
I.3.1 Contexte mondial	21
I.3.1.1 Consommation énergétique du Sud méditerranéen	21
I.3.1.2 Les systèmes de certification les plus utilisés	22
I.3.1.3 Diagnostic de performance énergétique (D P E).....	23
I.3.2 Contexte national	24
I.3.2.1 Energie et état de consommation en Algérie	24
I.3.2.2 Politique nationale d'efficacité énergétique	25
I.3.2.3 Programme national de maîtrise d'énergie dans le secteur du bâtiment	25
I.3.2.4 L'outil de la simulation numérique du confort thermique en Algérie (RTEA)	26
I.4 L'architecture vernaculaire dans le contexte chaud et aride	27
I.4.1 Dispositifs de l'habitat vernaculaire contribuant au confort thermique.....	27
I.4.1.1 Fonction climatique du patio	27
I.4.1.2 Les tours à vents « Melkef ».....	28
I.4.1.3 Le moucharabieh	29
I.4.2 Exemple d'habitat vernaculaire algérien (Modèle mozabite).....	29
I.4.3 L'efficacité énergétique de l'habitat vernaculaire	32
I.4.3.1 Matériaux contribuant à l'efficacité énergétique	32
I.4.3.2 Performances énergétiques du patrimoine architectural vernaculaire (l'exemple Turque de Mardin).....	33
Conclusion.....	37
Introduction	40
II.5 Le cas d'étude	40
II.5.1 Contexte du projet Tafilelt	40
II.5.2 Présentation générale du Ksar Tafilelt	41
II.5.3 Données climatiques.....	42
II.5.4 La contribution de la conception bioclimatique dans l'habitat étudié	43
II.5.4.1 A l'échelle urbaine.....	43
II.5.4.2 A l'échelle architecturale.....	43
II.5.4.3 Les matériaux et technique de construction	48

II.6 Diagnostique et vérification du cas d'étude	48
II.6.1 La thermographie.....	48
II.6.1.1 Les usage et outil de la thermographie.....	49
II.6.1.2 Etat des lieux à l'aide d'une caméra thermique	50
II.6.2 caractérisation thermo-physique des matériaux	51
II.6.2.1 Présentation du matériau	51
II.6.2.2 Description du dispositif de mesure.....	51
II.6.2.3 Présentation des résultats de mesure	52
II.6.3 Mesure des températures de l'air	53
II.6.4 Vérification de conformité aux règlements thermique	55
II.6.4.1 Présentation du fonctionnement du CTBAT	55
II.6.4.2 Simulation thermique statique avec CTBAT	58
II.6.4.3 Présentation de résultats du bilan thermique	59
II.7 Simulation	60
II.7.1 Protocole de simulation.....	60
II.7.2 Présentation du logiciel de simulation	60
II.7.3 Méthodologie de simulation	61
II.7.3.1 Création d'un fichier météorologique	61
II.7.3.2 Intégration du modèle sous « TRNSYS studio »	62
II.7.3.3 Intégration du modèle sous « TRNSYS-Build »	65
II.7.3.3.1 Définition des paramètres du modèle.....	65
II.7.3.3.2 Intégration des paramètres correspondant aux zones thermiques.....	70
II.7.3.4 Présentation du cas de base et des variantes	72
Conclusion.....	76
Chapitre 03 :	77
Résultats et Discussion	78
Introduction	79
III.8 Résultats et discussions	79
III.8.1 Etat des lieux du cas de base	79
III.8.1.1 Evolution des températures intérieures simulées	80
III.8.1.3 Evolution mensuelle des consommations énergétiques	84
III.8.2 L'impact des améliorations effectuées	85
III.8.2.1 L'impact de la configuration des couvertures vitrées.....	85

III.8.2.2 L'impact de configuration des protections solaire	87
III.8.2.3 L'impact de la ventilation naturelle.....	89
III.8.2.4 L'impact de l'isolation.....	91
III.8.3 Le cas optimisé	93
III.8.4 Conclusion	95

Table des figures

Figure 1: les zones climatiques de la terre	12
Figure 2 : (a et b): nébulosité jour et nuit	13
Figure 3 : le rapport forme taille et contact avec la compacité	14
Figure 4 : L'orientation du bâtiment	15
Figure 5 : concepts de la stratégie du chaud.....	16
Figure 6 : concepts de la stratégie du froid.	16
Figure 7 : pourcentages indicatifs des pertes de chaleur d'une maison non isolée	17
Figure 8 : Comparaison de la masse volumique et la conductivité thermique du bois de palmier dattier a d'autres matériaux naturels	19
Figure 9 : pays du nord et de la sud méditerranéenne	21
Figure 10 : principaux systemes de certification internationaux.....	22
Figure 11 : Comparatif des consommations des bâtiments	23
Figure 12 : l'énergie produite et consommée en Algérie.....	24
Figure 13 : La consommation énergétique en Algérie par secteur d'activité.....	24
Figure 14 : programme national d'efficacité énergétique en Algérie.	25
Figure 15 : la fonction climatique du patio	27
Figure 16 : la fonction climatique du melkef.	28
Figure 17 : Moucharabieh	29
Figure 18 : Situation géographique de Mardin.....	33
Figure 19 : La ville citadelle de la Mardin.	34
Figure 20 : vue aérienne ville de Mardin, Turquie.....	34
Figure 21 : La ville de Mardin	41
Figure 22: Consommation annuelle de tous les cas de figures Mardin	41
Figure 23 : données climatique tirées du logiciel meteonorm (la précipitation).....	42
Figure 24: données climatique tirées du logiciel meteonorm (la température).....	42
Figure 25 : Niveau rez-de-chaussée.	44
Figure 26 : Niveau étage	45
Figure 27: Façade principale	45
Figure 28: Niveau terrasse.....	45
Figure 29: Schéma de principe de ventilation naturelle.....	46
Figure 30: Schéma de principe de la compacité.....	47
Figure 31: les coques vitrées du chebek et de la cour.	47
Figure 32: fenêtre sur la cour.	47
Figure 33: les orifices sur la façade principale.....	47
Figure 34: coupes montrant la composition du mur porteur et du plancher.	48
Figure 35: la texture rugueuse du mur extérieur pour assurer l'ombrage.	48
Figure 36: la caméra thermique.....	49
Figure 37: Thermo-gramme de la façade urbaine	50
Figure 38: Thermo-gramme de la façade principale	50
Figure 39: Thermo-gramme d'une partie de la courette.....	50

Figure 40 : Thermo-gramme d'une partie de la buanderie.....	51
Figure 41 : découpage des pierres.....	51
Figure 42 : Le CT METRE.....	51
Figure 43 : l'évaluation des caractéristiques thermique des échantillons.....	52
Figure 44: Niveau rez-de-chaussée.....	54
Figure 45: Niveau étage.....	54
Figure 46 : Niveau terrasse.....	55
Figure 47: les quatre étapes de la simulation thermique.....	55
Figure 48: étape 01.....	56
Figure 49: étape 02.....	56
Figure 50: étape 04.....	57
Figure 51: étape 03.....	57
Figure 52: création d'une nouvelle enveloppe.....	58
Figure 53 : création parois opaques.....	58
Figure 54 : création d'un matériau.....	58
Figure 55: déterminer les matériaux qui composent la paroi en pierre.....	58
Figure 56: Rapport de conformité.....	59
Figure 57: Création de fichier météorologique de la zone de Ghardaïa.....	61
Figure 58: Choix du format.....	62
Figure 59 : choix du type de projet.....	62
Figure 60 :Traçage du plan.....	63
Figure 61:Dimensionnement des zones.....	63
Figure 62: Fraction et orientation.....	64
Figure 63: Création du projet.....	64
Figure 64: projet final.....	65
Figure 65: paramétrage du projet.....	65
Figure 66 : Introduction des caractéristiques des matériaux.....	66
Figure 67: Définir la structure des parois.....	67
Figure 68: Définir les types d'ouverture.....	67
Figure 69: Définir le taux d'infiltration.....	68
Figure 70: Définir le débit de ventilation.....	68
Figure 71: Définir la température de chauffage.....	68
Figure 72 : Définir la température de climatisation.....	69
Figure 73: Définition des gains.....	69
Figure 74: Définition des scénarios.....	69
Figure 75: Insertion des éléments constructifs.....	70
Figure 76: activation de climatisation.....	70
Figure 77 : activation du chauffage.....	70
Figure 78 : schéma démonstratif des différentes zones thermiques étudiées et leurs scenarios de consigne thermostat.....	71
Figure 79.....	71
Figure 80 : choix des outputs des différentes zones.....	71
Figure 81 : vue sur la cour (a- extérieur. b- intérieur).....	73
Figure 82 : vue sur chebek (a- extérieur. b- intérieur).....	73

Figure 83 : schéma de configuration des couvertures vitrées	74
Figure 84: schema de configuration des protections solaire.	74
Figure 85: schema de configuration de la ventilation naturelle.	75
Figure 86: schema de configuration de l'isolation	75
Figure 87 : Evolution annuelle de températures du niveau rez-de-chaussée du cas de base ...	80
Figure 88: Evolution annuelle de températures du niveau étage de cas de base.....	80
Figure 89: Evolution des températures du cas de base pour la saison hivernale.....	81
Figure 90: Evolution des températures du cas de base pour la saison estivale	82
Figure 91: Comparaison de l'évolution des températures simulées et mesurées du RDC pour la saison estivale du 03 Juillet au 15 Septembre 2019.....	83
Figure 92: Comparaison de l'évolution des températures simulées et mesurées de l'étage pour la saison estivale du 03 Juillet au 15 Septembre 2019.....	83
Figure 93: Etat de consommation énergétique mensuelle du cas de base.....	84
Figure 94: Etat de consommation énergétique annuelle du cas de base	84
Figure 95 : Variante 1.....	85
Figure 96: Comparaison de l'évolution des températures du séjour de cas de base avec les variantes V1, V2, V3 pour la saison hivernale	85
Figure 97 : Variante 2.....	85
Figure 98 : Variante 3.....	85
Figure 99: Comparaison de l'évolution des températures du séjour de cas de base avec les variantes V4, V5 pour la saison estivale	85
Figure 100: Comparaison des consommations énergétiques du cas de base avec les variantes V1, V2, V3.	86
Figure 101 : Variante 4.....	87
Figure 102 : Variante 5.....	87
Figure 103: Comparaison de l'évolution des températures du séjour du cas de base avec les variantes V4, V5 pour la saison hivernale.....	87
Figure 104 : Variante 4.....	87
Figure 105: Comparaison de l'évolution des températures du séjour du cas de base avec les variantes V4, V5 pour la saison estivale).....	87
Figure 106 : Variante 5.....	87
Figure 107: Comparaison des consommations énergétiques du cas de base avec les variantes V4, V5.	88
Figure 108 : Variante 6.....	89
Figure 109: Comparaison de l'évolution des températures du séjour du cas de base avec les variantes V6 pour la saison estivale	89
Figure 110: Comparaison de l'évolution des températures courette du cas de base avec les variantes V6 pour la saison estivale	89
Figure 111: Comparaison des consommations énergétiques du cas de base avec les variantes V6.	90
Figure 112: Comparaison de l'évolution des températures du séjour du cas de base avec les variantes V7, V8 pour la saison hivernale	91
Figure 113: Comparaison de l'évolution des températures du séjour du cas de base avec les variantes V7, V8 pour la saison estivale	91

Figure 114: Comparaison des consommations énergétiques du cas de base avec les variantes V7,V8.	92
Figure 115 : Comparaison de l'évolution des températures du séjour du cas de base avec le cas optimisé pour la saison hivernale.....	93
Figure 116 : Comparaison de l'évolution des températures de la courette du cas de base avec le cas optimisé pour la saison hivernale.....	93
Figure 117 : Comparaison des consommations énergétiques du cas de base avec le cas optimisé.....	94

Liste des tableaux

Tableau 1 : la conductivité thermique du matériau utilisé	52
Tableau 2 : la chaleur spécifique et la masse volumique du matériau utilisé	53
Tableau 3 :Consommation energetique annuelle (L'impact de configuration des couvertures vitrée)	86
Tableau 4 : Consommation énergétique annuelle (L'impact de configuration des protections solaire).....	88
Tableau 5 : Consommation énergétique annuelle (L'impact de la ventilation naturelle)	90
Tableau 6 : Consommation énergétique annuelle (L'impact de l'isolation).....	92
Tableau 7 : Consommation énergétique annuelle cas optimisé	94

Introduction

Introduction générale

Le début du 21^{ème} siècle est caractérisé en partie par la prise de conscience générale de l'importance du contexte énergétique suite aux conséquences du second choc pétrolier. Cette crise énergétique a mis en avant l'importance du volume énergétique combustible nécessaire pour le développement de différents secteurs à savoir : l'industrie, le transport et le secteur du bâtiment. Leurs répercussions sur l'économie en termes de coûts et d'impact écologique et environnemental étaient importantes. Cependant, Ürge-Vorsatz et al, ont déclaré que les bâtiments sont globalement responsables d'environ 23% de la consommation d'énergie primaire et 30% de la consommation mondiale d'électricité¹. Ce résultat est dû à la forte demande de logement qui résulte d'une augmentation démographique.

À l'échelle nationale, 42% de la consommation énergétique est destiné au secteur du bâtiment, ce qui le classe comme étant le plus énergivore. Omrany et al, ont déclaré que 60% de la consommation totale d'énergie dans les bâtiments est monopolisée pour le chauffage et le refroidissement des locaux². De ce fait, le développement des villes et des sociétés à faibles émissions de carbone gagne du terrain en termes de popularité parmi les pays développés et en développement. Ce phénomène contribue à l'atténuation des effets du réchauffement climatique³. Conventionnellement, l'enveloppe du bâtiment a été considérée comme une barrière thermique pour empêcher la perte de chaleur tout en contrôlant le gain solaire⁴. Celle-ci joue un rôle principal dans le contrôle de la consommation d'énergie dans les bâtiments et assure la maintenance du confort interne⁵.

Aujourd'hui, la réglementation thermique algérienne « DTR » définit ses exigences autour de la consommation énergétique et de la température intérieure du bâtiment. Prochainement, les bâtiments neufs devront répondre à la réglementation thermique Algérienne DTR.

¹ Al-Obaidi KM et al, "Designing an integrated daylighting system for deep-plan spaces in Malaysian low-rise buildings",

² Omrany H et al, "Application of passive wall systems for improving the energy efficiency in buildings: a comprehensive review", *Renew Sustain Energy Rev* 2016; 62:1252–69.

³ Ali G, Abbas S et Qamer FM, "How effectively low carbon society development models contribute to climate change mitigation and adaptation action plans in Asia", *Renew Sustain Energy Rev* 2013;26:632–8.

⁴ Barbosa S et Ip K, "Perspectives of double skin façades for naturally ventilated buildings: a review". *Renew Sustain Energy Rev* 2014;40:1019–29.

⁵ Oral GK et Yilmaz Z, "Building form for cold climatic zones related to building envelope from heating energy conservation point of view", *Energy Build* 2003;35(4):383–8.

Le programme d'amélioration de la performance énergétique des bâtiments résidentiels obéit à la volonté de l'Algérie, de favoriser une utilisation plus responsable de l'énergie et d'explorer toutes les voies pour préserver les ressources et systématiser la consommation utile et optimale⁶, Pour cela, l'Algérie met en œuvre des programmes de performance énergétique tel que PNME 2007-2011. Ce programme permet, l'intégration de l'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment avec pour objectif d'améliorer le confort intérieur des logements, tout en utilisant moins d'énergie, Dans ce contexte, on souligne la nécessité de développer une méthode de conception, accessible aux architectes qui permet l'intégration harmonieuse des bâtiments aux différentes conditions climatiques des régions, tout en assurant leur performance énergétique et leur confort thermique.

L'architecture vernaculaire pourrait s'inscrire dans cette démarche et elle pourrait participer à atteindre cet objectif puisqu'elle présente de nombreux avantages à la fois environnementaux, sociaux et économiques.

Problématique de recherche

En Algérie, la construction de logements d'habitation est amenée à augmenter considérablement vu que l'évolution démographique est importante, ce qui engendre un problème de consommation énergétique croissant car c'est le secteur le plus énergivore. En absence de système de certification en termes d'efficacité énergétique, des études devrait être initiées pour permettre de tester de quantifier les aspects liés au confort thermique dans les nouveaux projets cela pourrait se faire selon les climats, secteurs, typologie ...

De plus, l'absence d'application de réglementations thermiques alliées à des contraintes économiques de coût de construction et des pratiques architecturales standardisées favorisant la réalisation de bâtiments totalement inadaptés aux climats. L'habitat traditionnel en Algérie a toujours fait preuve d'efficacité en matière d'adaptation aux conditions climatiques, spécialement dans les régions sahariennes. Dans notre cas, nous voulions prendre en charge deux paramètres le climat aride et la typologie architecturale.

Pour cela le choix de l'étude c'est porté sur Tafilelt qui est un nouveau ksar où le logement est inspiré de l'habitat traditionnel du M'Zab avec l'utilisation des principes de l'architecture bioclimatique vernaculaire.

Les questions qui se posent dès lors sont :

⁶ APRUE, Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie, [En ligne], <http://www.aprue.org.dz/PNME-11-13.html> (page consultée le 20 juillet 2019)

- Est que le recours aux techniques bioclimatiques de l'architecture vernaculaire peut assurer le confort thermique et l'efficacité énergétique dans le Ksar de Tafilelt ?

Questionnement secondaires :

- Quel est l'influence des éléments constructifs et leurs matériaux de construction sur son efficacité énergétique ?

Hypothèses

Hypothèse générale

- L'habitat du Ksar TAFILELT n'assure pas le confort thermique nécessaire.

Hypothèses spécifiques

- La configuration de la courette et du chebek peuvent être des sources d'inconfort.
- Les matériaux de construction composant la toiture du cas d'étude ont un impact négatif considérable sur le confort intérieur et l'efficacité énergétique.

Objectif

Notre travail de recherche se situe dans le contexte de minimisation ou de maîtrise de la consommation énergétique des bâtiments et l'amélioration du confort thermique des occupants dans le but de contribuer aux objectifs du programme national d'amélioration d'efficacité énergétique pour la préservation des ressources et la systématisation d'une consommation utile et optimale. Cela se fera à travers une étude qui vise à explorer les nouvelles stratégies inspirées des techniques vernaculaires de construction qui ont été adopté par l'architecture d'aujourd'hui dans les régions arides, entre autres le ksar de Tafilelt. Cette recherche se focalisera sur un cas d'étude qui sera diagnostiqué à travers ces matériaux et ces éléments architecturaux et architectoniques et leur impact sur l'aspect énergétique et le confort thermique. On visera l'amélioration de sa performance énergétique.

Méthodologie de recherche

Dans le cadre de cette recherche une certaine démarche méthodologique est plus que nécessaire pour donner une crédibilité scientifique et avoir une meilleure maîtrise du sujet. Globalement, le travail est divisé en trois 03 phases, à savoir : une phase de recherche théorique suivie par une deuxième phase de diagnostic et de vérification, puis la phase de simulation.

A. Phase de recherche théorique

Cette phase consiste en la constitution d'une base documentaire relative aux sujets traités. L'essentiel de cette première étape de la recherche sera consacré à la lecture d'un corpus de documents portant sur les thèmes du confort thermique et système constructif vernaculaire ainsi que sa contribution à l'efficacité énergétique. Le recours à l'historique des thèmes abordés, nous permettra la mise en place d'un support théorique permettant la compréhension des différents intérêts de la construction vernaculaire et l'élaboration d'un système d'évaluation, afin de tirer les meilleurs enseignements pour mieux agir aujourd'hui.

B. Phase de diagnostic et vérification

Pour cette deuxième phase, il nous faut le maximum de données concernant notre cas d'étude s'agissant de la maison de Tafilelt. Pour nous permettre de récolter les informations nécessaires au bon déroulement de notre recherche, un travail de terrain s'est imposé. A cet effet, nous avons fait appel à des techniques d'investigations telles que :

- Le diagnostic thermographique à l'aide d'une caméra thermique.
- Le relevé de la température de la période estivale.
- L'étude au laboratoire du matériau utilisé « pierre du site de Tafilelt » afin de déterminer ces performances thermo-physique.
- La vérification de conformité à la norme thermique algérienne.

C. Phase de simulation

Un travail de modélisation de notre cas d'étude suivi d'opérations des simulations thermodynamique portant sur les aspects du confort thermique et la consommation énergétique suivie d'une interprétation de résultats.

Structure du mémoire

Notre recherche se scinde en trois chapitres successifs, prélués d'une introduction générale.

Le premier chapitre présente un état de l'art général sur :

- Le confort thermique tel que défini par l'approche bioclimatique et les stratégies de son amélioration.
- Les performances thermiques en termes de systèmes d'isolation et types d'isolant puis les caractéristiques des matériaux de construction contribuant à l'amélioration du confort thermique.
- Un aperçu du contexte énergétique mondial et national concernant le secteur du bâtiment. En abordant la question énergétique, ainsi que les moyens mis en œuvre pour l'utilisation rationnelle de l'énergie et les différents politiques d'efficacité énergétique.
- Le savoir-faire vernaculaire contribuant au confort thermique et l'efficacité énergétique.

Le deuxième chapitre présente la partie expérimentale comprenant :

- Présentation du cas d'étude par son contexte puis son aspect bioclimatique.
- Diagnostic et vérification du cas d'étude
- Procédé d'intervention par une méthodologie de modélisation et de simulation traitant les paramètres influençant le confort thermique à l'intérieur du bâtiment et le calcul des besoins énergétiques pour le chauffage et/ou le refroidissement à satisfaire pour résoudre la problématique de cette recherche.

Le troisième chapitre :

- Présentation et interprétation des résultats obtenus de la simulation thermique dynamique.

Conclusion générale

- Permettant de vérifier nos hypothèses de départ.
- Perspectives et recommandations

Chapitre I : Etat de l'art

Introduction

La protection de l'environnement est un but prioritaire. Pour cela, l'homme n'a pas d'autre choix que de réduire sa consommation énergétique. Une façon d'y parvenir est de recourir à des méthodes passives et systèmes à faible consommation d'énergie pour maintenir le confort thermique dans les bâtiments. Des travaux de recherche ont fourni des données techniques pour permettre aux professionnels de choisir les matériaux de construction les plus appropriés aux projets, ceux qui sont les moins polluants, les plus éco-énergétiques provenant de ressources durables. Les progrès peuvent être rendus possibles par le déploiement des matériaux qui sont adaptés au climat local des bâtiments, sachant que les modèles traditionnels existent en tant que références valides.

L'architecture traditionnelle vernaculaire a toujours impliqué l'utilisation de ressources naturelles pour servir les besoins de l'homme qui, à son tour, s'est toujours adapté au lieu et au climat en cherchant le confort dans la construction. Le tissu à patio « ksour » constitue une solution intéressante répondant aux contraintes du climat. C'est pour cela, que nous avons essayé de mettre la relation entre l'architecture et le climat au sein d'une architecture traditionnelle vernaculaire. Il est donc pertinent dans ce chapitre, de mettre en exergue le savoir-faire ancestral, en étayant les principes de l'approche bioclimatique : *implantation, compacité, ventilation naturelle ...*, ensuite déterminer les paramètres du confort comme la *température, l'humidité, la vitesse de l'air...*, outre les dispositifs contribuant au confort thermique dans l'architecture vernaculaire du bassin méditerranéen ainsi que sa contribution en terme d'efficacité énergétique.

I.1L'habitat et les paramètres du confort thermique

I.1.1 Le confort thermique

I.1.1.1 Définition

« Le confort thermique est tout d'abord un phénomène physique soumis à une faible part de subjectivité »⁷, son appréciation dépend des êtres humains. Selon K. Slater (1985) le confort est un terme si nébuleux à définir et si subjectif, qu'un consensus universel sur son sens est presque impossible à obtenir.

⁷Izrad, J-L. Architecture d'été, Espagne, Edition Edisud, 1993, p07

Le confort thermique est défini comme « la satisfaction exprimée vis-à-vis de l'ambiance thermique du milieu environnant »⁸. Des conditions doivent être assurées pour que l'occupant de bâtiment ne se sente pas gêné à l'intérieur. Ces conditions se présentent sous forme de température moyenne interne stable et confortable du corps sans le gêner par excès de chaleur ou de froid.

Quant à la réglementation (ASHRAE)⁹, elle définit le confort thermique comme étant « un état d'esprit qui exprime la satisfaction de l'environnement thermique »¹⁰. Il contribue au bien-être et au confort en général et se définit selon plusieurs aspects : psychologique, physiologique et physique.

Les paramètres essentiels qui expriment le confort thermique global ne sont pas relatifs à l'ambiance mais à l'organisme. Ceci revient à la détermination de confort non seulement par les paramètres physiques de l'ambiance, mais aussi par la réaction du corps aux conditions ambiantes¹¹.

D'après les définitions citées ci-dessus, nous constatons que le confort thermique dépend de plusieurs paramètres.

I.1.1.2 Les paramètres liés au confort thermique

I.1.1.2.1 Les facteurs liés à l'environnement

Le confort thermique doit prendre en compte l'environnement relatif à l'individu. Celui-ci comprend trois paramètres sur lesquels peuvent agir les concepteurs :

A- La température de l'air :

Dans les conditions habituelles, l'homme assure le maintien de sa température corporelle autour de 36,7°C¹². La température de l'air est le facteur le plus influent sur le confort humain. Cette dernière intervient dans les échanges par convection et par évaporation qui sont des termes principaux du bilan thermique. Ceci dit, malgré les variations de température entre

⁸ Luc Schreiber, Serge Douville et Jérôme Lemaire (2002). Confort thermique à l'intérieur d'un établissement [PDF file], Commission de la Santé et de la Sécurité du Travail du Québec, disponible à : http://www.cnesst.gouv.qc.ca/publications/200/Documents/dc_200_16183_3.pdf (consulté le 07 août 2019)

⁹ A.S.H.R.A.E : American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers.

¹⁰ A.S.H.R.A.E Handbook fundamental. Chapitre 9: Thermal Comfort, éd Inch Pound., 2009, p170.

¹¹ Mansoury.Y, « Conception des enveloppes de bâtiments pour le renouvellement d'air par ventilation naturelle en climats tempérés Proposition d'une méthodologie de conception », Thèse de doctorat, Ecole d'Architecture, Nantes, 2003.

¹² Liébard.A et De Herde.A, Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques, éd Le Moniteur, 2005, p80.

l'été et l'hiver, et entre le jour et la nuit, l'enveloppe du bâtiment doit pouvoir maintenir la température à l'intérieur du bâti dans une fourchette de confort, ainsi que son homogénéité¹³.

Une température idéale de chaque espace dépend de l'activité qu'on y pratique, du moment de la journée et des préférences de chacun. L'idéal est d'éviter les grands écarts de température dans le temps entre le jour et la nuit ou entre les saisons.

B- L'humidité de l'air :

L'humidité de l'air peut être exprimée comme la pression de vapeur d'eau, l'humidité de l'air à l'intérieur des bâtiments influence le corps humain de façon directe et indirecte, pouvant provoquer l'inconfort, et la sensation de chaleur¹⁴.

L'humidité de l'air n'a pas un grand effet sur la sensation de confort thermique, si les températures d'air sont confortables, elle n'a d'effet significatif que lorsque elle est extrêmement haute ou extrêmement basse (sous 20%, l'air est trop sec et au-delà de 80%, trop humide)¹⁵. Ainsi, les spécialistes affirment que nous restons dans une zone de confort lorsque l'humidité de l'air est entre 20% et 80%¹⁶. Une humidité trop forte dérègle la thermorégulation de l'organisme car l'évaporation à la surface de la peau ne se fait plus, ce qui augmente la transpiration¹⁷.

C- Le mouvement de l'air :

Le mouvement de l'air est un paramètre très important du confort. Il affecte le corps humain de deux façons différentes. Tout d'abord il détermine l'échange de chaleur convectif du corps, et augmente l'évaporation à la surface de la peau¹⁸.

Selon A. Liebard, la vitesse de l'air influence le confort dès qu'elle est supérieure à 0.2 m/s¹⁹, à l'intérieur des bâtiments, cette vitesse est limitée, ne dépassant pas généralement la vitesse moyenne, sauf en cas de mauvaise conception du bâtiment ou du système d'aération. Lorsque

¹³Benhouhou.M,« l'impact des matériaux sur le confort thermique dans les zones semi-arides, cas d'étude :la ville de Djelfa», Mémoire de magister, Ecole polytechnique d'architecture et d'urbanisme EPAU ,Alger ,2012.

¹⁴Liébard, A.et De Herde, A. Op.cit p.84

¹⁵ Ibidem

¹⁶ Ibid. p29

¹⁷ Ibid. p84

¹⁸http://www.lesommer.fr/fileman/Uploads/Documents/Guide%20biotech/guide_bio_tech_confort_d_ete_pas_sif1.pdf

¹⁹ Liébard, A.et De Herde, A. Op.cit p 86

la vitesse de l'air est supérieure à 0.2 m/s, elle est tenue pour responsable de l'apparition d'inconforts du bâtiment, liés à la présence de courants d'air froids ou chauds localisés²⁰.

Les courants d'air, très agréables en été, puisqu'ils favorisent la transpiration, sont très pénibles en hiver, car ils facilitent les échanges thermiques entre le corps et l'air. C'est le principe de convection :

En été, des ouvertures bien conçues peuvent créer des courants d'air utiles et rafraîchissants.

En hiver, au contraire, il est préférable de les diminuer ou de les canaliser afin qu'ils ne balayent pas tout l'espace.

I.1.1.1.2 Les facteurs liés à l'individu

A- L'habillement :

La vêtue représente une résistance thermique aux échanges de chaleur entre la surface de la peau et l'environnement. Son rôle principal est de maintenir le corps humain à une température acceptable face au changement de température du climat extérieur (Froid, chaleur, rayonnement solaire...etc.). Le transfert de chaleur par conduction entre la peau et l'ambiance extérieure exprimé en «Clo» est complexe et implique des mouvements de convection interne et des phénomènes de radiation entre les couches de vêtements²¹. Les vêtements permettent de créer un microclimat sous-vestimental, La nature du tissu, la coupe des vêtements et l'activité du sujet influencent aussi ces échanges thermiques avec l'environnement.

B- L'activité :

L'activité est un paramètre qui définit le métabolisme de l'individu et qui est donc responsable de sa sensation thermique (la quantité de chaleur produite par le corps humain). Lorsque le corps est en mouvement, il s'ajoute à son métabolisme de base dans un état de repos, un métabolisme dit de travail, celui-ci correspond à l'activité et s'accroît avec l'intensité de l'activité en question. Dans le cas d'une très forte activité, une sensation d'inconfort chaud peut être ressentie, même en présence de conditions météorologiques très favorables²².

²⁰Zouzou.A, Mokhtari.K, « solution hybrides pour maintenir le confort thermique et visuel », Mémoire de magister, à l'université KASDI MEREBAH, Ouargla ,2015.

²¹Benhouhou.M, « l'impact des matériaux sur le confort thermique dans les zones semi-arides, cas d'étude la ville de Djelfa», Mémoire de magister, à l'école polytechnique d'architecture et d'urbanisme EPAU, Alger ,2012.

²² Mazari.M, « Etude et évaluation du confort thermique des bâtiments à caractère public : Cas du département d'architecture de Tamda (Tizi Ouzou) » mémoire de magister, université de Tizi-Ouzou, 2012

I.1.2 Le confort thermique dans l'approche bioclimatique

I.1.2.1 L'implantation

L'implantation judicieuse d'un édifice est la tâche la plus importante de l'architecte. Elle détermine l'éclaircement, les apports solaires, les déperditions, les possibilités d'aération, mais aussi les qualités de l'habitat en termes de communications, vues, rapports de voisinage²³

Une implantation idéale répond aux objectifs suivant :

- Le bâtiment doit être positionné de façon à minimiser les consommations énergétiques
- Améliorations de la ventilation et du refroidissement naturel des surfaces extérieures du bâtiment
- Contrôle et réduction du rayonnement solaire

La bonne implantation assemble les conditions climatiques, les contraintes urbaines et réglementaires.

- Les contraintes pratiques : accès, vis-à-vis, intimité, gain de place
- Les contraintes réglementaires : document d'urbanisme, règlement de lotissement
- Les contraintes naturelles : topographie, orientation, vents dominants, ensoleillement

Une conception durable résulte d'une orientation optimale, une implantation adéquate, un choix attentif d'une volumétrie ainsi des matériaux constructifs. Elle est qualifiée comme une meilleure solution pour l'économie de l'énergie par la construction des maisons mitoyennes.²⁴

I.1.2.2 Le zonage climatique

Une zone climatique regroupe des territoires aux températures et aux conditions météorologiques similaires (figure 1) . On distingue les zones polaires, chaudes et tempérées, elles-mêmes subdivisées en climats. L'expression « zone climatique » désigne aussi un dispositif de la réglementation thermique française.

Chaque zone climatique est caractérisée par des conditions naturelles et météorologiques semblables.

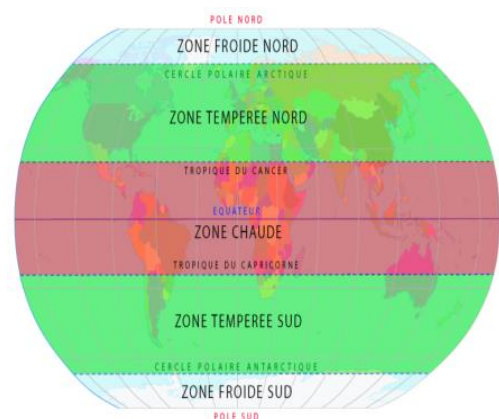


Figure 1: les zones climatiques de la terre (source : Saïd el khatri, 2003, « Manuel du cours de climatologie »)

²³Liébard, A. et De Herde, A. Op.cit p 63

²⁴Benharra Houda, « Impact de l'orientation sur la consommation énergétique dans le bâtiment. Cas des zones arides et chaudes- », mémoire de magister, Université Mohamed Khider Biskra, 2016, p74

Les zones climatiques rapprochent des régions du globe parfois éloignées géographiquement. Elles influencent directement la végétation et la faune locale. Au sein de chaque zone, voici les éléments qui permettent de définir précisément le climat :

-La température : La température de l'air usuelle est celle mesurée à l'ombre, à une altitude de 1m50. Car la température de l'air est maximale près du sol ; elle s'affaiblit en altitude avec un gradient fort près du sol. Ce gradient devient nul près de 1m50. La température du sol est supérieure à celle de l'air pendant le jour et inférieure pendant la nuit.

-Les précipitations (pluie et neige) : Les précipitations, avec la température, définissent le climat d'un lieu donné, influençant grandement la vie des êtres vivants ainsi que l'économie des pays. De ce fait, ce sont les précipitations par leur quantité, mais aussi leur nature physique (neige, graille, pluie), leur fréquence, leur durée de chute, leur intensité (10mm/heure ou 100mm/heure), et leur répartition dans le temps et dans l'espace qui caractérisent et influent sur l'absorption du sol, le drainage, les crues des cours d'eau, l'utilité agricole, la sécurité humaine.²⁵

-La vitesse des vents : La différence de pression entre deux zones voisines donne naissance au vent. Ce dernier provoque le déplacement des masses d'air transportant, par la même occasion, les caractères climatiques. Les vents forts, en contact avec la surface de l'eau et du corps humain favorisent le phénomène d'évaporation.

-Le nombre d'orages (La nébulosité) : La nébulosité est l'estimation de la couverture nuageuse : pendant le jour, elle intercepte une partie du rayonnement solaire, ce qui diminue l'échauffement de la surface terrestre (figure 2a). Au cours de la nuit, un ciel nuageux permet la réduction de la perte d'énergie de la Terre par rayonnement infrarouge et donc diminution du refroidissement de la Terre (figure 2b).²⁶

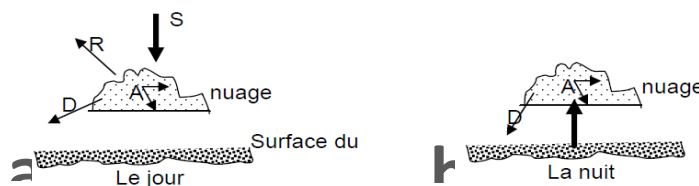


Figure 2 : (a et b): nébulosité jour et nuit
source : Saïd el khatri, 2003, « Manuel du cours de climatologie

²⁵ Saïd el khatri, 2003, « Manuel du cours de climatologie, IAS météo », centre national de recherches météorologiques, direction de la météorologie nationale, service études climatiques, B.P. 8106 casa-oasis; Casablanca.

