

UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA
Faculté de technologie

Département des Energies Renouvelables

THESE DE DOCTORAT TROISIÈME CYCLE

Spécialité : Énergies Renouvelables

APPLICATION DES ANCIENS PROCEDES
DANS L'HABITAT CONTEMPORAIN

Par

OUKACI Soumia

Devant le jury composé de

M.ROUDANE	Professeur, U.de BLIDA 1	Président de jury
A.KHELLAF	Directeur de recherche, CDER, ALGER	Examineur
H.ABDI	Maitre de conférences, U.de BLIDA 1	Examineur
R.KHARCHI	Directrice de recherche, CDER, ALGER	Examinatrice
A.HAMID	Professeur, U.de BLIDA 1	Rapporteur
D.SEMMAR	Professeur, U.de BLIDA 1	Co-Rapporteur

Blida, Juin 2023

RESUME

La présente recherche porte sur l'amélioration de la performance énergétique de la maison contemporaine adaptée dans la région aride d'In Saleh .et la création d'un modèle de logement adaptatif aux conditions climatiques de cette région. Cette recherche a contribué aussi à l'amélioration du confort hygrothermique de l'habitat de cette région par l'adaptation d'un système de rafraîchissement passif.

En premier lieu nous avons effectué une étude expérimentale dont le but est l'évaluation thermique des anciens procédés constructifs, afin de les adapter dans la maison contemporaine de la région étudiée. Des études paramétriques ont été faites à l'aide d'un outil de simulation thermique dynamique sur plusieurs typologies de maison de la région d'In Saleh, afin d'étudier leurs comportement thermique et la contribution à l'amélioration de leurs performance énergétique. Grâce aux résultats obtenus nous avons pu tirer les recommandations nécessaires pour l'identification des caractéristiques du modèle adaptatif proposé. Les résultats ont montré que les solutions adaptées dans ce modèle permettent d'obtenir des profils de température stables et d'atteindre des écarts de 9.5°C et 10.5°C durant la période la plus chaude de l'année.

Malgré la stabilité du profil des températures et les écarts obtenus le confort estival n'est pas atteint sans recourir à un système de climatisation. Cependant l'adaptation du système de rafraîchissement passif à courant descendant est nécessaire pour améliorer les conditions de confort hygrothermique. Cette phase de recherche a permis d'identifier les paramètres adéquats, qui ont permis d'améliorer l'adaptation du système de rafraîchissement proposé aux conditions climatiques de la région aride d'In Saleh et d'atteindre un écart de température de 15°C et un taux d'humidité relative de 60%.

ABSTRACT

This research focuses on improving the energy performance of the contemporary house adapted to the arid region of In Saleh and the creation of a model of adaptive housing to the climatic conditions of this region. This research also aims to contribute to the improvement of hygrothermal comfort of the habitat of this region by adapting a passive cooling system.

Firstly, we have carried out an experimental study whose aim is the thermal evaluation of the old constructive processes, in order to adapt them in the contemporary house of the studied region. Parametric studies have been done using a dynamic thermal simulation tool on several types of houses in the region of In Saleh, in order to study their thermal behavior and the contribution to the improvement of their energy performance. Thanks to the obtained results we were able to draw the necessary recommendations for the identification of the characteristics of the proposed adaptive model. The results showed that the solutions adapted in this model allowed us to obtain stable temperature profiles and to reach differences of 9.5°C and 10.5°C during the hottest period of the year.

In spite of the stable temperature profile and the obtained variations, the summer comfort is not reached without resorting to an air conditioning system. However, the adaptation of the passive downdraft cooling system is necessary to improve the hygrothermal comfort conditions. This phase of research has identified the appropriate parameters, which have improved the adaptation of the proposed cooling system to the climatic conditions of the arid region of In Saleh and achieve a temperature difference of 15°C and a relative humidity of 60%.

ملخص

يركز هذا البحث على تحسين أداء الطاقة للمنزل المعاصر المتكيف في منطقة عين صالح القاحلة وإنشاء نموذج سكني يتكيف مع الظروف المناخية لهذه المنطقة. يهدف هذا البحث أيضاً إلى المساهمة في تحسين الراحة الحرارية المعيشية من خلال تكيف نظام التبريد السلبي أولاً قمنا بدراسة تجريبية هدفها التقييم الحراري للعمليات البناءة القديمة من أجل تكيفها في المنزل المعاصر للمنطقة المدروسة. أجريت الدراسات البارامترية باستخدام أداة محاكاة حرارية ديناميكية على العديد من أنماط المنازل في منطقة في صالح ، من أجل دراسة سلوكهم الحراري والمساهمة في تحسين أداء الطاقة لديهم. بفضل النتائج التي تم الحصول عليها ، تمكنا من استخلاص التوصيات اللازمة لتحديد خصائص النموذج التكيفي المقترح. أظهرت النتائج أن الحلول التي تم تكيفها في هذا النموذج مكنت من الحصول على ملامح درجة حرارة ثابتة والوصول إلى فروق 9.5 درجة مئوية و 10.5 درجة مئوية خلال الفترة الأكثر حرارة في العام على الرغم من استقرار ملف تعريف درجة الحرارة والاختلافات التي تم الحصول عليها ، لا تتحقق الراحة الصيفية دون اللجوء إلى نظام تكييف الهواء. ومع ذلك، فإن تكيف نظام التبريد السلبي السفلي ضروري لتحسين ظروف الراحة الحرارية.

مكنت هذه المرحلة البحثية من تحديد المعايير المناسبة ، والتي جعلت من الممكن تحسين تكيف نظام التبريد المقترح مع الظروف المناخية للمنطقة القاحلة في عين صالح وتحقيق فرق في درجة الحرارة بمقدار 15 درجة مئوية. الرطوبة 60%.

REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche a été mené au sein du laboratoire LTSM (Laboratoire de traitement de Surface et Matériaux), faculté de technologie, Département des énergies renouvelables, de l'Université Saad DAHLAB Blida 1 Algérie.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de cette thèse.

En premier lieu, je tiens à remercier sincèrement mon directeur de thèse Abdelkader HAMID, professeur au sein du département des énergies renouvelables à l'université de BLIDA 1, pour son aide, ses orientations, ses précieux conseils, ses encouragements sa disponibilité et surtout sa patience tout au long de ma formation doctorale.

Egalement je voudrais exprimer ma profonde reconnaissance à mon co-directeur de thèse Djaffar SEMMAR, professeur au sein du département des énergies renouvelables à l'université de BLIDA 1, pour sa disponibilité et le temps qu'il m'a consacré, ses encouragements et ses conseils.

Je remercie ensuite l'ensemble des membres du jury, qui m'ont fait l'honneur de bien vouloir étudier avec attention mon travail : Professeur M.ROUDANE de l'université de BLIDA1 en qualité de président de jury, le directeur de recherche Abdellah KHELLAF et la directrice de recherche Razika KHARCHI également du centre de développement des énergies renouvelables ainsi que Dr Hamid ABDI de l'université de BLIDA1.

Je tiens aussi à témoigner ma reconnaissance aux personnes suivantes, pour leur aide dans la réalisation de cette thèse :

Docteur Lafri Djamel et Monsieur Doumaz Toufik pour leurs aides dans la partie expérimentale de cette thèse.

Monsieur Bradai Abd El Rahim pour son aide précieuse et Dr Sami Mecheri Sabrina du centre de développement des énergies renouvelables pour ses orientations et conseils.

Je remercie également, M.Mokhtar Meziane du centre National d'Etudes et de recherches intégrées du bâtiment (CNERIB) pour son aide dans la partie caractérisation thermo-physique des matériaux de construction.

Mes vifs remerciements à tout le personnel du département des énergies renouvelables en particulier Docteur Mazouz Halima pour ses orientations et son soutien moral tout au long de ma formation doctorale.

Un immense merci à ma mère, mon père et mon cher époux, pour leurs conseils ainsi que leur soutien inconditionnel à la fois moral et économique et qui m'a permis de réaliser ce travail.

Enfin Merci à mes chères sœurs, mon frère, mes chers enfants Nour, Adem et Sem et à l'esprit de ma grand-mère.

TABLE DES MATIERES

RESUME

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

NOMENCLATURE

INTRODUCTION GENERALE

1	REVUE BIBLIOGRAPHIQUE ET ETAT DE L'ART	1
1.1	INTRODUCTION	1
1.2	CONTEXTE ENERGETIQUE DU BATIMENT ET SOLUTIONS ENVISAGEES :	1
1.3	CLIMAT EN ALGERIE:	7
1.4	HABITAT TRADITIONNEL REFERENCE D'ARCHITECTURE BIOCLIMATIQUE	9
1.5	CONCLUSION	34
2	INVESTIGATION EXPERIMENTALE.....	35
2.1	INTRODUCTION :	35
2.2	PRESENTATION DE LA REGION ETUDIEE :	35
2.3	PRESENTATION DES DIFFERENTS CAS D'ETUDE :	38
2.4	ETUDE EXPERIMENTALE EFFECTUEE SUR LE CAS D'ETUDE N°01 :	48
2.5	RESULTATS ET DISCUSSION DE L'ETUDE EXPERIMENTALE :	57
2.6	CONCLUSION	63
3	MODELISATION ET SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE	65
3.1	INTRODUCTION :	65
3.2	LA MODELISATION THERMIQUE DYNAMIQUE.....	65
3.3	SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE.....	70
3.4	SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE DES DIFFERENTS CAS ETUDIES :	73
3.5	SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE DU CAS D'ETUDEN°03 :	78
3.6	CONCLUSION	87
	CHAPITRE 04.....	88
4	RESULTATS ET DISCUSSION.....	88
4.1	INTRODUCTION :	88
4.2	RESULTATS ET DISCUSSION :	88
4.3	RESULTATS ET DISCUSSIONS DU CAS D'ETUDE N°02 :	96
4.4	RESULTATS ET DISCUSSIONS DU CAS D'ETUDE N° 03 :	101
4.5	RESULTATS ET DISCUSSIONS DU CAS D'ETUDE N°04 :	111
4.6	CONFIGURATION ET CARACTERISTIQUES DU MODELE ADAPTATIF PROPOSE :	147
4.7	CONCLUSION	152

5	AMELIORATION DU CONFORT HYGROTHERMIQUE.....	153
5.1	INTRODUCTION :	153
5.2	ADAPTATION DU SYSTEME PDEC :	153
5.3	RESULTATS ET DISCUSSION :	157
	CONCLUSION GENERALE	
	REFERENCES	
	ANNEXE	

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1:Résultats obtenus de conductivité thermique et chaleur spécifique :	51
Tableau 3-1:Caractéristiques thermo-physiques des éléments constructifs du cas d'étude n° :01.....	74
Tableau 3-2:Eléments constructifs de la variante 01 (maison avec matériaux locaux) :.....	76
Tableau 3-3:Eléments constructifs de la Variante 02 : (maison en parpaing) :.	77
Tableau 3-4:Eléments constructifs de la Variante 03 : (maison en parpaing avec isolation de la toiture (amélioration proposée) :.....	77
Tableau 3-5:Caractéristiques thermo-physiques des éléments constructifs (cas initial) :.....	79
Tableau 3-6:Caractéristiques thermo-physiques des éléments constructifs (Toiture améliorée 01)	80
Tableau 3-7:Caractéristiques thermo-physiques des éléments constructifs (Toiture améliorée 02)	81
Tableau 3-8:Caractéristiques thermo-physiques des éléments constructifs du cas d'etude 04(état des lieux).....	82
Tableau 3-9:Caractéristiques thermo-physiques de la toiture isolée avec 10 cm de pétiole de palmier	83
Tableau 3-10:caracteristiques thermo-physiques du Mur en brique de terre ameliorée de 40 cm+mortier de terre	84
Tableau 4-1:calcul de l'erreur pour chaque espace :.....	94
Tableau 4-2:Toiture proposée pour le modèle adaptatif.....	149
Tableau 5-1:Configuration proposée et variantes étudiées :	155
Tableau 5-2: Résultats obtenus de la configuration AT1 avec ratio $a1$	166
Tableau 5-3: Résultats obtenus de la configuration AT1 avec ratio $a2$	166
Tableau 5-4: Résultats obtenus de la configuration AT1 avec ratio $a3$	167
Tableau 5-5: Résultats obtenus de la configuration AT2 avec ratio $a1$	168
Tableau 5-6: Résultats obtenus de la configuration AT2 avec ratio $a2$	168
Tableau 5-7: Résultats obtenus de la configuration AT2 avec ratio $a3$	169