²⁶ Ibidem.

-Le rayonnement solaire: Il désigne l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le Soleil. Il se compose donc d'ultraviolets, de la lumière visible, mais également d'ondes radio en plus de rayons cosmiques. Il se caractérise par la **durée d'insolation** et **l'intensité de la radiation globale**.²⁷

I.1.2.3 La forme de l'enveloppe (compacité)

La compacité d'un bâtiment est importante dans la conception climatique. L'objectif de le rendre compact est de limiter ces surfaces d'échange avec l'extérieur par rapport à son volume intérieur « V » (figure 3) cela pour minimiser les déperditions thermiques dus aux différences de température entre son intérieur doté des ambiances stable et la variabilité des conditions extérieures des climats tempérés, cet échange se fait principalement au niveau des surfaces « A » de l'enveloppe²⁸.

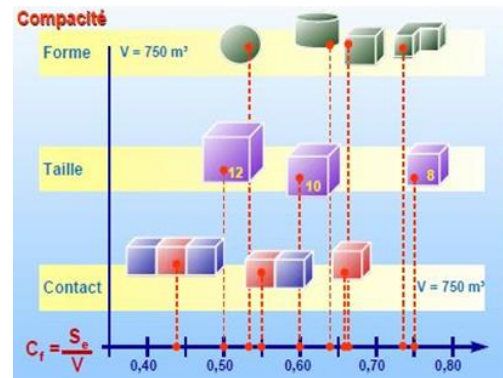


Figure 3 : le rapport forme taille et contact avec la compacité

Source : Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques

Le calcul se concrétise grâce aux formules suivantes :

- Compacité : $C = V/A$
- Coefficient de forme : $CF = A/V$

La compacité est meilleure lorsque le Coefficient de forme est plus faible. Ceux-là sont des critères d'évaluation thermique qui dépendent de plusieurs facteurs ils varient selon la forme, la taille et le mode contacte.

L'enveloppe présentant la plus faible surface de parois extérieures sera celle présentant le moins de déperditions thermiques²⁹. Cela aura une influence considérable sur la demande en énergie de chauffage des bâtiments, quel que soit le niveau d'isolation de la structure³⁰.

²⁷ <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/climatologie-rayonnement-solaire-13785/>

²⁸ A.Liebard.(2004).op.cit ,p 83

²⁹ Courgey, S et Oliva, J-P (1980) « La conception bioclimatique » Edition Terre vivante. Italie p 45

³⁰ S.M.A. Bekkouche et al.2013. "Influence of the compactness index to increase the internal temperature of a building in Saharan climate".Elsevier , N°66,page 686

I.1.2.4 L'orientation du bâtiment

L'orientation d'un bâtiment répond à plusieurs critères: les besoins en lumière naturelle, l'intérêt d'utiliser le rayonnement solaire pour le chauffage, ou au contraire la nécessité de s'en protéger pour éviter les surchauffes d'été, la protection du vent en hiver ou en tirer profit pour le rafraîchissement d'été (figure 4), sont autant de paramètres importants pour le choix de l'orientation³¹.

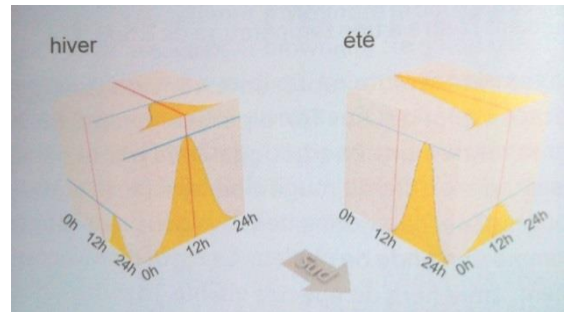


Figure 4 : L'orientation du bâtiment
Source : La conception bioclimatique

I.1.2.5 La ventilation naturelle

La ventilation dans un bâtiment est une fonction fondamentale, elle réalise l'échange d'air intérieur sans utilisation de ventilateurs mécaniques, de sorte que l'humidité intérieure soit régulée en respectant les normes de salubrité. Ce concept a pour fonctions principales, l'amélioration du confort thermique, l'évacuation des surchauffes, dues aux apports internes instantanés et la décharge thermique de la masse du bâtiment, surtout la nuit afin de diminuer les températures diurnes³². De nombreux travaux de recherche ont révélé que les solutions de ventilation naturelle du bâtiment ont un impact positif sur la performance thermique et le coût de consommation d'énergie³³.

Trois types de ventilation naturelle subsistent encore de nos jours :

1. Aération par les défauts d'étanchéité : le renouvellement de l'air intérieur des bâtiments d'habitation était principalement assuré par les défauts d'étanchéité des portes et des fenêtres.
2. Renouvellement d'air par ouverture des fenêtres.
3. Ventilation par tirage thermique : sans recours aux équipements qui consomment de l'énergie. Il existe au moyen de l'architecture, la ventilation naturelle qui utilise le phénomène

³¹ Ahmed Ali et Ait Kadi Salima, « performance thermique tu matériaux terre pour un habitat durable des régions aride et semi-aride : cas de Timimoune », mémoire de magister, Université mouloud Mammeri, TiziOuzou, 2012, p42.

³² Izard, J-L.(1993).op,cit p 54

³³ M.K. Cheriera et al .2018. Some solar passive concepts in habitat through natural ventilation case study: Dry climate in Algeria Ghardaia. Elsevier, Case Studies in Thermal Engineering 12, p 01

de convection permettant à l'air chaud de monter et de s'échapper par les sorties d'air hautes tandis que l'air froid est aspiré par les entrées³⁴.

I.1.3 Stratégies bioclimatiques pour améliorer le confort thermique

I.1.3.1 Le confort d'hiver

Les principes de la stratégie de chaud sont les suivants (figure 5) :

1-Capter : (rayonnement solaire) celui-ci dépend du climat, de l'orientation du bâtiment, de la nature des surfaces, des matériaux, de la topographie et de l'ombrage.³⁵

2-Stocker : La chaleur produite par le rayonnement solaire, au moment où elle n'est pas nécessaire, cette énergie, non utilisable, est stockée par les matériaux pour la restituer au moment de besoin.

3-Conserver : La chaleur accumulée en limitant les déperditions thermiques par une bonne étanchéité de l'enveloppe et sa forme dans un climat froid ou frais tout en assurant la qualité sanitaire de l'ambiance.³⁶

4-Distribuer : par restitution de la chaleur accumulée dans un matériau durant la période d'ensoleillement ou la thermo-circulation de l'air et produire le complément de chaleur nécessaire de façon efficace³⁷

I.1.3.2 Le confort d'été : Stratégie du froid (climatisation passive) celle-ci comprend les points suivants (figure 6) :

1-Protéger : Empêcher l'accumulation de la chaleur en protégeant les parois opaques du bâtiment avec la disposition d'écrans d'ombrage sur les parties vitrées, de façon permanente ou saisonnière (végétation).³⁸

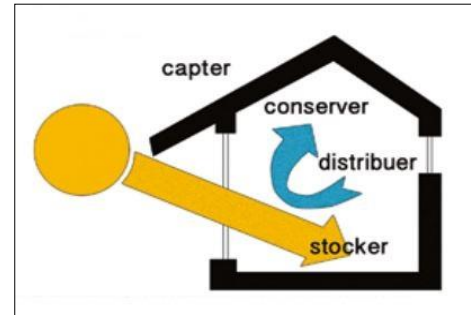


Figure 5 : concepts de la stratégie du chaud.
Source : Vincent Paillot et Étienne Chauvin et Julie Morvan

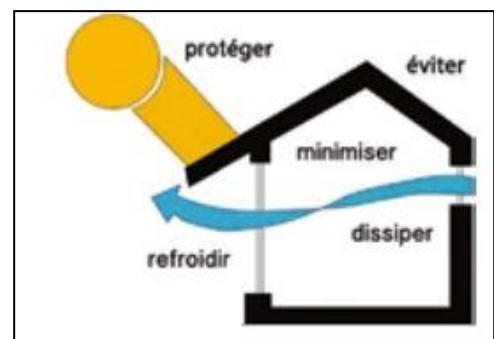


Figure 6 : concepts de la stratégie du froid.
Source : Vincent Paillot et Étienne Chauvin et Julie Morvan

³⁴ Conseil en Architecture, Urbanisme et Environnement (C.A.U.E), (2005) « La ventilation » in revue D'architecture d'urbanisme et d'environnement de l'Ariège, France. <http://www.caue.org/>

³⁵ A.Liebard.(2005).op.cit ,p 90

³⁶ Institut Bruxellois pour la gestion de l'environnement, Bruxelles environnement, Guide du bâtiment durable « développer une stratégie du chaud, assurer le confort d'hiver en limitant au maximum la consommation d'énergie », recommandations pratiques ENE02, 2016

³⁷ A.Liebard.(2005).op.cit. ,p 90

2-Minimiser l'apport de chaleur : Eviter les surchauffe en limitant les apports de chaleur internes.³⁹

3-Ventiler : (naturellement) Mettre à profit la pression du vent les flux d'air et le gradient de température (effet de cheminé) pour évacuer l'air surchauffé.⁴⁰

4- Refroidir : Utiliser des moyens naturels comme la ventilation nocturne ou augmentation de la vitesse de l'air, disposition de plans d'eau (évaporation), de la végétation, des conduites enterrées (puits canadiens)...etc.⁴¹

I.2 Les performances thermiques

I.2.1 L'isolation thermique

Au plan architectural, le concept de compacité règle les problèmes de déperditions thermiques (figure 7). L'avènement de l'isolation libère l'architecture de la contrainte de forme. Elle améliore le confort, permet des conceptions nouvelles et plus rationnelles des installations de chauffage ainsi qu'une exploitation moins coûteuse par la diminution de la consommation d'énergie.

L'isolation thermique assure la durabilité des constructions. Elle permet de mieux protéger les éléments du bâtiment contre les variations brutales de température. En pratique, il s'agit de limiter le flux de chaleur du plus chaud vers le plus froid. Il faut donc séparer ces deux milieux par un élément offrant une grande résistance à la transmission des calories c'est-à-dire ayant une faible conductivité thermique⁴².

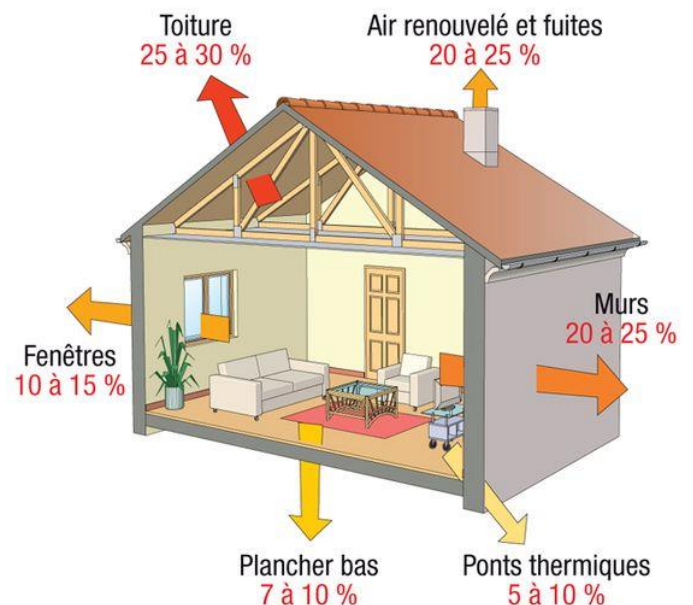


Figure 7 : pourcentages indicatifs des pertes de chaleur d'une maison non isolée.

Source : systemed.fr

³⁸Institut Bruxellois .op.cit.

³⁹A.Liebard. (2005).op.cit. ,p 90

⁴⁰ <https://energieplus-lesite.be/techniques/ventilation8/ventilation-intensive/la-ventilation-intensive-naturelle-d-ete/>

⁴¹Institut Bruxellois .op.cit.

⁴² J-M.BLOCH-LAINE.1977, Guide pratique de l'isolation thermique des bâtiments, ed EYROLLES, p 06

I.2.1.1 Systèmes d'isolation

I.2.1.1.1 Système d'isolation thermique par l'intérieur

L'isolation rapportée par l'intérieur est une solution simple à mettre en œuvre. Elle consiste à installer un isolant et une finition du côté intérieur des murs en contact avec l'extérieur ou des locaux non chauffés. En revanche cette technique a des lacunes en termes de ponts thermiques et aussi un autre inconvénient qui est l'emprise au sol. En effet, pour obtenir des performances correctes, la surface au sol occupée par l'isolant est importante, en résulte une diminution de la surface habitable.

I.2.1.1.2 Système d'isolation thermique par l'extérieur

Le principe de l'isolation par l'extérieur consiste à fixer l'isolant sur le côté extérieur du mur ce qui permet de préserver les surfaces intérieures. L'un des inconvénients à considérer est, la modification de l'aspect extérieur de la construction. Les points qui poseront le plus de difficulté et nécessiteront un soin tout particulier, sont les tableaux des ouvertures.

Rappelons que, grâce à l'isolation par l'extérieur, l'inertie du mur existant est conservée et optimisée puisque l'isolant, placé côté extérieur, évitera au mur de s'échauffer ou de se refroidir trop rapidement. De plus, l'ordre de positionnement des matériaux est respecté en ce qui concerne la résistance au transfert de la vapeur d'eau, qui doit s'effectuer du matériau le plus résistant vers le moins en ce résistant, voire de l'intérieur vers l'extérieur. Il n'y a alors pas de risque de condensation interne à la paroi⁴³.

I.2.1.2 Les différents types d'isolants

Plusieurs familles d'isolants coexistent sur le marché. Le classement peut se faire suivant le mode d'isolation :

A- Isolation par le vide (lame d'air) :

Le vide est le meilleur isolant possible car, en l'absence de matière, les déperditions de chaleur par conduction et par convection ne peuvent pas s'opérer. Seul le transfert par rayonnement est possible.

⁴³ J-M.BLOCH-LAINE, op.cit. , p252

B- Isolation par gaz piégé :

Le principe est le même que celui de l'air immobile mais dans ces isolants, l'air est remplacé par un gaz ayant un coefficient de conductivité thermique plus faible que celui de l'air. C'est le cas par exemple des mousses de polyuréthane, du polystyrène expansé et du polystyrène extrudé.

C- Isolants minces multicouches réflecteurs :

Ils sont également désignés comme films minces réfléchissants, isolants minces réfléchissants ou isolants thermo réflectifs. Ils sont constitués d'une ou plusieurs couches très fines de feuilles d'aluminium. La surface réfléchissante de ces feuilles permet d'améliorer la performance globale d'une paroi⁴⁴. Le principe de ce type d'isolant est la réflexion : ils agissent principalement sur les flux thermique par rayonnement⁴⁵.

D- Isolation par lame d'air immobile (entre parois) :

Ces isolants piègent l'air dans les petites cavités qui se trouvent entre leurs fibres. Or l'air immobile est un excellent isolant avec un coefficient de conductivité thermique très faible. A noter, tous les isolants à base de fibres : Minérales, Animales, Végétales et synthétiques.

1.2.1.3 Exemple d'isolant en phase d'expérimentation :

L'exploitation des palmiers dattiers produit annuellement une quantité importante de bois, estimée à environ 250000 tonnes pour l'Algérie seulement et presque deux millions de tonnes mondialement. Ces parties renouvelables de l'arbre sont actuellement très peu exploitées. Ce type de matériau est ainsi actuellement envisagé comme matériau d'isolation pouvant être utilisé dans le domaine du bâtiment.⁴⁶

La figure 8 présente une comparaison de la

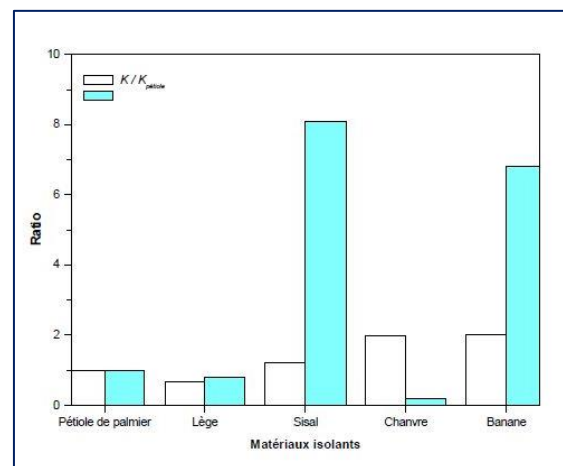


Figure 8 : Comparaison de la masse volumique et la conductivité thermique du bois de palmier dattier a d'autres matériaux naturels
Source : Boudjemaa AGOUDJIL et al

⁴⁴ Commission chargée de formuler des avis techniques sur les procédés, matériaux utilisés dans l'enveloppe du bâtiment (2004) « Performances des produits minces réfléchissants opaques utilisés dans l'enveloppe du bâtiment », Note d'information n° 1. France.

⁴⁵ Gallauziaux, T et Fedullo, D (2010) « le grand livre de l'isolation » Edition Eyrolles France, p 163

⁴⁶ Boudjemaa AGOUDJIL et al .2011. « Caractérisation thermophysique du bois de palmier dattier en vue de son utilisation en isolation thermique dans l'habitat ». Researchgate .p 1, 6, 7

conductivité thermique et la masse volumique du bois de palmier dattier à d'autres matériaux naturels utilisés actuellement pour la réalisation de composites ou de matériaux isolants dans le domaine du bâtiment. Cette étude expérimentale a démontré « *que le bois de pétiole de palmier dattier est un bon isolant thermique car il présente une conductivité thermique faible, $\lambda=0.058\text{W}\cdot\text{m}\cdot\text{K}^{-1}$ à pression atmosphérique. Cette valeur est proche ou inférieure à la conductivité thermique des autres matériaux isolants, le Sisal ($\lambda = 0,070 \text{ Wm}\cdot\text{K}^{-1}$; Kalaprasad et al. 2000), le liège ($\lambda = 0,039 \text{ Wm}\cdot\text{K}^{-1}$. Incropera et al, 2007), le chanvre ($\lambda = 0,115 \text{ Wm}\cdot\text{K}^{-1}$; Behzad et al, 2007), et la banane ($\lambda = 0,117 \text{ Wm}\cdot\text{K}^{-1}$; Paul et al, 2008). » Les résultats de ce travail expérimental ont montré que les parties renouvelables du palmier dattier (pétiole et grappe) constituent un bon isolant thermique présentant une faible masse volumique.⁴⁷*

I.2.2 Caractéristiques thermiques des matériaux

I.2.2.1 La conductivité thermique

La conductivité thermique est le flux de chaleur permanent et constant nécessaire exprimée en $\text{W}/\text{m}\cdot\text{C}^\circ$ traversant un mètre d'épaisseur de matériau pour élever sa température d'un degré.⁴⁸ Cette valeur permet de quantifier le pouvoir isolant de chaque matériau. Plus elle est faible, plus le matériau sera isolant.

I.2.2.2 La capacité thermique

La capacité thermique massique «C », ou C_p , d'un matériau permet de quantifier la possibilité qu'il a d'absorber ou de restituer de l'énergie. La capacité thermique est l'énergie qu'il faut apporter à un corps pour augmenter sa température d'un degré C'est une grandeur extensive (si on double la quantité de matière, on double la grandeur). L'unité s'exprime en Joules par kilogramme et par degré : $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$.

Quand on multiplie la masse volumique par la capacité thermique massique, on obtient la capacité thermique volumique « pC » du matériau, qui s'exprime en wattheures par mètre cube et par degré, $\text{Wh}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$. Cette grandeur détermine la capacité d'un matériau à absorber de l'énergie par unité de volume, grandeur plus parlante au niveau d'un bâtiment.⁴⁹

⁴⁷ Ibidem.

⁴⁸ Couasnet, Y(2007) « propriétés et caractéristiques des matériaux de construction » Edition Le moniteur, Espagne ,p123

⁴⁹ Dutreix, A(2010) « Bioclimatisme et performances énergétiques des bâtiments » Edition Eyrolles, France,p60

I.2.2.3 La résistance thermique

La résistance thermique R représente la résistance du matériau au passage de la chaleur. C'est donc l'inverse de la conductivité thermique, le R d'une paroi d'épaisseur e s'écrit : $R=e / \lambda$.⁵⁰

I.2.2.4 L'inertie thermique

Les matériaux de construction ont la capacité d'emmagasiner la chaleur ou la fraîcheur puis la restituer de manière diffuse à l'intérieur du bâtiment avec un décalage plus ou moins important dans le temps suivant son inertie thermique. Celle-ci peut être, l'allié ou l'ennemie du confort et de la consommation énergétique⁵¹. L'utilisation de la pierre peut offrir au bâtiment une inertie importante en favorisant une stabilité des températures⁵².

I.3 Architecture et énergie

I.3.1 Contexte mondial

Au niveau mondial, le secteur des bâtiments a des enjeux énergétiques importants, vu qu'à lui seul, il représente, autour de 32 % de la consommation d'énergie finale et contribue à hauteur d'un tiers environ des émissions de CO2.

Selon l'Agence Internationale de l'Energie (AIE), la consommation mondiale d'énergie va augmenter de 50 % entre 2004 et 2030, pour accompagner la croissance démographique et économique. Le taux de consommation diffère d'un pays à un autre, il est déterminé par les conditions climatiques, le taux de croissance économique et le développement technologique.

I.3.1.1 Consommation énergétique du Sud méditerranéen

Dans les pays du Sud méditerranéen, le bâtiment est responsable de plus d'un tiers de la consommation d'énergie (38 % en moyenne, variant entre 27 % et 65 % dans les PSEM (figure 09) pour l'énergie, et entre 21 % et 51 % pour l'électricité). Agir sur ce

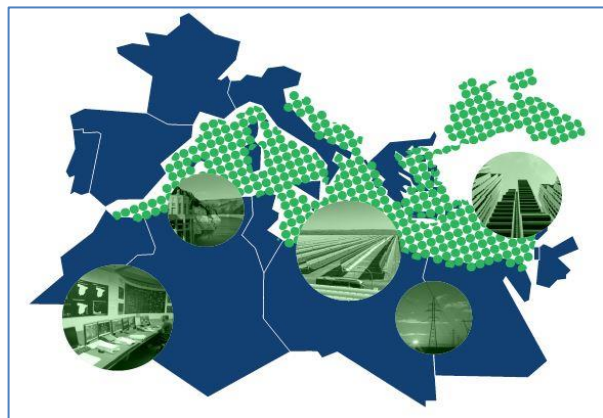


Figure 9 : pays du nord et de la sud méditerranéenne
source : Meet-MED 2019

⁵⁰Bousquet, L (2014) « Mise en œuvre des réglementations thermique et acoustique » Edition Le Moniteur. France, p15

⁵¹Gallauziaux, T et Fedullo, D (2010) « le grand livre de l'isolation » Edition Eyrolles France, page 42

⁵²M.Hamdani et al. L'impact de l'inertie thermique sur l'efficacité de l'isolation thermique intérieure d'un bâtiment en pierre située à Ghardaia .

secteur constitue donc un levier d'action significatif pour intervenir à la fois sur la demande (mesures d'efficacité énergétique) et sur l'offre (intégration d'énergies renouvelables) .

En ce qui concerne l'efficacité énergétique, certains pays ont des objectifs plus ambitieux que d'autres, en fonction des différents progrès réalisés dans le secteur de l'énergie dans les différents pays. Il est également important de noter que, dans certains cas, les objectifs sont définis pour des secteurs spécifiques, avec différents niveaux de détail. La Jordanie et la Tunisie sont les pays avec les objectifs les plus ambitieux. Tandis que la stratégie jordanienne vise à réduire la consommation d'énergie de 20% en 2020 et de 18% en 2030, la Tunisie s'est engagée à réduire sa consommation d'énergie de 17% en 2020 et 30% d'ici 2030. À l'inverse, l'Algérie, le Maroc et la Palestine ont les plus bas, une réduction de 9% d'ici 2030 pour l'Algérie, 5% d'ici 2020 et 20% d'ici 2030 pour le Maroc et 5% d'ici 2020⁵³.

I.3.1.2 Les systèmes de certification les plus utilisés

Rappelons que le choix des matériaux dans le projet d'architecture n'est qu'une partie de l'élaboration de la solution architecturale et constructive. Il est à noter que l'essentiel des gains énergétiques et environnementaux est donné par la conception de l'architecture et de ses dispositifs techniques, dans leur capacité à contrôler les consommations des ressources et à produire la qualité environnementale de l'édifice. Ce type de conception est codifié par des normes de certification qui définissent des objectifs à atteindre (figure 10).



Figure 10 : principaux systèmes de certification internationaux.

Source : www.bluebuildingfoundation.de

⁵³ Meet-Med "ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY STRATEGIES AND POLICIES", voir : www.meetmed.org

- **La certification HQE**

En France, l'association HQE (Haute qualité environnementale), créée en 1996, a défini 14 cibles dans un guide de conception traitant de l'approche environnementale des bâtiments. Depuis 2005, l'association HQE est un organisme de certification au même titre que les organismes américain et anglais que sont Leed et Breeam. Ces deux derniers valorisent les efforts réalisés avec des étoiles. Ces certifications permettent d'évaluer la performance environnementale des bâtiments tout au long de leur cycle de vie.

- **La certification LEED**

Le US Green Building Council (USGBC), crée par "David Gottfried, Rob Wattson" en 1993 c'est transformer en *Le Leadership in Energy and Environmental Design (LEED)* est un système de certification et un point de référence international nord-américain de standardisation de bâtiment haute qualité environnementale pour le design, la construction et l'opération des bâtiments durables à haute performance. Il fournit aux propriétaires et aux gérants des bâtiments, les outils dont ils ont besoin pour avoir un impact immédiat et mesurable sur la performance de leurs bâtiments.

- **La certification BREEAM**

La certification BREEAM (BRE Environmental Assessment Method), Royaume-Uni, impose une attention spécifique à la préservation de la biodiversité et à l'éco mobilité. Depuis 2008, HQE, BREEMAM et d'autres organismes internationaux se sont regroupés au sein d'un réseau international commun : SB Alliance. Ce réseau a pour mission de faire converger les méthodes BREEAM et d'évaluation de la qualité environnementale des bâtiments. Il est composé d'organismes internationaux chargés de l'évaluation et de la recherche ou intéressés par le développement durable des bâtiments et des territoires.⁵⁴

I.3.1.3 Diagnostic de performance énergétique (D P E)

Le diagnostic de performance énergétique est reconnu comme un dispositif essentiel pour atteindre les objectifs fixés par le Grenelle de l'environnement, il permet d'estimer la performance énergétique d'un logement à un instant donné, en évaluant sa consommation d'énergie et son impact en termes d'émission de gaz à effet de serre. C'est aussi une



Figure 11 : Comparatif des consommations des bâtiments

source : sdimmo.fr

⁵⁴ Hoyet Nadia (2013), « matériaux et architecture durable », éditions Baume-les-dames. France. P37

classification en fonction de valeurs de référence afin que les consommateurs puissent comparer et évaluer sa performance énergétique (figure 11).

Il définit sept classes, de la classe A la plus performante pour un logement le plus économe, à la classe G la moins performante pour un logement le moins économe. Classe A. Un logement économe d'une consommation d'énergie primaire pour le chauffage, l'eau chaude sanitaire et le refroidissement devant être inférieure à 51 kWh/m² /an. Classe G. Un logement énergivore d'une consommation d'énergie primaire devant être égale ou supérieure à 451 kWh/m² /an.⁵⁵

I.3.2 Contexte national

La consommation énergétique en Algérie a fortement augmenté ces dernières décennies. Cela est dû principalement à l'augmentation du niveau de vie de la population et du confort qui en découle, ainsi qu'à la croissance des activités industrielles. L'Algérie est confrontée aujourd'hui à l'augmentation de la consommation interne d'énergie. De 2004 à 2014, la consommation d'énergie a doublé, passant de 31.2 Mtep à 52 Mtep. La même tendance haussière est observée pour la production d'énergie électrique qui a augmenté pour la même période de 30.9 TéraWatt-heures à 64.2 TéraWatt-heures avec un taux de croissance de 7 % par an (figure 12). Les prévisions d'ici 2030 montrent que la production d'énergie primaire couvrira à peine les besoins du marché intérieur.

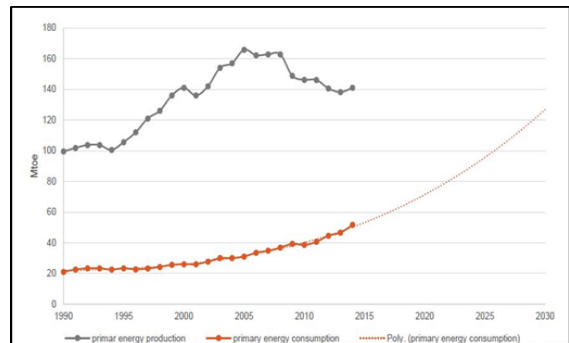


Figure 12 : l'énergie produite et consommée en Algérie. Source : APRU

I.3.2.1 Energie et état de consommation en Algérie

Selon le rapport qui a été publié par l'Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie (APRUE), sur la consommation énergétique finale de l'Algérie, pour l'année 2005. Le secteur du bâtiment est celui qui consomme le plus en termes de consommation énergétique finale par rapport

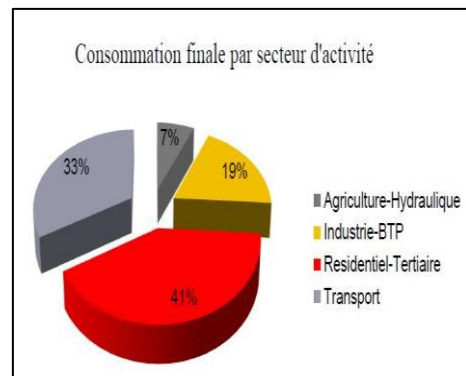


Figure 13 : La consommation énergétique en Algérie par secteur d'activité Source : APRU

⁵⁵https://www.isover.fr/sites/isover.fr/files/assets/documents/isolation_thermic

aux secteurs de l'industrie et celui des transports (figure13) Cette consommation a triplé durant les trois dernières décennies et il est prévu sa multiplication par le même facteur d'ici les horizons 2025. Cela est dû à la forte augmentation de la demande.

I.3.2.2 Politique nationale d'efficacité énergétique

L'Algérie a lancé un processus de transition énergétique qui lui permettra de protéger son économie et d'assurer sa sécurité énergétique à long terme. Cette transition est mise en place à travers deux programmes considérés comme priorité nationale. Le premier concerne l'application de mesures d'efficacité énergétique, tandis que le second concerne le développement des énergies renouvelables qui prévoit l'installation d'une capacité de 22 000 MW d'ici 2030. Le programme d'efficacité énergétique cible trois secteurs qui impactent fortement sur la demande d'énergie. Il s'agit des secteurs du **bâtiment**, du **transport** et de **l'industrie**. Le programme qui se déploie sur une durée de 15 années vise à atteindre une économie d'énergie globale de l'ordre de 60 Mtep d'ici 2030 et 30 Mtep au-delà de 2030. Les deux programmes, s'ils arrivent à être concrétisés, vont permettre une réduction progressive de la croissance de la demande d'énergie, et l'intégration des énergies renouvelables dans le mix énergétique à hauteur de 40%, les objectifs principaux de ces programmes sont :

- Approvisionner en priorité le marché national pour satisfaire les besoins sans cesse croissants.
- Préserver les ressources énergétiques pour garantir l'indépendance énergétique future du pays.
- Exporter pour assurer le financement du développement socio-économique du pays.

I.3.2.3 Programme national de maîtrise d'énergie dans le secteur du bâtiment

Ce programme national (figure 14) met en vigueur des normes et exigences d'efficacité énergétique qui sont :

- l'isolation thermique dans les bâtiments neufs qui seront fixées par voie réglementaire.
- Une réglementation thermique n'ayant pas le caractère obligatoire de l'isolation thermique des

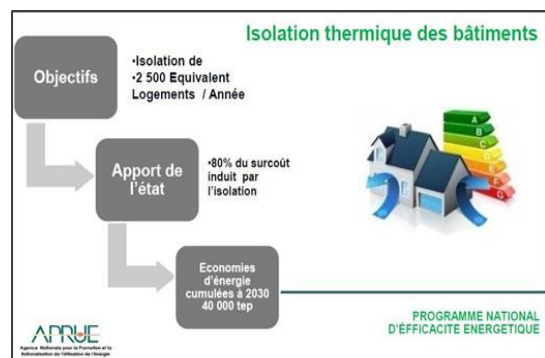


Figure 14 : programme national d'efficacité énergétique en Algérie.

Source : APRU

bâtiments individuel et cela à titre transitoire.

La réglementation thermique algérienne actuellement en vigueur est le DTR C3.2/4, la vérification de la conformité d'un bâtiment vis-à-vis de cette nouvelle réglementation doit se faire pour la période d'hiver et pour la période d'été séparément.

La Vérification d'hiver, le DTR stipule que pendant la période de chauffage, les déperditions calorifiques par transmission à travers les parois doivent être inférieures à une valeur de référence. Pour la période d'été, les apports de chaleur à travers les parois opaques (APO) et vitrées (AV) calculés à 15 h au mois de Juillet (considéré comme le mois le plus chaud de l'année) doivent être inférieurs à une limite appelée 'Apport de Référence'.⁵⁶

I.3.2.4 L'outil de la simulation numérique du confort thermique en Algérie (RTEA)

Une coopération composée d'experts nationaux appartenant à différentes institutions, telle que CDER, CNERIB et experts internationaux de la coopération allemande au développement (GIZ⁵⁷) a été créé en 2012, dans le but de construire le nouveau siège d'une banque régionale à Batna en intégrant les mesures d'efficacité énergétique. Pour atteindre cet objectif, un document cite 14 critères d'évaluation de l'efficacité énergétique dans le bâtiment tels que la protection thermique en été, les besoins en énergie en hiver selon les saisons, les émissions de CO₂, l'utilisation des énergies renouvelables et la puissance électrique⁵⁸.

Ce document devait être une référence pour les projets futurs en termes de réglementation thermique algérienne et performance énergétique du bâtiment à l'aide d'un dispositif d'évaluation thermique. Ainsi, un logiciel de calcul thermique nommé CTBAT a été développé sous la direction de l'APRUE.

Ceci permet de vérifier la conformité des projets de construction de bâtiments aux normes algériennes (DTR C3-2 et DTR C3-4). En effectuant les calculs thermiques nécessaires sur un site web⁵⁹ libre d'accès sous forme d'interface graphique, qui permet de décrire les différents composants d'un bâtiment et d'effectuer le calcul thermique.

⁵⁶ K. Imessad et al.2017. « Mise en application de la nouvelle réglementation thermique algérienne du bâtiment », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 20 N°4, p 591

⁵⁷ GIZ : La Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit

⁵⁸ http://portail.cder.dz/IMG/article_PDF/article_a4969.pdf

⁵⁹ <http://v2.ctbat.net/>

I.4 L'architecture vernaculaire dans le contexte chaud et aride

« L'éloge du simple et du vernaculaire n'est nullement un appel à l'immobilisme. Avoir l'humilité d'apprendre des bâtisseurs anonymes qui nous ont précédés ne nous dispense pas de jeter un regard critique sur ce savoir-faire traditionnel, ni d'intégrer des pratiques contemporaines. C'est à ce prix, et à condition de faire évoluer l'enseignement en ce sens, que l'on pourra construire un habitat moderne, adapté aux défis de notre temps et restant en accord avec les traditions locales et le contexte culturel. »⁶⁰

I.4.1 Dispositifs de l'habitat vernaculaire contribuant au confort thermique

I.4.1.1 Fonction climatique du patio

Pour assurer le confort d'un habitat, il a fallu avant tout, se protéger des radiations solaires et obtenir les meilleures conditions de ventilation cela a été atteint selon des dispositifs vernaculaires.

« Le patio permet de passer constamment du soleil à l'ombre, de l'humide au sec. Dans un pays où le climat est contrasté avec un soleil très chaud, une intensité lumineuse violente et air froid ou humide, les maisons, fermées aux regards, mais ouvertes au vent offrent des pièces pleines d'ombre et de courants d'air »⁶¹.

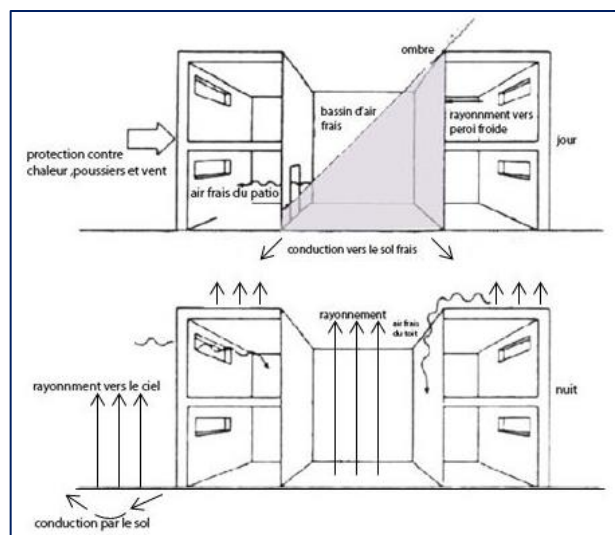


Figure 15 : la fonction climatique du patio
Source: climatic Design in the Arab Courtyard Houses

Le patio joue un rôle régulateur du climat à l'intérieur de la maison. En effet, la ventilation des pièces ouvertes sur celui-ci, est assurée par la fraîcheur captée durant la nuit, et ce, à travers l'effet cheminée (figure 15). Cette ventilation dépend des proportions du patio et de son orientation par rapport aux vents dominants. La configuration spatiale du patio permet d'ombrager la majeure partie de ses parois intérieures durant la journée, ce qui permet d'abaisser la température de l'air.

⁶⁰ Aurélie Vissac, « matière en fibres », Mémoire du Diplôme de Spécialisation et d'Approfondissement DSA – Architecture de Terre, ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE GRENOBLE, 2012-2014

⁶¹ PETONNET C, «Espace, distance et dimension dans une société musulmane», L'Homme, Année 1972, Volume 12, Numéro 2, page 53

Le rôle climatique du patio a fait l'objet de nombreuses recherches, notamment celles de (Fathy 1986) et (Bahadori 1978) qui avançaient que l'introversion du patio joue de multiples rôles dans les régions arides comme la création du microclimat (Supic 1988), la possibilité d'adoption des stratégies de refroidissement d'espaces, la protection contre les vents, le sable et le soleil. Selon ces recherches, le climat et le facteur le plus déterminant de la forme architecturale. Au cours des deux dernières décennies, ce type de recherches qualitatives réalisées surtout sur le répertoire vernaculaire a permis d'enrichir considérablement les connaissances dans ce domaine et de reconstruire avec une précision croissante, les phases principales, les dynamiques et les contextes environnementaux de l'évolution du patio. Par conséquent, le patio est à la fois protecteur contre le soleil et collecteur de soleil, or il n'y a pas vraiment de contradiction dans ce postulat car les propriétés climatiques du patio viennent de ses variables ; les dimensionnements du patio, sa situation dans la maison, son orientation par rapport au soleil, sa profondeur dans la maison, et en fin, la présence et l'absence de l'eau et de la végétation.

I.4.1.2 Les tours à vents « Melkef »

Le principe des malqafs est double : capter l'air à une hauteur suffisante pour échapper aux poutres et avoir une vitesse d'air suffisante pour générer un flux (figure 16), puis humidifier pour le refroidir par évaporation. Cela se fait au moyen d'échangeurs qu'Hassan Fathi appelle des déflecteurs où l'air s'écoule en cascade à travers des mailles métalliques et des bacs remplis de charbon de bois. Dans certains cas, le système peut être complété par un bassin avec ruissellement.

Dans d'autres pays, les "tours à vent" ("bodgir") se substituent aux malqafs: elles sont visibles au Caire, à Oman, Muscat, Bagdad, Dubaï ou Hyderabad (Pakistan). Elles peuvent être associées elles aussi à des procédés d'humidification de l'air⁶²

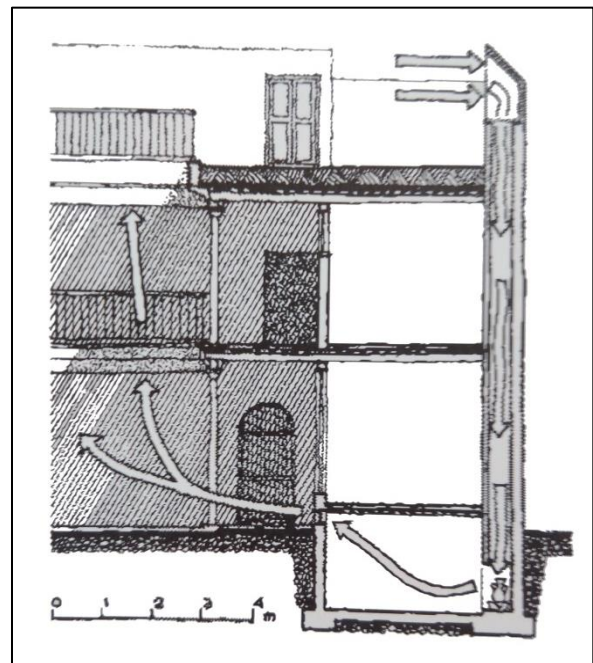


Figure 16 : la fonction climatique du melkef.
Source : Architecture d'été

⁶²Izrad, J-L, op.cit. ,p 65-66

I.4.1.3 Le moucharabieh

Le moucharabieh est un dispositif d'ouverture poreux, généralement en bois précieux, avec décoration et qui permet une ventilation naturelle ; ce sont ces petits orifices (figure 17) qui lui donnent sa fonction climatique, sociale et esthétique. Il permet aux personnes qui sont à l'intérieur de voir à l'extérieur sans être vues. Il se présente souvent en saillie afin de profiter de trois



Figure 17 : Moucharabieh
source : André Ravéreau

façades augmentant ainsi la surface de contact avec le vent pour ventiler plus efficacement⁶³. En effet, la réduction de la surface produite par ce dernier, accélère le passage du vent. Ce dispositif peut être complété par des surfaces humides telles que la jarre, ce qui permet de rafraîchir l'air par l'évaporation de l'eau. L'air extérieur entre par le bas de l'ouverture se réchauffe, puis ressort par le haut de l'ouverture⁶⁴.

I.4.2 Exemple d'habitat vernaculaire algérien (Modèle mozabite)

Le confort thermique est un des éléments les plus recherchés dans la maison mozabite et un de ses succès, car "la température ambiante intérieure y dépasse rarement les 30 °C en été, et ne descend pas en dessous de 15 °C la nuit en plein hiver, le tout sans technologie complexe"⁶⁵. Cela est rendu possible grâce à un ensemble de dispositifs passifs et une organisation particulière de l'utilisation des espaces :

a. L'orientation :

Les maisons sont orientées au Sud-est. Il est connu que l'orientation optimale d'une façade est le sud géographique⁶⁶, car celle-ci reçoit le plus de rayonnement solaire durant l'hiver⁶⁷. Le soleil étant bas dans le ciel, il pénètre profondément dans la maison et la chauffe.

⁶³ Ait Kaci, Z. 2014. « L'apport de la cage d'escalier dans la ventilation naturelle : simulation thermo aéraulique d'un habitat collectif en Algérie ». mémoire de Magister, Option Architecture et Développement Durable, TiziOuzou, p67.

⁶⁴ Atekamina, 2012, "pour une réinterprétation du vernaculaire dans l'architecture durable, cas de la casbah d'Alger", mémoire de magister, TiziOuzou, mouloud Mammeri, p57.

⁶⁵ Armand Dutreix, « Bioclimatisme et performances énergétiques des bâtiments », Ed. Eyrolles, Paris 2010, p.28.

⁶⁶ Samuel Courgey et Jean-Pierre Oliva : La conception bioclimatique des maisons confortable et économiques, Ed. Terre vivante, Mens 2006, p. 130.

⁶⁷ Ibid., p44

Cela est très bénéfique, vu l'absence d'un système de chauffage dans la maison mozabite. En été, la façade sud reste la meilleure orientation, car elle est la plus facile à protéger (le masque, dans notre cas est la galerie appelée « ikomar » dont le rôle est d'atténuer l'intensité des rayons solaires par l'ombre qu'elle procure et garantir un espace de circulation assez confortable), le soleil étant haut dans le ciel, donc ses rayons perpendiculaires n'entrent pas à l'intérieur de la maison qui reste protégée.

b. La forme de l'enveloppe :

La maison mozabite, n'a pratiquement pas de façade à part celle de l'entrée, cette fermeture de la maison sur elle-même entraîne une limitation "des fluctuations du confort intérieur dû aux phénomènes extérieurs"⁶⁸. En outre, la mitoyenneté "permet un minimum de perte de chaleur en hiver et un minimum de gain en été"⁶⁹. En résumé, le principe régnant dans la maison mozabite est d'avoir le minimum de contact avec l'espace extérieur.

c. Les ouvertures :

La maison mozabite est introvertie sur son patio couvert. Les fenêtres sur l'extérieur sont pratiquement inexistantes sinon limitées aux justes besoins de lumière⁷⁰. La seule grande ouverture qui existe, c'est la porte. Elle est laissée généralement ouverte pour assurer la ventilation. Le peu d'ouvertures existantes est généralement localisé en haut dans le mur pour renforcer la ventilation. Si le besoin de plus de lumière s'impose, les mozabites utilisent les puits de lumière. Une manière d'éclairage indirect introduite dans la volonté de bénéficier de la lumière naturelle sans autant être exposé aux rayons solaires.

d. La ventilation naturelle :

Une fois la nuit tombée au M'Zab, la température de l'air extérieure étant plus basse que celle de la maison, il suffit alors d'ouvrir le "chebek" du patio et les quelques ouvertures percées dans le mur pour activer une circulation de l'air par effet thermosiphon⁷¹. La position du "chebek" dans le point le plus haut permet l'évacuation rapide de l'air chaud vu que celui-ci a tendance à monter contrairement à l'air froid qui descend. Le patio reste de ce fait l'endroit le plus frais à l'intérieur de la maison⁷². L'autre intérêt de la ventilation c'est la décharge de

⁶⁸ Chabi Mohammed, « Le Ksar de Tafilelt dans la vallée du M'Zab, une expérience urbaine entre tradition et modernité ».

⁶⁹ Ibidem.

⁷⁰ André Ravereau : Le M'Zab une leçon d'architecture, Ed. Actes SudSindbad, Arles 2003, p. 139.

⁷¹ Pierre Fernandez et Pierre Lavigne : op. cit., p. 263.

⁷² Armand Dutreix : op. cit, p. 28.

l'énergie amassée dans les murs. Ces derniers étant de forte inertie thermique, il est indiqué de les ventiler surtout durant la nuit quand la température est relativement basse.

e. L'humidification de l'air :

Malgré l'ingéniosité des mozabites dans les techniques d'adaptation climatique, certes, ils ne disposent pas d'un système d'humidification tel le "malquaf". Cela est dû probablement à la proximité de la palmeraie du ksar, qui crée un microclimat. En revanche dans les périodes de canicule, les occupants disposent de jarres d'eaux poreuses disposées devant les entrées d'air. L'eau absorbe une partie de la chaleur de l'air et le rafraîchit.

f. Le patio:

Le patio permet un éclairage zénithal minimal des pièces du rez-de-chaussée. Il est aussi utilisé comme "un régulateur climatique"⁷³. En été, "le chebeq" est couvert durant la journée pour empêcher les rayons solaires de pénétrer à la maison. Pendant la nuit, il est ouvert pour permettre la sortie de l'air chaud de la maison et la pénétration de l'air extérieur plus frais, dans ce cas il joue le rôle d'une "cheminée de ventilation"⁷⁴. En hiver c'est l'inverse qui se produit, "le chebeq" est fermé durant la nuit pour se protéger du froid et ouvert le jour pour tirer profit de la chaleur du soleil. Le patio participe aussi à l'accélération de la ventilation ; celle-ci est assurée grâce aux courants d'air qui s'installent entre l'ouverture du patio et la porte d'entrée ouverte ou les quelques ouvertures aménagées en façade.

g. L'inertie thermique des parois :

Les mozabites ont su utiliser cette caractéristique pour maintenir une température moyenne journalière et effacer les fluctuations extrêmes du climat. Grâce à la conception de murs qui pouvaient absorber le maximum de chaleur durant la journée et éviter le réchauffement de l'ambiance intérieur. La nuit, en favorisant la ventilation par le "chebeq", les murs refroidissent et chargent leur masse de fraîcheur en restituant cette chaleur lorsqu'il fait plus froid⁷⁵. Une fois le jour levé, la fraîcheur reste piégée à l'intérieur grâce à l'inertie élevée. Les murs servent d'accumulateurs et de transfert d'énergie entre le jour et la nuit en limitant les variations de températures de l'air ambiant⁷⁶. Pour cette raison, le rez-de-chaussée et la cave

⁷³ Ammar Bouchair : Decline of urban ecosystem of M'Zab valley.

⁷⁴ Mohammed Chabi et Mohammed Dahli : Une ville nouvelle saharienne sur les traces de l'architecture traditionnelle. www.ummo.dz

⁷⁵ Armand Dutreix : op. cit., p. 28

⁷⁶ Ibid, p.29.

sont les plus frais le jour, car, non seulement ils bénéficient de l'inertie des murs, mais aussi de celle du sol.

h. Matériaux de construction :

Le matériau, généralement, utilisé pour la construction d'une maison est la pierre. Une roche extraite souvent du sol même d'implantation, il y a également les briques crues en terre argileuse, combinée parfois, avec de la paille pour une meilleure cohésion. Ils utilisent aussi la "Tibchent", un plâtre typique de la région, obtenue d'un gisement de gypse disponible à environ 1m de profondeur. Ce matériau est caractérisé par sa couleur blanche grisâtre, utilisée comme enduit et liant. Pour la construction, les mozabites utilisent également la chaux, dont la matière première est disponible de manière abondante dans la région. Son extraction est facile, vu sa disponibilité dans les couches superficielles⁷⁷. Ils utilisent aussi le bois, principalement celui du palmier, mais aussi d'autres types disponibles dans les palmeraies comme l'acacia, le bois des arbres fruitiers. Il est utilisé "entièrement"⁷⁸, avec rationalité et exceptionnellement pour la structure et les portes d'entrée.

I.4.3 L'efficacité énergétique de l'habitat vernaculaire

I.4.3.1 Matériaux contribuant à l'efficacité énergétique

Les pierres naturelles constituent des ressources inestimables pour la création de bâtiments véritablement écologiques. Le leadership en matière de conception énergétique et environnementale (LEED) met l'accent sur la certification dans six catégories d'amélioration de l'environnement : Sites durables, Efficacité de l'utilisation de l'eau, Énergie et atmosphère, Matériaux et ressources, qualité de l'environnement intérieur, innovation et design qui peuvent contribuer à des points dans plusieurs de ces catégories. L'optimisation des performances énergétiques peut être atteinte à travers l'utilisation d'une pierre naturelle ayant une bonne masse thermique (capacité d'un matériau à stocker de la chaleur et à la libérer lentement). Selon le contexte climatique, l'utilisation de pierres peut influencer positivement sur la température de l'air ambiant intérieur et ainsi contribuer à l'efficacité énergétique. Le nombre de points gagnés dépend de la masse thermique du type de pierre utilisé.⁷⁹

⁷⁷ Site officiel de l'OPVM, voir, <http://www.opvm.dz>

⁷⁸ Ibidem.

⁷⁹ Walter Leal Filho & al, "Implementing Campus Greening Initiatives: Approaches, Methods and Perspectives", ed springer ,2015 ,Switzerland p 31,32

Dans un monde où l'efficacité énergétique reste un défi essentiellement urbain, (Francesca POGGI et al) montre que les murs en pierre naturelle de l'architecture vernaculaire offrent des niveaux optimaux de performances énergétiques en matière de logement rural.

La promotion des matériaux locaux et des techniques de construction traditionnelles représente un vecteur stratégique pour garantir de bonnes performances énergétiques du logement rural permettant de réduire la consommation de ressources et les émissions de gaz à effet de serre. L'efficacité énergétique joue un rôle clé dans la qualité de «vie en milieu rural», ce qui constitue un aspect social essentiel à prendre en compte dans le contexte de communautés durables⁸⁰

I.4.3.2 Performances énergétiques du patrimoine architectural vernaculaire

(l'exemple Turque de Mardin)

Situation géographique et climatologie :

Mardin est situé dans le sud-est de l'Anatolie et a pour coordonnées 37,31 ° de latitude nord et 40,73 ° de longitude est (figure 18). Le climat local présente des caractéristiques de zone chaude-aride avec des étés chauds et secs et des hivers froids de fortes précipitations. En été, l'intensité du rayonnement est si élevée que la température de la surface du sol pourrait monter à 70 ° C. La différence de température diurne



Figure 18 : Situation géographique de Mardin

source: newsimg.bbc.co.uk

est élevée et la température de surface chute à 15 ° C la nuit. Les montagnes du Nord ont une incidence sur le climat, protégeant la région des vents du nord et procurant des brises en été⁸¹.

⁸⁰ Francesca POGGI et al .2015.Natural stone walls in vernacular architecture: what contribution towards rural mzab concept? .BSGLg, 65,P 64

⁸¹ İrem SÖZEN et Gül KOÇLAR ORAL, “Evaluation of Parameters Affecting Energy Efficiency of Vernacular Mardin Houses: A Case Study”, MEGARON 2019,p 03

Model d'habitation :

La vieille citadelle est située au sommet de la colline de Mazi et les habitations sont denses et en gradin, sur le bas des pentes (figure 19). L'emplacement de ces habitations permet la création d'unités individuelles et de terrasses pour accéder au soleil. Les vents catabatiques sont réconfortants pendant les chaudes journées d'été. Durant la journée, l'air chaud monte, tandis que l'air frais de la montagne s'abaisse, créant un flux d'air constant. Durant la nuit, l'air frais descend des hauts plateaux vers les fonds de la vallée et crée une brise nocturne⁸².



Figure 19 : La ville citadelle de la Mardin.
Source: Evaluation of Parameters Affecting Energy Efficiency of Vernacular Mardin Houses: A Case Study

Les bâtiments sont très densément installés minimisant l'accès au rayonnement solaire sur l'enveloppe du bâtiment (figure 20). Les bâtiments sont effectivement blindés des côtés est et ouest. Les espaces extérieurs de la colonie sont pour la plupart ombragés par des bâtiments et murs de la cour. Les rues principales sont orientées est-ouest. Les Solutions vernaculaires telles que les rues couvertes appelées «Kabaltı» sont efficaces pour créer des espaces extérieurs ombragés et confortables. Les maisons sont construites en ligne en offrant avec le paysage un motif homogénéisé. Les rez-de-chaussée sont ouverts jusqu'à la rue tandis que les étages supérieurs offrent une vue sur la plaine de Mardin.



Figure 20: vue aérienne ville de Mardin, Turquie
source: Evaluation of Parameters Affecting Energy Efficiency of Vernacular Mardin Houses: A Case Study

⁸² İrem SÖZEN et Gül KOÇLAR ORAL, "Evaluation of Parameters Affecting Energy Efficiency of Vernacular Mardin Houses: A Case Study", MEGARON 2019, p 03

Forme et matériaux de construction :

La forme des habitats est compacte pour minimiser l'interaction avec les conditions extérieures difficiles. Une forme compacte de la cour est utilisée dans la plupart des modèles (figure 21). Des espaces ouverts et semi-ouverts sont créés autour de celle-ci qui est dotée d'un plan de verdure, d'ombrage et d'eau créant un microclimat en abaissement de la température du sol et du rayonnement.

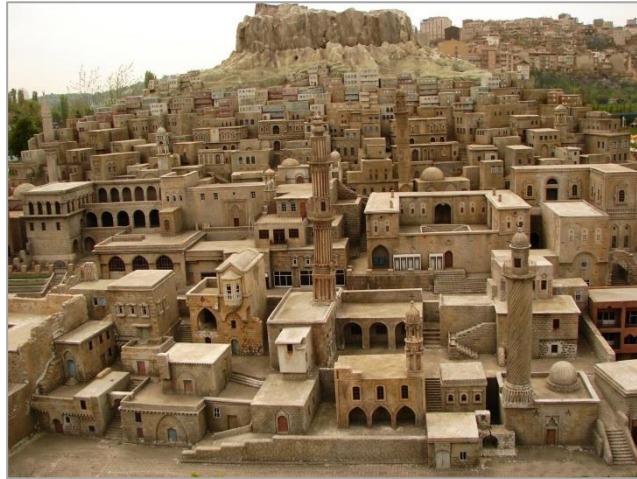


Figure 21: La ville de Mardin

source : https://medomed.org/featured_item/mardin-cultural-landscape-turkey/

Presque tous ces bâtiments sont souterrains sur côté nord. L'implantation est faite sur des roches calcaires facilement taillées. Les maisons sont construites en un, deux, trois ou quatre étages qui sont déterminés par la différence de niveau entre le point de départ et d'arrivée du pâté de maisons figure 20. La hauteur de l'étage varie de 3 à 5,5 mètres.

La nuit, l'air frais s'accumule dans les cours et comme elles sont protégées des vents chauds et arides et des radiations, les maisons peuvent profiter de cette fraîcheur jusqu'à l'après-midi. Les cours sont également importantes pour la lumière du jour et la ventilation. Les fenêtres des maisons sont petites, sur les façades sur rues et plus importantes sur façade cote cour. Ce schéma de fenêtre permet une ventilation naturelle efficace et minimise les radiations. L'enveloppe du bâtiment est généralement fortement construite avec pierre naturelle disponible localement. C'est une pierre calcaire jaune et tendre facile à mettre en forme. Elle a une densité inférieure et un coefficient de transmission thermique inférieur au béton, granit et grès. Les épaisseurs de paroi varient entre 0,80-2,0 m au rez-de-chaussée et 0,75-0,90 m en haut planchers⁸³.

Une recherche a été faite par (İrem SÖZEN et Gül KOÇLAR ORAL) sur les maisons vernaculaires à Mardin en comparaison avec les maisons contemporaines ces maisons vernaculaires ont été évaluées sur plusieurs paramètres sous différentes échelles, en terme de demande d'énergie annuelle pour le chauffage et refroidissement. Cette recherche est

⁸³ İrem SÖZEN et Gül KOÇLAR ORAL, "Evaluation of Parameters Affecting Energy Efficiency of Vernacular Mardin Houses: A Case Study", MEGARON 2019, p 04

importante pour l'interprétation de paramètres en termes de la contribution à l'efficacité énergétique.

Les résultats révèlent que l'enveloppe massive du modèle vernaculaire « cas de base » (figure 22) contribue significativement à réduire la demande de refroidissement, mais aussi de chauffage.

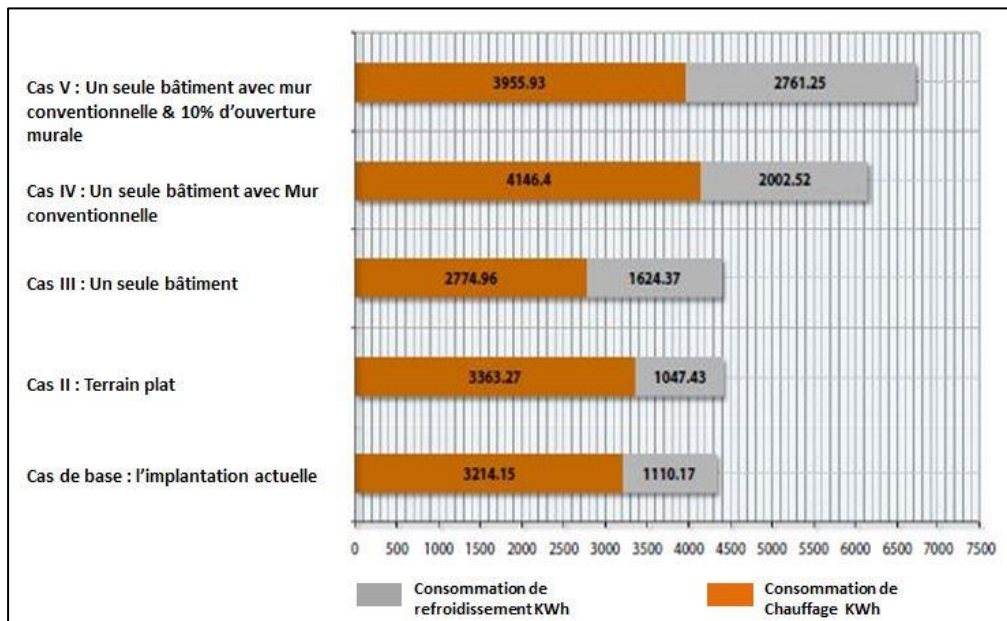


Figure 22 : Consommation annuelle de tous les cas de figures Mardin
 source : Evaluation of Parameters Affecting Energy Efficiency
 of Vernacular Mardin Houses: A Case Study

Conclusion

À l'échelle mondiale, le double défi de la réduction de la consommation d'énergie dans les bâtiments et l'amélioration de l'environnement intérieur sont devenus parties essentielles des normes de conception. Au terme de ce chapitre, nous concluons, qu'un ensemble de concepts théoriques et pratiques sont à retenir en ce qui concerne le confort thermique commençant par les paramètres qui l'affecte, sa conjugaison dans l'approche bioclimatique et les stratégies pouvant contribuer à son amélioration.

Après nous être penchés sur le confort thermique, on est passé aux matériaux de construction et leurs performances thermiques. Les matériaux de construction reçoivent différemment le rayonnement selon leurs caractéristiques thermiques particulières ce qui leur permet de gérer différemment les apports solaires. Ces caractéristiques thermiques doivent être prises en compte dans la conception des parois d'un bâtiment pour qu'elles soient performantes.

Par rapport au contexte énergétique, la consommation mondiale et nationale sont en progression continue, le secteur bâtiment est considéré comme étant le plus consommateur d'énergie et émetteur de gaz à effet de serre. On constate aussi que la climatisation et le chauffage consomment une portion non négligeable en matière d'énergie. Pour une meilleure efficacité énergétique des bâtiments, la mise en place d'une réglementation thermique pour toute construction devient obligatoire.

D'autre part, il a été démontré à travers la récente recherche sur la ville de Mardin, que l'architecture vernaculaire dans un climat chaud et aride, utilise une pierre naturelle locale extraite sur le site. Ainsi, les stratégies architecturales de protection contre la chaleur et le froid, constituent un exemple de référence et une source d'inspiration pour l'économie d'énergie.

Chapitre 02 :

Cas d'étude et méthodologie

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter en première lieu les connaissances acquises lors du premier chapitre du mémoire au service de la problématique de recherche qui se situe dans le contexte de maîtrise de la consommation énergétique et l'amélioration du confort thermique des occupants. Cela se fera à travers l'étude d'un habitat du ksar Tafilelt qui vise à extraire le savoir-faire constructif vernaculaire et bioclimatique, puis en effectuant différentes investigations à savoir, un diagnostic thermographique, un relevé des températures intérieur du model étudier et une caractérisation thermo-physique de la pierre naturelle du site de Tafilelt. Les résultats obtenus des investigations ont été utilisé pour effectuer les différentes simulations numériques (statique et thermodynamique).

II.5 Le cas d'étude

II.5.1 Contexte du projet Tafilelt

Durant des siècles, la vallée du Mzab a connu, du fait de son organisation sociale, une période prospère jusqu'aux années 70. La crise de la décennie suivante a engendré un nombre de phénomènes alarmants dont la croissance démographique, un foncier saturé et un pouvoir d'achat limité des citoyens. En réponse à ces problèmes, un groupe de notables et d'intellectuels originaires du ksar de Beni Isguen dirigé par Mr Nouh Ahmed, ont créé la Fondation Amidoul en 1998 dans le but de contribuer à la résorption, sur le plan local, de la crise du logement⁸⁴.

Ce ksar est l'extension du ksar de Beni Isguen. L'un des objectifs de la Fondation Amidoul dans le projet était la réinterprétation des principes de l'urbain planifié dans le logement traditionnel local (Addad, 2013). Le mélange intergénérationnel est également l'une des clés d'élément de la conception de la maison Tafilelt, il peut accueillir deux à trois générations (Addad, 2011), il a été constaté cependant après la distribution des logement que la mixité sociale était plutôt absente dans ce projet (Gueliane, 2014).

⁸⁴ A.moussa .2017. »Une alternative urbaine à Ghardaia » .MADINATI, N°04, p42

II.5.2 Présentation générale du Ksar Tafilelt

Tafilelt est un projet initié en 1997 par la Fondation «Amidoul», achevée en 2011 sur une superficie de 22,5 hectares (figure 21), il est constitué de 1050 logements destinés aux jeunes couples mozabites, salle de sport, salle de fête, madrasa, centre culturel et parc écologique (Gueliane, 2014). Le mode de financement pour la construction des maisons est tripartite entre le gouvernement, la fondation et la population.



Figure 21 : vue aérienne du ksar Tafilelt. Source : association Amidoul

Par conséquent, Tafilelt n'est pas une ville

nouvelle, la fondation ne l'a pas construite après une décision gouvernementale et les lois, qui réglementent les nouvelles villes en Algérie, ne sont pas appliquées sur ce ksar. C'est une initiative purement de la fondation et des habitants. Il est lauréat du premier prix de la "ville durable" à la Conférence des Parties (COP) 22 au Maroc, en 2017(figure 22).



Figure 22: vue d'ensemble sur le ksar de Tafilelt . Source :auteur

II.5.3 Données climatiques

La précipitation passe entre un maximum de 120 mm et un minimum de 20 mm. Les précipitations ne peuvent se produire qu'entre octobre et février. Le nombre de jours de précipitations par an ne dépasse pas 15 journées (figure 23). Le rayonnement solaire et la température sont élevés en été, et relativement faible en hiver. La température moyenne en Juillet est de 35C° avec un maximum de 45C° et un minimum de 27C°.

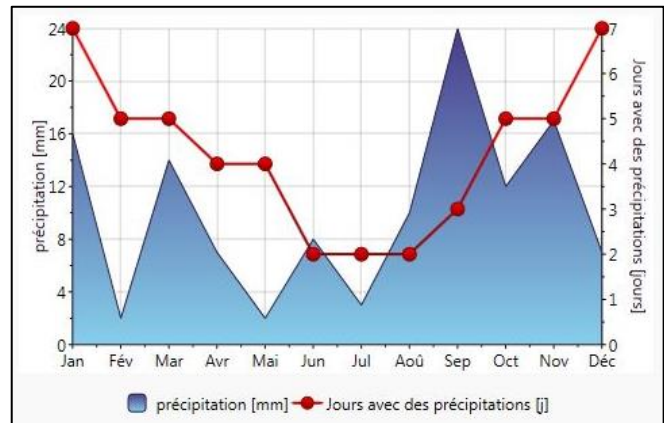


Figure 23 : données climatique tirées du logiciel meteonorm (la précipitation).

En janvier, la température moyenne de l'air ambiant est d'environ 10°C avec un maximum de 20C° et un minimum de 3C° (figure 24). En hiver, les vents dominants viennent du N-O. et ils sont frais et humides. La vitesse moyenne du vent en janvier est 12 km/h avec un maximum de 29 km/h. En été, les vents dominants viennent de l'est et ils sont chauds et secs. La vitesse moyenne du vent en juillet est de 13 km/h avec un maximum de de 29 km/h.⁸⁵

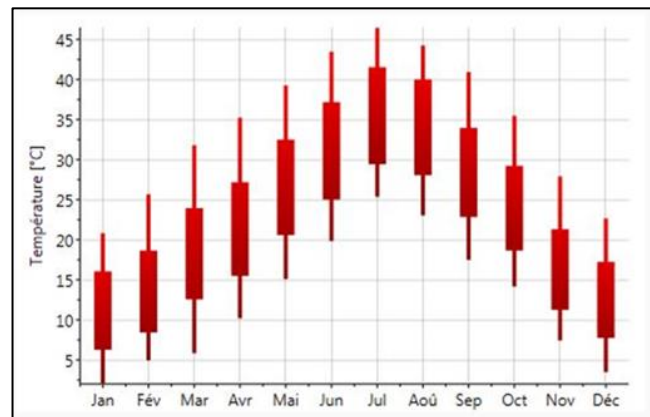


Figure 24: données climatique tirées du logiciel meteonorm (la température).

Une étude faite par Hamida bencheikh et Ameer Rchid montre que les températures extérieures au niveau du vieux Ksar étaient plus basses de 5 ° à 10 ° C par rapport à celui du Ksar de Tafilelt.⁸⁶

⁸⁵ Bouchair .A “Decline of urban ecosystem of Mzab valley,Building and Environment”, Elsevier,39 (2004) 719 – 732

⁸⁶ Bencheikh.H, Ameer.R, “The effects of green spaces (Palme trees) on the microclimate in arides zones, case study: Ghardaia, Algeria”, Elsevier, Energy Procedia 18 (2012) 10 – 20

II.5.4 La contribution de la conception bioclimatique dans l'habitat étudié

II.5.4.1 A l'échelle urbaine

A- L'implantation

L'implantation du ksar de Tafilalet est sur un plateau nu, de formes allongées du nord au sud, le maillage urbain de celui-ci est orthogonal en damier. Il est organisé selon un système viarie à géométrie rectiligne, un profil moins étroit que les rues de Béni-Isguen pour les exigences de la modernité. Les rues sont profondes et se coupent à angle droit ; le tracé ne montre que deux axes : d'un côté l'axe Est Ouest pour les rues principales et l'axe Nord –Sud pour les ruelles et les impasses. Les rues principales sont les plus éclairées alors que les rues secondaires et les impasses plus étroites et ombragées, donnant généralement sur les maisons, ce qui leur donne un caractère plus intime, cette organisation compacte, leur permet d'être éclairées sans être exposées directement au soleil.

B- L'orientation

Le ksar de Tafilalet, situé sur un plateau surplombant la vallée, est exposé à toutes les directions du vent. La majorité des maisons sont orientées au sud, ce qui leur procure l'ensoleillement l'hiver (rayons obliques) et sont protégées l'été (rayons verticaux).

C- Compacité urbaine

Le ksar de Tafilalet est considéré comme organisation urbaine compacte. Les habitations sont accolées autant que possible les unes aux autres de manière à réduire les surfaces exposées à l'ensoleillement. L'occupation totale de la parcelle (C.E.S = 1) ayant une superficie des parois de l'enveloppe globale de 329,62 m², seul 140.62 m² sont en contact avec l'environnement extérieur.