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1:Evolution de la consommation et la production électrique en Algérie.	2
Figure 1.2:Evolution de la consommation électrique et la croissance démographique	3
Figure 1.3:Zones climatiques d'Eté.	7
Figure 1.4:Zones climatiques d'hiver.	8
Figure 1.5:compacité du tissu urbain:(a):Ksar du M'zab,(b):Ksar de Souf.....	10
Figure 1.6:Matériaux de construction de la région d'In Saleh	11
Figure 1.7:fabrication du plâtre du gypse : (a) la roche Tefza,(b)four de cuisson,(c)peinture du linteau de la porte	12
Figure 1.8:Le palmier dattier :(a)Composition du palmier dattier, (b) déchets du bois de palmier	12
Figure 1.9:La composition et disposition des éléments de couverture en bois de palmier, Biskra, Algérie	13
Figure 1.10:Patio type découvert	14
Figure 1.11:Schéma de fonctionnement climatique d'un patio	14
Figure 1.12:Fonctionnement du Système de tour à vent	15
Figure 1.13:protection solaire (Les moucharabiehs)	16
Figure 1.14:Vue sur l'ancien Ksar et le nouveau Ksar de Beni Izguen.....	26
Figure 1.15:Plan de la maison mozabite : (a) ancien Ksar,(b) nouveau ksar	27
Figure 1.16:Composition de la toiture de la maison de l'ancien Ksar	27
Figure 1.17:Composition de la toiture de la maison du nouveau Ksar de Tafilelt[.....	27
Figure 1.18:Utilisation des moucharabiehs et encorbellements sur les façades du Ksar de Tafilalet	28
Figure 1.19:Aménagement de voies larges au sein de Ksar de Tafilelt	28
Figure 1.20:Schéma d'écoulement de l'air dans une tour à vent classique	30
Figure 1.21:Le système proposé par Bahadori	30
Figure 1.22:Système Pdec avec système de pulvérisation	32
Figure 2.1:Situation de la région d'In Saleh	35
Figure 2.2:Evolution des températures maximales	36
Figure 2.3:Evolution des taux d'humidité relative.	36
Figure 2.4:Précipitations Mensuelles	37
Figure 2.5:Taux d'inconfort thermique estival en Algérie	38
Figure 2.6:Taux d'inconfort thermique estival en Algérie	38
Figure 2.7:Plan de situation des différents cas étudiés	39
Figure 2.8:plan de situation du tissu traditionnel du cas d'étude 01	40
Figure 2.9:plan de masse du cas n°01	40
Figure 2.10:Plan cas d'étude n° :01	40
Figure 2.11:(a) : Vue sur l'entrée principale,(b) :Façade Ouest	41
Figure 2.12:Figure :(a)Vue sur l'ouverture zénithale de la skifa ,(b)Fissures dans l'espace Swari	41

Figure 2.13:plan de masse cas 02	42
Figure 2.14:Plan du cas d'étude N°:02.....	42
Figure 2.15: Vue sur l'entrée du cas d'étude n° :02, (b) Volumétrie du cas n° :02	43
Figure 2.16:Plan de situation du cas n°03.....	44
Figure 2.17:Plan du cas d'étude n° :03	45
Figure 2.18:Coupe A-A.....	45
Figure 2.19:Coupe B-B.....	46
Figure 2.20:Vue sur différents espaces du cas n°03.....	46
Figure 2.21:Plan d'assemblage du cas d'étude n°04.	46
Figure 2.22:Vue sur Façade Sud	47
Figure 2.23:Vue sur la cour du cas d'étude n° :04.....	47
Figure 2.24:Vue sur différents espaces du cas d'étude n°04	48
Figure 2.25:Découpage des échantillons	49
Figure 2.26:Instrument de mesure CT METRE	49
Figure 2.27:Mesures effectuées à l'aide du CT-metre.....	51
Figure 2.28:Instruments de mesure utilisés.....	52
Figure 2.29:Installation des compagnes de mesure	52
Figure 2.30:Localisation des appareils de mesure	53
Figure 2.31:Appareils installés dans l'espace Swari Imra.....	53
Figure 2.32:Mesures effectuées dans les différents espaces.....	53
Figure 2.33:Mesures effectuées dans l'espace Swari Imra et chambre 01.....	54
Figure 2.34:Localisation de la prise des mesures des éléments constructifs.(a)en RDC,(b)sur la terrasse	54
Figure 2.35:Mesures de surface de la toiture	55
Figure 2.36:Mesures des différents Murs	56
Figure 2.37:Instrument de mesure des températures de surface des murs	56
Figure 2.38:Instrument utilisé pour mesure du taux d'humidité	57
Figure 2.39: Evolution des temperatures dans l'espace Skifet el bab	57
Figure 2.40: Évolution des températures dans l'espace Swari	58
Figure 2.41: Evolution des températures dans l'espace Swari Imra	58
Figure 2.42: Evolution des températures dans l'espace Chambre 01	58
Figure 2.43: Evolution des températures dans l'espace Chambre 02	59
Figure 2.44: Evolution des températures dans l'espace Couloir.....	59
Figure 2.45: Evolution des températures des différents murs	61
Figure 2.46: Evolution des températures de surface de la toiture	62
Figure 2.47: Evolution du taux d'humidité relative	63
Figure 3.1:Processus d'application du logiciel	71
Figure 3.2:Interfaces du logiciel.....	72
Figure 3.3:Détail des éléments constructifs.....	79
Figure 3.4:Methodologie adaptée pour le cas n°04	82
Figure 3.5:renforcement de la toiture du cas n°:04.....	83
Figure 3.6:Configuration des murs proposés pour l'amélioration du cas n°:04.	84
Figure 3.7:protections solaires sur surfaces vitrées proposées.....	85
Figure 3.8:Differentes protections solaires proposées.....	86
Figure 4.1:Evolution des températures durant la période la plus froide.....	88

Figure 4.2:Evolution des températures durant la semaine la plus froide	88
Figure 4.3:Evolution des températures durant la période la plus chaude	89
Figure 4.4:Evolution des températures durant la semaine la plus chaude	89
Figure 4.5:Evolution des températures dans les espaces Swari,Skifa et couloir	90
Figure 4.6:Evolution des températures dans les espaces Swari Imra, chambre 01 et chambre 02.	90
Figure 4.7: comparaison des résultats dans l'espace Skifet el bab	92
Figure 4.8: comparaison des résultats dans l'espace Swari.....	92
Figure 4.9: comparaison des résultats dans l'espace Swari Imra.....	93
Figure 4.10: comparaison des résultats dans l'espace chambre 01.....	93
Figure 4.11: comparaison des résultats dans l'espace chambre 02.....	93
Figure 4.12: comparaison des résultats dans l'espace couloir	94
Figure 4.13:Besoins en climatisation et chauffage du cas d'étude n° 01.....	95
Figure 4.14: Evolution des températures durant la semaine la plus chaude de la variante 01.....	96
Figure 4.15: Evolution des températures durant la semaine la plus chaude de la variante 02.....	96
Figure 4.16: Evolution des températures durant la semaine la plus chaude de la variante 03.....	97
Figure 4.17: Evolution des températures durant la semaine la plus froide de la variante 01.....	98
Figure 4.18: Evolution des températures durant la semaine la plus froide de la variante 02.....	98
Figure 4.19: Evolution des températures durant la semaine la plus froide de la variante 03.....	99
Figure 4.20:Comparaison des besoins en climatisation	100
Figure 4.21:Comparaison des besoins en chauffage	100
Figure 4.22:Evolution des températures durant la période la plus froide de la variante A	101
Figure 4.23: Evolution des températures durant la semaine la plus chaude de la variante A	102
Figure 4.24:Evolution des températures durant la période la plus froide de la variante B	103
Figure 4.25: Evolution des températures durant la semaine la plus chaude de la variante B	103
Figure 4.26: Evolution des températures durant la période la plus chaude de la variante C.....	104
Figure 4.27: Evolution des températures durant la semaine la plus chaude de la variante C.....	104
Figure 4.28: Evolution des températures durant la période la plus chaude de de la variante D	105
Figure 4.29: Evolution des températures durant la semaine la plus chaude de la variante D.....	105
Figure 4.30: Evolution des températures durant la période la plus froide de de la variante A	106

Figure 4.31: Evolution des températures durant la semaine la plus froide de de la variante A	106
Figure 4.32: Evolution des températures durant la période la plus froide de de la variante B	107
Figure 4.33: Evolution des températures durant la semaine la plus froide de de la variante B	107
Figure 4.34: Evolution des températures durant la période la plus froide de de la variante C	108
Figure 4.35: Evolution des températures durant la semaine la plus froide de de la variante C	108
Figure 4.36: Evolution des températures durant la période la plus froide de la variante D	109
Figure 4.37: Evolution des températures durant la semaine la plus froide de la variante D	109
Figure 4.38: Comparaison des besoins en climatisation	110
Figure 4.39: Comparaison des besoins en chauffage	110
Figure 4.40: Evolution des températures de la variante (Etat des lieux) durant la semaine la plus chaude	111
Figure 4.41: Evolution des températures de la variante (Etat des lieux) durant la semaine la plus froide	112
Figure 4.42: Besoins en chauffage et climatisation de variante Etat des lieux	113
Figure 4.43: Evolution des températures dans la zone 01 durant la semaine la plus chaude	114
Figure 4.44: Evolution des températures dans la zone 02 durant la semaine la plus chaude	114
Figure 4.45: Evolution des températures dans la zone 03 durant la semaine la plus chaude	114
Figure 4.46: Evolution des températures dans la zone 04 durant la semaine la plus chaude	115
Figure 4.47: Comparaison des températures maximales dans les différentes zones (période estivale)	115
Figure 4.48: Evolution des températures dans la zone 01 durant la semaine la plus froide	116
Figure 4.49: Evolution des températures dans la zone 02 durant la semaine la plus froide	116
Figure 4.50: Evolution des températures dans la zone 03 durant la semaine la plus froide	117
Figure 4.51: Evolution des températures dans la zone 04 durant la semaine la plus froide	117
Figure 4.52: Comparaison des températures minimales dans les différentes zones (période hivernale)	117
Figure 4.53: Comparaison des besoins en climatisation	118
Figure 4.54: Comparaison des besoins en chauffage	118
Figure 4.55: Evolution des températures dans la zone 01 durant la semaine la plus chaude	119

Figure 4.56:Evolution des températures dans la zone 02 durant la semaine la plus chaude	120
Figure 4.57:Evolution des températures dans la zone 03 durant la semaine la plus chaude	120
Figure 4.58:Evolution des températures dans la zone 04 durant la semaine la plus chaude	120
Figure 4.59:Comparaison des températures maximales dans les différentes zones (période estivale)	121
Figure 4.60:Evolution des températures dans la zone 01 durant la semaine la plus froide.....	121
Figure 4.61:Evolution des températures dans la zone 02 durant la semaine la plus froide.....	122
Figure 4.62:Evolution des températures dans la zone 03 durant la semaine la plus froide.....	122
Figure 4.63:Evolution des températures dans la zone 04 durant la semaine la plus froide.....	122
Figure 4.64:Comparaison des températures minimales dans les différentes zones (période hivernale)	123
Figure 4.65:Comparaison des besoins en climatisation	124
Figure 4.66:Comparaison des besoins en chauffage	124
Figure 4.67:Evolution des températures dans la zone 01 durant la semaine la plus chaude	125
Figure 4.68:Evolution des températures dans la zone 02 durant la semaine la plus chaude	126
Figure 4.69:Evolution des températures dans la zone 03 durant la semaine la plus chaude	126
Figure 4.70:Evolution des températures dans la zone 04 durant la semaine la plus chaude	126
Figure 4.71:Comparaison des températures maximales dans les différentes zones (période estivale)	127
Figure 4.72:Evolution des températures dans la zone 01 durant la semaine la plus froide.....	127
Figure 4.73:Evolution des températures dans la zone 02 durant la semaine la plus froide.....	128
Figure 4.74:Evolution des températures dans la zone 03 durant la semaine la plus froide.....	128
Figure 4.75:Evolution des températures dans la zone 04 durant la semaine la plus froide.....	128
Figure 4.76:Comparaison des températures minimales dans les différentes zones (période hivernale)	129
Figure 4.77:Comparaison des besoins en climatisation	129
Figure 4.78:Comparaison des besoins en chauffage	130
Figure 4.79:Evolution des températures dans la zone 01 durant la semaine la plus chaude	130
Figure 4.80:Evolution des températures dans la zone 02 durant la semaine la plus chaude	131

Figure 4.81:Evolution des températures dans la zone 03 durant la semaine la plus chaude	131
Figure 4.82:Evolution des températures dans la zone 04 durant la semaine la plus chaude	131
Figure 4.83:Comparaison des températures maximales dans les différentes zones (période estivale)	132
Figure 4.84:Evolution des températures dans la zone 01 durant la semaine la plus froide.....	132
Figure 4.85:Evolution des températures dans la zone 02 durant la semaine la plus froide.....	132
Figure 4.86:Evolution des températures dans la zone 03 durant la semaine la plus froide.....	133
Figure 4.87:Evolution des températures dans la zone 04 durant la semaine la plus froide.....	133
Figure 4.88:Comparaison des températures minimales dans les différentes zones (période hivernale)	133
Figure 4.89:Comparaison des besoins en climatisation	134
Figure 4.90:Comparaison des besoins en chauffage	134
Figure 4.91:Evolution des températures dans la zone 01 durant la semaine la plus chaude	135
Figure 4.92:Evolution des températures dans la zone 02 durant la semaine la plus chaude	136
Figure 4.93:Evolution des températures dans la zone 03 durant la semaine la plus chaude	136
Figure 4.94:Evolution des températures dans la zone 04 durant la semaine la plus chaude	136
Figure 4.95:Comparaison des températures maximales dans les différentes zones (période estivale)	137
Figure 4.96:Evolution des températures dans la zone 01 durant la semaine la plus froide.....	137
Figure 4.97:Evolution des températures dans la zone 02 durant la semaine la plus froide.....	137
Figure 4.98:Evolution des températures dans la zone 03 durant la semaine la plus froide.....	138
Figure 4.99:Evolution des températures dans la zone 04 durant la semaine la plus froide.....	138
Figure 4.100:Comparaison des températures minimales dans les différentes zones (période hivernale)	138
Figure 4.101:Comparaison des besoins en climatisation	139
Figure 4.102:Comparaison des besoins en chauffage	140
Figure 4.103:Comparaison des températures dans la zone 01 entre les différents cas étudiés durant la semaine la plus chaude	141
Figure 4.104:Comparaison des températures dans la zone 02 entre les différents cas étudiés durant la semaine la plus chaude	141
Figure 4.105:Comparaison des températures dans la zone 03 entre les différents cas étudiés durant la semaine la plus chaude	142

Figure 4.106:Comparaison des températures dans la zone 04 entre les différents cas étudiés durant la semaine la plus chaude	142
Figure 4.107:Comparaison des températures maximales entre les différents cas étudiés (période estivale)	142
Figure 4.108:Comparaison des températures dans la zone 01 entre les différents cas étudiés durant la semaine la plus froide	143
Figure 4.109:Comparaison des températures dans la zone 02 entre les différents cas étudiés durant la semaine la plus froide	144
Figure 4.110:Comparaison des températures entre les différents cas étudiés dans la zone 03 durant la semaine la plus froide	144
Figure 4.111:Comparaison des températures dans la zone 04 entre les différents cas étudiés durant la semaine la plus froide	144
Figure 4.112:Comparaison des températures minimales entre les différents cas étudiés.....	145
Figure 4.113:Comparaison des Besoins en climatisation des différents cas étudiés.....	145
Figure 4.114:Comparaison des Besoins en chauffage des différents cas étudiés	146
Figure 4.115:Plan du modèle adaptatif proposé	148
Figure 4.116:Coupe A-A du modèle adaptatif proposé	148
Figure 4.117:Plan d'assemblage	148
Figure 4.118:Façade Sud du modèle adaptatif proposé.....	149
Figure 4.119:Vue d'intérieur du modèle adaptatif proposé	149
Figure 4.120:Evolution des températures du modèle proposé durant la semaine la plus chaude	150
Figure 4.121:Evolution des températures du modèle proposé durant la semaine la plus froide	150
Figure 4.122:Besoins en chauffage et climatisation	151
Figure 4.123:Besoins en chauffage et climatisation	152
Figure 5.1:configuration géométrique de la Tour 1	156
Figure 5.2:configuration géométrique de la Tour 2.....	156
Figure 5.3:Evolution des températures de sortie de la configuration AT1.	157
Figure 5.4:Evolution des températures de sortie de la configuration AT1 avec débit WF1=5L/h	157
Figure 5.5:Evolution des températures de sortie de la configuration AT1 avec débit WF5=25L/h.....	158
Figure 5.6:Evolution des vitesses du vent de sortie de la configuration AT1.	158
Figure 5.7:Evolution des Vitesses du vent à la sortie du système de la configuration AT1 avec débit WF5=25L/h.	158
Figure 5.8:Evolution des températures de sortie de la configuration AT2.	159
Figure 5.9:Evolution des températures de sortie de la configuration AT2 avec débit WF1=5L/h.....	159
Figure 5.10:Evolution des températures de sortie de la configuration AT2avec débit WF5=25L/h.....	159
Figure 5.11:Evolution des vitesses du vent de sortie de la configuration AT2.	160

Figure 5.12:Evolution des Vitesses de sortie de la configuration AT2 avec WF1=5L/h.....	160
Figure 5.13:Evolution des Vitesses de sortie de la configuration AT2 débit. avec débit WF5=25L/h.	160
Figure 5.14:Comparaison des températures de sortie des configurations AT1 AT2, avec débit WF1=5L/h.....	161
Figure 5.15:Comparaison des températures de sortie des configurations AT1 AT2, avec débit WF5=25L/h.....	161
Figure 5.16:Comparaison des vitesses de sortie des deux configurations AT1 AT2 avec le débit WF1=5L/h.....	161
Figure 5.17:Comparaison des vitesses de sortie des deux configurations AT1 AT2 avec débit WF5=25L/h.....	162
Figure 5.18:Comparaison des taux d'humidité de sortie pour les deux configurations avec débit WF1=5L/h.....	162
Figure 5.19:Comparaison des taux d'humidité de sortie pour les deux configurations avec débit WF5=25L/h.....	162

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

A : surface d'une paroi (m^2)

$A_{moyenne}$: moyenne des surfaces opaques d'une zone (m^2)

A_{opaque} : somme des surfaces opaques d'une zone (m^2)

AT1 : section transversale de la tour (m^2).

AT2 : section transversale de la tour (m^2).

A_{totale} : somme des surfaces opaques et transparentes d'une zone (m^2)

$A_{transparent}$: somme des surfaces transparentes d'une zone (m^2)

A_{wc} : surface de capitation du vent (m^2).

C : chaleur massique d'un matériau en ($Wh/kg/^\circ C$)

C_{maille} : la capacité thermique de la maille ($J/^\circ C$).

C_{tot} : capacité thermique de l'air et des parois légères incluses dans une zone ($Wh/^\circ C$)

D : taille des gouttelettes d'eau (μm).

e : épaisseur d'une couche de matériau (m)

ε : Efficacité moyenne d'un récupérateur de chaleur sur l'air de ventilation

ext : extérieur

h : coefficient de transfert thermique superficiel (incluant les transferts radiatifs et convectifs).

H : hauteur effective de la tour (m).

int : intérieur

im1 : isolant éventuel entre la zone et la maille d'une paroi côté intérieur

im2 : isolant éventuel entre la maille côté intérieur et une maille intermédiaire

im3 : isolant éventuel entre une maille intermédiaire et la maille côté extérieur

im4 : isolant éventuel entre la maille du côté extérieur et l'extérieur

m : moyen

\dot{m}_a : débit massique d'air (kg/s).

Masse volumique de l'air ($\rho=1.2kg/m^3$).

\dot{m} : débit de ventilation minimal de la zone (kg/s)

ρ : masse volumique d'un matériau (kg/m³)

P : puissance thermique (positive ou négative) fournie à une zone par un équipement de chauffage ou de rafraîchissement, la ventilation₁, les apports internes, les occupants.

PDEC: passive downdraught cooling .

Sol : sol (T_{sol} : température du sol à 10 m de profondeur)

T : température (°C)

T : température

T_{db} : Température sèche extérieure (° C).

T_{e} : température de sortie (°C).

T_{maille} : la température de la maille (°C)

T_{wb} : Température humide (°C).

\dot{T} : dérivée d'une température

T_{eq} : température équivalente (sortie du système d'équations d'une zone adjacente)

U : Coefficient de transmission (W /m² °C).

U_{Ag} : coefficient de transfert avec le sol (W/°C)

U_{Aw} : coefficient de transfert thermique par un vitrage (W/°C)

V_i : vitesse de l'air d'entrée au sommet de la tour (m/s).

V_o : vitesse du vent (m/s).

WF : débit d'eau (L/h).

Q'_{sol} : flux solaire net restant dans la zone en W

Q_{sw} : rayonnement solaire incident sur un mur opaque (W/m²)

Zone : zone (T_{zone} : température de la zone considérée)

λ : Conductivité thermique (W/m.°C).

Ψ_L : coefficient de transfert global correspondant aux ponts thermiques entre une zone et l'extérieur (W/m/°C)

α : facteur d'absorption d'une surface

α_m : facteur d'absorption moyen des surfaces d'une zone

τ_m : facteur solaire moyen des vitrages d'une zone

τ_{ti} : facteur de transmission pour une couche d'isolant transparent

Indices

' : maille intermédiaire d'une paroi

" : maille la plus externe d'une paroi

INTRODUCTION GENERALE

L'objectif principal d'une habitation est de protéger les occupants des sollicitations extérieures et de leur fournir un environnement confortable pour les activités humaines. Selon le Corbusier [1] « Une maison est une machine à habiter. Bains, soleil, eau chaude, eau froide, température à volonté, conservation des mets, hygiène, beauté par proportion » ; En échange de ce que peut nous offrir une habitation comme exigences de confort pour la vie quotidienne, elle doit consommer de l'énergie. Toutefois cette consommation énergétique qui ne cesse d'augmenter.

Plusieurs facteurs ont contribué à l'augmentation énergétique dans le secteur résidentiel entre autre la standardisation du logement afin de répondre à la forte demande de logements. L'utilisation de nouveaux matériaux ont conduit à la normalisation des bâtiments. Partout dans le monde et indépendamment du contexte climatique, les bâtiments sont devenus presque similaires. C'est pourquoi ils sont devenus plus dépendants du chauffage, de la ventilation, et des systèmes de climatisation pour satisfaire les conditions de confort [2]. Improductif et énergivore, le secteur du bâtiment représente environ 40 % de la consommation mondiale d'énergie et contribue à plus de 30 % d'émission de CO₂, Une grande partie de cette énergie est utilisée pour le confort thermique [3].

Le contexte énergétique du bâtiment Algérien ne diffère pas de celui du contexte énergétique mondial et peut être un échantillon intéressant qui le concrétise. Le secteur résidentiel est le premier consommateur d'énergie avec un taux de 43.3% de la consommation totale du pays (Aprue, 2017) [4]. Cette situation alarmante nécessite de trouver des stratégies adéquates afin de faire face à ce problème énergétique.

La consommation d'énergie finale par habitant était estimée à 0.48 TEP en 1990, et passée à 0.71 TEP en 2000, à 1.35 TEP en 2010 et finalement à 1.88 TEP en 2020 [5]. Ghademi et al 2015[6] ont aussi confirmé à travers une approche ascendante pour la modélisation de la consommation d'énergie, que la consommation passera de 73.73 TWh en 2008 à 179.78 TWh en 2040 dans les bâtiments résidentiels standards construits en brique creuse.

Malheureusement les besoins énergétiques dans ce secteur sont satisfaits presque exclusivement par les hydrocarbures [7], ce qui nécessite de trouver des stratégies adéquates sachant que le secteur est responsable de 70% de la consommation de l'électricité en période estivale dû à l'utilisation massive des climatiseurs pour assurer le confort des habitants [8,9].