II.5.4.2 A l'échelle architecturale

A- L'organisation des espaces intérieurs :

La maison que nous étudions est en R+1 avec terrasse accessible de dimension (07,80 x 11,50) m, mitoyenne aux maisons voisines de l'Est, l'Ouest et Nord, et est allongée dans la direction Nord-Sud, en occupant toute la parcelle rectangulaire (C.E.S=1)

Selon le Dr Hadj Ahmed Nouh « Le logement traditionnel du M'Zab a été notre source d'inspiration dans la réalisation de ce projet aux côtés des travaux de recherche sur

l'architecture bioclimatique, tout en l'adaptant aux commodités de la vie contemporaine, tel que l'introduction de l'élément « cour » pour augmenter l'éclairage et l'aération de l'habitation ainsi que l'élargissement de ses espaces intérieurs »

• **Niveau du rez-de-chaussée(figure 25) :**

- **Dégagement** : c'est un espace de desserte, il abrite l'entrée principale qui se fait en chicane.
- **Bureau** : est une pièce nouvelle située juste à l'entrée.
- **Escalier** : il est collé à la pièce qui fait office de bureau, c'est une seule cage d'escalier qui commence du RDC jusqu' au niveau de la terrasse.
- **Cuisine** : l'espace de celle-ci est moderne assez grand pour la préparation des repas doté de deux ouvertures hautes qui donnent sur la façade principale.
- **Séjour (west el dar)** : l'espace le plus spacieux et le plus éclairé du RDC, s'ouvre avec une porte fenêtre vers la cour qui est un espace nouveau de la maison mozabite et ayant une ouverture zénithale qui donne sur le séjour du premier niveau qui est une réinterprétation du chebek de la maison traditionnelle.
- **(Tezifri)** : c'est une sorte de salon familial destiné aux femmes ouvert sur le séjour
- **La cour** : cette cour est rectangulaire (3,20 x 2 m) autour de laquelle s'organisent les espaces leur permettant d'avoir des ouvertures, celle-ci est couverte d'une coque vitrée qui s'ouvre et se ferme manuellement.
- **Chambre 01** : spacieuse comparé aux chambres des maisons traditionnelles avec une fenêtre qui donne sur la cour.

1 Bureau
2 Dégagement
3 Cuisine
4 Sanitaire
5 Courette
6 Séjour 'west el dar'
7 Chambre 01
8 'Tezifri'

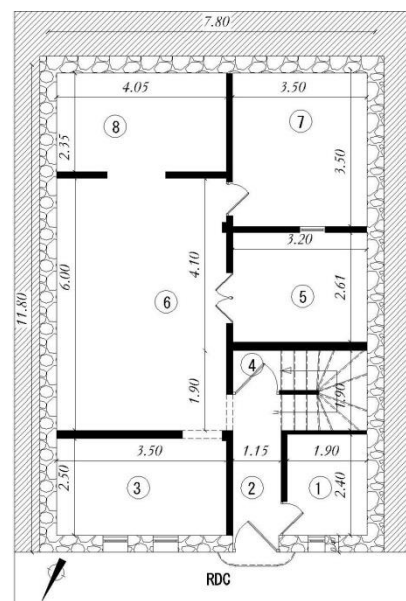


Figure 25 : Niveau rez-de-chaussée.
Source : auteur

• **Niveau étage (figure 26) :**

L'accès à ce niveau se fait par la cage d'escalier donnant directement sur un deuxième séjour, muni d'une fenêtre qui s'ouvre sur le vide de la cour et un percement au plafond semblable au chebek qui est dans le même alignement que celui du RDC couvert d'une coque vitrée qui peut être ouverte ou fermée selon les besoins d'éclairage de ventilation et d'ensoleillement, de trois chambres et de sanitaires.

- | | |
|----|---------------|
| 9 | Salle de bain |
| 10 | Chambre 02 |
| 11 | Séjour étage |
| 12 | Chambre 03 |
| 13 | Chambre 04 |
| A | Chebek |

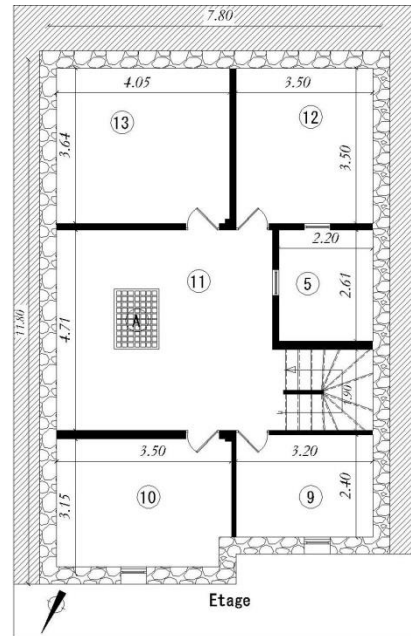


Figure 26 : Niveau étage. Source : auteure

• **Niveau terrasse (figure 28) :**

Le niveau terrasse, espace très utilisé la nuit en période estivale, comporte une buanderie et délimité d'un mur de 1,80 m de hauteur pour les besoins d'intimité, car il constitue un espace nocturne d'été.

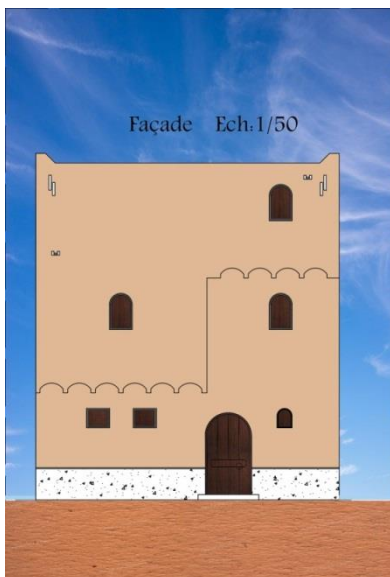


Figure 28: Façade principale. Source : auteure

- | | |
|----|----------------------|
| 14 | Buanderie |
| 15 | Terrasse |
| C | Coque vitré courette |
| B | Coque vitré chebek |

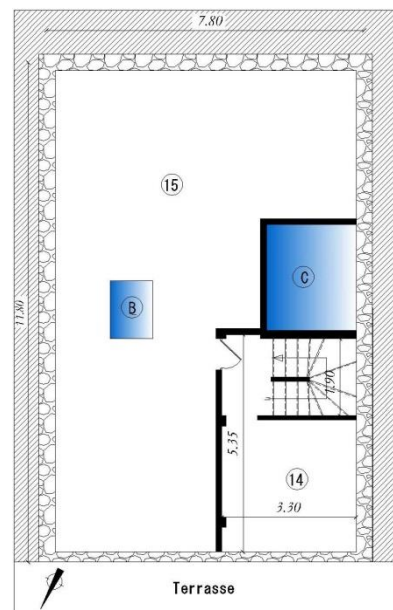


Figure 28: Niveau terrasse. Source : auteure

B- La ventilation naturelle :

La ventilation naturelle est provoquée par une différence de température ou de pression dans un bâtiment. Dans notre cas d'étude, celle-ci se fait durant la nuit suite à la restitution de la chaleur stockée au niveau des parois de l'enveloppe, alors que dans la journée, elle sera évacuée par les fenêtres et aussi par effet de tirage thermique à travers le chebek après ouverture de sa coque vitrée (figure 29).

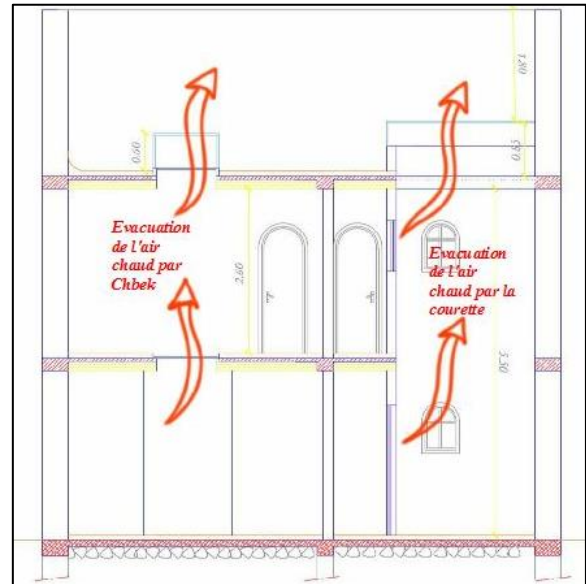


Figure 29: Schéma de principe de ventilation naturelle.
Source : auteure

La cour, est une réinterprétation du « malkef » qui est un dispositif de rafraîchissement d'air dans l'habitat traditionnel, cette cour est un

conduit vertical qui permet durant la nuit l'acheminement de l'air mais sans le dispositif d'humidification. Lorsque les températures extérieures sont moins élevées, l'air frais pénètre dans les espaces intérieurs par les fenêtres et est évacué par effet de cheminée à travers ce conduit qui est donc, une combinaison de deux anciens dispositifs permettant une bonne ventilation naturelle de l'habitat, sauf que les couvertures en coque vitrée de ces derniers provoquent des surchauffes par effet de serre en période estivale.

C- Compacité architecturale :

La forme rectangulaire des maisons de Tafilelt associée à la mitoyenneté avec les maisons voisines (figure 30), permet un minimum de perte de chaleur en hiver et un minimum de gain en été. Les gains et les pertes se limitent aux parois de la façade extérieure, à la terrasse, aux ouvertures et aux coques vitrées qui couvrent la cour et le chbek.

La superficie des murs extérieurs et plancher-terrasse est évaluée à 329,62 m², seul 140,62 m² sont en contact avec l'environnement extérieur ce qui nous donne une compacité de 42% et un coefficient de forme qui est de 2,34.

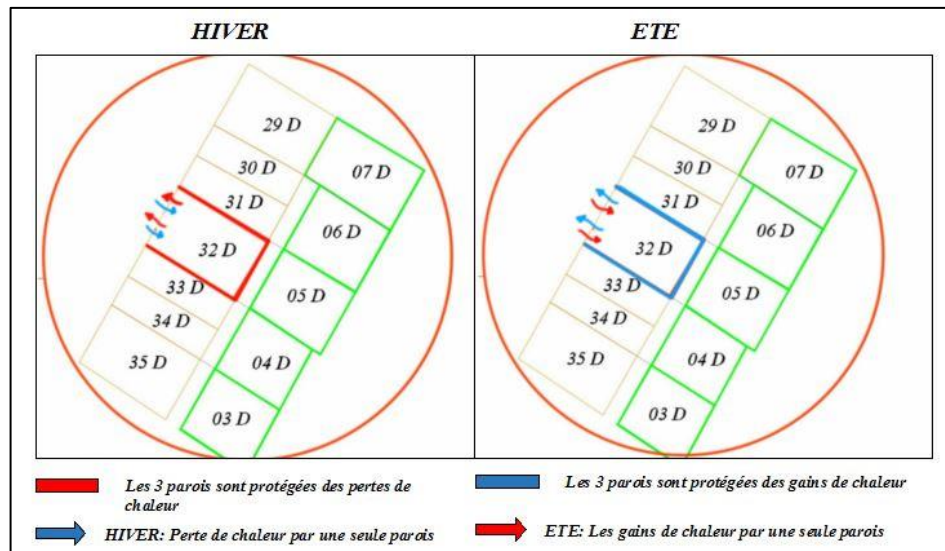


Figure 30: Schéma de principe de la compacité. Source : auteure

D- Protection solaire :

Afin de limiter le flux de chaleur, les concepteurs de Tafilelt ont mis au point une forme de protection solaire qui couvre toute la surface de la fenêtre qui donne sur la façade principale, tout en assurant l'éclairage naturel à travers des orifices, une typologie comparable aux moucharabiehs des maisons musulmanes (figure 33). Les fenêtres qui donnent sur la cour, les coques vitrées qui couvrent le chebek et de la cour ne sont pas dotées de protection solaire (figure 31 et 32).



Figure 33: les coques vitrées du chebek et de la cour. Source : auteure



Figure 32: fenêtre sur la cour. Source : auteure



Figure 31: les orifices sur la façade principale. Source : auteure

II.5.4.3 Les matériaux et technique de construction

L'enveloppe extérieure de la maison qui constitue la structure constructive porteuse est réalisée de murs en pierre de 0,45 m. Par contre, les murs intérieurs de séparation de la cour et la buanderie sont réalisées en parpaings creux (aggloméré en béton) de 0,15 m d'épaisseur. Pour le plancher terrasse, la partie la plus exposée au rayonnement solaire, les matériaux utilisés sont le béton pour la dalle de compression, des poutrelles en béton armé, espacées de 0,65 m, et des voûtains de plâtre. Le vide entre la dalle de compression et les voûtains est rempli par un mélange de chaux et de sable comme schématisé dans la figure 34.

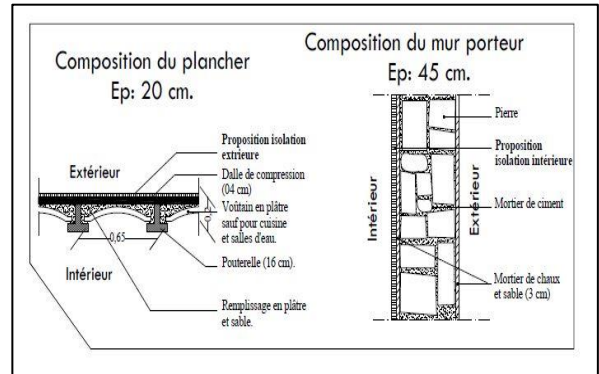


Figure 34: coupes montrant la composition du mur porteur et du plancher. source : Chabi M

Quant au revêtement extérieur, les concepteurs et constructeurs du projet se sont inspirés des techniques traditionnelles qui consistent en l'utilisation d'un mortier de chaux aérienne et de sable de dunes, lequel est étalé sur la surface du mur à l'aide d'un régime de dattes, la forte proportion en chaux et la présence de sable fin permettent une meilleure malléabilité du mortier. L'utilisation du régime permet de rendre la texture de la surface rugueuse pour assurer un ombrage au mur, comme apparaît dans la figure 35, et éviter un réchauffement excessif de la paroi. L'utilisation de la pierre, associée au mortier de chaux locale, représentant un matériau lourd à forte inertie thermique, correspond aux principes de l'architecture bioclimatique.

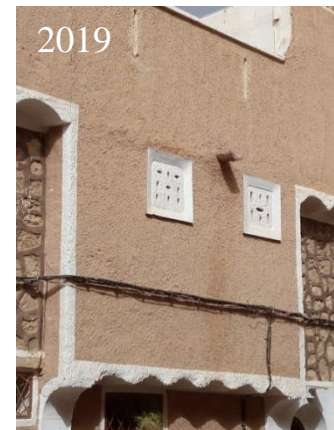


Figure 35: la texture rugueuse du mur extérieur pour assurer l'ombrage. Source : auteure

II.6 Diagnostique et vérification du cas d'étude

II.6.1 La thermographie

La thermographie infrarouge est au bâtiment ce que la radiologie est à la médecine. La thermographie infrarouge est la méthode la plus facile et la plus rapide, sans contact et sans perturbation du milieu, pour mettre en évidence les pertes d'énergie, les irrégularités dans

l'isolation thermique (parois et toiture), les ponts thermiques ; les défauts d'étanchéité à l'air, les infiltrations d'eau et la présence d'humidité. En ce sens elle constitue un outil d'aide à l'élaboration du bilan thermique ou énergétique du bâtiment en quantifiant les déperditions par rayonnement (pertes moins gains).

II.6.1.1 Les usage et outil de la thermographie

A- Usage

La thermographie utilisée peut être différente selon l'objectif ciblé. Si le but recherché est d'informer, de communiquer ou de montrer les déperditions énergétiques, on aura, donc plus recours à la thermographie illustrative. Elle se doit d'être évocatrice car elle est non quantifiée et n'est basée que sur l'imagerie thermique. Elle peut être aussi utilisée dans toutes ses applications pour effectuer des états de lieux thermiques, ses résultats détermineront l'étendue des travaux à effectuer : de simples corrections de défauts ou des investissements à plus long terme tel que des rénovations.

B- Outil

La caméra thermique ou « imageur radiométrique » est l'évolution du radiomètre puisqu'elle mêle mesure et image. C'est un capteur de rayonnement dont le calculateur interne calcule l'échelle des températures que la camera superpose sur l'écran à l'image pour obtenir un thermo- gramme (figure 36).

Comme son nom l'indique c'est la sensibilité de détection de la caméra, qui détecte le plus petit écart de température. Puisqu'en thermographie du bâtiment, on a affaire à de petits écarts de température, ce facteur est éminemment important. Elle varie entre 0.02°C à 0.3 (sur une cible à 30 °C mais le maximum acceptable dans le bâtiment et de 0.10 °C.



Figure 36: la caméra thermique.
Source : thermalimaging-blog.com

II.6.1.2 Etat des lieux à l'aide d'une caméra thermique

A- Inspection extérieure :

Le diagnostic thermographique s'est déroulé le 31 Janvier 2019 entre 11h et 12h. Ce matin-là, il faisait 22 °C, le ciel était couvert.

L'inspection extérieure fut la première étape pour éviter que les rayons du soleil ne viennent fausser les thermo-grammes dans le cas où le ciel s'éclaircit (figure 37).

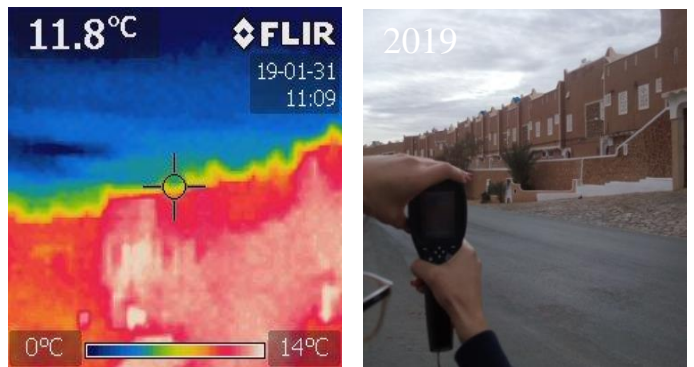


Figure 37: Thermo-gramme de la façade urbaine
source : Auteure.

La façade principale était assez dégagée afin de ne prendre qu'un seul thermo-gramme. Celle-ci offre un thermo-gramme d'un mur en pierre qui se présente plus chaud que les moucharabiehs en plâtre car la pierre est un matériau à forte inertie (figure 38).

Les autres façades étaient impossibles à photographier car elles sont en mitoyenneté avec les autres maisons.

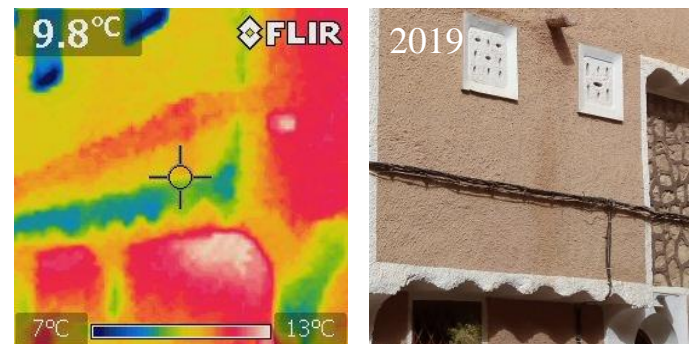


Figure 38: Thermo-gramme de la façade principale
source : Auteure

B- Inspection intérieure :

Pour l'inspection intérieure c'était des prises de photos et de thermo-gramme des parois en contact avec l'extérieur présentant des déperditions, détection de pont thermique et infiltrations d'air au niveau des ouvertures.

Le thermo-gramme détecte une infiltration d'air au niveau du vitrage de la courette (figure 39).

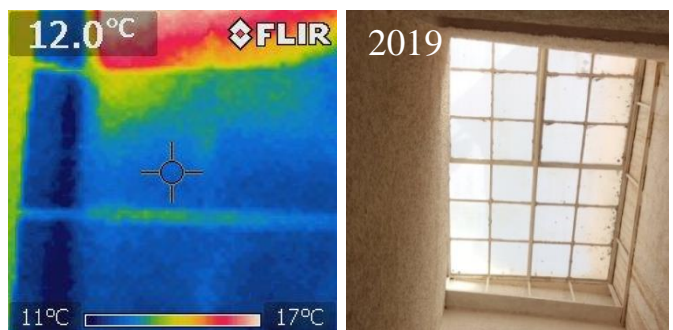


Figure 39: Thermo-gramme d'une partie de la courette
source : Auteure

Le thermo-gramme dévoile une présence de pont thermique localisé au niveau des murs de la buanderie qui sont réalisés en parpaing.

A l'intérieur de la maison le chauffage n'était pas en marche et donc n'a pas d'influence sur les résultats (figure 40).

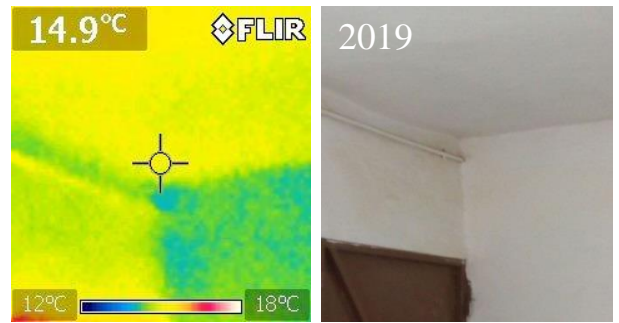


Figure 40 : Thermo-gramme d'une partie de la buanderie
source : auteure

II.6.2 caractérisation thermo-physique des matériaux

II.6.2.1 Présentation du matériau

Dans la région de Ghardaïa, les pierres sont les matériaux de construction les plus utilisés en raison de leur disponibilité. Notre échantillon a été prélevé du site de notre cas d'étude, puis découpé en module. C'est une pierre calcaire d'une couleur jaunâtre avec une faible porosité (figure 41).



Figure 41 : découpage des pierres
source : auteure

II.6.2.2 Description du dispositif de mesure

Le CT METRE (figure 42), appareil aisément transportable, a été élaboré dans le but de permettre d'évaluer avec précision, les caractéristiques thermiques d'un certain nombre de matériaux, tels que : la brique, les roches, la terre, etc



Figure 42 : Le CT METRE. Source : C.N.E.R.I.B

Le dispositif utilisé pour déterminer les valeurs du coefficient de conductivité thermique et de la chaleur spécifique de nos éprouvettes est la méthode du fil chaud. L'appareillage utilisé est le CT-mètre développé par le SCTB, conforme à la norme NF EN 993-15⁸⁷.



Figure 43 : l'évaluation des caractéristiques thermique des échantillons.

Source : auteure

La méthode du fil chaud permet d'estimer la conductivité thermique d'un matériau et de la chaleur spécifique à partir de l'évolution de la température mesurée par un thermocouple placé à proximité d'un fil résistif. La sonde, constituée du fil résistif et du thermocouple dans un support isolant, est positionnée entre deux échantillons du matériau à caractériser (figure 43).

Le CT-mètre, développé au CSTB, utilise cette méthode avec les critères suivants:

- Température de mesure 20 à 80 °C
- Echantillons : 80 x 40 mm

La résistance thermique (R) des éléments est proportionnelle à l'épaisseur (e) et inversement proportionnelle à λ , elle est déterminée suivant la relation : $R=e / \lambda$

Les résultats des valeurs du coefficient de conductivité thermique et de la résistance thermique des éprouvettes sont portés aux tableaux.

II.6.2.3 Présentation des résultats de mesure

Résultats expérimentaux de la conductivité thermique du matériau utilisé (tableau 1)

Echantillon	λ (w. m ⁻¹ °C ⁻¹)	E(m)	$R=e / \lambda$ (m ² C °/w)
Pierre naturelle	3.2	0.4	0.125

Tableau 1 : la conductivité thermique du matériau utilisé

⁸⁷ A. Hamid, 'Etude Expérimentale du Prototypage Réalisé au C.N.E.RIB, Rapport Interne CDER/LT DBT, 1995


Résultats de mesure de la chaleur spécifique et la masse volumique (tableau 2)

Echantillon	Masse Volumique (kg/m³)	Chaleurs spécifiques (kJ/kg. °C)
Pierre naturelle	2050	2200

Tableau 2 : la chaleur spécifique et la masse volumique du matériau utilisé

II.6.3 Mesure des températures de l'air

Les températures de l'air sont prises à l'aide d'un appareil de mesure « Testo » toutes les heures pendant la période d'été de la journée du 3 Juillet 2019 au 15 Septembre 2019. Durant l'investigation 10 psychromètres ont été placés à l'intérieur et l'extérieur de model étudié, Les prises des températures (sèches et humides) se sont effectuées au centre de chaque espace (figure 44,45 et 46).

Type d'appareil	Illustration	Types de mesures
Testo		Permet de mesurer la Température de l'air

Légende :

▲ Température de l'air

- | |
|------------------------|
| 1 Bureau |
| 2 Dégagement |
| 3 Cuisine |
| 4 Sanitaire |
| 5 Courette |
| 6 Séjour 'west el dar' |
| 7 Chambre 01 |
| 8 'Tezifri' |

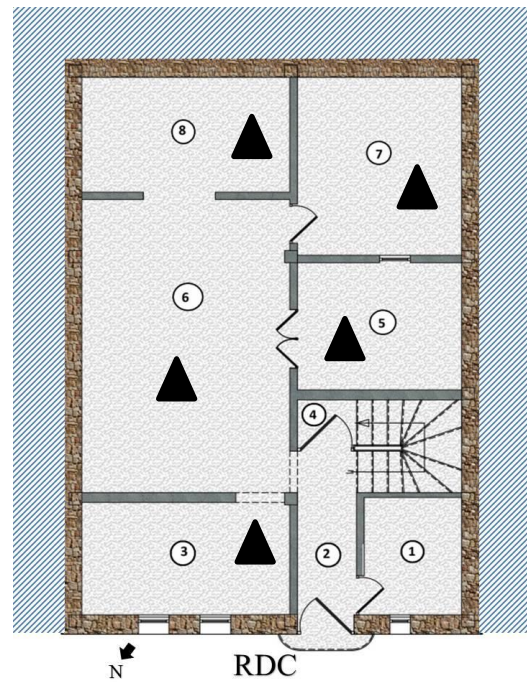


Figure 44: Niveau rez-de-chaussée. Source : auteure.

Légende :

▲ Température de l'air

- | |
|-----------------|
| 9 Salle de bain |
| 10 Chambre 02 |
| 11 Séjour étage |
| 12 Chambre 03 |
| 13 Chambre 04 |
| A Chebek |

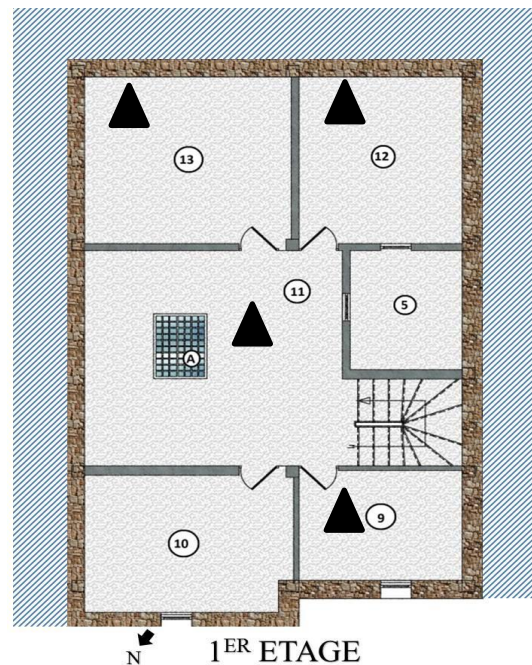


Figure 45: Niveau étage. Source : auteure.

Légende :

▲ Température de l'air

- | |
|------------------------|
| 14 Buanderie |
| 15 Terrasse |
| C Coque vitré courette |
| B Coque vitré chebek |

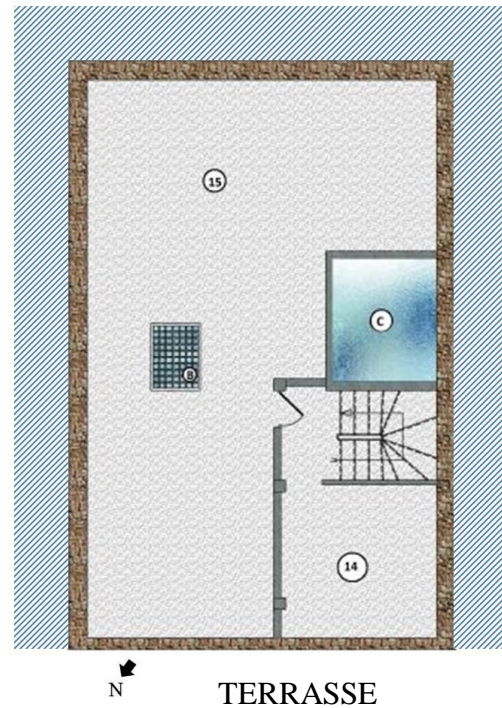


Figure 46 : Niveau terrasse. Source : auteure

II.6.4 Vérification de conformité aux règlements thermique

Cette étape va nous permettre de procéder à la simulation thermique statique de notre cas d'étude à l'aide de l'application CTBAT afin de pouvoir vérifier sa conformité aux normes du règlement thermique algérien et d'affirmer ou infirmer notre hypothèse générale.

II.6.4.1 Présentation du fonctionnement du CTBAT

La plate-forme CTBAT est accessible via le serveur web, pour y accéder, un enregistrement préalable est exigé.

L'entité principale dans l'application est le projet, qui détaille les données de base communes à toutes les autres entités composant le projet. Le déroulement de la simulation thermique de ce projet sous CTBAT peut être résumé en quatre étapes importantes (figure 47):

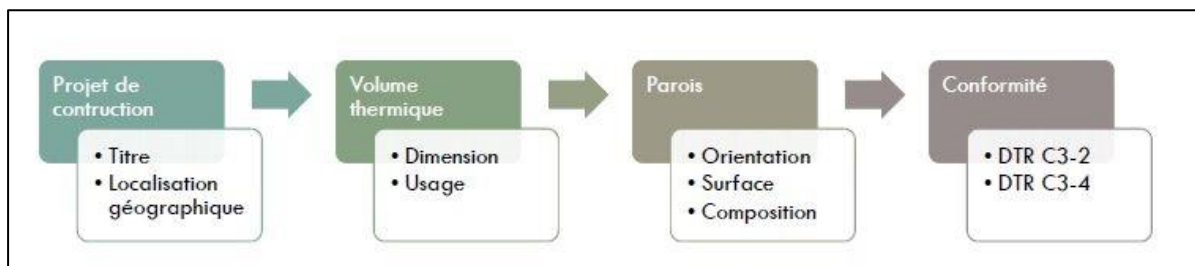


Figure 47: les quatre étapes de la simulation thermique. Source : auteure

Première étape (figure 48) : Elle débute préalablement par l'introduction d'un certain nombre de renseignements sur le projet avec sa description et ses données géographiques : altitude, latitude, wilaya, commune.

Figure 48: étape 01. Source : auteure, simulation par CTBAT

Deuxième étape (figure 49):

Il s'agit de la création des enveloppes thermiques. Cette information est demandée conformément aux définitions du DTR C3-2, en intégrant toutes les parois opaques et vitrées de façon à créer un espace fermé, avec les caractéristiques thermiques et physiques des matériaux qui les composent. C'est durant cette étape que les apports thermiques qui s'y produisent sont définis.

Figure 49 : étape 02
Source : Source : auteure, simulation par CTBAT

Troisième étape (figure 51):

Une fois les enveloppes du bâtiment définies, il ne reste qu'à décrire les différentes dispositions de chauffage, climatisation et de renouvellement d'air.

Quatrième étape (figure 50):

Les résultats des simulations thermiques exécutées sur CTBAT sont affichés dans un rapport détaillé qui détermine la conformité ou la non-conformité du bâtiment contenant les représentations des composantes architecturales de l'enveloppe sous forme de tableaux et de profils de températures des parois.

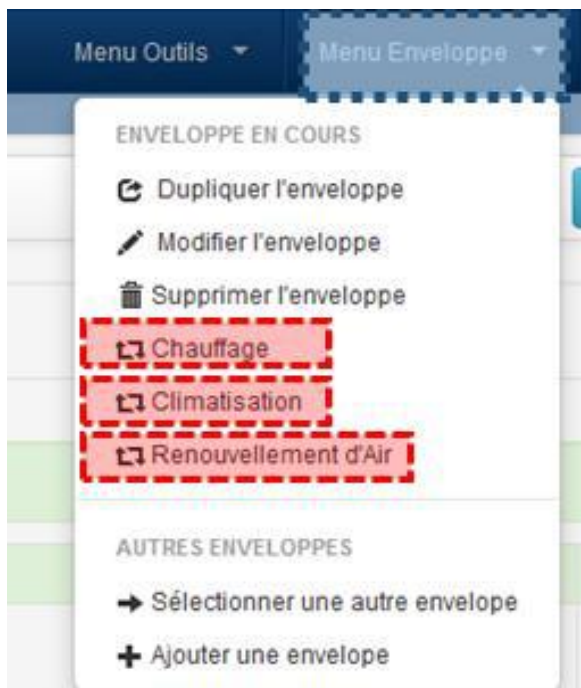


Figure 51: étape 03. Source : auteure, simulation par CTBAT

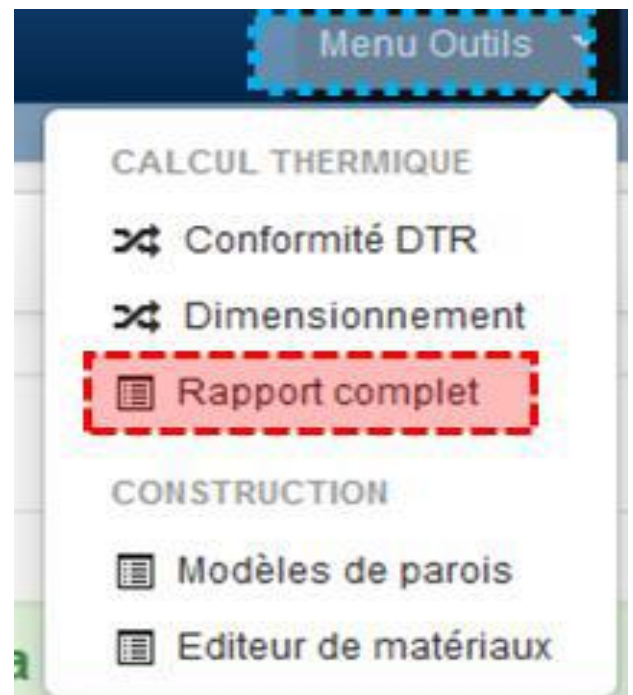


Figure 51: étape 04 . Source : auteure, simulation par CTBAT

II.6.4.2 Simulation thermique statique avec CTBAT

La simulation avec CTBAT a pris un cheminement qui peut être résumé ainsi :

1-La création d'un projet, commençant par l'introduction des données géographiques du projet TAFILELT et sa description.

2-Après la création du projet, nous avons accédé à une fenêtre qui nous permet de décrire les entités composantes de tout le projet. Le premier composant à définir est l'enveloppe de l'habitat avec des conditions de confort améliorées avec des installations de climatisation qui fonctionnent 12h/j (figure 52).

3-Dès que l'enveloppe est définie, CTBAT offre la possibilité de déterminer les différentes parois du bâtiment .Il s'agit de déterminer le type de la paroi (opaque, vitrée ou une porte), sa surface, son inclinaison (toiture, verticale ou plancher), son orientation et à la fin son contact (avec extérieur, non chauffé et non climatisé, enterré entièrement ou partiellement) (figure 53).

4-Après avoir déterminé les caractéristiques générales des parois, nous avons déterminé les matériaux composant chacune, ainsi que leur facteur d'absorption qui est en relation avec la couleur extérieure des parois (figure 54 et 55).

5-Un autre composant à définir après avoir déterminé toutes les parois verticales de l'habitation, c'est le plancher intermédiaire et la couverture de l'enveloppe architecturale. Les modèles de plancher de notre habitation ne se trouvaient pas parmi les modèles de CTBAT, c'est pourquoi nous les avons ajouté conformément à notre cas d'étude.

Figure 52: création d'une nouvelle enveloppe
Source : auteure, simulation par CTBAT

Figure 53 : création parois opaque
Source : auteure, simulation par CTBAT.