Le principal facteur ayant contribué à cette augmentation énergétique est l'inadaptation climatique du logement contemporain Algérien, il est à noter que L'Algérie occupe une vaste étendue territoriale, avec une superficie qui dépasse les deux millions de Km² [10] et qui se caractérise par une variété climatique sous l'influence de la mer, des montagnes et du désert dont plus de 85% de la surface totale de l'Algérie est caractérisée par un climat chaud et Sec [11]

Le climat du Sud se distingue du reste du pays, l'habitation dans ce milieu nécessite une conception adéquate. Mais malheureusement les mêmes techniques constructives sont utilisées dans les différentes zones climatiques en Algérie. Un état d'inconfort thermique de 61.5% a été constaté sur le territoire Algérien, avec un nombre d'heures d'inconfort thermique annuel de 3900h, cette zone couvre la zone désertique du Sud Algérien [12].

Dans ce contexte, plusieurs chercheurs ont recommandé le retour à l'utilisation des anciens procédés constructifs, et qui ont été remplacés par de nouveaux procédés qui ne s'adaptent pas aux conditions climatiques de ces régions entre autre : l'utilisation du ciment. Actuellement, le secteur du bâtiment consomme 80% de la production du ciment en Algérie [13]. F. Hadji et al 2020[14] ont recommandé le retour à l'utilisation des matériaux, en raison de leur disponibilité ainsi que leurs avantages sur le plan thermique.

En Algérie, la typologie traditionnelle introvertie a été abandonnée au profit du temps et a été remplacée par une typologie plus moderne extravertie, ce qui a engendré la perte de notre patrimoine architectural et eu un impact significatif sur la performance énergétique du logement Algérien, en particulier celui adapté dans les régions Sud.

Dans ce contexte s'inscrit notre problématique majeure, et qui a pour objectif l'amélioration de la performance énergétique de la maison

contemporaine adaptée dans la région aride d'In Saleh et la création d'un modèle adaptatif aux conditions climatiques de cette région.

Notre recherche vise à contribuer à l'amélioration du confort hygrothermique par l'adaptation d'un système de rafraîchissement passif aux conditions climatiques de la région d'In Saleh, Vu qu'elle se caractérise par des étés chauds avec des températures qui dépassent 48°C et des taux d'humidité qui ne dépassent pas 10.5% [15]. Plusieurs études ont fortement recommandé le rafraichissement passif par évaporation directe pour ces régions [16-18]. Samir Semahi et al [19]. Suite aux résultats des recherches su citées nous avons opté pour l'adaptation du système de refroidissement passif à courant descendant (PDEC).

Objectifs de la recherche :

Notre recherche a pour objectif :

- ✓ Evaluation thermique des solutions passives intégrées dans la maison traditionnelle d'In Saleh, de l'impact du changement des matériaux de construction ainsi que l'amélioration de la performance énergétique de la maison contemporaine.
- ✓ Création d'un modèle de logement adaptatif aux conditions climatiques de la région étudiée.
- ✓ Adaptation d'un système de rafraîchissement par évaporation à courant descendant aux conditions climatiques de la région étudiée.

Méthodologie de recherche:

Afin d'atteindre nos objectifs, nous avons opté pour la méthodologie suivante :

A. Phase de recherche théorique :

Cette phase de recherche est considérée comme étape préliminaire pour notre étude. En premier lieu, nous avons fait une recherche bibliographique et un état de l'art sur le contexte énergétique du bâtiment à l'échelle mondiale et nationale, ainsi que les solutions d'efficacité énergétique envisagées. En second lieu, nous avons analysé le contexte climatique afin de choisir notre périmètre d'intervention. A travers l'analyse du contexte énergétique national ainsi que celui climatique, nous avons proposé le retour à l'utilisation des procédés traditionnels dans l'habitat contemporain. Suite à cela, nous avons

pris comme référence l'habitat traditionnel du contexte chaud, nous avons exposé les recherches effectuées sur les concepts traditionnels, ainsi que celles ayant comme objectif la valorisation de ces concepts.

B. Phase investigation expérimentale :

L'habitat traditionnel se présente comme une référence pour l'étude de l'adaptation climatique du bâtiment. À cet effet, en premier lieu nous avons entrepris une investigation expérimentale durant la période chaude dans une maison traditionnelle de la région d'In Saleh, ce qui nous a permis de récolter les données, relevés, effectuer les mesures nécessaires pour l'évaluation thermique de ce cas d'étude ainsi que la caractérisation des matériaux locaux extraits de cette maison.

C. Phase de simulation :

Nous avons opté pour la simulation thermique dynamique en utilisant le logiciel pleades comfie qui nous a permis d'étudier plusieurs échantillons de l'habitat de la région d'In Saleh et la contribution à l'amélioration de leurs performances énergétiques.

En premier lieu, nous avons étudié le comportement thermique de la maison dans laquelle nous avons effectué une étude expérimentale.

En second lieu, nous avons étudié une autre maison traditionnelle dont la volumétrie diffère du premier cas.

Ensuite, nous avons fait une étude paramétrique sur une maison moderne de cette région et qui a subi des modifications par le propriétaire.

En dernier lieu, nous avons pris une autre maison moderne représentative du logement contemporain de cette région, afin de l'améliorer et de créer un modèle de logement adaptatif au contexte climatique de la région étudiée.

D. Phase adaptation du système de rafraîchissement :

Cette étape est basée sur une approche théorique à l'aide d'un modèle mathématique rapporté dans la littérature. Nous avons fait une étude paramétrique afin d'améliorer son adaptation aux conditions climatiques de la région étudiée.

Structuration de la thèse :

Un chapitre introductif qui comprend une introduction générale, problématiques, Hypothèses et méthodologie de la recherche.

Notre mémoire se structure en cinq chapitres:

Le premier chapitre de ce mémoire sera consacré à la présentation de l'état de recherches effectuées.

Le deuxième chapitre sera consacré à la présentation de la région étudiée, critères du choix du périmètre d'intervention, les différents cas étudiés. Ainsi qu'à l'investigation expérimentale effectuée sur la maison traditionnelle de la région d'In Saleh.

Le troisième chapitre sera consacré à la simulation thermique des différents cas, afin d'étudier leurs comportement, leurs performances énergétiques. Les simulations ont été faites à l'aide du logiciel Pleiades -Comfie

Le quatrième chapitre sera consacré à la présentation et interprétation des résultats de la simulation thermique dynamique.

Le cinquième chapitre sera consacré à l'étude paramétrique effectuée sur l'adaptation du système de rafraîchissement à courant descendant (Pdec) ainsi que la présentation et interprétation des résultats obtenus.

Enfin, ce travail sera clôturé par une conclusion générale dans laquelle nous présenterons les différents résultats obtenus qui permettront de vérifier nos hypothèses de départ .Voire une mise en perspectives sera également proposée dans le but de s'ouvrir sur d'autres optiques.

CHAPITRE 1

1 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE ET ETAT DE L'ART

1.1 Introduction

Le but de ce chapitre est de présenter une synthèse bibliographique et de tirer les recommandations nécessaires pour notre recherche. Pour cela nous avons présenté les études effectuées sur le contexte énergétique mondial et national, les solutions d'efficacité énergétiques proposées ainsi que le contexte climatique national, ensuite nous avons présenté les différentes recherches effectuées et qui sont en relation avec nos différentes thématiques de recherche.

1.2 Contexte énergétique du bâtiment et solutions envisagées :

1.2.1 A l'échelle mondiale

A l'échelle mondiale, la réduction de la consommation énergétique dans le secteur du bâtiment est devenu un enjeu majeur, à travers la réalisation des bâtiments à basse consommation énergétique .D'après I.Blom et al [21] 80% de l'énergie mondiale est consommée dans les villes, la réalisation du bâtiment représente 50% de la consommation totale d'énergie qui peut par conséquent produire des quantités importantes de gaz à effet de serre. Pour faire face à ce problème, les chercheurs se sont focalisés sur l'amélioration de l'efficacité énergétique du bâtiment contemporain à travers l'adaptation des concepts de l'architecture bioclimatique et l'intégration des énergies renouvelables.

Une étude a été faite par W. A. Friess et al [22] afin d'évaluer les solutions passives proposées pour améliorer l'efficacité énergétique du bâtiment adapté dans la région chaude des Emirats Arabes Unis .les résultats ont montré que l'intégration de l'isolation permet de réduire jusqu'à 20% de la consommation énergétique, l'orientation et le choix judicieux du type du vitrage permet une réduction de 55 % et l'utilisation de la ventilation hybride permet de réduire jusqu'à 30%.

Une autre étude menée par Krarti Kankana et Dubey Kankana [23] , dont le but d'améliorer l'efficacité énergétique du bâtiment moderne à Bahreïn,

À travers l'optimisation de la conception du bâtiment en utilisant une large gamme de mesures d'efficacité énergétique entre autre : l'orientation, la taille des fenêtres, type du vitrage, isolation des murs et du toit, l'efficacité des systèmes de refroidissement et chauffage et l'intégration des énergies renouvelables pour la production d'électricité. Les résultats indiquent que l'application de ces mesures d'efficacité énergétique permettra de réduire 62 % de la consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment à Bahreïn. Ces mesures d'efficacité énergétique ont fait aussi l'objet de l'étude faite par Jaber et al [24] sur le secteur résidentiel en Jordanie. Les résultats ont montré que l'application de ces mesures d'efficacité énergétique permettra de réduire jusqu' à 27,59% de la consommation annuelle d'énergie et atteindre un seuil de consommation de 64 kWh/m² /an.

1.2.2 A l'échelle nationale :

L'Algérie comme d'autres pays dans le monde, est confrontée à un problème énergétique croissant dans le secteur du bâtiment dont les besoins sont presque satisfaits par les hydrocarbures notamment le gaz l'énergie la plus disponible [7] (**voir Figure 1.1**). Cette augmentation de consommation est aussi liée à son évolution démographique (**voir Figure 1.2**).

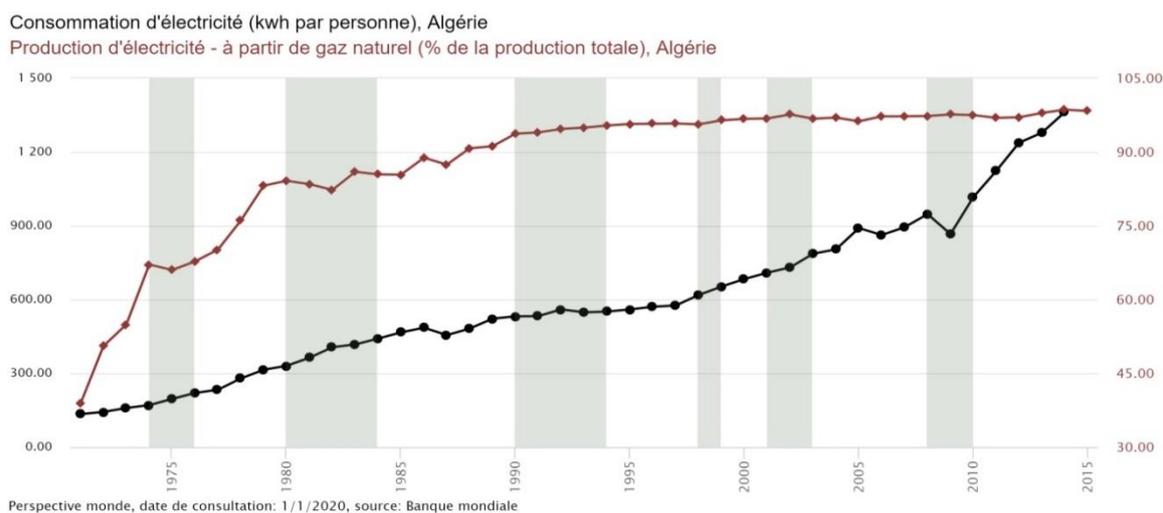


Figure 1.1: Evolution de la consommation et la production électrique en Algérie. [25]

Face à cette problématique, l'état a envisagé deux programmes. Le premier concerne l'application des mesures d'efficacité énergétique, quant au second, il est relatif à l'intégration des énergies renouvelables qui prévoit à l'horizon 2030 d'installer une capacité de 22.000 MW [26]

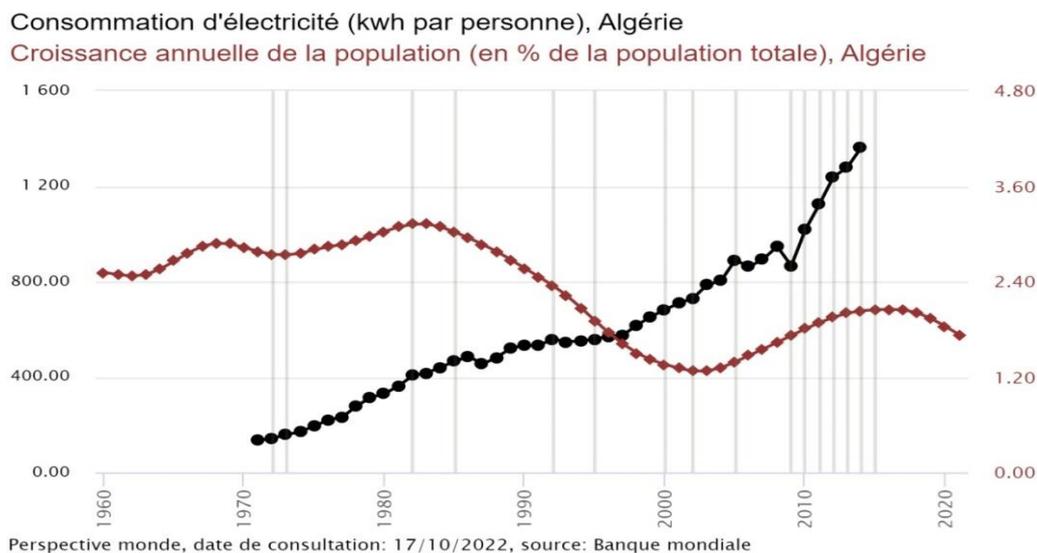


Figure 1.2: Evolution de la consommation électrique et la croissance démographique [25]

• **Politique d'efficacité énergétique dans le bâtiment Algérien : [27]**

La politique algérienne en terme d'efficacité énergétique, essentiellement dans le secteur du bâtiment se traduit par les actions de quelques entités : l'APRUE soutenu par son bras financier le Fonds National pour la Maîtrise de l'Energie (FNME) et le Programme National de Maîtrise de l'Energie (PNME). A cela il faudra ajouter la collaboration des centres de recherches liés au domaine des bâtiments comme le centre du développement des énergies renouvelables (CDER) et le Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment (CNERIB) et bien évidemment le ministère de l'Energie et des Mines .

• **La réglementation Algérienne dans le cadre de la maîtrise d'énergie dans le bâtiment :**

Textes relatifs à la maîtrise de l'énergie

- Loi n°99-09 du 28 juillet 1999 relative à la maîtrise de l'énergie ;

- Décret exécutif n°2000-90 du 24 avril 2000 portant réglementation thermique dans les bâtiments neufs ;
- Décret exécutif n°04-149 du 19 mai 2004 fixant les modalités d'élaboration du programme national de maîtrise de l'énergie (PNME).

Textes relatifs au Ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme

Arrêté ministériel du 10 décembre 1997 portant Approbation du document technique réglementaire relatif à la réglementation thermique des bâtiments « règle de calcul des déperditions calorifiques » (DTR C3.2) ;

- Arrêté ministériel du 18 août 1998 portant approbation du document technique réglementaire

Relatif aux « règles de calculs des apports calorifiques des bâtiments fascicule 2, climatisation » (DTR C3.4.

- Arrêté du 14 Novembre 2005 portant approbation du document technique réglementaire DTR C 3.31 intitulé «Ventilation naturelle-locaux à usage d'habitation».

Arrêté Ministériel du 25 chaoual 1437 correspondant au 30 juillet 2016 portant approbation du Document Technique Règlementaire C3.2/4 relatif à la Règlementation Thermique du Bâtiment [15]

• Projets réalisés dans le cadre de la maîtrise d'énergie dans le bâtiment :

Dans ce contexte, des actions de maîtrise d'énergie ont été entreprises. L'Etat a opté pour le lancement du programme ECO-BAT dans le cadre du PNME 2007-2011, et qui a eu pour objectif la réalisation de 600 logements à haute performance énergétique à travers le territoire Algérien, parmi les stratégies de conception adoptée pour ce projet, la limitation des déperditions thermiques, Orientation et conception adéquates des façades et utilisation des matériaux adéquats [28].Un autre programme de construction de 3000 logements neufs, efficaces en énergie et 4000 logements existants à réhabiliter thermiquement, a été est proposé dans le cadre du PNME 2010-2014[29].

Toujours dans le contexte de réalisation de logement à haute efficacité énergétique un autre projet pilote algérien a été conçu dans le cadre du projet MED NEC (Mediterranean Energy Efficiency in Construction Structure)[30].

Malgré les programmes et la réglementation envisagés, mais la consommation ne cesse d'augmenter. Plusieurs facteurs ont contribué à cette augmentation entre autre ; l'absence d'application de la réglementation thermique alliée à des contraintes économiques du coût de construction et à

Des pratiques architecturales importées et qui a favorisé la réalisation des bâtiments totalement inadaptés aux climats [31].

1.2.3 Aperçu sur le contexte constructif du logement contemporain Algérien :

Le problème du logement en Algérie a pris des proportions considérables, le nombre de logements est amené à augmenter considérablement afin de répondre aux besoins de la population en matière de logement et dont le but de construire vite l'état comme d'autre pays du monde a opté pour l'industrialisation du bâtiment.

L'industrialisation du bâtiment permet de transformer la construction en un processus mécanisé d'assemblage à partir des éléments normalisés fabriqués en usine [32]. L'utilisation de cette technique a rendu le logement Algérien standard, les même techniques et matériaux de construction sont utilisés pour les différentes régions du territoire Algérien.

• Techniques et Matériaux utilisés dans la construction du logement contemporain

✓ La structure :

Parmi les systèmes utilisés dans la structure du logement Algérien

-Système poteau/poutre

-Système de coffrage tunnel et façade préfabriquée

-Structure métallique avec fondations en béton armé.

✓ Plancher :

-Plancher à poutrelles en hourdis avec dalle de répartition coulée sur place.

-Dalle en béton armé

✓ **Murs extérieurs**

Ils se font généralement en

-Brique creuse de 15cm (double paroi de 30cm)

-Parpaing creux de 15cm, 20cm, 25cm.

✓ **Mur intérieur**

Généralement des murs en brique creuse de 10 à 15cm ou des murs en parpaing. [33]

• **Impact de la standardisation du logement sur sa performance énergétique du logement Algérien :**

Une analyse du potentiel bioclimatique a été faite par Samir Semahi et al [19] sur un modèle de bâtiment résidentiel contemporain construit en brique creuse en utilisant des données récentes (2003-2017), l'approche s'est basée sur l'application du modèle du confort adaptatif Ashrae 55-2017 dans 8 lieux représentatifs des zones climatiques Algériennes. Les résultats obtenus ont permis de classer les villes Algériennes en deux grandes catégories ; villes dominées par le chauffage et villes dominées par le refroidissement, le pourcentage d'inconfort moyen toutes zones confondues est de 60%.

Un autre zonage récent établi par Samir Semahi et al [12] sur la base de taux d'inconfort et de la demande énergétique en chauffage et climatisation, à travers une étude faite sur un modèle de référence représentatif du logement contemporain Algérien construit en brique creuse, sur 74 régions des 48 wilayas Algériennes et en utilisant les données climatiques de la période 2004-2017. Les résultats ont montré que l'écart entre le minimum et le maximum de consommation en climatisation et en chauffage sont respectivement estimés à 141 KWh, 148 KWh. Ce contraste est dû à l'adaptation de la même typologie de construction et les mêmes procédés constructifs dans les différentes régions Algériennes malgré la variété du climatique du territoire Algérien.

1.3 Climat en Algérie:

La diversité du climat en Algérie provient essentiellement de sa grande superficie de l'influence de la mer, du désert et des variations de la latitude et l'altitude.

1.3.1 Zones climatiques

- **Classification des zones climatiques selon Borel**

Selon la première classification, BORELJ.[33] ,il avait défini quatre zones climatiques A, B, C, D. et une sous zone B '.

-**La zone A** : comprend le rivage de la mer avec parfois le versant Nord des chaînes côtières.

-**La zone B** : comprend la plaine derrière le rivage de la mer et les vallées entre les chaînes côtières et l'atlas tellien autre que celle de Chelef, la sous zone B ' comprend la vallée du Chlef.

-**La zone D** : comprend le Sahara au-delà de l'Atlas Saharien et jusqu'à la latitude 32°5.

Dans ces zones on distingue les sites d'altitude inférieure à 500 m, les sites compris entre 500 et 1000 m et ceux au-dessus de 1000m.

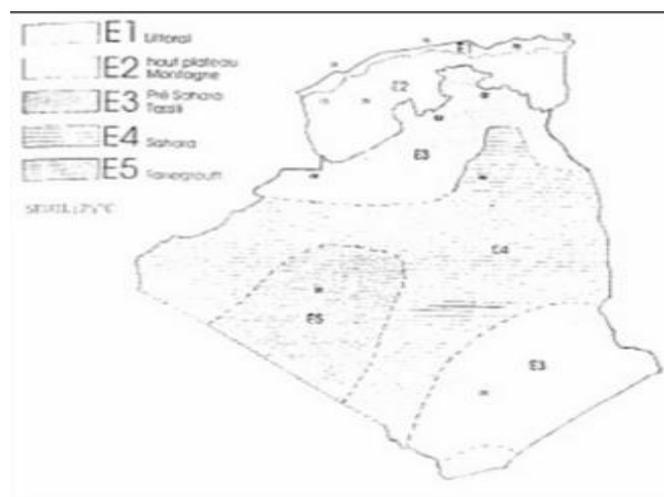


Figure 1.3: Zones climatiques d'Eté. [33]

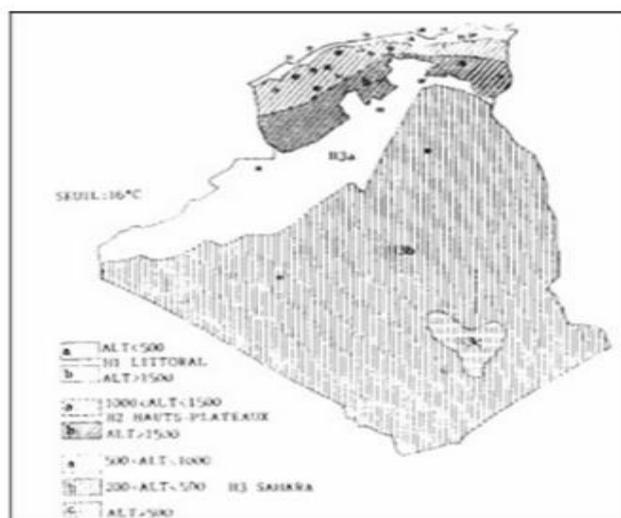


Figure 1.4:Zones climatiques d'hiver.[33]

• **Classification selon DTR C3.2.4 [15]**

✓ **Classification thermique des communes d'Algérie en période d'hiver :**

-**Zone climatique A** : Cette zone est délimitée par la mer au nord et les hautes plaines de l'intérieur au sud. Caractéristiques : - La température extérieure de base est de 3 °C.

- **Zone Climatique A1** : elle comprend les régions de Bejaia, Skikda, Dellys, EL kala, Tenes et Beni saf Caractéristiques : - La température extérieure de base est de 7 °C.

-**Zone Climatique B** : Elle regroupe les différentes régions du nord Tellien et les hautes plaines de l'intérieur. Caractéristique : La température extérieure de base est de - 2 °C. A1.3.

-**Zone Climatique C** : elle comprend les différentes régions du nord Sahara et reliant la Saoura jusqu'à In Amenas, Illizi et Bord Badji Mokhtar Caractéristiques la température extérieure de base est de 1°C, A1.4.

-**Zone Climatique D** : Elle englobe les régions de Tanezrouft et une partie du nord Sahara et le Hoggar Caractéristiques : - La température extérieure de base est de 4 °C.

✓ **Classification thermique été des communes d'Algérie :**

-**La zone climatique A** : comprend le rivage de la mer au nord et les plaines côtières au sud.