Figure 54 : création d'un matériau
Source : auteure, simulation par CTBAT

Composition (de l'extérieur vers l'intérieur) :			
Matériau	Cond. λ	Epaisseur	Résistance
Mortier de ciment	1,40 W/m.°C	0,02 m	0,01 (m ² .°C)/W
Pierres calcaires dures	2,40 W/m.°C	0,40 m	0,17 (m ² .°C)/W
Plâtre courant d'enduit intérieur	0,35 W/m.°C	0,02 m	0,06 (m ² .°C)/W
Total		0,44 m	0,24 (m².°C)/W

Figure 55: déterminer les matériaux qui composent la paroi en pierre
Source : auteure, simulation par CTBAT

l'habitation à la réglementation thermique, nous avons effectué le dimensionnement suivant :

Les échanges dus au renouvellement et la circulation d'air qui est en relation avec le volume de l'enveloppe et non pas avec les parois, du chauffage et la climatisation.

II.6.4.3 Présentation de résultat du bilan thermique

Le rapport final contient tous les résultats de calculs des déperditions et des apports thermiques pour pouvoir synthétiser les données sous forme de petit tableau contenant l'évaluation de la conformité réglementaire du bâtiment.

Le résultat de notre habitation montre qu'elle est non conforme à la réglementation en hiver avec une valeur de 1.76, tandis qu'en été elle est plus loin de la somme des apports référentiels avec une valeur de 2.70 (figure 56).

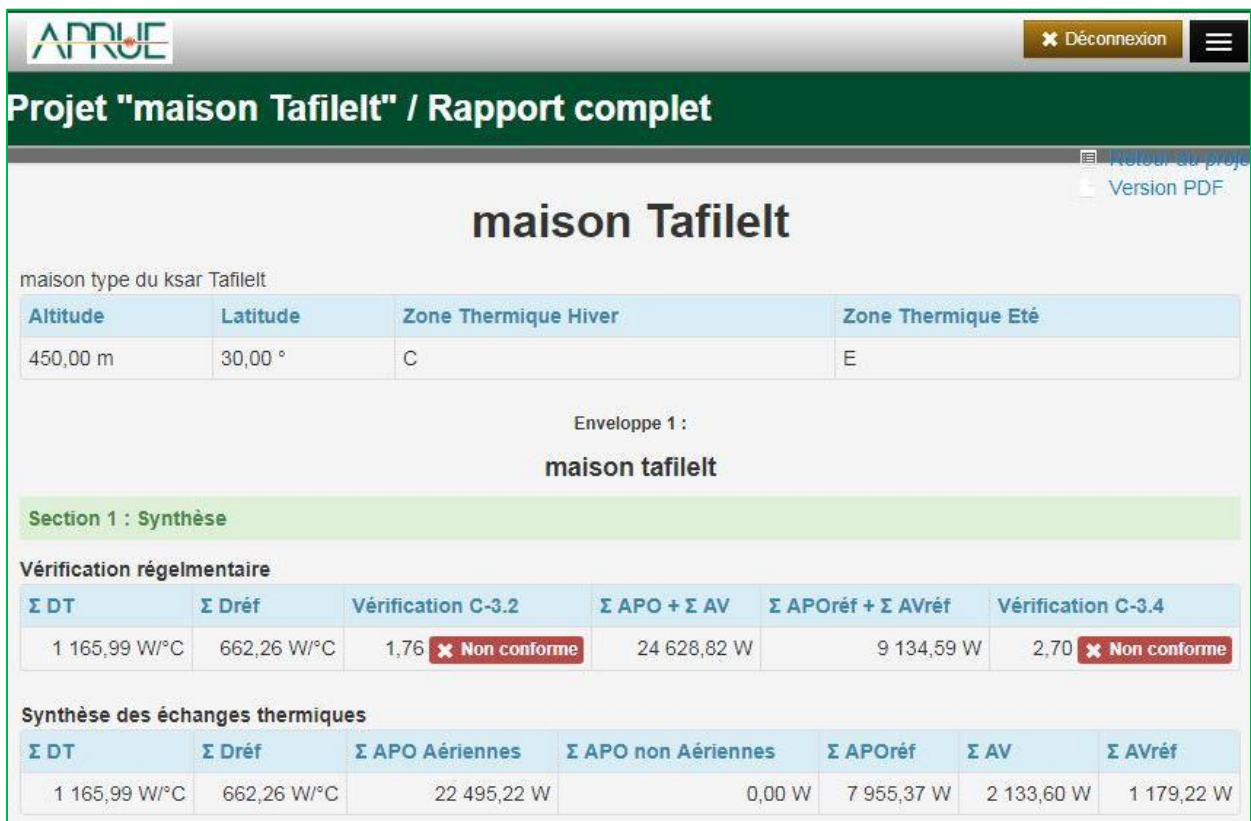


Figure 56: Rapport de conformité
Source : auteure, simulation par CTBAT

II.7 Simulation



II.7.1 Protocole de simulation

Les objectifs de cette recherche exigent une méthodologie axée sur les méthodes numériques qui sont indispensables pour évaluer virtuellement le cas d'étude sur une année entière et étudier le comportement prévisionnel pour des résultats proches de la réalité. Pour cela, on a choisi de faire des simulations dynamiques (STD) à l'aide de **TRNSYS 16** « **TRaNsient SYstem Simulation** ». La simulation se fera sur un habitat du ksar Tafilelt modélisé et qui servira de cas de base et de référence, pour déterminer les températures intérieures et la consommation énergétique, puis procéder à la simulation des différentes variantes pour ressortir à chaque fois les paramètres des cas optimaux qui seront regroupés pour former le cas optimisé.

Pour cette recherche, le scénario de consigne thermostat est fixé à une température de confort de 21° en hiver et de 24° pour l'été selon le DTR.

II.7.2 Présentation du logiciel de simulation

Le logiciel TRNSYS comprend trois interfaces différentes:

- Simulation TRNSYS Studio , qui est l'interface de calcul. Il permet de modéliser l'environnement du bâtiment (climat, apports solaires, autres données d'entrée) et d'obtenir les résultats de simulation. Il génère un fichier « point tpf ».
- TRNBuild , il permet de rentrer les caractéristiques du bâtiment (zones, parois, apports internes, débits de ventilation...). Il génère un fichier « point bui ».
- TRNEdit.

TRNSYS est un logiciel de simulation numérique du comportement thermique des bâtiments et de leurs équipements développés par **CSTB**, TRNSYS est particulièrement utile pour étudier avec précision des systèmes dont le comportement thermique varie fort dans le temps. TRNSYS permet, par exemple, de calculer avec précision les consommations énergétiques, d'évaluer les performances thermiques de systèmes très divers, d'effectuer des analyses de sensibilité en vue d'optimiser la conception d'un système énergétique. Il possède une bibliothèque standard d'environ 50 composants (modèles génériques de bâtiments, de pompes

à chaleur, de composants de réseaux hydrauliques, etc.) mais tout utilisateur ayant des connaissances en FORTRAN a la possibilité de créer ses propres bibliothèques de modèles. TRNSYS est aujourd'hui la référence au niveau mondial de la simulation dynamique de bâtiments et de systèmes.

II.7.3 Méthodologie de simulation

II.7.3.1 Création d'un fichier météorologique

A- Sous logiciel Meteonorme version 7

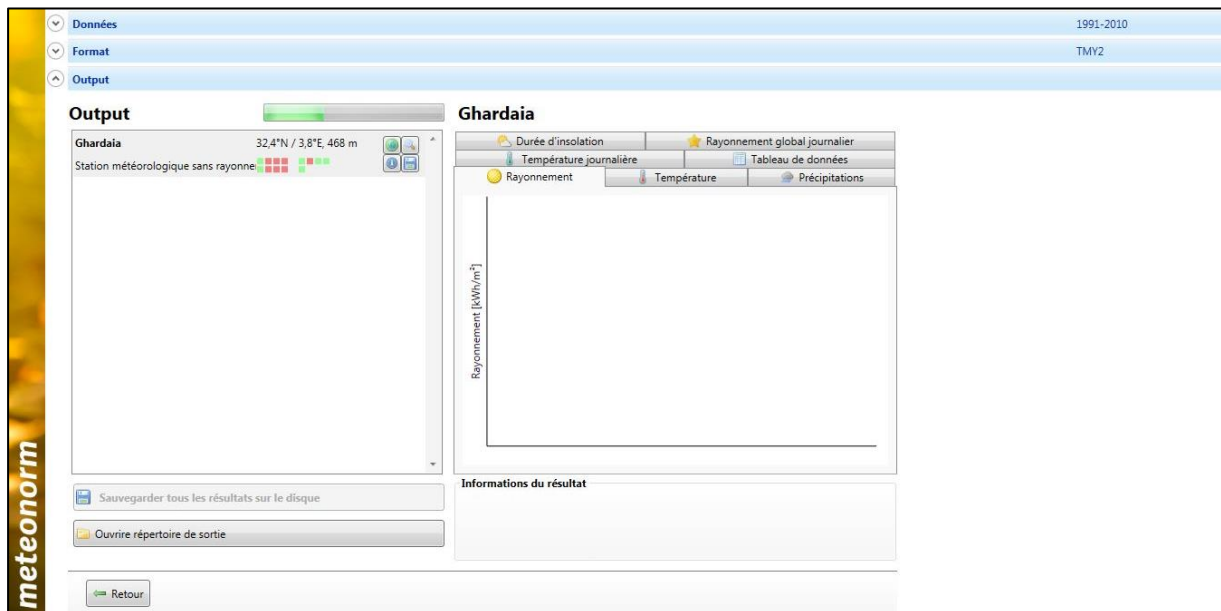


Figure 57: Création de fichier météorologique de la zone de Ghardaïa (source :auteure depuis logiciel meteonorme)

B- Choix du format du fichier

Les données météorologiques qu'il convient d'utiliser pour la simulation thermique sont sous format TM2, requis par TRANSYS (figure 58)

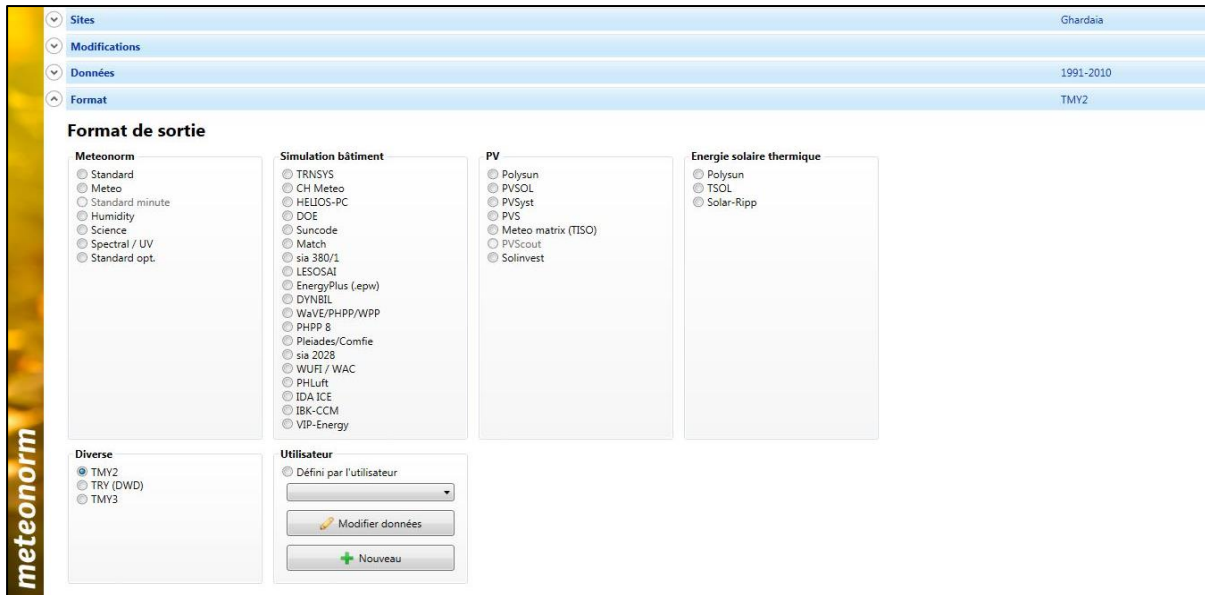


Figure 58: Choix du format (source : auteure depuis logiciel meteonorme)

II.7.3.2 Intégration du model sous « TRNSYS studio »

TRNSYS Studio assure l'interface entre le schéma de principe du projet à modéliser et TRNBuild d'une manière intuitive, permettant de développer des applications de simulation. Un projet de simulation consiste à choisir un ensemble de modules et à décrire ensuite les interactions entre ceux-ci. Pour commencer notre projet, on doit passer par TRNSYS studio, dans cette partie, il existe Plusieurs étapes

A- Choix du type de projet

Pour notre projet on est dans le cas d'un projet multizone, une fois que le bon article est choisi dans la liste (c.-à-d. **Building Project (multizone)**), on clique sur le bouton (**Next->**) et on passe à l'étape suivante (figure 59).

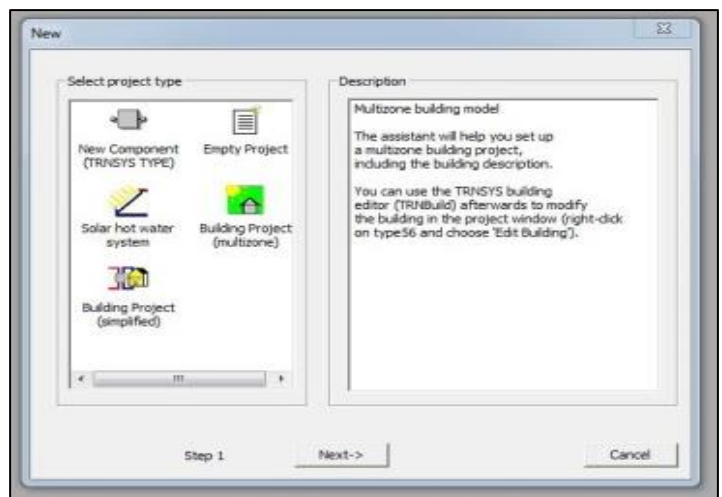


Figure 59 : choix du type de projet (Source : auteure depuis logiciel« TRNSYS studio »)

B - Tracer le plan

Dans cette étape on définit les zones de notre bâtiment. Pour ajouter une zone on clique sur la grille. Chaque case noire représente une zone. A la même heure, le logiciel calculera automatiquement les contiguïtés entre les zones supplémentaires et montrera la liste du côté droit. Une fois que le plan d'étage est tracé, on clique sur **Next->** (figure 60).

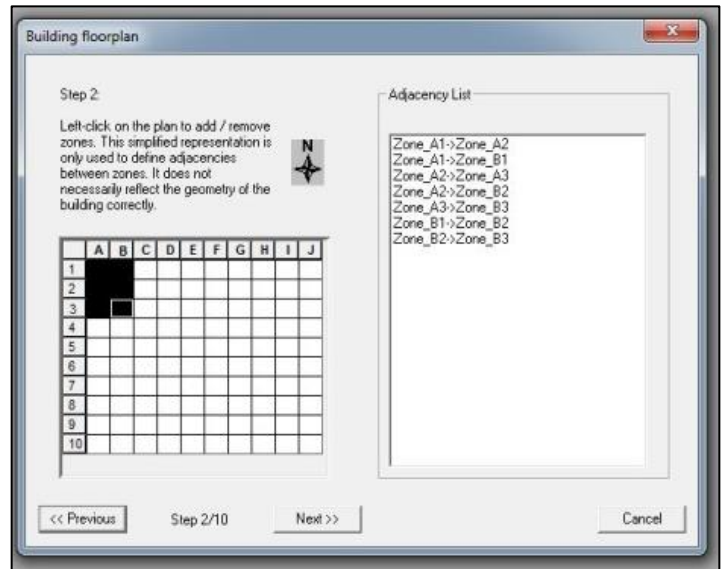


Figure 60 : : Traçage du plan (Source : auteure depuis logiciel « TRNSYS studio »)

C- Dimensionnement des zones

Le choix d'une zone dans la grille montre ses propriétés qui sont : le nom, la longueur, la largeur, la profondeur et le volume. A l'exception du volume qui est automatiquement calculé selon la taille, la largeur et la profondeur, l'utilisateur doit placer lui-même ces dimensions (figure 61).

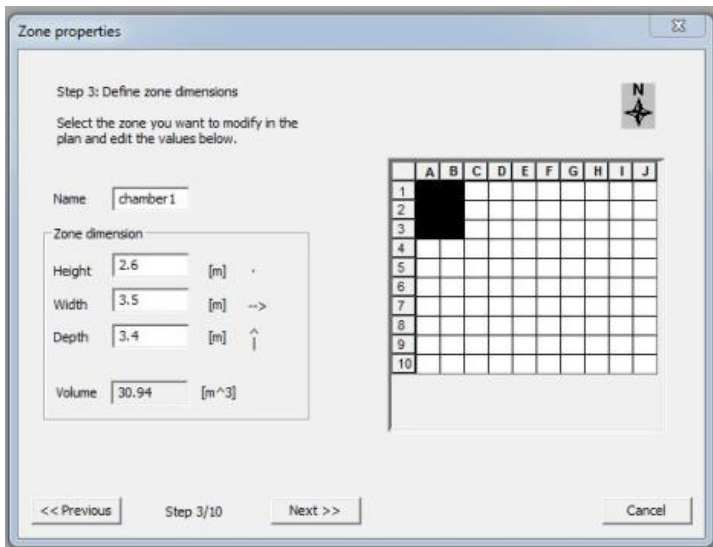


Figure 61: Dimensionnement des zones (Source : auteure depuis logiciel « TRNSYS studio »)

Dans notre cas, nous avons décomposé la maison en 12 zones :

- Zone1 : Cuisine.
- Zone 2 : Dégagement + cage d'escalier
- Zone 3 : Bureau
- Zone 4 : Séjour rez-de-chaussée
- Zone 5 : Courette
- Zone 6 : Chambre 01

- Zone7 : Chambre 02
- Zone8 : Salle de bain
- Zone 9 : Séjour étage
- Zone10 : Chambre 03
- Zone 11 : Chambre 04
- Zone 12 : Buanderie

C- Fraction des fenêtres et l'orientation de la maison

Dans cette figure la partie gauche définit la fraction des fenêtres sur les murs de la maison, la partie droite pour l'orientation de la maison. L'angle est positif du nord à l'est et négatif du nord à l'ouest. Le bouton « browse » permet d'introduire le fichier météo (figure 62). Celui-ci contient toutes les informations météorologiques de la région de notre habitation.

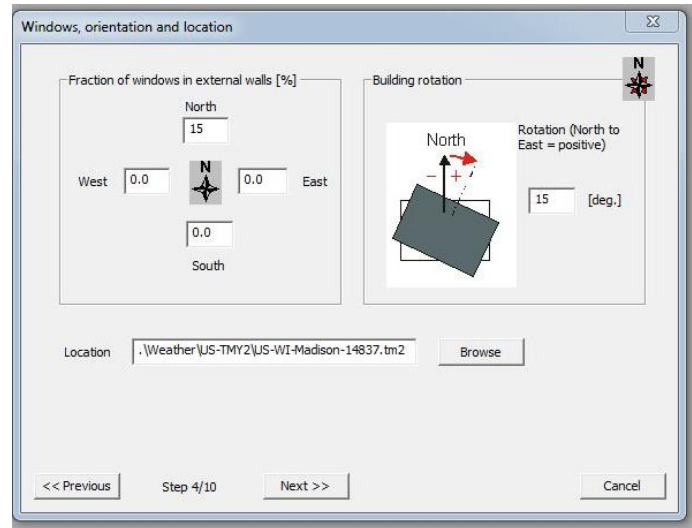
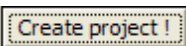


Figure 62: Fraction et orientation (Source : auteure depuis logiciel « TRNSYS studio »)

E- Création du projet

Une fois que cette fenêtre apparait tous les paramètres nécessaires pour la création du projet ont été introduits. Pour cela, on doit cliquer sur  (figure 63).

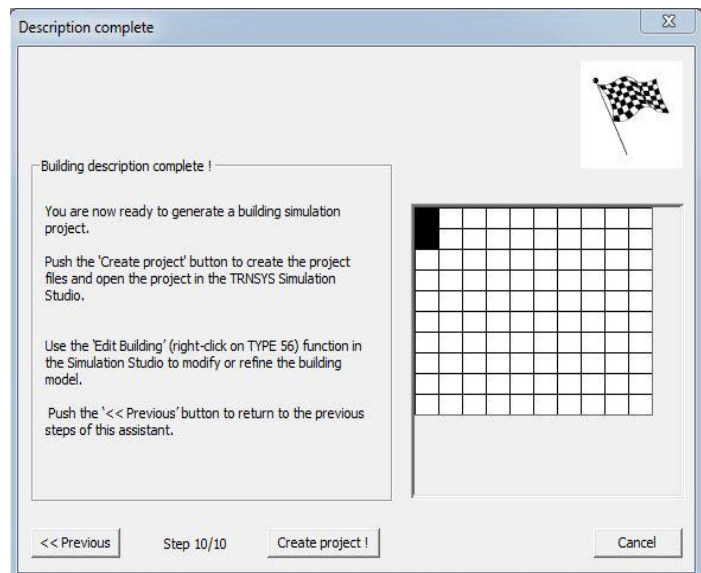


Figure 63 : Création du projet (Source : auteure depuis logiciel « TRNSYS studio »)

F- Le projet final

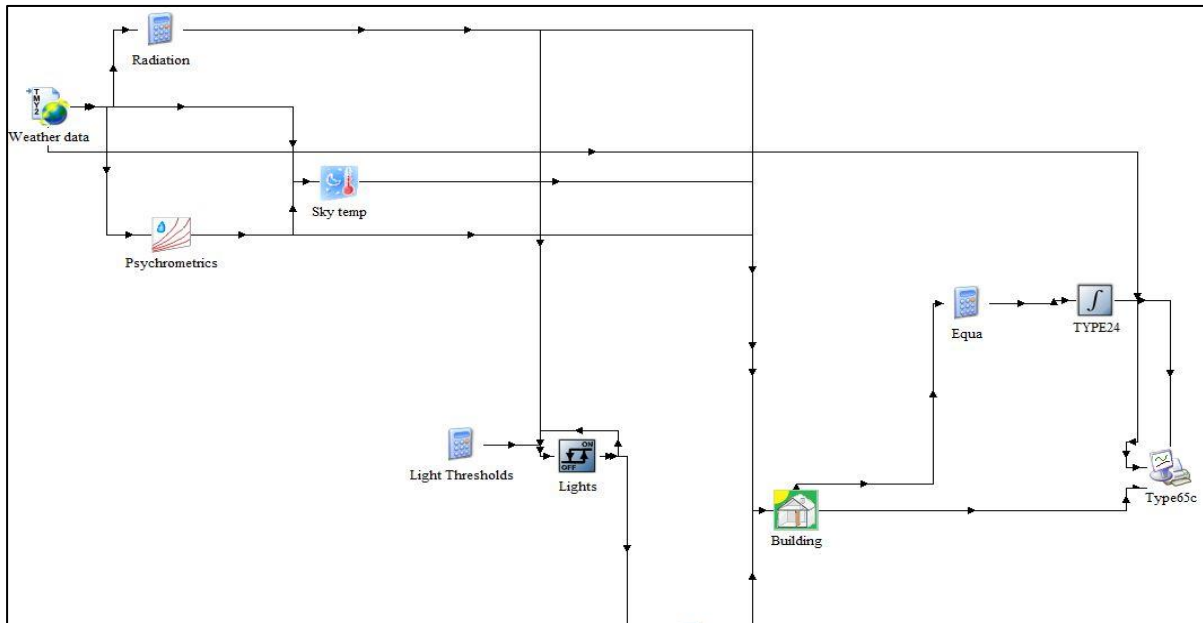



Figure 64: projet final (Source : auteure depuis logiciel « TRNSYS studio »)

Cette figure montre la création du projet avec quelque paramètre par défaut pour le bâtiment.

Pour redéfinir les paramètres on clique sur  puis « Edit building ».

II.7.3.3 Intégration du model sous « TRNSYS-Build »

II.7.3.3.1 Définition des paramètres du model

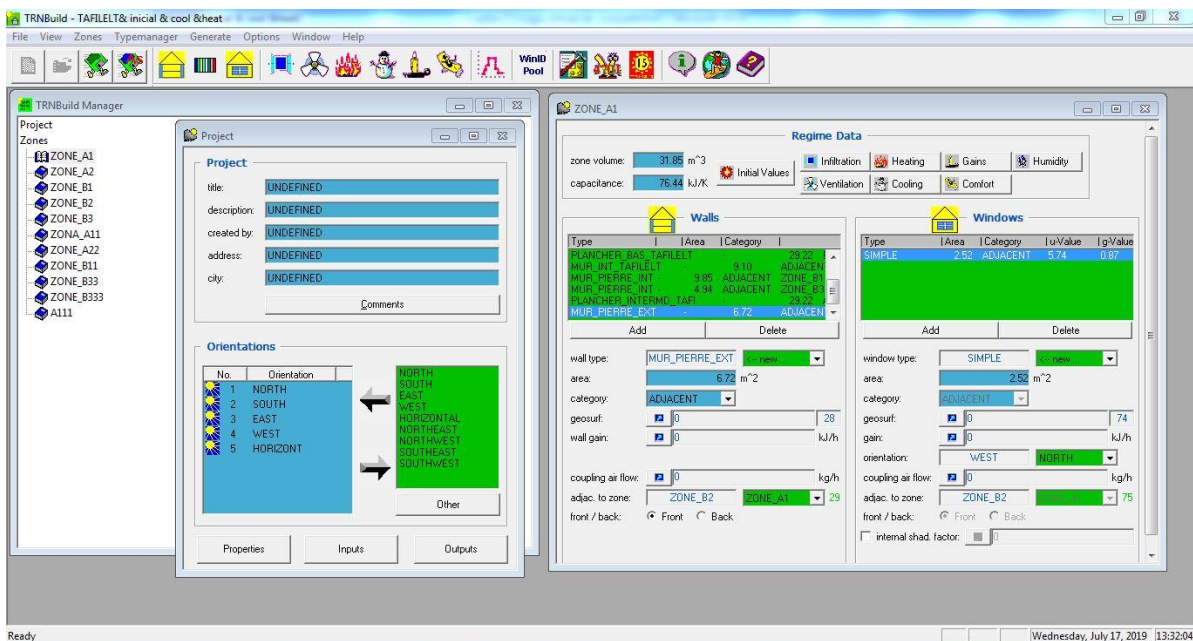


Figure 65: paramétrage du projet (Source : auteure depuis logiciel « TRNSYS studio »)

Dans cette fenêtre toutes les données relatives à notre projet peuvent être introduites.

Nous spécifions la composition des murs, leurs orientations respectives, les surfaces vitrées et les types de vitrage utilisés.

Nous définissons les caractéristiques des murs, fenêtres, portes, planchers et plafonds (dimensionnement, les matériaux l'orientation et autres caractéristiques) (figure 65 page précédente).

Une fois que toutes les données sont entrées, on peut lancer la simulation à partir du studio et sortir ainsi les résultats souhaités (profil de température, les besoins en chauffage et en climatisation).

A- Introduction des matériaux

Matériaux	Conductivité (w. m ⁻¹ °C ⁻¹)	Chaleurs spécifiques (kJ/kg. °C)	Masse volumique (kg/m ³)
Pierre	3.2	2200	2050
Chaud	0.87	1080	1800
Plâtre	0.35	936	800
Béton plein	1.75	1080	2300
Parpaing	1.1	936	900
Acier	72	468	7780
Mortier ciment	1.4	1080	2200
Carrelage	2.1	936	2200
Verre	1.1	792	2700
Isolant liège	0.044	1512	150

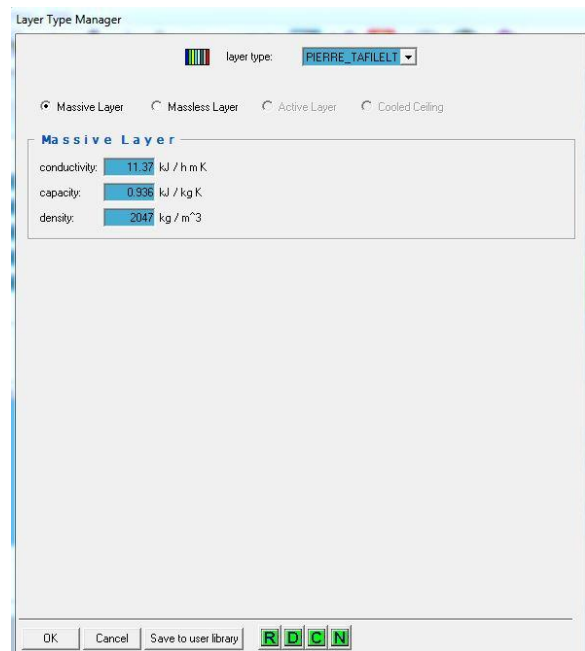


Figure 66 : Introduction des caractéristiques des matériaux (Source : auteure depuis logiciel « TRNSYS studio »)

Il est nécessaire de renseigner :

La conductivité : l'unité utilisée par TRNSYS pour les puissances est le kJ/h (W x 3.6).

La capacité calorifique

La masse volumique

B- Définition des murs

Pour chaque paroi, on indique :

- la structure de la paroi : matériaux et épaisseur (la paroi a un sens : on définit un côté « front » et un côté « back » que l'on retrouvera lorsque l'on disposera les parois dans les zones, pour les parois donnant sur l'extérieur, le côté « front » est le côté intérieur)
- les coefficients d'absorption des parois
- les coefficients convectifs (h_e et h_i) selon la réglementation thermique des bâtiments habitation D.T.R.C 3-2 (figure 67).

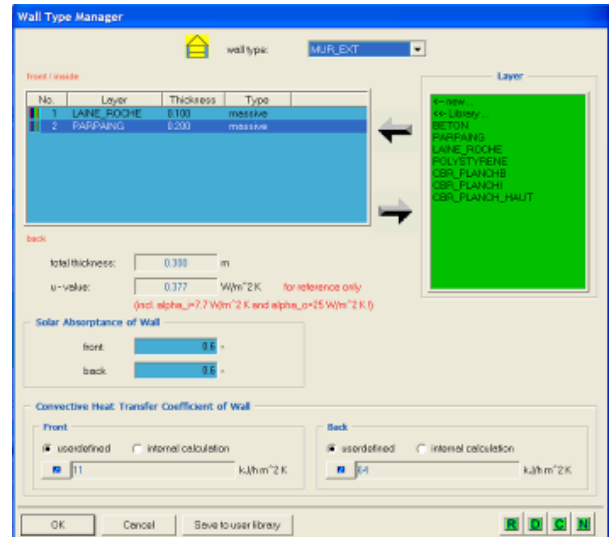


Figure 67: Définir la structure des parois (Source : auteure depuis logiciel « TRNSYS studio »)

C- Définition des fenêtres

On définit les dimensions des Fenêtres, et aussi le type de vitrages existant dans la bibliothèque du logiciel (figure 68).

- définir la partie opaque de la menuiserie.
- définir les résistances additionnelles des occultations solaires et des coefficients de réflexion dans le cas d'occultations intérieures.

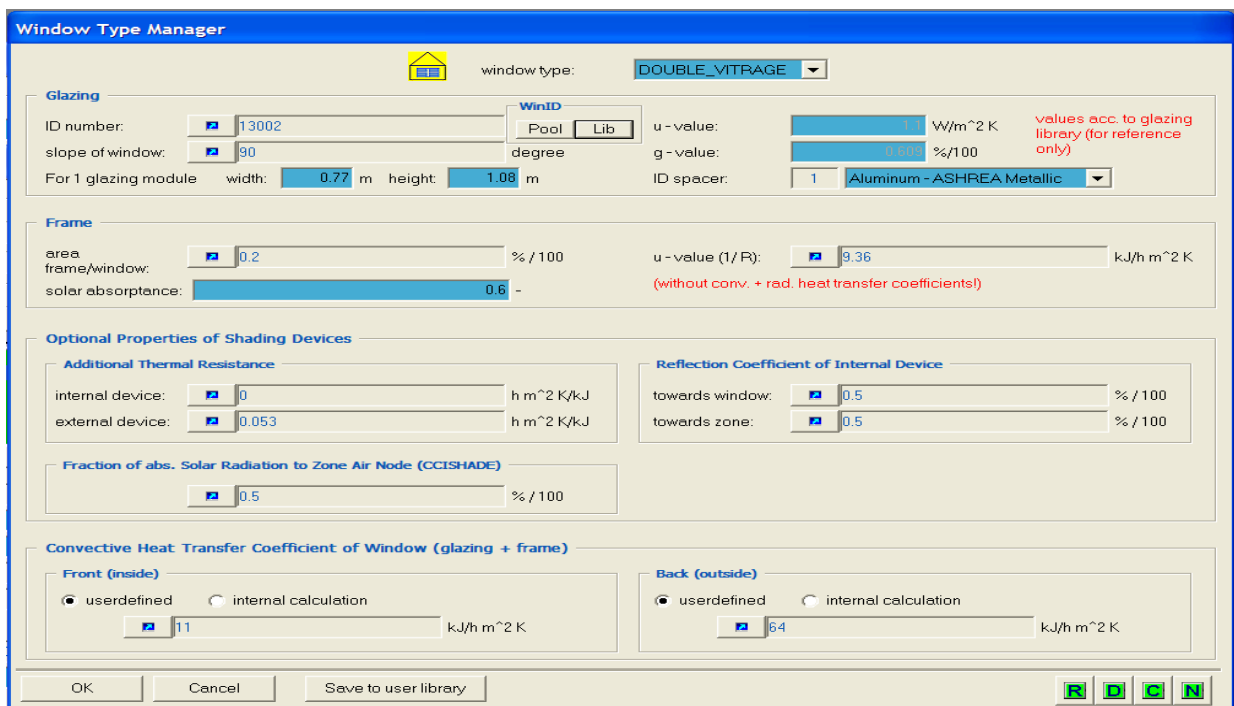


Figure 68: Définir les types d'ouverture (Source : auteure depuis logiciel « TRNSYS studio »)

D- Définition des types d'infiltration

Le taux de renouvellement d'air lié aux infiltrations est à saisir en Vol/h. Pour modéliser une surventilation, on peut utiliser les infiltrations en utilisant une valeur en INPUT (figure 69).

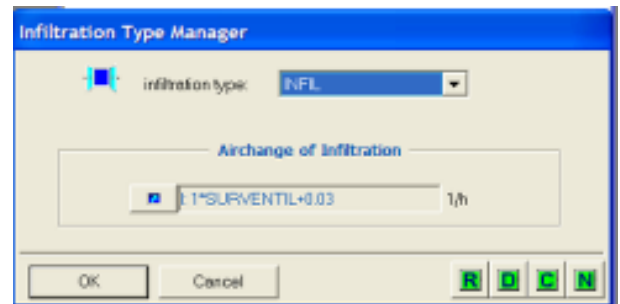


Figure 69: Définir le taux d'infiltration (Source : auteure depuis logiciel « TRNSYS studio »)

E- Définition des types de ventilation

De la même façon que pour les infiltrations, il faut saisir le taux de renouvellement d'air lié à la ventilation en vol/h.

Il est également nécessaire de rentrer la température de l'air entrant par cette ventilation (T extérieur ou « outside » pour une ventilation simple-flux) (figure 70). Dans le cas d'une ventilation double-flux, la température de soufflage est donnée en INPUT.

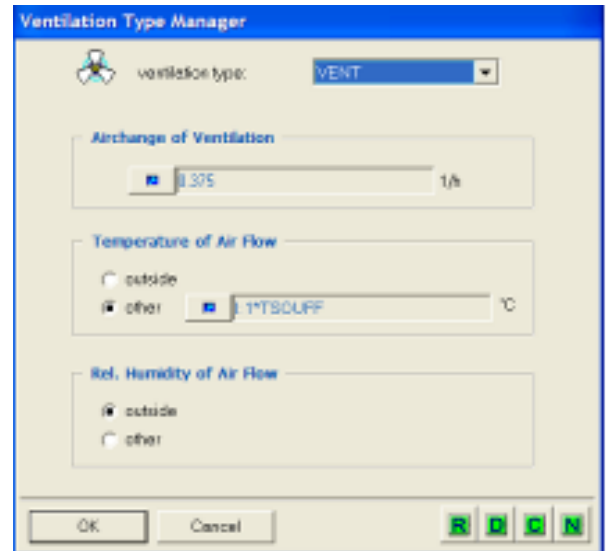


Figure 70: Définir le débit de ventilation (Source : auteure depuis logiciel « TRNSYS studio »)

F- Définition du type chauffage

La température de consigne est de 21c° et elle varie selon les scénarios d'occupation (figure 71).