-**La zone climatique B** : comprend la partie nord des hautes plaines de l'intérieur, on distingue

-**Deux sous zones**, la première B1 qui comprend la vallée du Chlef, la deuxième B2 qui comprend la région de Guelma.

-**La zone climatique C** : comprend les hautes plaines de l'intérieur.

-**La zone climatique D** : comprend les différentes régions du nord Saoura chott el Hodna.

-**La zone climatique E** : Comprend le nord, l'est et le sud-ouest ainsi l'extrême sud du

Sahara, on distingue une sous zones E1 qui comprend le Hoggar et le Tassili.

- La zone climatique F comprend la région de Tanezrouft.

D'après les différentes classifications, on constate que l'Algérie est un pays assez chaud, selon A. Bouchaira et al [29] les terres du sud de l'Algérie est l'une des terres les plus arides du monde. Le climat est considéré comme contraint à toute étude visant l'amélioration de la performance énergétique du logement. Pour cette raison notre choix a porté sur la région la plus chaude de l'Algérie. La région d'In Saleh comme toutes les régions du Sud se caractérise par une surconsommation d'électricité durant la période estivale ce qui provoque des délestages fréquents. Parmi les causes principales de cette surconsommation l'abandon de la typologie traditionnelle et l'utilisation de nouveaux procédés constructifs malgré que la typologie traditionnelle ait prouvé son adaptation non seulement en Algérie mais à travers le monde grâce à ces concepts bioclimatiques intégrés.

1.4 Habitat traditionnel référence d'architecture bioclimatique

Nous avons pris cette typologie comme source de départ pour notre étude étant une référence d'architecture bioclimatique grâce à ses concepts

Intégrés. Nous avons établi une étude bibliographique sur la typologie traditionnelle, les concepts intégrés ainsi que les recherches effectuées.

1.4.1 Définition de l'habitat traditionnel :

Une architecture conçue en harmonie avec son environnement, employant des techniques et des moyens locaux. A travers des exemples des maisons traditionnelles, on présentera les aspects bioclimatiques qui ont été adaptés dans l'architecture traditionnelle. [36]

1.4.2 Concepts bioclimatiques intégrés dans l'habitat traditionnel du contexte aride :

- **La compacité :**

Est le rapport entre son volume protégé « chaud » et sa surface des déperditions .elle est meilleure quand la valeur est faible [36], la Compacité du tissu urbain permet de réduire les surfaces d'échange thermique. Les maisons traditionnelles se caractérisent par la compacité à l'échelle urbaine et celle du bâti ce qui permet de réduire les surfaces d'échange et réduire les apports solaires reçus (Voir Figures 1.5(a) ,1.5(b)).



(a)



(b)

Figure 1.5: compacité du tissu urbain:(a):Ksar du M'zab,(b):Ksar de Souf[36]

- **Choix des matériaux de construction :**

Pour choisir les matériaux de construction adaptés au climat chaud, deux caractères D'ambiance revêtent une grande importance: la température

maximale et l'amplitude diurne, lesquels dépendent du rayonnement solaire absorbé en relation avec l'orientation et la couleur externe du bâtiment. L'habitat traditionnel au Sahara présente un aspect particulier. La présence des gisements importants d'argile et de gypse ont favorisé l'usage de matériaux tels que le Adobe (Toub) et le mortier de terre (Timchent.). La terre qui est un matériau de construction millénaire. Elle est l'un des matériaux les plus connus dans le monde pour ses propriétés thermiques, sa large disponibilité et son faible coût., elle est utilisée selon diverses techniques : Pisé, Torchis (terre sur ossature en bois), brique crue et cuite [37]. Dans le Sud Algérien le matériau le plus utilisé est la brique d'adobe en terre crue grâce aux gisements d'argile qui se trouvent presque dans toutes les régions du Sud Algérien (voir Figure 1.6) ce qui a permis de fabriquer les briques d'adobe avec des dimensions variables.



Figure 1.6: Matériaux de construction de la région d'In Saleh [source Auteur]

- **La brique d'adobe :**

Elle fut utilisée dans la construction des parois des maisons traditionnelles, pour sa confection ils mélangeaient la poudre issue du broyage de l'argile avec de l'eau afin d'obtenir une pâte élastique collante (40% argile, 60% eau). Puis ils ajoutèrent de la terre sèche afin d'obtenir la texture finale de la brique d'adobe. Après pétrissage de la pâte obtenue ils la mettaient dans des moules en bois fabriqués selon les dimensions désirées, après démoulage ils laissaient les briques se sécher au soleil. La période recommandée pour le séchage est de 4 à 5 jours en été et de 15 à 20 jours en hiver.

- **Le plâtre :**

Ce matériau est utilisé comme un liant et pour la peinture des linteaux (voir Figure 1.7(c)), il est obtenu à partir de la cuisson des blocs d'une couche

calcaire appelé tafza (debdeb)(voir **Figures 1.7(a),1.7(c)**).Le plâtre est fabriqué dans des fours qui se sont de simples tours ayant une ouverture à leur base (voir **Figure 1.7(b)**).



Figure 1.7: fabrication du plâtre du gypse : (a) la roche Tefza,(b)four de cuisson,(c)peinture du linteau de la porte [source auteur]

- **Les isolants naturels :**

Les fibres du palmier dattier furent utilisées dans la construction et l'isolation de la toiture de l'habitat traditionnelle du Sud Algérien (voir **Figure 1.8(a)**) ; Le tronc de palmier fut utilisé pour la construction des poutres, le pétiole et Grappe furent utilisés pour l'isolation de la toiture (**Voir Figure 1.9**).

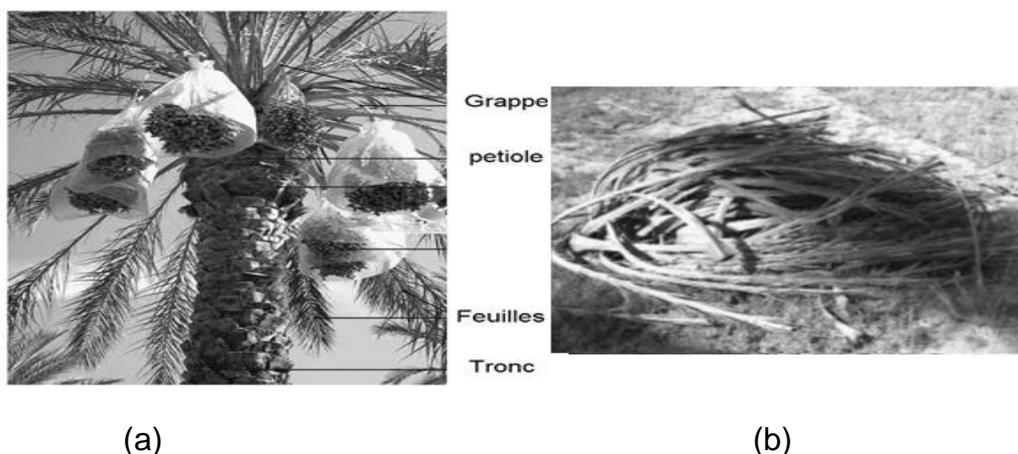


Figure 1.8:Le palmier dattier :(a)Composition du palmier dattier, (b) déchets du bois de palmier [38]

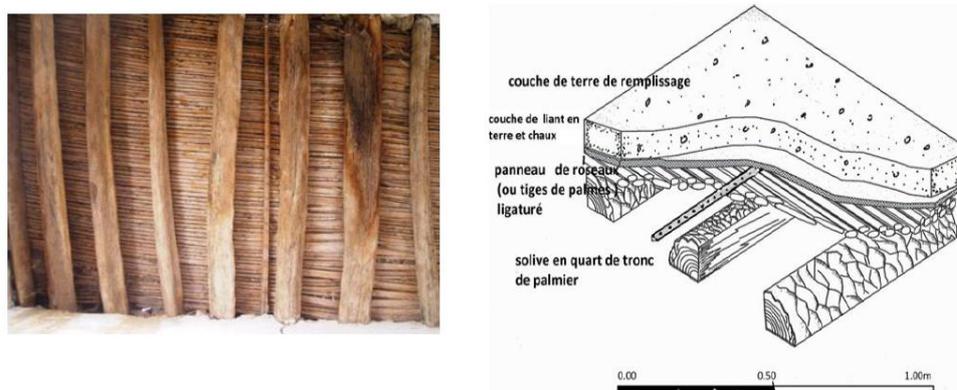


Figure 1.9:La composition et disposition des éléments de couverture en bois de palmier, Biskra, Algérie [39]

Les fibres du palmier dattier présentent plusieurs avantages par leurs résistance à la chaleur, à la sécheresse, au froid et possèdent une conductivité thermique proche de celle du sissal [40]. Cet arbre, entièrement utilisable, n'est mis en œuvre qu'après sa mort [9]. Les fibres de bois de palmier sont considérés comme déchets (**Voir Figure 1.8(b)**) et peuvent être utilisés pour l'isolation des maisons contemporaines du Sud Algérien, sachant que l'Algérie possède un potentiel important de ces déchets de palmier (210 000 tonnes de pétioles, 73000 tonnes de folioles et 52000 tonnes de grappe chaque année)[41].

- **Intégration du patio :**

Le patio : est défini comme, tout espace entouré de clôture et contenant à son tour l'habitation et les services [42]. Ce type d'espace découvert et clos contre les vents et les rayons solaires peut apporter un sentiment de calme, de sécurité et répond aux besoins d'introversité [43]. Pendant l'été, l'espace cour est ombragé pour une longue partie de la journée.

La cour est l'endroit qui fonctionne comme régulateur thermique car elle défend contre les vents dominants par la forme et les dimensions qu'elle peut prendre, de manière que, si elle est restreinte à un petit patio (voir Figure 1.11), elle lutte contre les vents de sable en évitant la création d'une zone de dépression. Les différentes pièces du volume sont aérées, ventilées à travers leurs fenêtres de dimensions variables qui donnent directement sur la cour ou

Le patio (voir Figure 1.10). Elle peut être tenue des techniques les plus avancées, la seule défense véritable contre les vents desséchants chargés de sable qui l'épargnent [42] et [44].



Figure 1.10: Patio type découvert [44]

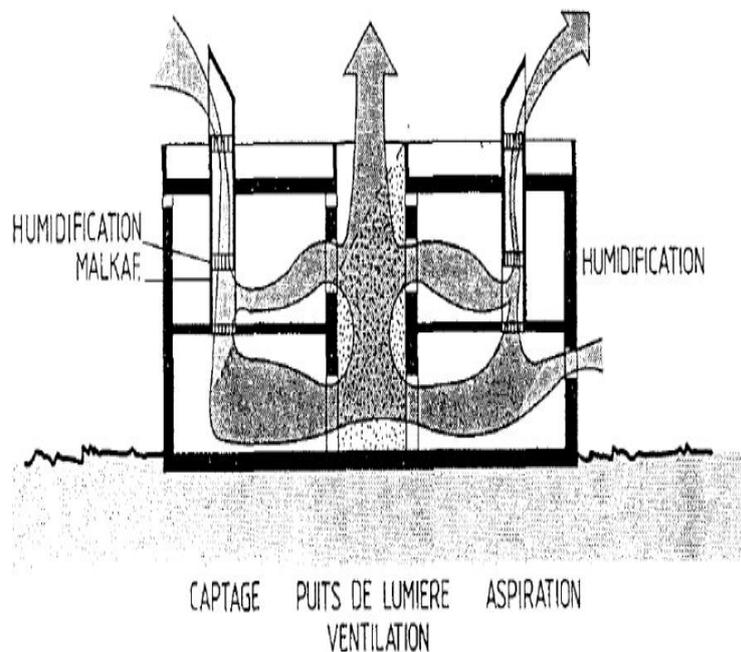


Figure 1.11: Schéma de fonctionnement climatique d'un patio [44]

- **Le rafraîchissement et ventilation naturelle**

Dans des climats arides où la ventilation naturelle ne fait qu'ajouter au gain calorifique, on utilise le refroidissement par convection sous forme "d'évacuation nocturne". Dans ce cas, la masse thermique du bâtiment stocke l'air frais durant la nuit, puisque la température de l'air est plus basse la nuit que le jour, l'air frais nocturne accumulé dans la masse thermique du bâtiment est restitué le jour d'après. L'enveloppe externe doit être isolée pour profiter de cette méthode et le bâtiment doit rester clos durant le jour pour éviter la pénétration de l'air chaud extérieur. Cette technique fut beaucoup utilisée dans les maisons traditionnelles du Sud Algérien. [45]