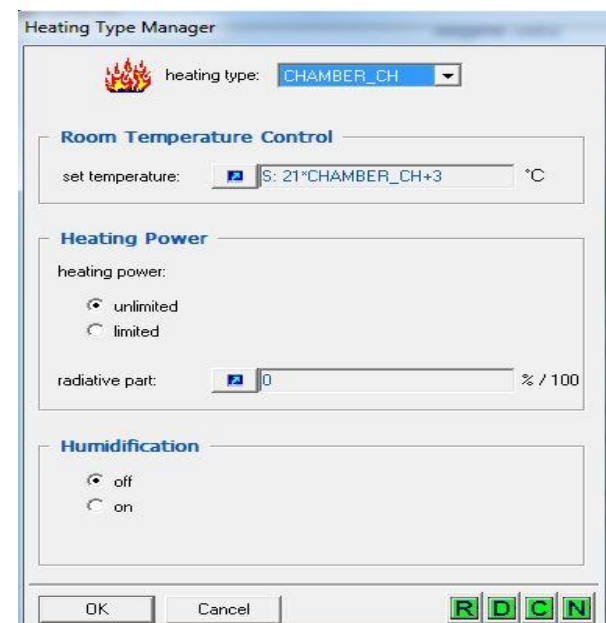


Figure 71: Définir la température de chauffage (Source : auteure depuis logiciel « TRNSYS studio »)

G- Définition du type de refroidissement

De la même façon que pour les types de chauffage, il est nécessaire de saisir la température de consigne de froid tout respectant les scenarios d'occupation (figure 72).

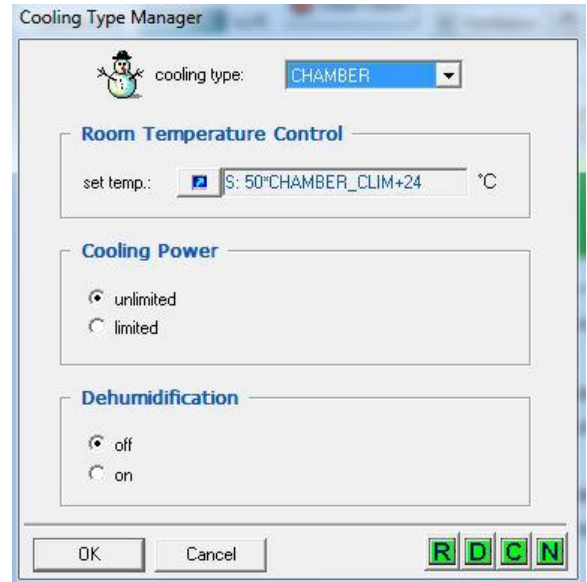


Figure 72 : Définir la température de climatisation (Source : auteure depuis logiciel « TRNSYS studio »)

H- Définition des apports internes

Il est nécessaire de rentrer en INPUT les apports internes qui seront générés dans les différentes zones (figure 73).

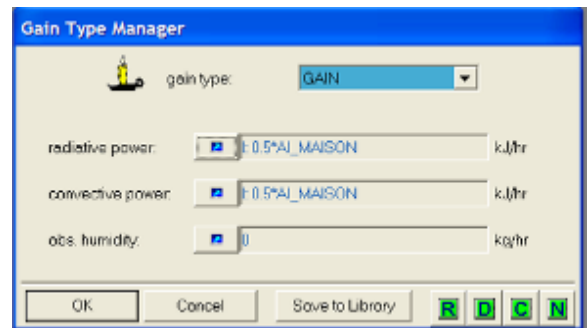


Figure 73: Définition des gains (Source : capture d'écran prise par l'auteur depuis logiciel « TRNSYS-Build »)

I- Définition des scénarios

Cette fenêtre nous permet de définir les différents scénarios : ventilation, d'occupation, chauffage et de refroidissement etc (figure 74)..

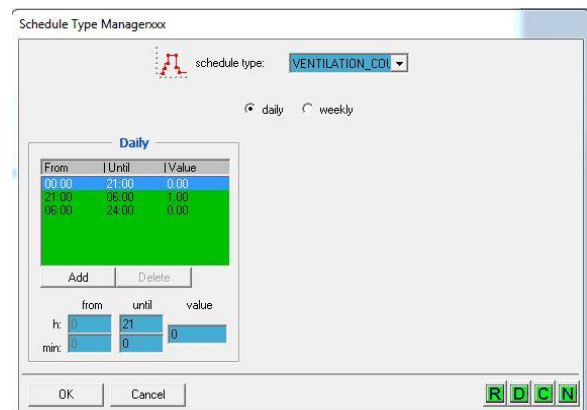


Figure 74: Définition des scénarios (Source : auteure depuis logiciel « TRNSYS studio »)

II.7.3.3.2 Intégration des paramètres correspondant aux zones thermiques

1- Saisie des parois et des fenêtres pour chaque zone

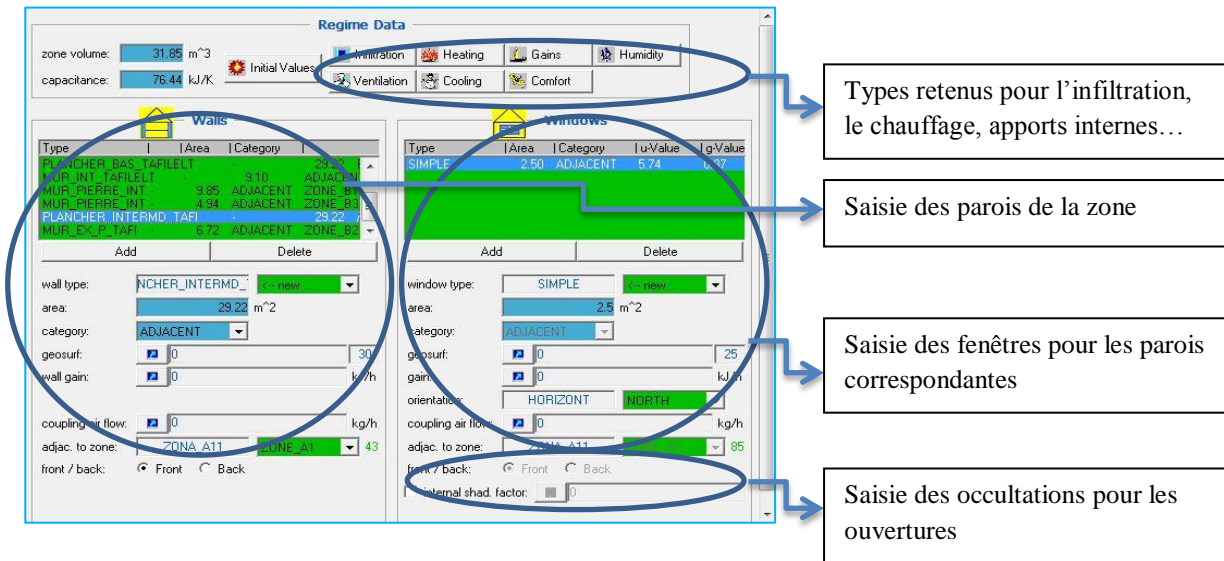


Figure 75: Insertion des éléments constructifs (Source : auteure depuis logiciel « TRNSYS studio »)

2- Saisie des types de chauffage, ventilation

Activer le chauffage par « on » et choisir le type de chauffage par le menu déroulant la même manipulation est nécessaire pour les infiltrations, la ventilation et les apports internes. Les températures du confort sont fixées à 24°C en été et 21°C en hiver selon le DTR (figure 76 et 78).



Figure 77 : activation du chauffage (Source : auteure depuis logiciel « TRNSYS studio »)



Figure 76: activation de climatisation (Source : auteure depuis logiciel « TRNSYS studio »)

3- Définition des « OUTPUT »

Une fois les zones définies (figure 78), il est nécessaire de définir les sorties que l'on souhaite du modèle afin d'exploiter au mieux les résultats.

A partir de la fenêtre « Output », on peut ajouter différents type de sorties en cliquant sur « Add » et en renseignant la fenêtre « Output Data » (figure 80).

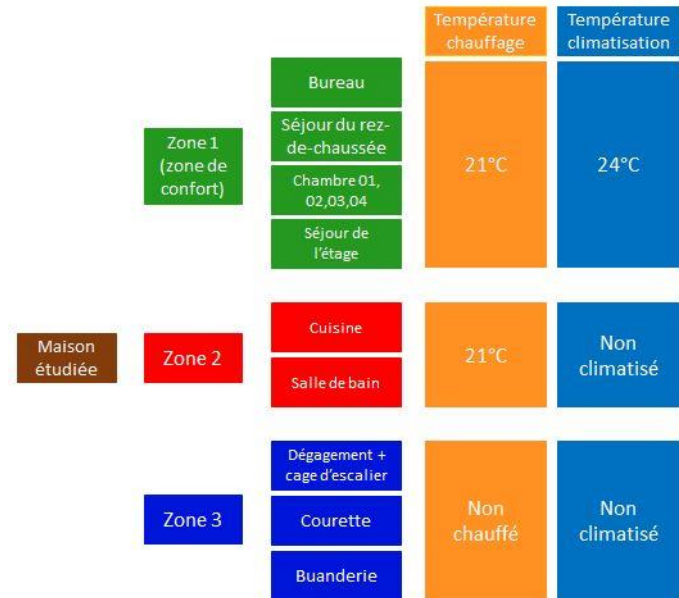


Figure 78 : : schéma démonstratif des différentes zones thermiques étudiées et leurs scenarios de consigne thermostat. Source : auteur

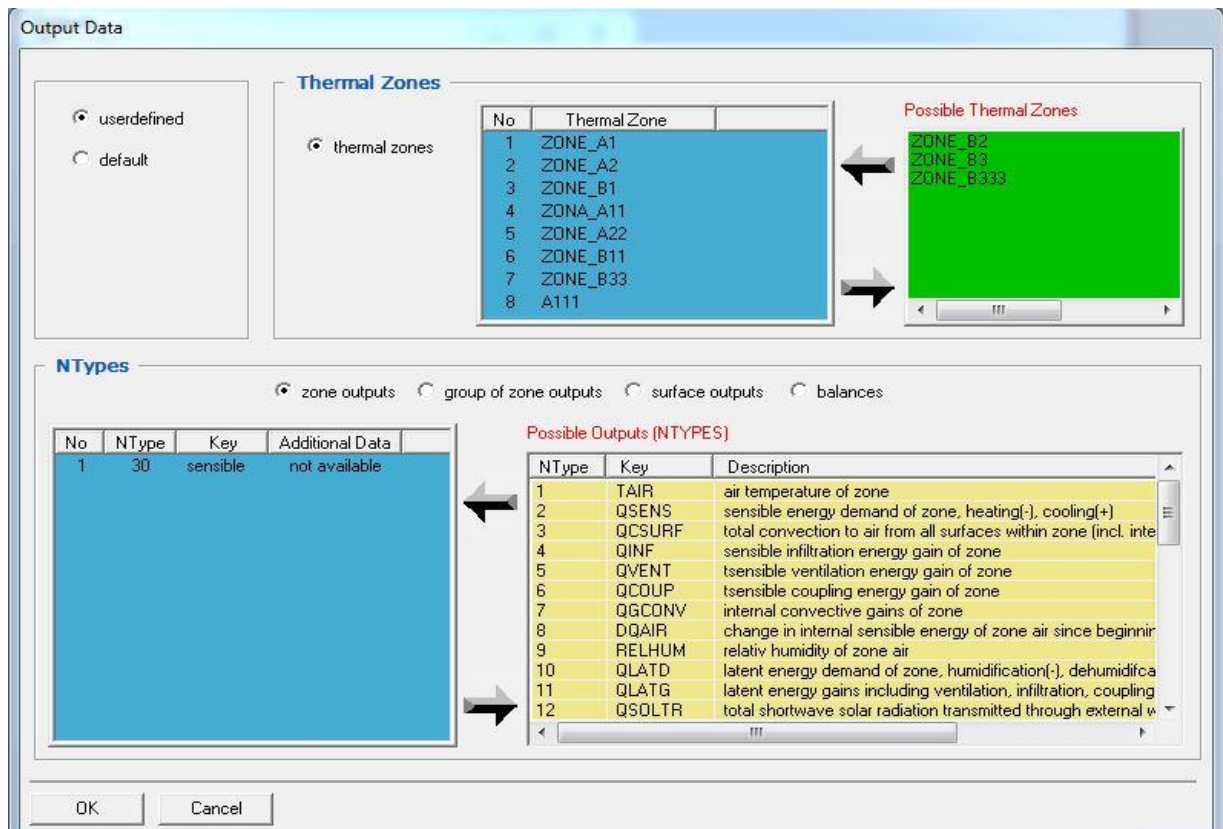


Figure 80 : choix des outputs des différentes zones.

On peut noter les valeurs de sorties les plus utiles pour notre cas d'étude :

- Les températures de l'air des zones (définies dans les sorties par défaut)
- Bilans énergétiques pour les zones

Cette sortie va générer lors du lancement de la simulation un fichier « Energy_Zone.bal » qui peut être lu sous Excel. Ce fichier reprend à chaque pas du calcul le bilan énergétique des zones sélectionnées (besoins de chauffage, apports internes, apports solaire, apports liés aux « wall gains » et au « couplage air flow », déperditions liées à la ventilation, aux infiltrations, aux parois et ponts thermiques...)

II.7.3.4 Présentation du cas de base et des variantes

L'étude des consommations énergétiques et l'amélioration du confort thermique du projet passent par la réalisation de séries de simulations thermiques dynamiques. Ces simulations ont pour but de démontrer les résultats obtenus lors d'intervention sur l'enveloppe extérieure de la maison en terme de configuration des coques vitrées, la toiture et les murs extérieurs (courette +buanderie)

Une simulation reposant sur le cas de base, permet la déduction des températures intérieures et de la consommation énergétique du cas de base.

Donc, le cas de base servira de support qui subira des modifications de différents paramètres en exploitant les mesures d'efficacité énergétiques pour obtenir les variantes des cas optimaux qui seront regroupés pour former le cas optimisé.

On distinguera alors deux types de données d'entrée :

Les données identiques entre le cas de base et les variantes. Il s'agit :

- **La volumétrie (surface, volume, surface des façades...)**
- **Les données météorologiques**
- **Les schémas d'utilisation (apports internes et consignes de température...)**

Les données qui vont évoluer entre le cas de base et les variantes du projet traduiront ainsi le gain énergétique et l'amélioration du confort thermique. Il s'agit :

- **La configuration d'ouverture des surfaces vitrées.**
- **La protection solaire des surfaces vitrées.**
- **L'impact de l'isolation.**

A- Le cas de base :

Configuration de la cour du cas de base

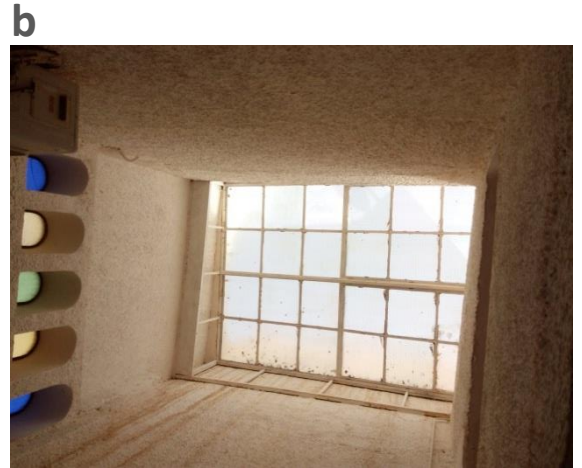


Figure 81:vue sur la cour (a- extérieur. b- intérieur). Source : auteure

Configuration du chebek du cas de

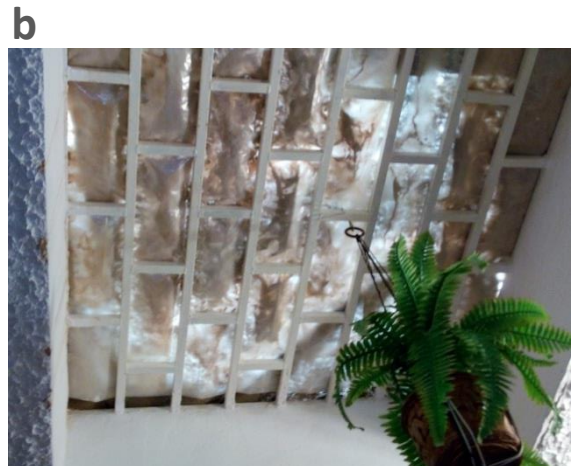


Figure 82:vue sur chebek (a- extérieur. b- intérieur). Source : auteure

B- Les variantes

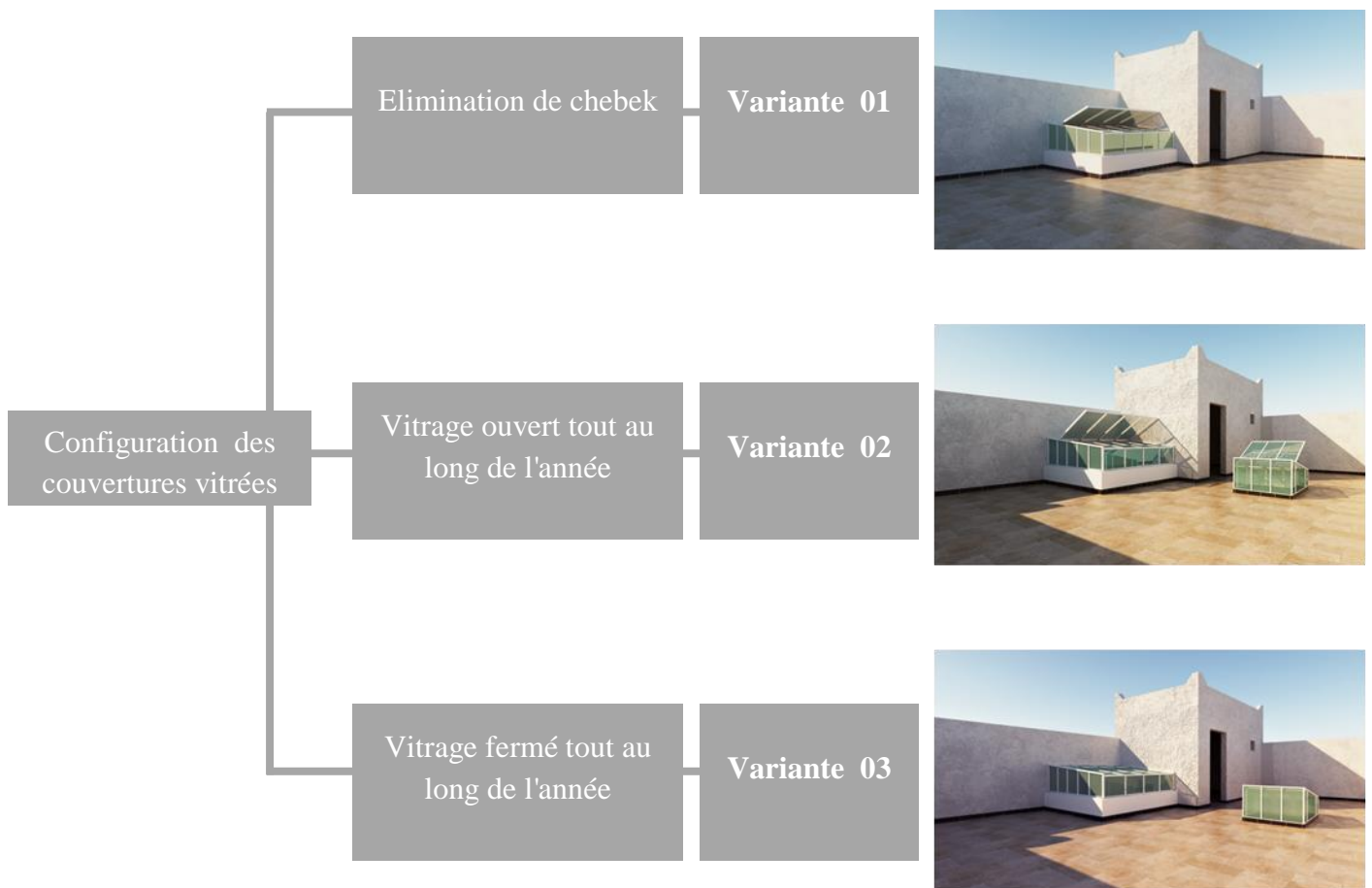


Figure 83 : schéma de configuration des couvertures vitrées

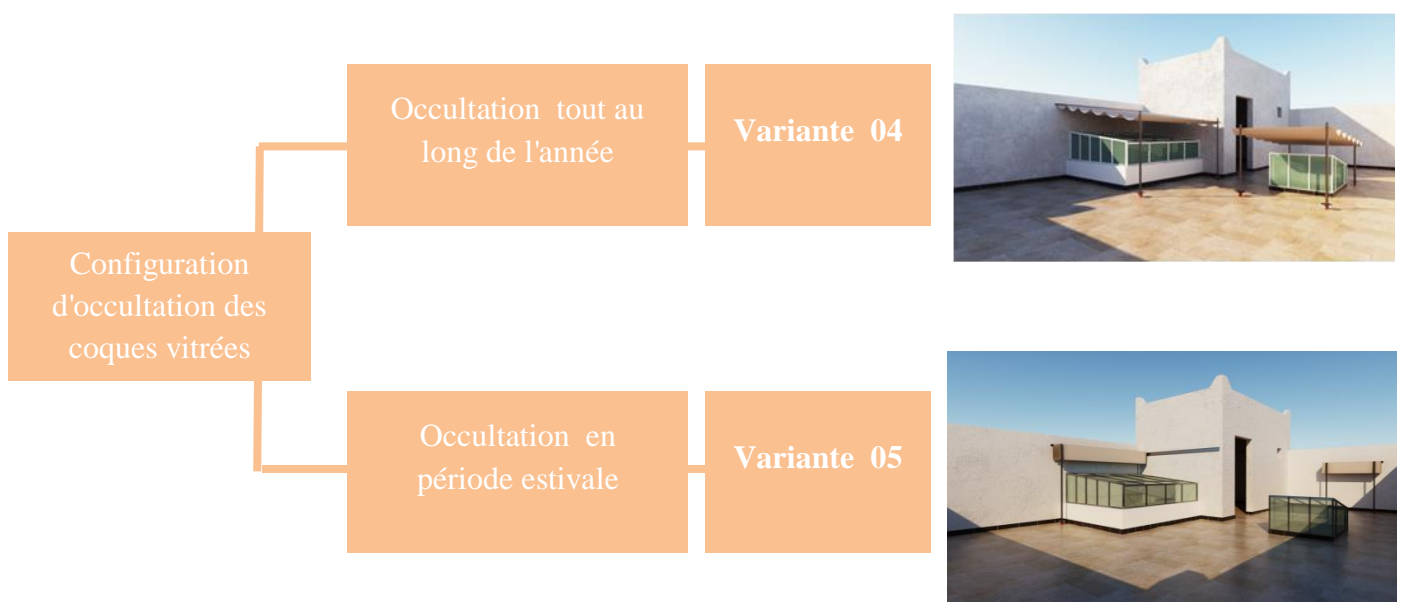


Figure 84: schéma de configuration des protections solaire.

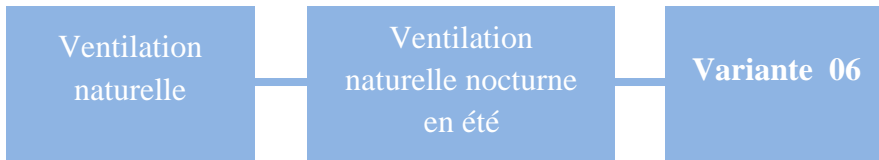


Figure 85: schéma de configuration de la ventilation naturelle.

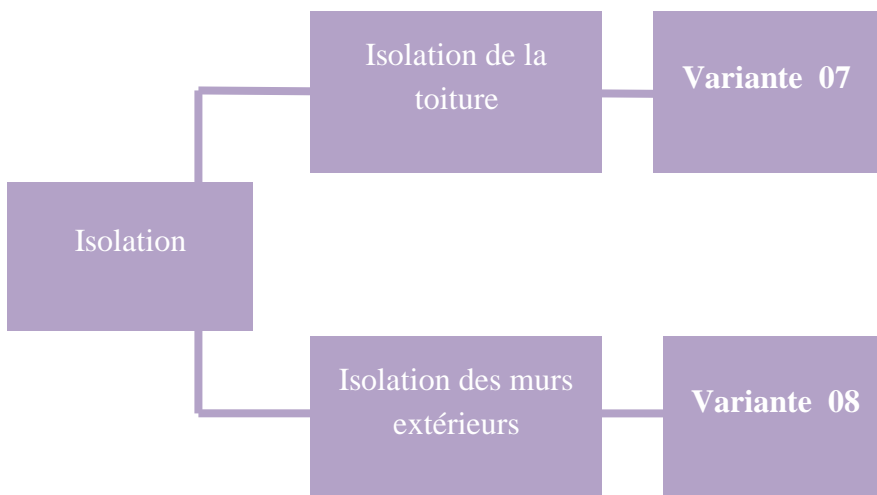


Figure 86: schéma de configuration de l'isolation

Conclusion

En conclusion de ce chapitre, nous pouvons déduire que l'habitat du ksar de Tafilelt nous a informé sur l'application de certaines stratégies bioclimatiques contribuant au confort thermique en climat chaud et aride qui consistent en une bonne compacité de la forme, l'orientation, le traitement des fenêtres et des parois extérieures massives en pierre naturelle et la présence de la cour, espace nouveau dans la typologie traditionnelle, qui procure un meilleur éclairage naturel. Mais à la lecture des plans la configuration du chebek ne reflètent pas vraiment le souci d'intégration climatique.

En second lieu, nous avons procédé à un processus d'investigation et vérification : le premier consiste à un diagnostic thermographique du modelé étudié et ces résultats dévoilent la présence d'anomalie telles que : une absence d'isolation, une très importante infiltration d'air au niveau des surfaces vitrées ainsi qu'une détection de pont thermique. Le deuxième processus fut l'évaluation du niveau de confort thermique procuré par l'habitat du ksar Tafilelt, à travers son enveloppe architecturale en utilisant les résultats obtenus de l'étude expérimentale des propriétés thermo physiques de la pierre naturel du site de Tafilelt, à l'aide de la simulation statique CTBAT conformément à la réglementation thermique algérienne.

Après la simulation avec CTBAT, durant la période estivale et hivernale, nous avons remarqué une absence de conformité à la réglementation thermique dans cet habitat pratiquement pendant toute l'année, ceci fut démontré par les deux résultats d'été et d'hiver. L'in-conformité des apports calorifiques est estimée à (2.7) ; tandis que celle des déperditions thermiques, elle, est estimée à (1.76).

De ce fait, nous constatons une situation d'inconfort qui peut être due à l'inefficacité de l'enveloppe et de ces éléments constructifs et l'importance des surfaces vitrées non protégées. Pour déterminer la provenance de cet inconfort nous avons procédé à une série de simulations thermiques dynamiques, du cas de base en arrivant au cas optimisé en termes de confort thermique et consommation énergétique.

Finalement, nous présentons dans le chapitre suivant les résultats obtenus et les différentes interprétations.

Chapitre 03 :

Résultats et Discussion

Introduction

Ce chapitre se focalisera sur les résultats obtenus après simulation ainsi que les mesures des températures et les discussions de l'impact des changements de configuration des différents éléments constructifs sur le confort thermique et les consommations énergétiques du bâtiment du cas de base.

L'objectif assigné à ce travail est de faire ressortir un modèle qui correspond à un habitat le plus efficace possible en tenant compte des mesures prises afin d'améliorer le confort thermique et l'efficacité énergétique en se référant au cas de base pour chaque mesure, après avoir préalablement paramétrer le cas de base et simuler ces consommations énergétiques. Cet objectif passe par la comparaison de l'influence de chaque mesure passive avec ce dernier pour déterminer l'impact de chaque paramètre indépendamment et ainsi éviter l'effet des interactions des paramètres.

Cette démarche permettra de déterminer l'impact de chaque mesure qui sera matérialisé par une évolution des températures intérieures du nouveau cas, s'en suit la comparaison de l'influence de ces mesures par rapport à la proportion d'énergie économisée.

III.8 Résultats et discussions

III.8.1 Etat des lieux du cas de base

Cette étape consiste à faire ressortir les résultats, paramétrer le logiciel TRNSYS avec les données caractéristiques du cas de base à l'aide du TRNBUILD (Type c 65) ainsi que les données météorologiques de Ghardaïa, et on fixe le pas de calcul à une heure pour chaque itération, enfin on simule pour obtenir l'évolution de la température de l'air à l'intérieur de chaque zone ainsi que les consommations énergétiques de chauffage et de climatisation.

III.8.1.1 Evolution des températures intérieur simulés

Les graphiques suivants (figure 87 et 88) présentent l'évolution des températures tout au long de l'année dans les différentes pièces de la maison comparées aux températures extérieure, puis nous mettrons l'accent sur les périodes estivale et hivernale afin d'avoir une lecture plus claire des cas les plus défavorables.

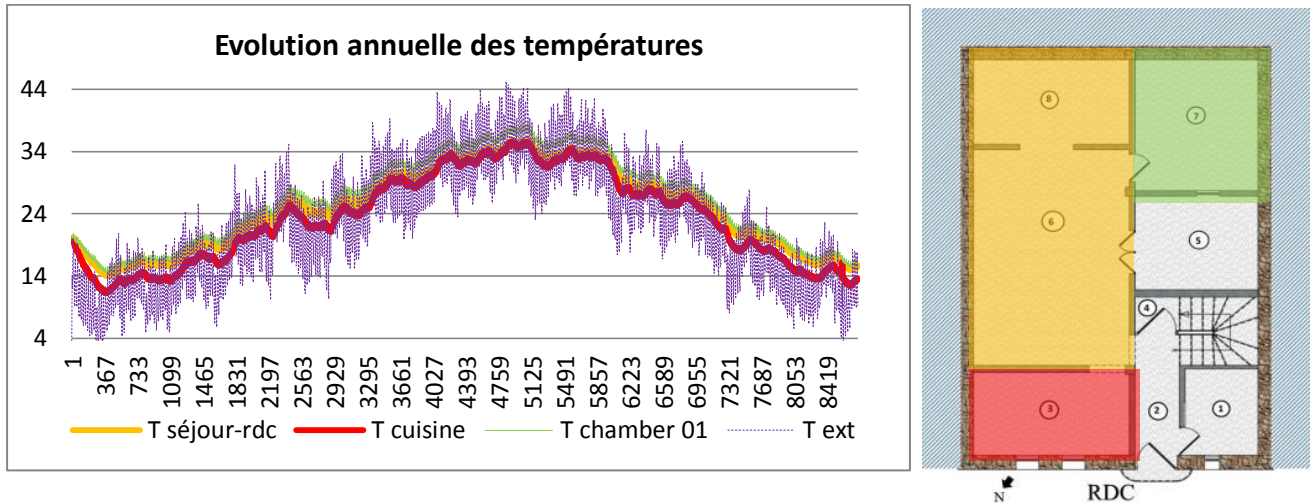


Figure 87 : Evolution annuelle de températures du niveau rez-de-chaussée du cas de base (source: simulation par TRNSYS effectuée par l'auteure.)

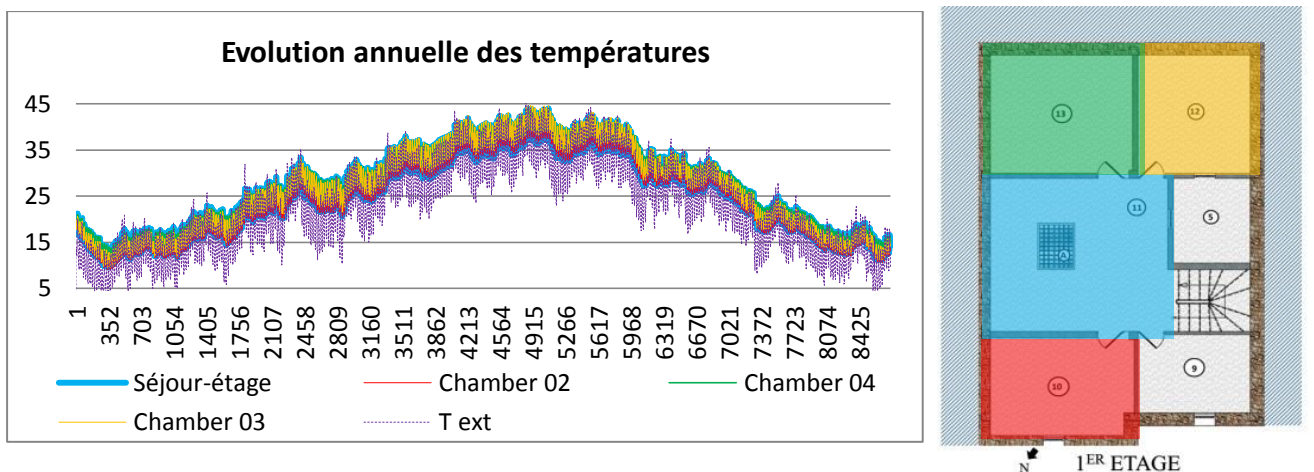


Figure 88: Evolution annuelle de températures du niveau étage de cas de base (source: simulation par TRNSYS effectuée par l'auteure.)

La température intérieure de la maison évolue de la même manière que la température extérieure, A l'intérieur, elle varie de 10°C à 25°C en hiver et de 30°C à 40°C en été, alors que celle de l'extérieure varie, elle de 05°C à 23°C en hiver et atteint les 48°C en été. Les valeurs extérieures sont des valeurs moyennes données par le logiciel METEONORM.

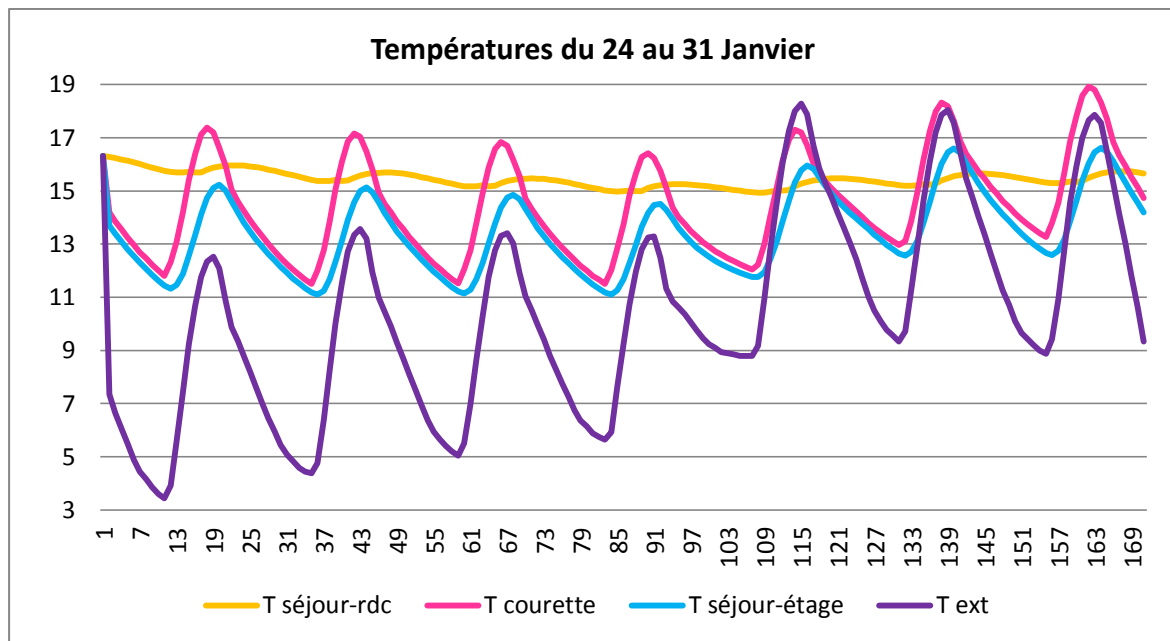
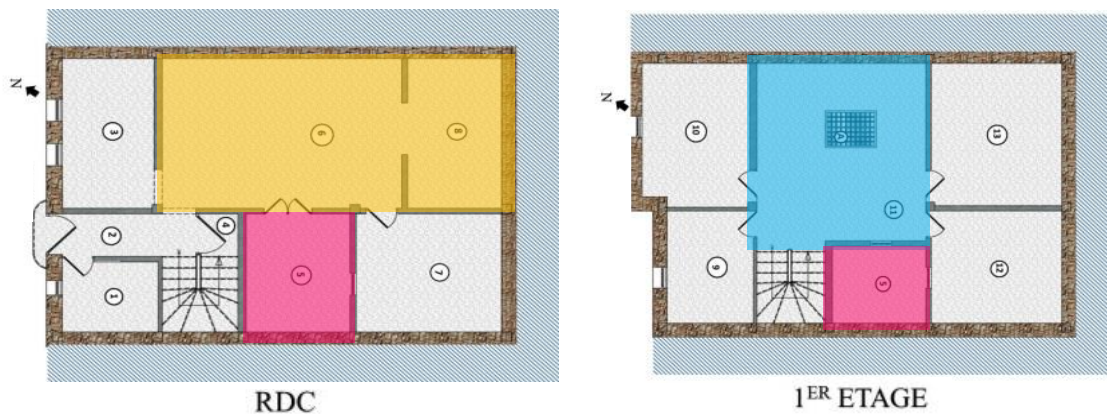
Saison hivernale :

Figure 89: Evolution des températures du cas de base pour la saison hivernale simulation par TRNSYS effectuée par l'auteur.)

(source:



La (figure 89) présente l'évolution de la température de l'air extérieur et celles de l'intérieur de la maison pour différentes zones thermiques à savoir (séjour du rez-de-chaussée, séjour de l'étage et la courette). D'après celle-ci, on constate que les températures de l'étage sont inférieures à celle du rez-de-chaussée.

Pour la dernière semaine du mois de Janvier, le climat est marqué par des températures très basses variant entre 04°C et 10°C , cela a un impact direct sur la température interne, cette dernière est située autour de 16°C la journée et 11°C la nuit. Nous constatons aussi que l'amplitude de la variation de température est de l'ordre de 3°C entre jour et nuit.

Saison estivale :

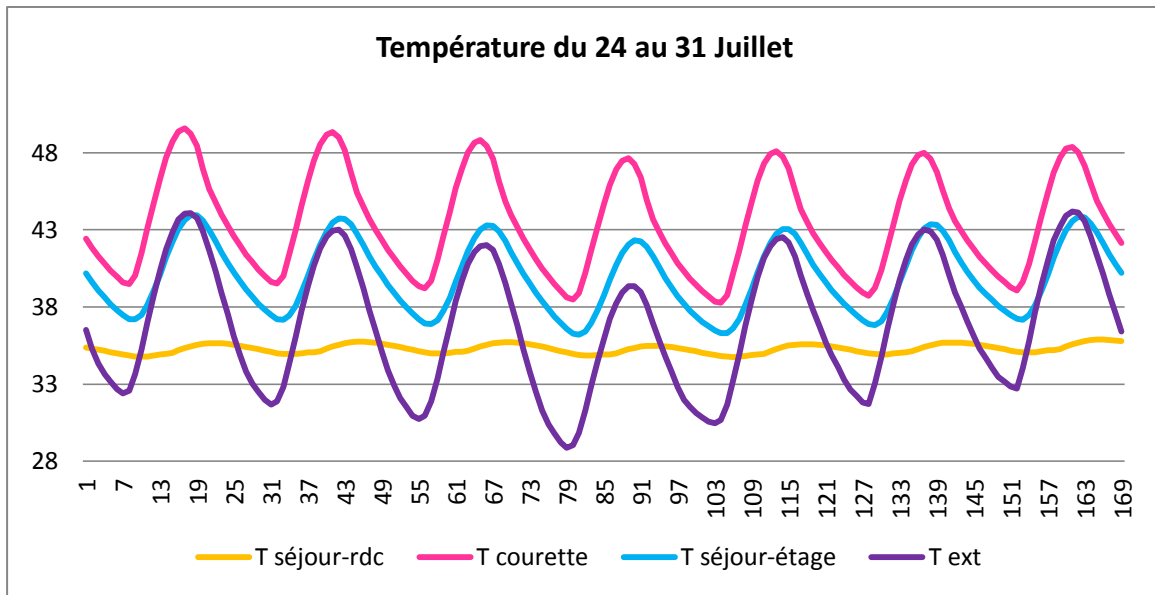
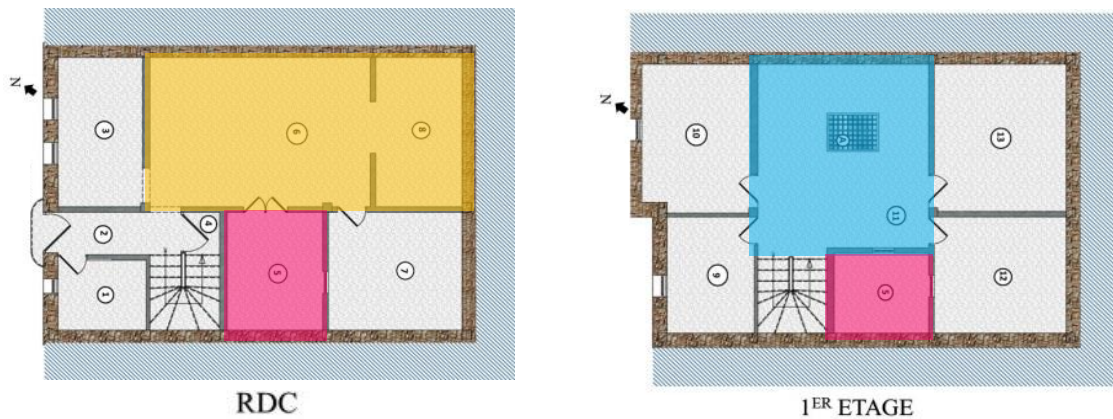


Figure 90: Evolution des températures du cas de base pour la saison estivale (source: simulation par TRNSYS effectuée par l'auteure.)



D'après la (figure 90), on constate que la température à l'intérieur des deux niveaux de la maison pour la dernière semaine du mois de Juillet évolue différemment. Les températures à l'intérieur de la maison oscillent en moyenne entre 35°C et 40°C avec un maximum de 44 °C. Il a été constaté que l'amplitude de la variation de la température entre la nuit et la journée est de 3 à 4°C pour le niveau du rez-de-chaussée et de 6 à 7 C° du niveau étage, cette stabilité au niveau du rez-de-chaussée s'explique par la mitoyenneté.

III.8.1.2 Confrontation des résultats de simulation aux résultats mesurés

Saison estivale :

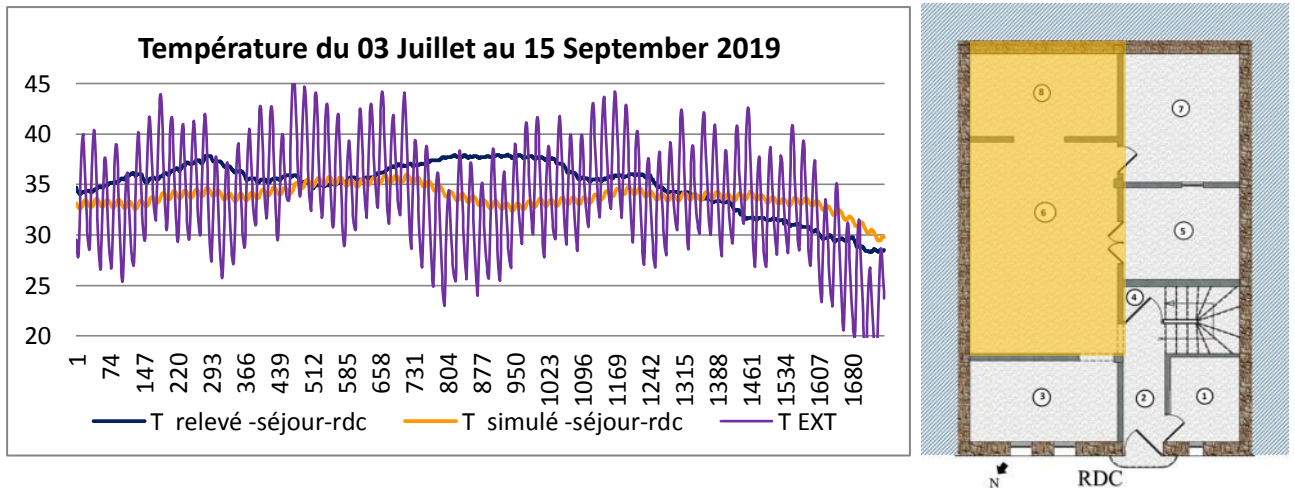


Figure 91: Comparaison de l'évolution des températures simulées et mesurées du RDC pour la saison estivale du 03 Juillet au 15 Septembre 2019 (source: simulation par TRNSYS effectuée par l'auteure.)

La lecture du graphe de la (figure 91), fait ressortir l'évolution de la courbe des températures du séjour rez-de-chaussée, les résultats simulés suivent celles des températures mesurées. Soit, elle atteint sa valeur maximale de 36.30°C et sa valeur minimale de 28°C soit une amplitude de 08°C.

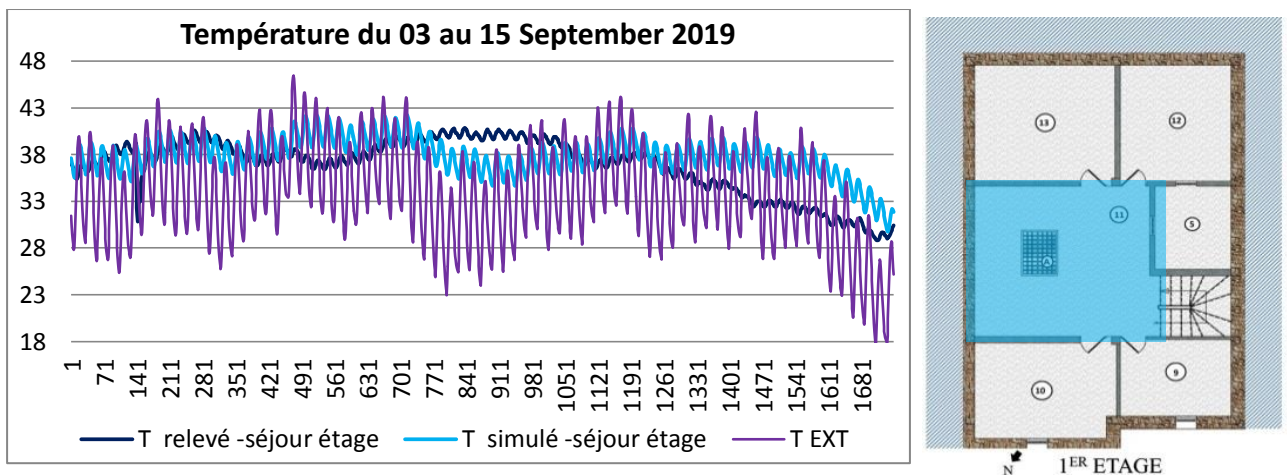


Figure 92: Comparaison de l'évolution des températures simulées et mesurées de l'étage pour la saison estivale du 03 Juillet au 15 Septembre 2019 (source: simulation par TRNSYS effectuée par l'auteure.)

Pour le séjour d'étage (figure 92) , l'évolution de la courbe des températures est entre 35 °C et 43 °C, sous l'effet de la radiation solaire directe, cette température atteint sa valeur maximum de 45°C , il a été constaté que l'amplitude de la variation de la température entre la nuit et la journée des résultats simulés est de 5 à 9 °C alors que les résultats mesurés représentent une amplitude de variation moins importante de 3 °C à 5 °C.

III.8.1.3 Evolution mensuelle des consommations énergétiques

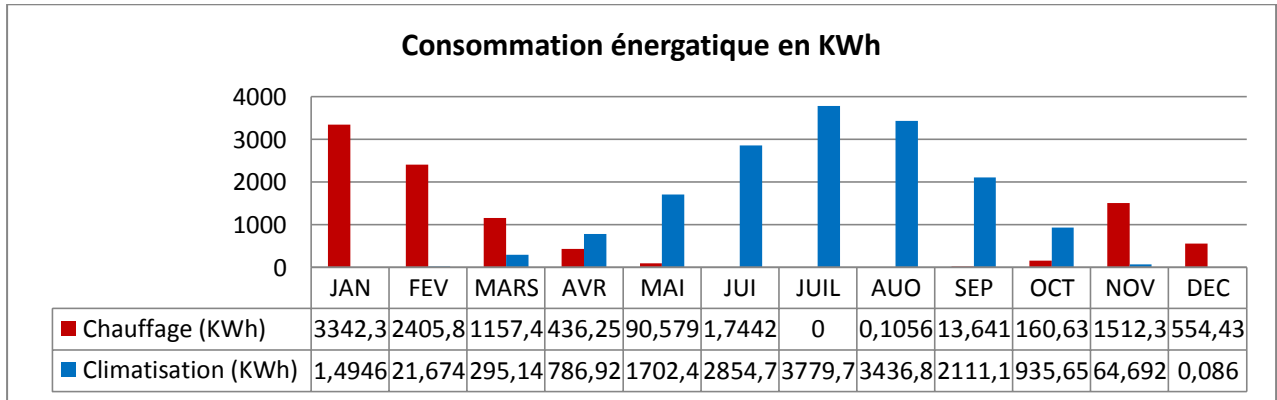


Figure 93: Etat de consommation énergétique mensuelle du cas de base (source: simulation par TRNSYS effectuée par l'auteure.)

Selon le graphe au-dessus (figure 93), on remarque que pendant la période hivernale une demande très élevée de chauffage, qui est de l'ordre de 3342 KWh pour le mois de janvier et 3779 KWh de climatisation pour le mois de Juillet.

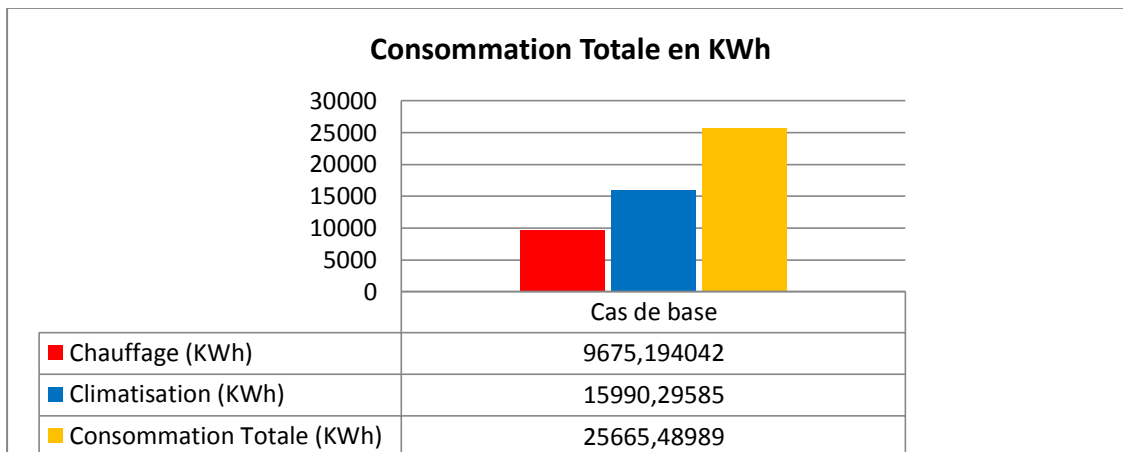


Figure 94: Etat de consommation énergétique annuelle du cas de base (source: simulation par TRNSYS effectuée par l'auteure.)

Les consommations énergétiques de chauffage et de climatisation du bâtiment (cas de base) se révèlent être de l'ordre de 9675 (KWh) pour le chauffage et de 15990 (KWh) pour la climatisation soit une consommation totale annuelle de 25665 (KWh) (figure 94).

La performance énergétique de notre cas de base est de l'ordre de 160,40 KWh /m².an (on obtient cette performance on divisant la consommation totale annuelle par la surface du bâtiment 160 m²).

III.8.2 L'impact des améliorations effectués

III.8.2.1 L'impact de la configuration des couvertures vitrées

Saison hivernale :

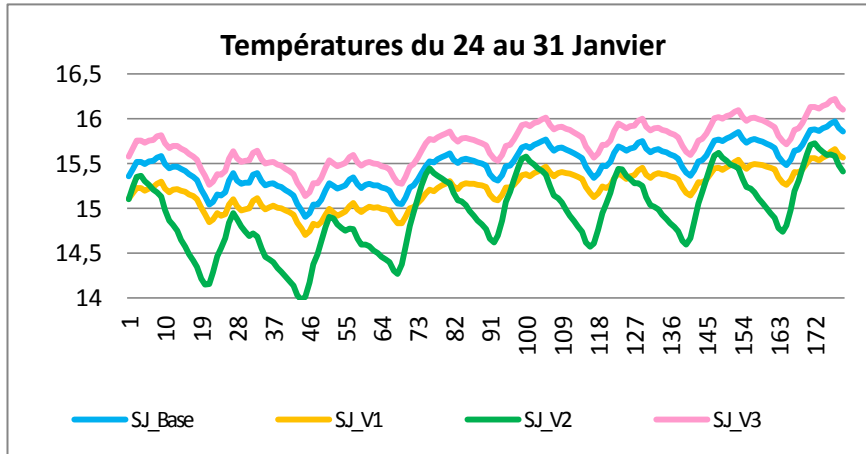


Figure 95: Comparaison de l'évolution des températures du séjour de cas de base avec les variantes V1, V2, V3 pour la saison hivernale (source: simulation par TRNSYS effectuée par l'auteur.)

La température intérieure en saison hivernale (figure 96) de la **variante 3** augmente de 1,5°C par rapport au cas de base, cette augmentation s'explique par l'élimination de la protection solaire interne de ce dernier.



Figure 96 : Variante 1



Figure 97 : Variante 2

Saison estivale :

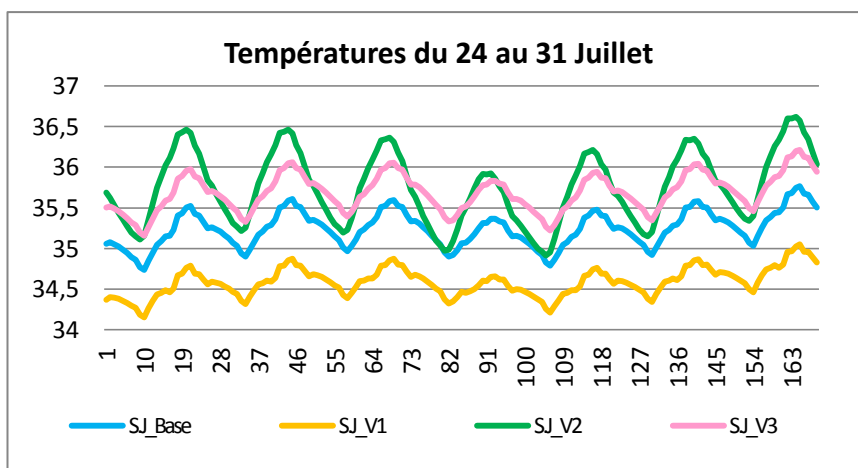


Figure 98: Comparaison de l'évolution des températures du séjour de cas de base avec les variantes V4, V5 pour la saison estivale (source: simulation par TRNSYS effectuée par l'auteur.)

La température intérieure en saison estivale (figure 99) de la **variante 1** diminue de 2 °C par rapport au cas de base, cette diminution s'explique par l'élimination du chebek de ce dernier.

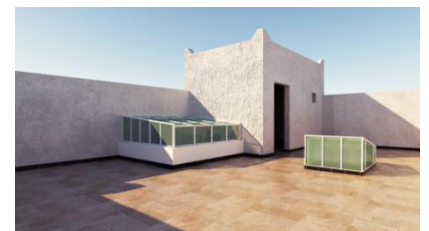


Figure 99 : Variante 3

Tableau 3 : Consommation énergétique annuelle (L'impact de configuration des couvertures vitrée)

Besoin énergétique	Cas de base	Variable 01	Variable 02	Variable 03
Chauffage (KWH)	9675	10196	10406	9530
Climatisation (KWH)	15990	15160	17522	16893
Consommation Totale (KWh)	25665	25356	27928	26423
Performance énergétique	160,40	158,47	172	165
Énergie économisé (%)		1,2%	-7,23%	- 2,9%

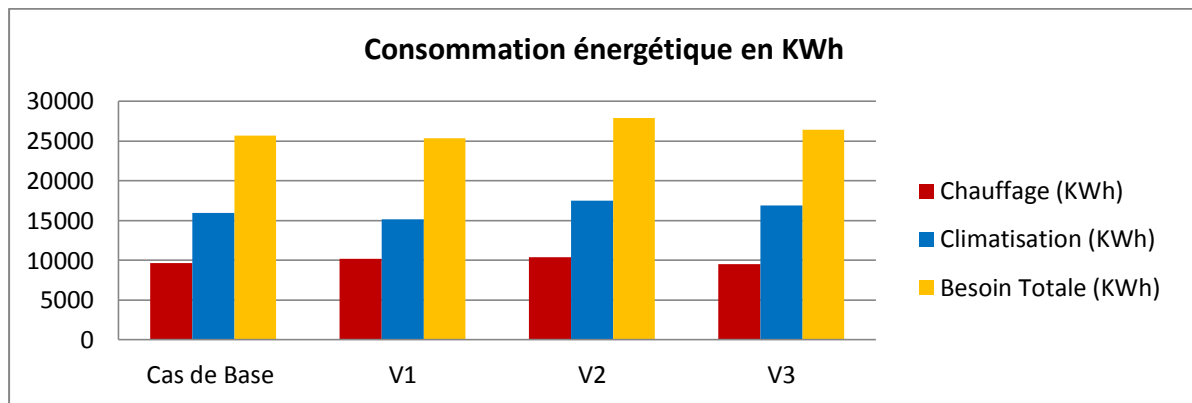


Figure 100: Comparaison des consommations énergétiques du cas de base avec les variantes V1, V2, V3. (Source: simulation par TRNSYS effectuée par l'auteure.)

L'étude de l'impact de la configuration des coques vitrées a pour but l'examen du gain énergétique en chauffage grâce aux apports solaires (figure 100).

La première simulation de (**variante 1**) a été faite suite à l'élimination du chebek et sa coque vitrée du cas d'étude de base, cela a montré que la consommation énergétique pour le chauffage a augmenté inversement à celle de la climatisation qui a enregistré une baisse de plus de 5.1%, pour au final arriver à un gain énergétique total de plus de 1.2%.

L'ouverture permanente des coques vitrée (**variante 2**) était au centre de la deuxième simulation, concluant qu'il faut absolument éviter cette configuration du fait que la consommation énergétique totale a augmenté de plus de 7.23%. La configuration des coques vitrées fermés en permanence (**variante 3**) ont fait objet de la troisième simulation. Les résultats qui accompagnent ce changement de configuration influent sur la consommation énergétique totale du bâtiment, cette configuration a apporté un gain de 3% en énergie de chauffage alors qu'elle a engendré une augmentation de 3.85 % en énergie de climatisation.

III.8.2.2 L'impact de configuration des protections solaire

Saison hivernale :

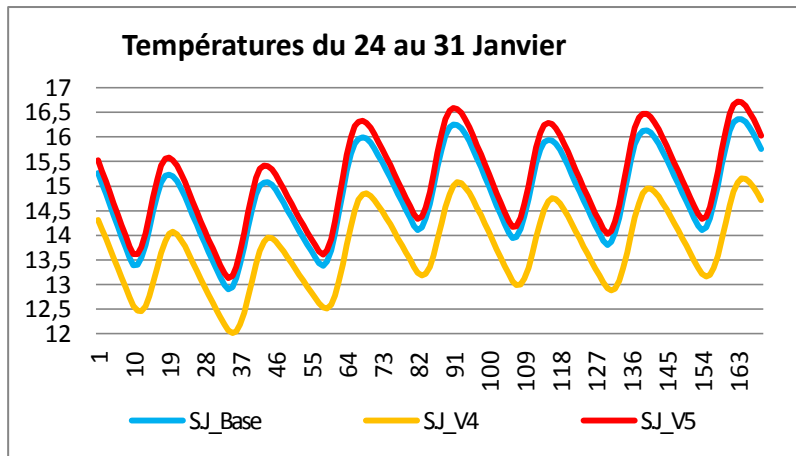


Figure 101: Comparaison de l'évolution des températures du séjour du cas de base avec les variantes V4, V5 pour la saison hivernale (source: simulation par TRNSYS effectuée par l'auteur.)



Figure 102 : Variante 4



Figure 103 : Variante 5

Les résultats de la figure (103) montrent l'effet de la protection solaire des surfaces vitrées de la maison sur la température intérieure du séjour. Cette stratégie a considérablement amélioré la température à l'intérieur de la maison en l'augmentant de 3 à 5°C. L'amplitude de la variation de la température jour nuit est inférieure à 3°C.

Saison estivale :

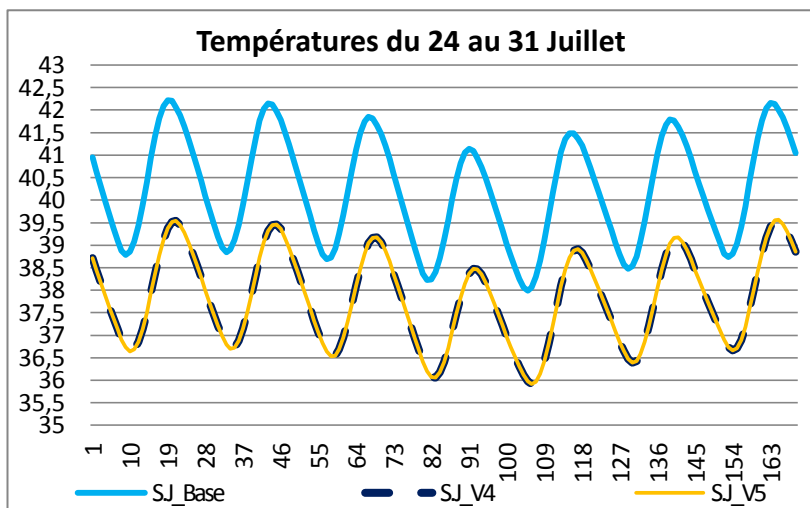


Figure 104: Comparaison de l'évolution des températures du séjour du cas de base avec les variantes V4, V5 pour la saison estivale (source: simulation par TRNSYS effectuée par l'auteur.)



Figure 105 : Variante 4



Figure 106 : Variante 5

Les résultats dans la (figure 105) permettent de constater que la protection solaire des couvertures vitrées a efficacement contribué à améliorer la température à l'intérieur de la maison, avec une diminution de 2 à 4°C en plus de la réduction de l'amplitude.

Tableau 4 : Consommation énergétique annuelle (L'impact de configuration des protections solaire)

Besoin énergétique	Cas de base	Variable 04	Variable 05
Chauffage (KWh)	9675	11538	9688
Climatisation (KWh)	15990	12750	13730
Consommation Totale (KWh)	25665	24288	23419
Performance énergétique	160,40	151,8	146,36
Énergie économisé (%)		5,36%	8,75%

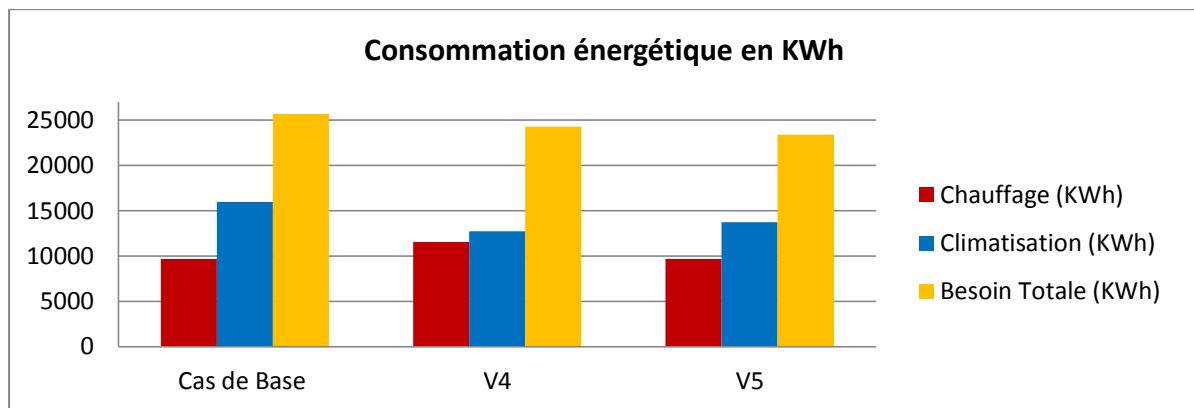


Figure 107: Comparaison des consommations énergétiques du cas de base avec les variantes V4, V5. (Source: simulation par TRNSYS effectuée par l'auteur.)

La simulation de la protection solaire permanente (**variante 4**) a montré que la consommation énergétique pour le chauffage a augmenté inversement à la consommation de climatisation qui a enregistré une baisse de plus de 20.26%, pour au final arrivé à un gain de consommation énergétique total de 5.36%. Quand a la simulation de la protection solaire en saison estivale (**variante 5**) qui a l'avantage de protéger les surfaces vitrées du rayonnement solaire en été et de favoriser le solaire passif en hiver, Cette mesure a permis un gain énergétique totale de plus de 8.75% qui est de plus 14% pour la climatisation (figure 107).

III.8.2.3 L'impact de la ventilation naturelle

Saison estivale :

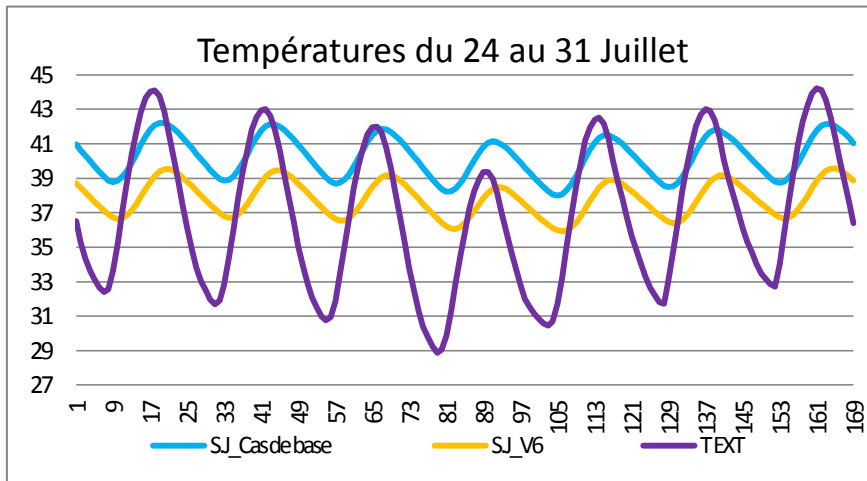


Figure 108: Comparaison de l'évolution des températures du séjour du cas de base avec les variantes V6 pour la saison estivale (source: simulation par TRNSYS effectuée par l'auteure.)



Figure 109 : Variante 6

La figure 109 montre l'effet de la ventilation naturelle nocturne en saison estivale de l'enveloppe du logement sur la température intérieure du séjour. Nous constatons que cette stratégie a contribué à améliorer la température de cet espace en la diminuant de 2 à 3°C.

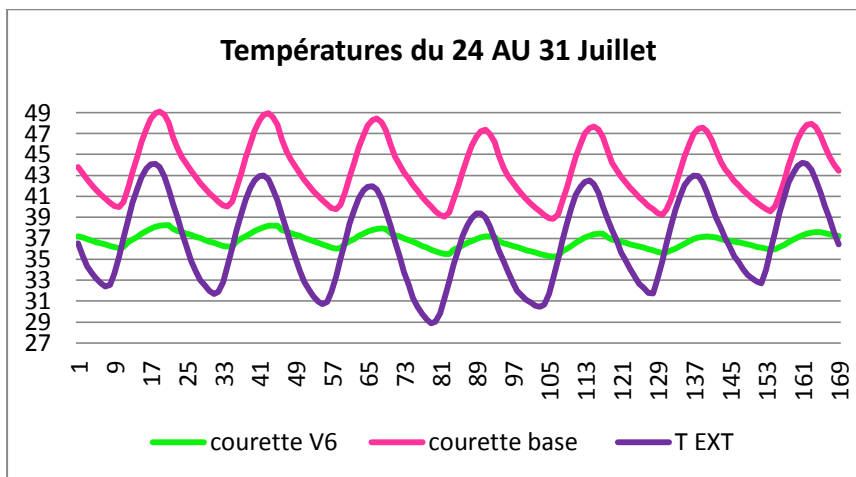
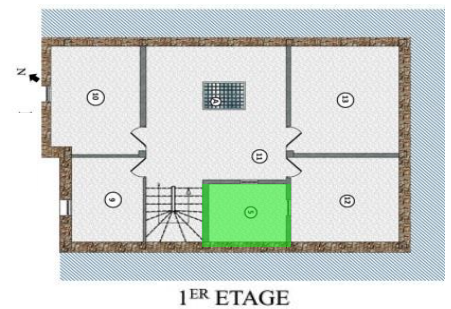


Figure 110: Comparaison de l'évolution des températures de la courette du cas de base avec les variantes V6 pour la saison estivale (source: simulation par TRNSYS effectuée par l'auteure.)



La figure 110 montre l'effet de la ventilation naturelle en saison estivale sur la température intérieure de la courette qui est considérablement élevée (du à l'effet de serre). Nous constatons que cette stratégie a contribué à améliorer la température de cet espace en la diminuant de 10 à 12°C.

Tableau 5 : : Consommation énergétique annuelle (L'impact de la ventilation naturelle)

Besoin énergétique	Cas de base	Variable 06
Chauffage (KWh)	9675	9675
Climatisation (KWh)	15990	15345
Consommation Totale (KWh)	25665	25020
Performance énergétique	160,40	156,37
Énergie économisé (%)		2,5%

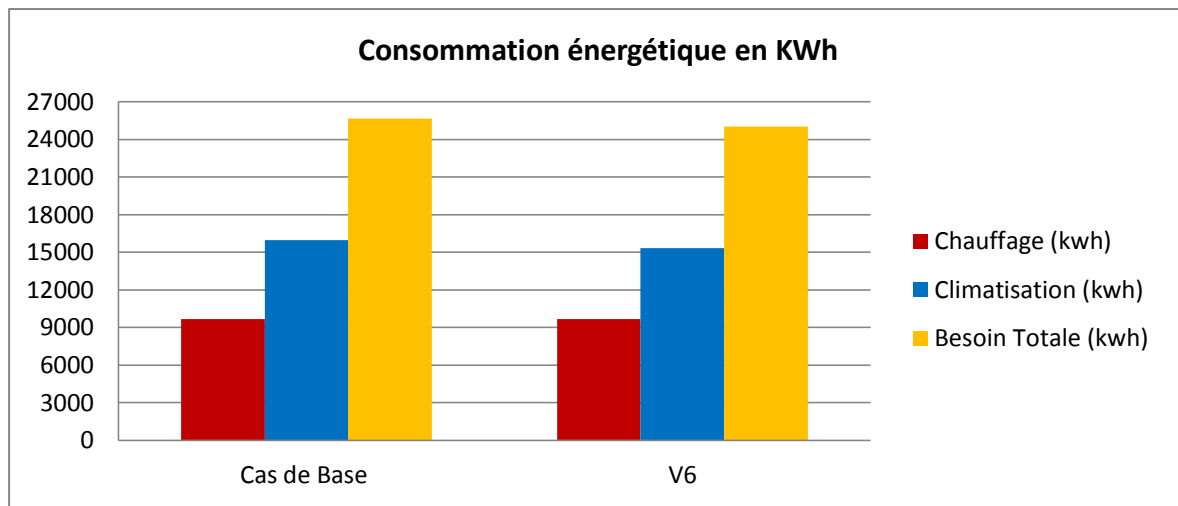


Figure 111: Comparaison des consommations énergétiques du cas de base avec les variantes V6. (Source: simulation par TRNSYS effectuée par l'auteure.)