- **Tour à vent :**

Pour la ventilation des maisons, les anciens du moyen orient utilisaient des « tours à vent » (**Voir Figure 1.12**) ; le bagdir en Irak ou en Iran, le malquaf en Egypte), dont le principe est le suivant : Chacune des quatre faces de cette „tour carrée pour la bagdir, est pourvue d'orifices, eux-mêmes munis d'un volet qu'il suffit d'ouvrir pour capter la moindre brise. Celle-ci s'engouffre dans le conduit puis se refroidit en évaporant l'eau qui suinte des jarres poreuses situées en contrebas. Plus lourd, l'air frais circule au niveau du plancher, puis il se réchauffe et s'élève pour s'échapper par les portes et fenêtres. [46]

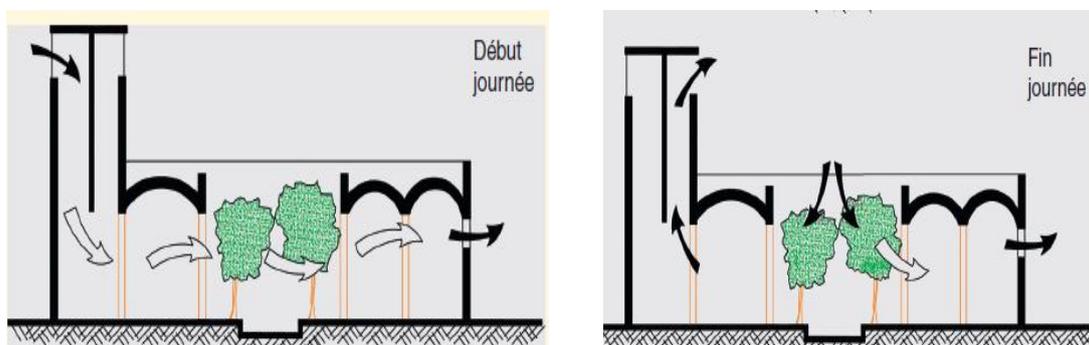


Figure 1.12:Fonctionnement du Système de tour à vent [45]

- **Les moucharabiehs**

un autre procédé « les moucharabiehs » ouverture en panneaux ajourés de bois ou de gypse qui permet de voir sans être vu tout en favorisant la ventilation naturelle sur les façades extérieures et la pénétration du rayonnement diffus [43].(voir **Figure 1.13**)



Figure 1.13:protection solaire (Les moucharabiehs) [47]

1.4.3 Recherches effectuées sur la typologie traditionnelle :

A travers le monde l'habitat traditionnel a fait preuve d'adaptation climatique, Certaines recherches se sont basées sur l'évaluation du confort à l'échelle urbaine. D'autres à l'échelle du bâti afin d'étudier l'impact des solutions passives intégrées entre autre : compacité du tissu urbain, utilisation des matériaux locaux entre autre la brique d'adobe et pierre, utilisation des parois massifs, intégration des isolants naturels dans les toitures, la typologie introvertie ; intégration des cours et patios et les systèmes de rafraichissement intégrés.

Afin de mettre en évidence les recherches effectuées dans les climats chauds, nous avons soulevé les recherches effectuées à l'échelle urbaine et à l'échelle du bâti.

- **Evaluation du confort thermique à l'échelle urbain :**

Afin d'évaluer le confort thermique dans le tissu urbain traditionnel des régions arides, et vérifier l'impact des solutions adoptées, plusieurs recherches ont été faites sur les Ksour du sud Algérien. Ces ksour" qui ont prouvé leur

valeur environnementale et socioculturelle et restent un témoin d'une architecture vernaculaire bioclimatique. [48]

F Ali Toudert et al [49] ont fait une étude expérimentale sur le tissu urbain traditionnel du Ksar de Beni-Izguen de la région de Ghardaïa, dont le but est l'évaluation du confort par rapport aux formes de conception urbaine : Aspect géométrique H/L (le rapport dimensionnel entre la hauteur et la largeur des rues urbaines), SVF (Facteur de vision du ciel) et l'orientation. Des mesures météorologiques ont été effectuées sur huit sites durant deux jours le 24 et 26 juin 2003. Les résultats obtenus ont montré que l'orientation la plus favorable pour les rues est Nord sud et que les températures d'air peuvent atteindre 50° à 55° dans les rues ayant $H/L = 1.5$ et un SVF qui varie de 0.45 à 0.67, et 46° dans les rues ayant H/L qui varie de 3.1 à 4.6 et un SVF qui varie de 0.09 à 0.16 et ne dépassent pas 34° dans les passages couverts ayant un $H/L = 1.4$ et un $SVF = 0.03$. L'écart de températures a été estimé de 15° à 20° entre les espaces ayant un $SVF > 0.45$. Les résultats de l'estimation de l'indice de température physiologique équivalente (PET) ont montré que le stress thermique dans un climat chaud est très élevé dans les endroits dégagés par rapport aux sites urbains abrités.

Une autre étude expérimentale a été faite sur le tissu traditionnel - Ksar, de la région de Ouragla par Moufida Sebtia et al [50], dont le but est de comparer et d'évaluer les caractéristiques thermiques des zones transformées et les zones originales du tissu ancien traditionnel, les mesures météorologiques ont été effectuées au niveau des deux tissus, durant la journée du 3 Aout, à 5h, 9h, 12h, 17h, et 21h. Les résultats obtenus ont montré que la température moyenne de l'air a été estimée à $37,04^{\circ}\text{C}$ dans les zones originales et à 38°C dans les zones transformées, l'écart a été estimé à 0.56°C . et que les températures radiantes augmentent de 17h à 5h et peuvent atteindre 37°C , par contre les températures augmentent à partir de 12 h et peuvent atteindre $38,92^{\circ}\text{C}$ ce qui confirme l'impact du changement de la configuration des voies urbaines, de la densité du tissu, facteur de vision du ciel ainsi que le changement des matériaux de construction.

- **Evaluation du confort thermique à l'échelle du bâti :**

Nous avons établis une recherche dans la littérature et soulevé des recherches qui ont eu pour objectif l'évaluation des éléments conceptuelles intégrés dans l'habitat traditionnel des régions chaudes à travers le monde.

L'inertie thermique des matériaux de construction locaux a été étudiée par de nombreux chercheurs, Niccolo` Aste et al [51] ont examiné l'efficacité énergétique de l'utilisation des parois massifs à forte inertie thermique. L'étude a été menée sur plusieurs murs ayant le même coefficient de transmission(U) dans les maisons de la ville de Milan en Italie, cette région qui se caractérise par un été chaud et un hiver froid. Les résultats ont montré que l'utilisation des murs à forte inertie thermique permet de réduire 10% de consommation en chauffage et 20% en climatisation, il a été aussi démontré que l'inertie thermique devient efficace aux conditions estivales lorsqu'elle soit associée à une bonne ventilation et une protection solaire. Dans le même contexte une étude expérimentale a été faite par Silvia Martín et al [52], dont l'objectif est l'évaluation de l'impact de l'inertie thermique sur le confort hygrothermique. L'étude a été faite sur trois maisons qui sont respectivement construites en pierre, adobe et bois dans la région rurale de NAVAPALOS en Espagne, une région caractérisée aussi par des hivers froids et des étés chauds. Les résultats obtenus ont montré que Le confort estival est accru à 100% dans les deux maisons traditionnelles construites en pierre et adobe sans recourir à un système actif, alors que dans la maison en bois seulement 44% des valeurs obtenus sont conforme aux températures de confort. Par rapport au taux d'humidité durant la période estivale il a été montré que 44 % des données étaient hors de la zone de confort pour la maison en bois, 2% pour la maison en pierre et 11% pour la maison en adobe.

Une autre étude menée par A.P.Olukoya, et al [53] et qui ont confirmé que l'utilisation des parois massives en adobe dans un bâtiment à Louroujina dans l'île de Chypre permet une réduction de 17% pour chauffage et 25% pour refroidissement et Les résultats de l'estimation d'émission de carbone ont montré que la construction traditionnelle de cette région a une empreinte nulle sur l'environnement.

L'utilisation des matériaux locaux a un impact significatif sur le confort thermique, à travers une étude comparative sur différentes typologies de maisons de la région Camerounaise. A. Kemjou et al [54] ont déduit que l'utilisation des matériaux de construction locaux bois simple, enduit de terre battu et brique de terre permettent de favoriser le confort et d'atteindre des températures de 27°C durant la période estivale contrairement à la typologie moderne construite en parpaing dans laquelle le confort thermique est assuré par l'utilisation de la climatisation.

Dans une autre région parmi les régions les plus chaudes du Sud du Portugal dont la température dépasse 45°C en été , Jorge Fernandes et al [55] ont fait une évaluation thermique sur une maison vernaculaire en utilisant l'approche du confort adaptatif thermique ,et ils ont approuvé que l'utilisation des murs massifs en terre battue, l'intégration de l'isolation et la compacité du tissu urbain permettent d'avoir un profil de températures et un taux d'humidité stable et que le confort estival est atteint, les températures intérieures sont estimées à 27°C et le taux d'humidité relative à H%=60% sans recourir à un système actif.

Les études effectuées sur la maison traditionnelle ont montré que la typologie et les procédés constructifs diffèrent d'une région à une autre .Dans les régions arides et hyper arides des pays maghrébins et des pays du moyen orient fut adaptée la typologie traditionnelle introvertie et qui a fait l'objet de plusieurs chercheurs afin d'étudier son adaptation climatique, sa performance et la comparer à celle de la maison moderne extravertie.

Dans la région aride de Ghadamès en Lybie I.AHMAD et al [56] ont fait une étude expérimentale sur deux maisons dont le but d'étudier l'impact des solutions passives intégrées sur le confort thermique. Les résultats ont montré que la température moyenne ambiante est estimée à 28°C dans la maison traditionnelle par contre elle peut atteindre 31°C dans la maison moderne durant la période estivale. Le taux d'humidité relative a été estimé à 30% à l'intérieur de la maison traditionnelle alors qu'à l'extérieur a été estimé à 25%, par contre dans la maison moderne sa valeur est moins faible à celui de l'extérieur. Cet écart de température et d'humidité est due au changement de la configuration spatiale de la maison de Ghadamès, du model introverti au model

extraverti, ce qui a rendu la maison moderne moins compacte que celle traditionnelle, la compacité est estimée à 0.52 pour la maison traditionnelle et à 4 dans celle moderne, aussi le coefficient de transmission U des parois est estimé à $1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ dans la maison traditionnelle et à $2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ dans la maison moderne du au changement des matériaux de construction. Parmi les recommandations suggérées de cette étude l'utilisation du plâtre de gypse pour le traitement des surfaces intérieures qui permet de réduire la transmission du flux de chaleur et l'équilibre de l'humidité intérieure.

Nazanin Nasrollahi et al [57] ont fait une étude sur 19 modèles établis après le classement de 45 échantillons de l'habitat traditionnel dans la région de Shiraz en Iran, dont le but d'étudier la performance thermique des différentes configurations des cours adaptées dans les maisons traditionnelles. L'étude a confirmé que les modèles profonds sont plus performants et que le rapport $H/W=3.1$ (H est la hauteur et W la largeur de la cour) permet d'avoir les conditions les plus favorables.

Zahra Zamani et al [58] ont étudié les conditions thermiques intérieures et extérieures d'une maison à cour typique en Iran, afin d'évaluer l'impact de la position des zones sur leurs performances énergétiques. Les résultats ont montré que les besoins en refroidissement des zones situées sur les côtés Est et Ouest de la cour sont plus importants par rapport aux autres zones du rayonnement solaire. Les heures d'inconfort maximales ont été enregistrées dans la zone Est. Il a été déduit après comparaison des températures à l'intérieur de la cour et à l'extérieur pendant la journée la plus longue de l'année (21 juin) que les fluctuations sont plus importantes à l'extérieur qu'à l'intérieur avec un écart de 1.2°C , les résultats montrent que les cours intérieures peuvent fournir un microclimat plus frais en été.