La sixième simulation (**variante 6**) a été faite suite à l'activation de la ventilation naturelle nocturne en saison estivale, le résultat obtenu est d'une performance énergétique quasi identique en dépit d'un gain d'énergie total qui est seulement de 2,5% par rapport au cas de base (figure 111).

L'influence de la ventilation naturelle sur la consommation énergétique pour notre cas de base a été très limité cela n'interdit nullement que cette stratégie sera bénéfique pour une autre conception, comme le propose l'étude bioclimatique du cas d'étude ' *Nous proposons le déplacement du chebek pour qu'il puisse évacuer la chaleur stockée dans ces espaces*'⁸⁸

⁸⁸Chabi Mohammed, «étude bioclimatique du logement social-participatif de la vallée du m'zab : cas du ksar de tafilet».p251

III.8.2.4 L'impact de l'isolation

Saison hivernale :

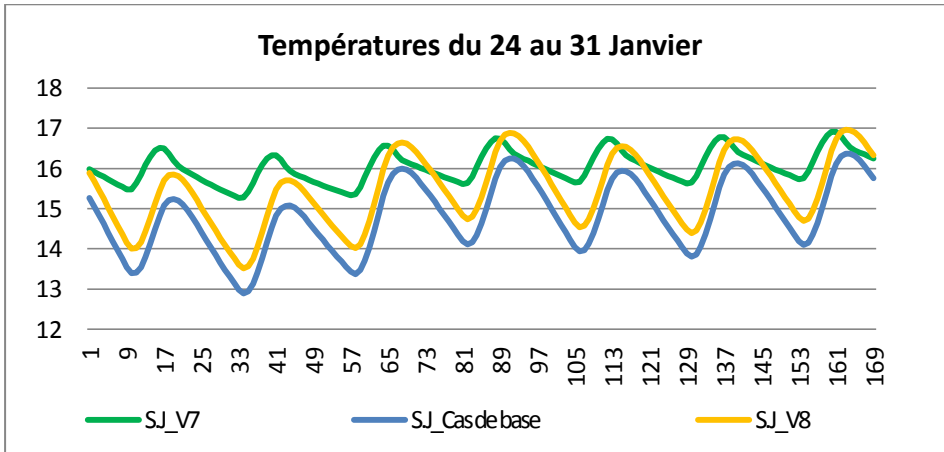


Figure 112: Comparaison de l'évolution des températures du séjour du cas de base avec les variantes V7, V8 pour la saison hivernale (source: simulation par TRNSYS effectuée par l'auteur.)

La Figure (112) montre l'effet de l'isolation de l'enveloppe sur la température intérieure du séjour pour chaque variante. La température intérieure suite à l'isolation de la toiture **variante 7** se situe au tour de 16°C à 17°C pour. L'isolation a considérablement amélioré la température à l'intérieur tout en limitant les échanges de chaleur avec l'extérieur.

Saison estivale :

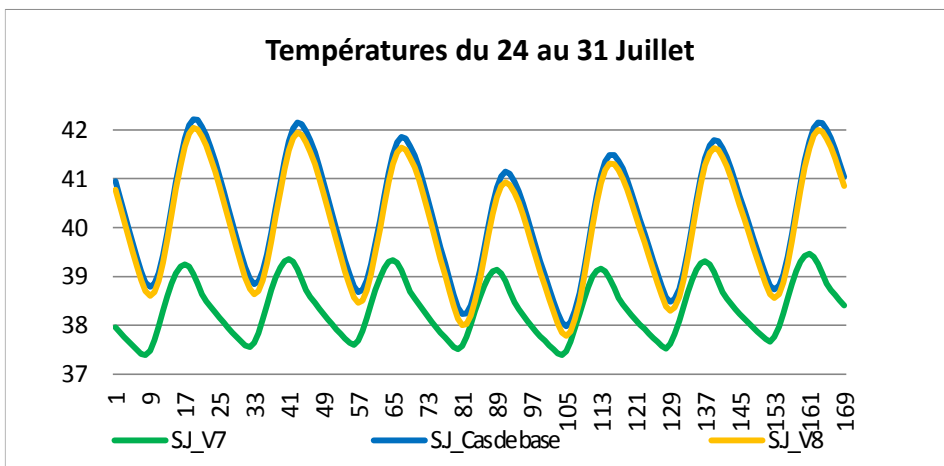


Figure 113: Comparaison de l'évolution des températures du séjour du cas de base avec les variantes V7, V8 pour la saison estivale (source: simulation par TRNSYS effectuée par l'auteur.)

D'après la figure(113), on constate que l'isolation de la toiture à efficacement contribué à améliorer la température à l'intérieur du séjour, elles varient en moyenne entre 36°C et 38°C avec un maximum de 39 °C. L'isolation de la toiture **variante 7** a considérablement amélioré la température à l'intérieur de la maison en la diminuent de presque 4°C. L'amplitude de la variation de la température est ramenée à 1°C à 2°C entre la journée et la nuit durant toute la semaine.

Tableau 6 : Consommation énergétique annuelle (L'impact de l'isolation)

Besoin énergétique	Cas de base	Variable 07	Variable 08
Chauffage (KWh)	9675	6506	7298
Climatisation (KWh)	15990	8138	13828
Consommation Totale (KWh)	25665	14645	21126
Performance énergétique	160,40	91,53	132
Énergie économisé (%)		42,93%	17,70%

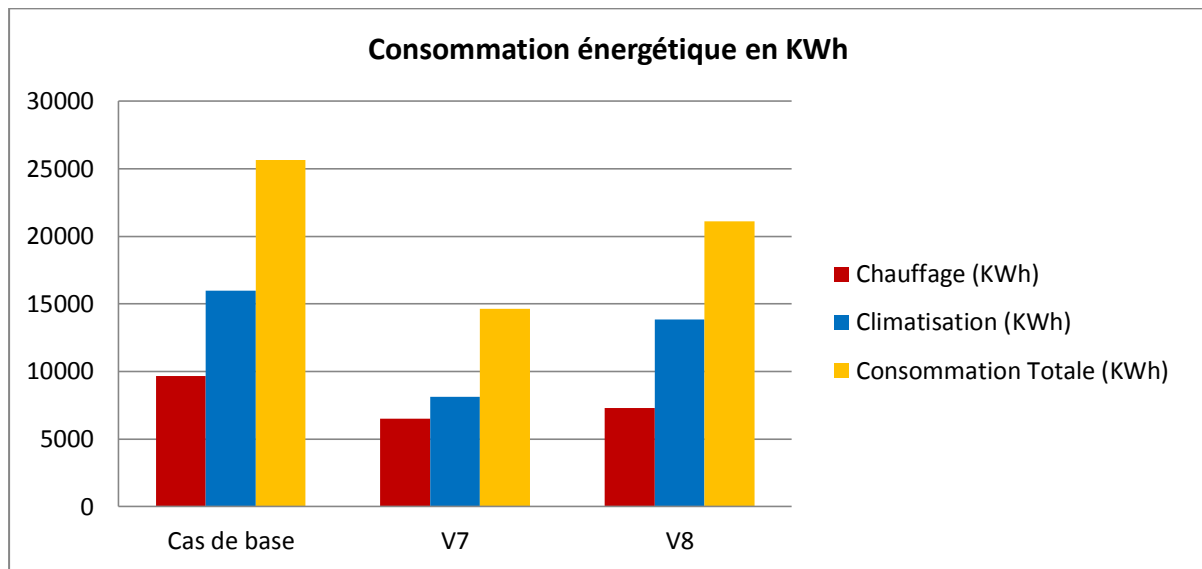


Figure 114: Comparaison des consommations énergétiques du cas de base avec les variantes V7,V8. (Source: simulation par TRNSYS effectuée par l'auteur.)

L'isolation des murs extérieurs (**variante 8**) peut apporter un gain total de l'ordre de 17,70%, mais l'isolation de la toiture (**variante 7**) dépasse largement celles des murs extérieurs qui génère un gain totale de 42,93%, en plus l'isolation de la toiture permis une baisse de consommation énergétique en chauffage et en climatisation simultanément contrairement à l'isolation des murs extérieurs qui abaisse seulement la consommation en chauffage variante 8 (figure 114).

III.8.2.5 Le cas optimisé

Saison hivernale :

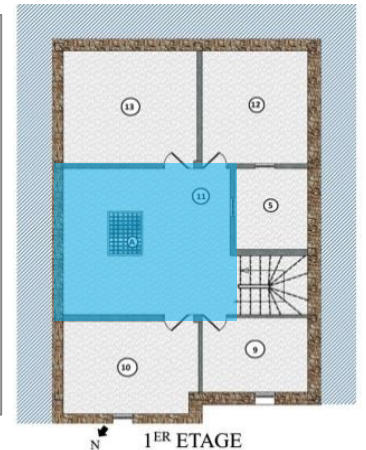
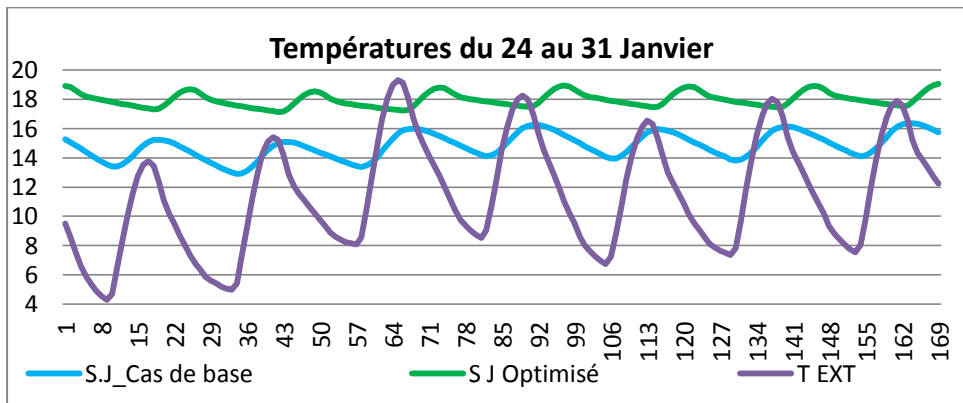


Figure 115 : Comparaison de l'évolution des températures du séjour du cas de base avec le cas optimisé pour la saison hivernale (source: simulation par TRNSYS effectuée par l'auteur.)

La Figure (115) montre l'impact améliorations apportées au cas de base sur la température intérieure. Durant la 3^{ème} semaine du mois de Janvier, Nous constatons que ces stratégies ont efficacement contribué à améliorer la température intérieure de la maison en l'augmentant de 4 à 5°C avec un minimum de 19 °C, alors que les températures extérieures varient entre 14C° et 16C° durant la journée et 4C° et 8C° durant la nuit.

Saison estivale :

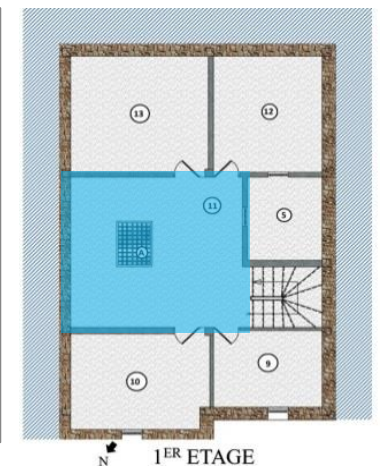
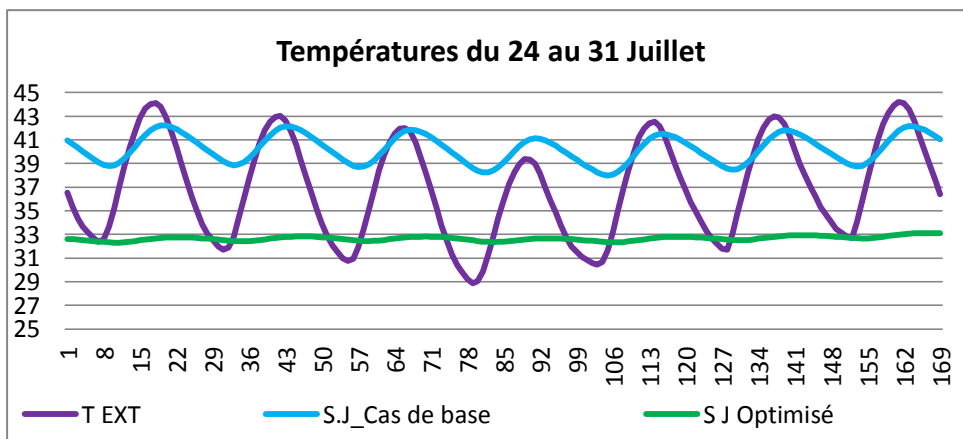


Figure 116 : Comparaison de l'évolution des températures de la courette du cas de base avec le cas optimisé pour la saison estivale (source: simulation par TRNSYS effectuée par l'auteur.)

La Figure (116) montre l'impact des améliorations apportées au cas de base sur la température intérieure. Durant la 3^{ème} semaine du mois de Juillet, Nous constatons que ces stratégies ont efficacement contribué à améliorer la température intérieure de la maison en la diminuant de 8 à 9°C, avec une température interne stable autour de 33 °C alors que les températures extérieures varient entre 44C° et 45C° durant la journée et 29C° et 33C° durant la nuit.

Tableau 7 : Consommation énergétique annuelle cas optimisé

Besoin énergétique	Cas de base	Cas optimisé
Chauffage (KWh)	9675	3506
Climatisation (KWh)	15990	2704
Consommation Totale (KWh)	25665	6210
Performance énergétique	160,40	38,81
Énergie économisé (%)		75,55%

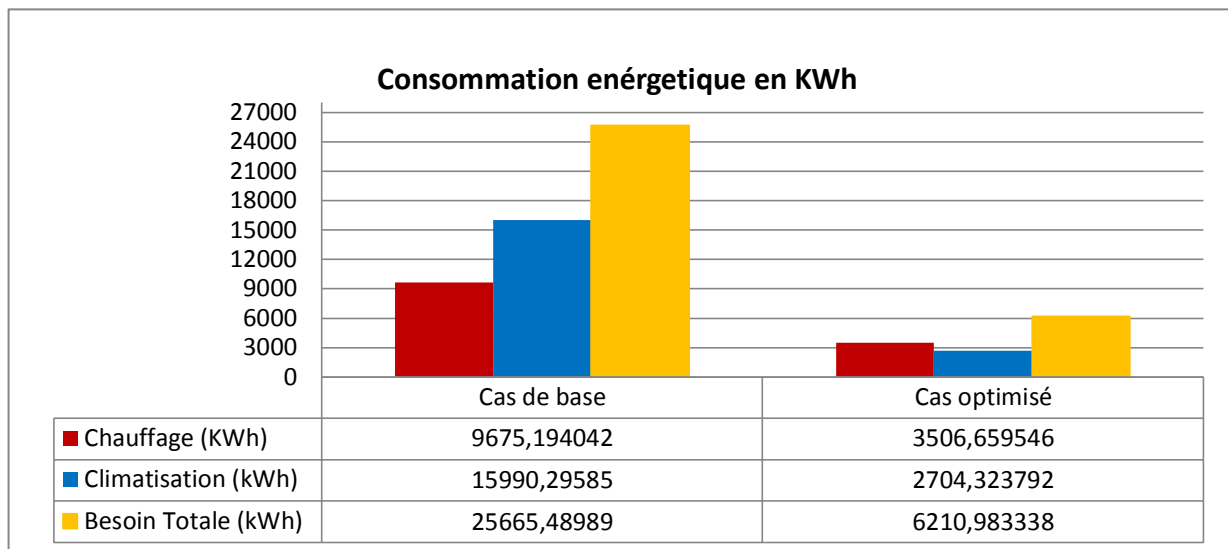
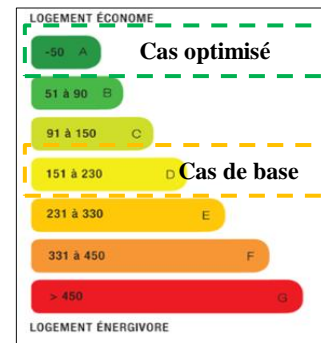


Figure 116 : Comparaison des consommations énergétiques du cas de base avec le cas optimisé. (Source: simulation par TRNSYS effectuée par l'auteur.)

Le cas de base a subi les mesures d'efficacité énergétique passives, en premier lieu la configuration du chebek et les couvertures vitrées, ensuite l'ajout de la protection solaire. Ces deux mesures ont permis un gain énergétique de plus de 8,75%, puis l'ajout -au cas de base optimisé avec la mesure de l'activation de la ventilation naturelle a engendré un gain de plus de 2,5%.

La simulation des différentes étapes d'isolation a montré que l'isolation de la toiture représente le meilleur gain énergétique total 42,93%, alors que l'isolation des murs extérieurs présente un gain énergétique moindre 17,70%.

Le résultat final (figure 117) donne une performance énergétique totale de **(38,81 KWh/m²an)** ce qui représente plus de 75,55% d'économie d'énergie par rapport au cas de base **(160,40 KWh/m²an)**, donc le cas de base optimisé est passé de la classe **D** à la classe **A** en indice d'efficacité énergétique.

III.8.3 Validations des résultats

Les méthodes de simulation sont très performantes dans les analyses énergétiques de bâtiments, car elles traitent la majorité des paramètres signifiants reliés à la consommation d'énergie. Ainsi plusieurs études numériques ont été réalisées sur l'efficacité énergétique et sur l'optimisation des bâtiments résidentiels. Pour mettre en perspective la présente étude et dégager les points communs, un choix de publications scientifiques a été retenu, elles s'intègrent dans une dimension nationale et internationale et montre l'intérêt croissant aux questions liés à la maîtrise de l'énergie en particulier dans le secteur du bâtiment.

A l'aide du logiciel TRNSYS une recherche effectuée par Bekkouche et al en 2018, a entrepris une simulation numérique d'un studio avec les données météorologiques relatives à la ville de Ghardaïa. Il a été constaté que, pour ce studio de 43.56 m² mal isolé et totalement exposé, l'énergie nécessaires pour garantir des températures confortables s'élève à 19963.2213 KWh / an. Néanmoins, cette consommation arrive à 6125,2711 KWh / an si celui-ci est bien isolé et plus compact. La comparaison entre les deux variantes a été menée pour démontrer l'intérêt de ces notions de construction bioclimatique passive⁸⁹.

Une autre étude faite par Bekkouche et al en 2011, conclut que les gains de chaleur à travers les murs et les ouvertures sont certainement la principale cause de surchauffe dans les d'habitats. Mais la protection solaire devrait couvrir tous les murs extérieurs du logement: toit, murs et les fenêtres. Il s'agit d'une étape importante dans la conception bioclimatique. Par conséquent, la réalisation d'une protection solaire efficace est la deuxième phase de la conception fondamentale de l'efficacité thermique et énergétique des maisons.

La conception des maisons passives dans une région aride (Ghardaïa) est basée sur plusieurs points, Bekkouche et al, citent à titre indicatif: le calcul et le contrôle des gains solaires, la connaissance avec précision l'impact de la masse thermique sur les températures intérieures, le choix correct des matériaux de construction et le renforcement de l'isolation thermique, l'orientation du bâtiment et de l'absorption optimale de l'énergie solaire à travers la toiture et l'avant-toit.⁹⁰

⁸⁹ S.M.A. Bekkouche et al ,2018 . « Application of some solar passive concepts to create more energy efficient studio apartment », Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, URAER

⁹⁰ S.M.A. Bekkouche et al ,2011 . «Introduction to control of solar gain and internal temperatures by thermal insulation, proper orientation and eaves», Elsevier , N°43,p 2414–2421

III.8.4 Conclusion

La mise en relation entre le chapitre 01 et le chapitre 02 a mis en avant, chaque variante du cas de base de l'habitat de Tafilelt, les consommations énergétiques dues aux différents stratégies de configurations et des mesures d'améliorations effectuée sur celui-ci. Cela nous a permis d'obtenir le cas optimisé le plus performant, après avoir simulé les consommations énergétiques respectives pour chaque variante.

En premier lieu, les variantes des configurations des couvertures vitrées non protégé sont les moins performantes tout en présentent un potentiel de réduction de consommation énergétique de chauffage, permettant une amélioration du confort d'hiver. Ensuite, l'utilisation des protections solaires en saison estivale est la variante qui a apporté une meilleure économie d'énergie que celle avec des protections permanentes, tout en assurant un meilleur confort d'été. Elle a protégé les surfaces vitrées du rayonnement solaire en été et a favorisé le solaire passif en hiver.

En outre, la variante utilisant la stratégie de ventilation naturelle nocturne en saison estivale peut procurer une amélioration intéressante du confort thermique. Cependant, cette stratégie permet une économie d'énergie moindre par rapport aux variantes précédentes. En fin, une comparaison de la consommation énergétique annuelle entre les différentes variantes (Isolation de la toiture et isolation des murs) pour chaque zone. Il en résulte globalement que toutes les solutions d'isolation proposées permettent de réduire la consommation d'énergie toutefois l'isolation de la toiture dans notre cas, est une solution énergétiquement plus efficace que celle de l'isolation des murs.

Conclusion générale

Aujourd'hui nous ne pouvons pas nier la réalité de nos constructions inadaptées aux climats, accompagnés d'une consommation énergétique très importante, ce qui génère un impact négatif sur l'environnement et la santé de la population. L'intérêt principal de ce travail est d'avoir une meilleure compréhension des processus d'efficacité énergétique et de confort thermique dans les bâtiments en Algérie, en analysant les stratégies pouvant contribuer à leurs améliorations.

Ces phénomènes nécessitent des interventions sur différents niveaux, nous en tant qu'architectes, on peut y contribuer au niveau du bâti en utilisant les enseignements de l'architecture vernaculaire comme modèle ou source d'inspiration pour la conception architecturale, et plus précisément les stratégies bioclimatiques de ce type d'architecture.

L'objectif fixé au début de ce travail était de contribuer aux objectifs du programme national d'amélioration d'efficacité énergétique pour la préservation des ressources et la systématisation d'une consommation utile et optimale, en adoptant une démarche de minimisation ou de maîtrise de la consommation énergétique des bâtiments et l'amélioration du confort thermique dans le secteur résidentiel.

Notre démarche s'est articulée autour des étapes suivantes :

- 1- Introduction théorique portant sur les thèmes du confort thermique et système constructif vernaculaire ainsi que sa contribution à l'efficacité énergétique.
- 2- L'adaptation des critères théoriques concernant notre cas d'étude s'agissant de la maison de Tafilet.
- 3- Lecture analytique de la consommation énergétique dans les cas d'étude sélectionnés, par type d'énergie, puis en tant que somme totale.
- 4- Choix final de la variable la moins énergivore.

Ainsi trois hypothèses ont été émises au départ de cette recherche :

Une hypothèse générale : *L'habitat du Ksar TAFILELT n'assure pas le confort thermique nécessaire.*

Qui a pu être vérifié grâce à La simulation thermique statique à l'aide de CTBAT, qui nous a permis de démontré une absence de conformité à la réglementation thermique dans cet habitat pendant toute l'année.

Puis des hypothèses spécifiques :

- *La configuration de la courette et du chebek peuvent être des sources d'inconfort.* On a pu confirmer cette première hypothèse en démontrant que l'impact des stratégies architecturales adoptées dans la configuration de la courette et du chebek ont permis une amélioration du confort thermique de **2 à 4°C** en plus de la réduction de l'amplitude de la variation des températures .
- *Les matériaux de construction composant la toiture du cas d'étude ont un impact négatif considérable sur le confort intérieur et son efficacité énergétique.* Pour cette deuxième hypothèse , les simulations effectuées après l'intégration de l'isolation au niveau de la toiture ont permis d'avoir des consommations énergétiques les plus basses **91,53 KWh/m²an** ainsi qu'une nette amélioration du confort thermique.

A l'issue de cette contribution, nous avons constaté plusieurs difficultés qui ont constitué des freins à l'avancement de la recherche. On peut citer notamment des limites suivantes :

- Les outils de création de l'enveloppe architecturale à l'aide du logiciel « Trnsys 16 » sont limités à un tracé des dimensions du bâtiment et ils ne permettent pas une modélisation 3D.
- Les données météorologiques du logiciel metronome ne sont pas d'actualité (données de l'année 2010)

Cependant cette recherche ouvre plusieurs perspectives d'étude pour une recherche future. Il serait bénéfique d'en citer quelques-unes :

- Cette recherche n'a fait qu'effleurer la surface de ce que peut faire la thermographie, il serait intéressant dans une recherche ultérieure d'aborder le côté quantitatif de cette discipline qui mêle calcul thermique et analyse thermographique.
- La prise en charge de tous les paramètres de confort dans la simulation et introduire le facteur du métabolisme humain qui dépend du type d'activité entreprise par l'individu.
- On peut s'orienter par exemple vers un élargissement de l'échantillon d'étude, une comparaison des différentes typologies en termes de facteur de compacité

- Il est aussi important de caractériser l'aéraulique du bâtiment ce qui permettra de disposer de paramètres fiables pour une meilleure exploration du phénomène de ventilation naturelle notamment la ventilation pour le confort
- Les études sur les éléments de toitures doivent être poursuivies au niveau des matériaux et aussi sur la conception du toit afin de trouver des configurations mieux adaptées au climat.

Pour finir l'architecture vernaculaire algérienne, aussi diversifié que le climat de ses différentes régions, offre des perspectives de recherches encore inexploité que nous n'avons fait qu'entrevoir dans la cadre de cette recherche, mériterait une attention particulière de la part des chercheurs, pour notre part nous espérons avoir apporté notre contribution dans cette voie en attente de futures recherches.

Bibliographie

1. A. Hamid, 'Etude Expérimentale du Prototypne Réalisé au C.N.E.RIB, Rapport Interne CDER/LT DBT, 1995
2. A.moussa .2017. »*Une alternative urbaine à Ghardaia* ».MADINATI, N°04, p42
3. A.S.H.R.A.E : American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers.
4. Ahmed Ali et Ait Kadi Salima, « *performance thermique tu matériaux terre pour un habitat durable des régions aride et semi-aride : cas de Timimoune* », mémoire de magister, Université mouloud Mammeri, TiziOuzou,2012, p42.
5. Ait Kaci, Z. 2014. « *L'apport de la cage d'escalier dans la ventilation naturelle : simulation thermo aéraulique d'un habitat collectif en Algérie* ». memoire de Magister, Option Architecture et Développement Durable, TiziOuzou, p67.
6. Ali G, Abbas S et Qamer FM, "*How effectively low carbon society development models contribute to climate change mitigation and adaptation action plans in Asia*", Renew Sustain Energy Rev 2013.
7. Al-Obaidi KM et al, "*Designing an integrated daylighting system for deep-plan spaces in Malaysian low-rise buildings*", Solar Energy 2017.
8. Ammar Bouchair : Decline of urban ecosystem of M'Zab valley.
9. André Ravereau : Le M'Zab une leçon d'architecture, Ed. Actes SudSindbad, Arles 2003, p. 139.
10. Armand Dutreix,« Bioclimatisme et performances énergétiques des bâtiments », Ed. Eyrolles, Paris 2010, p.28.
11. ASHRAE Handbook fundamental. *Chapitre 9: Thermal Comfort*, éd Inch Pound., 2009, p170.
12. Atekamina, 2012, "*pour une réinterprétation du vernaculaire dans l'architecture durable, cas de la casbah d'Alger*", mémoire de magister, TiziOuzou, mouloud Mammeri, p57.
13. Aurélie Vissac, « matière en fibres », Mémoire du Diplôme de Spécialisation et d'Approfondissement DSA – Architecture de Terre, Ecole nationale supérieure d'architecture de Grenoble, 2012-2014
14. Barbosa S. et Ip K, "*Perspectives of double skin façades for naturally ventilated buildings: a review*". Renew Sustain Energy Rev 2014.
15. Bencheikh.H, Ameur.R, "*The effects of green spaces (Palme trees) on the microclimate in arides zones, case study: Ghardaia, Algeria*", Elsevier, Energy Procedia 18 (2012) 10 – 20

16. Benharra Houda, « *Impact de l'orientation sur la consommation énergétique dans le bâtiment. Cas des zones arides et chaudes-* », mémoire de magister, Université Mohamed Khider Biskra, 2016, p74
17. Benhouhou.M,« *l'impact des matériaux sur le confort thermique dans les zones semi-arides, cas d'étude :la ville de Djelfa*», Mémoire de magister, Ecole polytechnique d'architecture et d'urbanisme EPAU ,Alger ,2012.
18. Bouchair .A “Decline of urban ecosystem of Mzab valley,Building and Environment”, Elsevier,39 (2004) 719 – 732
19. Boudjemaa AGOUDJIL et al .2011. « Caractérisation thermophysique du bois de palmier dattier en vue de son utilisation en isolation thermique dans l'habitat ». Researchgate .p 1, 6, 7
20. Bousquet, L (2014) « Mise en œuvre des réglementations thermique et acoustique » Edition Le Moniteur. France, p15
21. Chabi Mohammed, « *Le Ksar de Tafilelt dans la vallée du M'Zab, une expérience urbaine entre tradition et modernité* ».
22. Commission chargée de formuler des avis techniques sur les procédés, matériaux utilisés dans l'enveloppe du bâtiment (2004) « Performances des produits minces réfléchissants opaques utilisés dans l'enveloppe du bâtiment », Note d'information n° 1. France.
23. Conseil en Architecture, Urbanisme et Environnement (C.A.U.E), (2005) « La ventilation » in revue D'architecture d'urbanisme et d'environnement de l'Ariège, France. <http://www.caue.org/>
24. Couasnet, Y(2007) « propriétés et caractéristiques des matériaux de construction » Edition Le moniteur, Espagne ,p123
25. Courgey, S et Oliva, J-P (1980) « *La conception bioclimatique* » Edition Terre vivante. Italie p 45
26. Dutreix, A(2010) « Bioclimatisme et performances énergétiques des bâtiments » Edition Eyrolles, France,p60
27. Francesca POGGI et al .2015.Natural stone walls in vernacular architecture: what contribution towards rural mzab concept? .BSGLg, 65,P 64
28. Gallauziaux,T et Fedullo,D (2010) « le grand live de l'isolation » Edition Eyrolles France, p 163
29. Gallauziaux,T et Fedullo,D (2010) « le grand live de l'isolation » Edition Eyrolles France, page 42

30. Hoyet Nadia (2013), « *matériaux et architecture durable* », éditions Baume-les-dames. France. P37
31. Institut Bruxellois pour la gestion de l'environnement, Bruxelles environnement, Guide du bâtiment durable « développer une stratégie du chaud, assurer le confort d'hiver en limitant au maximum la consommation d'énergie », recommandations pratiques ENE02, 2016
32. İrem SÖZEN et Gül KOÇLAR ORAL, "Evaluation of Parameters Affecting Energy Efficiency of Vernacular Mardin Houses: A Case Study", MEGARON 2019,p 03
33. Izrad, J-L. *Architecture d'été*, Espagne, Edition Edisud, 1993, p07
34. J-M.BLOCH-LAINE.1977,*Guide pratique de l'isolation thermique des bâtiments* ,ed EYROLLES, p 06
35. K. Imessad et al.2017. « *Mise en application de la nouvelle réglementation thermique algérienne du bâtiment* », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 20 N°4, p 591
36. Liébard, A.et De Herde, A. Op.cit p 86
37. Liébard.A et De Herde.A, *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques*, éd Le Moniteur, 2005, p80.
38. Luc Schreiber, Serge Douville et Jérôme Lemaire (2002). *Confort thermique à l'intérieur d'un établissement*, Commission de la Santé et de la Sécurité du Travail du Québec.
39. M.Hamdani et al. L'impact de l'inertie thermique sur l'efficacité de l'isolation thermique interieur d'un batiment en pierre située a Ghardaia .
40. M.K. Cheriera et al .2018. *Some solar passive concepts in habitat through natural ventilation case study: Dry climate in Algeria Ghardaia*. Elsevier, Case Studies in Thermal Engineering 12, p 01
41. Mansoury.Y, «*Conception des enveloppes de bâtiments pour le renouvellement d'air par ventilation naturelle en climats tempérés Proposition d'une méthodologie de conception* », Thèse de doctorat, Ecole d'Architecture, Nantes, 2003.
42. Mazari.M, « *Etude et évaluation du confort thermique des bâtiments à caractère public : Cas du département d'architecture de Tamda (Tizi Ouzou)* » mémoire de magister, université de Tizi-Ouzou, 2012
43. Meet-Med "ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY STRATEGIES AND POLICIES", voir : www.meetmed.org
44. Mohammed Chabi et Mohammed Dahli : Une ville nouvelle saharienne sur les traces de l'architecture traditionnelle. ww.ummtto.dz

45. Omrany H et al, “*Application of passive wall systems for improving the energy efficiency in buildings: a comprehensive review*”, *Renew Sustain Energy Rev* 2016.
46. Oral GK et Yilmaz Z, “*Building form for cold climatic zones related to building envelope from heating energy conservation point of view*”, *Energy Build* 2003.
47. PETONNET C, «Espace, distance et dimension dans une société musulmane», *L'Homme*, Année 1972, Volume 12, Numéro 2, page 53
48. Pierre Fernandez et Pierre Lavigne : op. cit., p. 263.
49. S.M.A. Bekkouche et al.2013. “*Influence of the compactness index to increase the internal temperature of a building in Saharan climate*”.Elsevier , N°66,page 686
50. Saïd el khatri, 2003, « *Manuel du cours de climatologie, IAS météo* », centre national de recherches météorologiques, direction de la météorologie nationale, service études climatiques, B.P. 8106 casa-oasis; Casablanca.
51. Samuel Courgey et Jean-Pierre Oliva : *La conception bioclimatique des maisons confortable et économiques*, Ed. Terre vivante, Mens 2006, p. 130.
52. S.M.A. Bekkouche et al ,2018 . « *Application of some solar passive concepts to create more energy efficient studio apartment* », Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, URAER
53. S.M.A. Bekkouche et al ,2011 . «*Introduction to control of solar gain and internal temperatures by thermal insulation, proper orientation and eaves*», Elsevier , N°43,p 2414–2421
54. Walter Leal Filho& al, “*Implementing Campus Greening Initiatives: Approaches, Methods and Perspectives*”,ed springer ,2015 ,Switzerland p 31,32
55. Zouzou.A, Mokhtari.K, « *solution hybrides pour maintenir le confort thermique et visuel* », Mémoire de magister, à l’université KASDI MEREBAH, Ouargla ,2015.

Webographie :

APRUE, *Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie*, [En ligne], <http://www.aprue.org.dz/PNME-11-13.html> (page consultée le 20 juillet 2019)

[http://www.lesommer.fr/fileman/Uploads/Documents/Guide%20biotech/guide bio tech confort d ete pas sif1.pdf](http://www.lesommer.fr/fileman/Uploads/Documents/Guide%20biotech/guide%20bio%20tech%20confort%20d%20ete%20pas%20sif1.pdf)

<https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/climatologie-rayonnement-solaire-13785/>

<https://energieplus-lesite.be/techniques/ventilation8/ventilation-intensive/la-ventilation-intensive-naturelle-d-ete/>

https://www.isover.fr/sites/isover.fr/files/assets/documents/isolation_thermique_guide_isover.pdf

http://portail.cder.dz/IMG/article_PDF/article_a4969.pdf

<http://v2.ctbat.net/>

<http://www.opvm.dz>

Site officiel de l'OPVM, voir, <http://www.opvm.dz>