La comparaison de la performance énergétique de la typologie traditionnelle introvertie par rapport à celle moderne extravertie a fait l'objet de plusieurs études entre autre l'étude comparative faite par N.Fezziou et al [59] dans plusieurs régions des pays maghrébins ; Algérie, Maroc, Tunisie, Lybie. Afin de vérifier seulement l'impact du patio ils ont utilisé les matériaux contemporains pour les différents cas d'étude. Les résultats ont montré que le nombre des heures d'inconfort a été estimé à 550h dans la maison extravertie

et à 206 h dans celle introvertie. Alors qu'à Oran qui se caractérise un climat méditerranéen tempéré il a été constaté que la maison à patio présente un comportement thermique assez similaire à celui de la maison extravertie. Les résultats ont montré aussi que les besoins en rafraîchissement dans la maison introvertie sont inférieurs à ceux de la maison extravertie, le taux de réduction a été estimé à 20% dans les régions de Saba et Koufra en Lybie, Bechar et Tamanrasset, et à 50% dans la région de Tunis. Tandis qu'à Oran et Casablanca au Maroc les besoins sont presque similaires. Par conséquent La maison à patio a un impact significatif sur l'efficacité énergétique des maisons des régions chaudes.

Dans le même contexte une autre étude menée dans la région de Bechar a confirmé que la maison à patio permet de réduire les heures d'inconfort durant la période de surchauffe jusqu'à 11.82% par rapport à une maison moderne [60], ce qui confirme que le patio s'adapte mieux dans un climat aride.

Le patio dans l'architecture traditionnelle avait plusieurs configurations, il pouvait être totalement ouvert ou bien quasiment fermé type Atrium. Naïma Fezzioui et al [17]. Ont confirmé à travers une étude faite sur trois maisons situées à Béchar, deux maison traditionnelles du ksar Knadsa de Bechar construites en Adobe dont la configuration du patio est différente ; une typologie à patio et une typologie à atrium, et une maison extravertie en parpaing. d'après les résultats obtenus, le pourcentage d'heures lorsque la température varie entre 32°C et 34°C est estimé de 2.94% à 8.16% dans la maison à Atrium et à 6.03% dans la maison WD à patio, ce qui peut être supportable pendant la période de surchauffe, Tandis que la température peut atteindre 40°C dans la maison moderne, cet inconfort ne peut être résolu qu'à travers l'utilisation de l'air conditionné, le pourcentage moyen d'heures pendant lesquelles $T > 34^\circ\text{C}$ est à égal 17.62% ,une différence de 15.59% par rapport à la maison à patio et 17.22% par rapport à la maison à atrium, la période d'inconfort dans les deux maisons traditionnelles est estimée à 18 jours par contre dans la maison contemporaine à 2 mois. Ce qui confirme l'inadaptation climatique du logement contemporain dans les régions climatiques. Et ce qui a été confirmé par

Maatouk Khoukhi et Naïma Fezzioui [61] à travers une étude similaire menée sur la même typologie de la région.

Dans le même contexte, une autre étude menée sur Le Ksar de Ouargla par [S-Abdou 2004 [62] a confirmé que la maison s'intègre aux conditions climatiques de la région grâce à ses concepts utilisés : murs massifs en pierre locale de nature calcaire gypseuse dont l'épaisseur est de 45cm, rapport plein vide qui est égale à 3%, Aspect dimensionnel $H > L$ (hauteur du patio par rapport à sa largeur) type atrium. Compacité du tissu et l'utilisation du rafraichissement par évaporation.

Les mesures des températures intérieures ont été comparées avec celles de la station météorologique, l'écart a été estimé entre 12 :00h et 18 :00h à 2°C malgré qu'il n'est pas important mais il reste apprécié car c'est le moment le plus défavorable de la journée cela s'explique par la masse importante des éléments constructifs, la maison de Ouargla reste sensible à la chaleur, température peut atteindre 38°C mais les températures intérieures ne suivent pas les fluctuations des températures extérieures.

Amri Khaoula , Alkama Djamel [63] ont prouvé que l'adaptation climatique de la maison traditionnelle de Oued Souf a aussi approuvé son efficacité et ce qui a été déduit à travers les résultats de cette étude ,et qui a prouvé que l'utilisation des dômes et des voutes ; des éléments constructifs qui favorisent la ventilation, aussi l'utilisation des matériaux de construction locaux à forte inertie thermique comme la rose de sable, Tafza ont permis de stabiliser les fluctuations durant la période de surchauffe et d'obtenir une écart de 5°C à 7°C tout en favorisant le confort en hiver , ce constat a été aussi déduit aussi à partir des résultats de l'étude faite par Houda Nefidi et al [64] sur la maison traditionnelle de la région de Souf.

Dans une autre région du Sud Algérien caractérisé par un climat semi-aride Darda Bencheikh et Madani Bederina[65] ont fait une évaluation thermique de la maison traditionnelle du Ksar de Laghouat en utilisant l'approche de Givoni [66] et celle du confort adaptatif –ASHRAE 55[67] , ont démontré que la maison vernaculaire est à 100% performante durant la période

Estivale grâce aux solutions passives intégrées, et permettant une réduction de 39% de consommation par rapport à la maison moderne.

D'après les résultats des recherches effectuées sur l'habitat traditionnel nous avons déduit que cette typologie favorise le confort dans les régions chaudes et semi arides mais dans les zones arides et hyper arides, les solutions permettent de réduire les fluctuations de températures et d'avoir des profils de température stables. La minimisation des fluctuations des températures permet par conséquent de faire des économies de chauffage et de climatisation dans le Sahara [68].

Aussi le rafraîchissement par évaporation a été fréquemment utilisé, (plantes et fontaines), dans certaines régions arides, l'intégration des bassins d'eau dans les patios a permis d'améliorer le confort durant les périodes de surchauffe grâce au rafraîchissement passif par évaporation, et ce qui a été prouvé à travers une étude expérimentale menée en Arabie Saoudite par Nasser A et al [69] et qui ont montré que l'écart entre les températures extérieures et intérieures puisse atteindre 5°C. Une étude similaire a été faite par Kindah Mouslia et Giovanni Semprinia [70] à Damas et qui ont confirmé que l'aménagement d'un bassin d'eau dans le patio a un impact sur la ventilation ainsi que sur l'évolution des températures, La ventilation par évaporation permis d'augmenter l'acceptabilité de la plage de confort de 30% à 35% par rapport à une maison extravertie durant la période de surchauffe.

Un autre procédé constructif de refroidissement passif, très répandue en Iran, Irak et en Egypte, « Les tours à vent » ou le Baghdir qui est un dispositif qui fut utilisé non seulement pour la ventilation mais aussi pour le refroidissement passif dans le climat désertique, plusieurs centres de recherches ont travaillé pour améliorer sa configuration [43].

1.4.4 Valorisation des anciens procédés constructifs :

- **Valorisation des matériaux de construction locaux :**

Plusieurs recherches ont été entreprises dont le but de valoriser les matériaux locaux afin de les introduire dans l'habitat contemporain. Certaines recherches se sont orientées vers l'identification des caractéristiques thermo-

physiques des isolants naturels .B.Agoudjil et al [38] ont étudié l'effet de l'orientation des fibres du palmier dattier sur leurs conductivités thermiques.

Et d'autre sur l'amélioration des caractéristiques thermo-physiques et mécaniques des matériaux modernes par la création des matériaux bio composites en utilisant des ressources naturelles [71,72].Mourad Chikhi et al[73] ont développé un nouveau matériau à partir des fibres de palmier et du plâtre du gypse , les résultats ont montré que ce nouveau type de bio composite présente de bonnes performances thermiques et mécaniques qui lui permettent d'être appliqué comme matériau d'isolation thermique dans le bâtiment. L'étude faite par Fatiha Mokhtari et al [30] sur le projet pilote Algérien (Med Nec) a permis d'évaluer l'impact de l'inertie thermique et de tester la performance de ce nouveau isolant bio source afin de l'adapter aux conditions climatique de la région de Bechar. Les résultats obtenus ont confirmé que l'utilisation des murs en brique de terre stabilisée isolé avec ce nouveau matériau bio source est la plus performante et la moins couteuse.

D'autres chercheurs ont recommandé le retour à l'utilisation des matériaux locaux comme la brique d'adobe dans les constructions en climat aride en Algérie en raison de leurs disponibilité ainsi que leurs avantages[74].Une étude menée dans ce contexte a contribué à l'amélioration de la performance énergétique de la brique d'adobe de la région de Msila par l'ajout d'une masse de paille équivalente de 5% de la masse de la brique de terre [14].

Dans un autre volet, l'étude de la performance de l'intégration des matériaux de construction locaux, les isolants naturels et les matériaux composites a fait l'objet de l'étude entreprise par Sami Mecheri.S [40] dont le but était d'évaluer l'impact de leurs intégrations sur la performance énergétique des logements à haute performance énergétique réalisés dans le cadre du programme d'efficacité énergétique Algérien. Une autre étude faite par Fazia Ali[75], dans le but d'évaluer la performance du projet pilote Algérien (Med Nec) dans deux régions ayant un climat différent, la région d'Alger dans laquelle il est construit et la région aride de Ghardaïa au Sud du pays, le projet pilote construit en brique de terre stabilisée a été comparé à un logement représentatif du logement contemporain Algérien construit en brique creuse et

mal isolé dans la région de Ghardaia. Les résultats ont montré que l'utilisation des matériaux à forte inertie thermique permettent de réduire de 30% de consommation pour le refroidissement et 90% pour le chauffage par rapport au logement contemporain de la région de Ghardaïa, l'étude comprend aussi une contribution d'optimisation de la performance du logement pilote en climat aride à travers le renforcement des éléments constructifs (isolation des murs et des surfaces horizontales), augmentation du taux de ventilation nocturne et intégration des dispositifs d'ombrage réglables en temps utile .

Une autre recherche récente faite par Meryem KADRI et al [76] et qui a visé à étudier la contribution d'une toiture double peau couplée à une peinture thermo-réfléchissante sur la réduction de la température intérieure et la consommation d'énergie dans la maison traditionnelle du Ksar de Beni Isguen. Afin d'identifier l'inconfort estival dans ce cas étudié, des mesures de température et d'humidité ont été prises pendant la période de surchauffe ; les résultats obtenus ont montré qu'en été les températures dans les maisons traditionnelles sont élevées par rapport à la zone de confort. Néanmoins, le modèle proposé réduit la température de fonctionnement intérieure de 5°C par rapport à une maison avec un toit de style ancien.

Toujours dans le contexte de la valorisation des anciens procédés constructifs et pour répondre aux conditions climatiques arides de la région de Ghardaia, une nouvelle ville appelée « ksar de Tafilet » a été construite au sud de Béni-Isguen,

- **Le projet de Tafilet réalisé dans le cadre de la valorisation des anciens procédés constructifs :**

Le Ksar de Tafilet est un modèle urbain « néo-traditionnel » qui reproduit les principes de composition et d'organisation spatiale des ksours dans la ville de Ghardaïa. Ce ksar incarne l'adaptation entre tradition et modernité : il renvoie au cadre local de production de l'espace ksourien, contribue à la valorisation de ces anciens ksours qui remontent au XI^e siècle [77].

Ce projet a fait l'objet de plusieurs recherches, M-BenCherif Adad et al [47] ont fait une étude comparative afin d'examiner les caractéristiques urbaines et architecturales des anciens et nouveaux ksour du Mzab. Les principes de conception du nouveau ksar ont impliqué une réinterprétation des principes urbains et architecturaux des villes et des maisons mozabites traditionnelles, avec une adaptation à la vie contemporaine en matière d'architecture bioclimatique. Les éléments de conception qui ont été inspirés de l'ancien Ksar comprennent la compacité du tissu urbain(**Voir Figure 1.14**), l'utilisation des matériaux locaux tels que la pierre, le sable, la chaux et le plâtre (**Voir Figures 1.16,1.17**), des encorbellements pour créer des passages ombragés(**Voir Figure 1.18**), des "Moucharabiehs" pour contrôler le rayonnement solaire(**Voir Figure 1.18**), une texture rugueuse pour assurer un ombrage au mur et l'introduction de végétation. Cependant, pour s'adapter aux exigences du confort moderne, certains éléments ont été modifiés dans la conception du nouveau Ksar, tels que l'élargissement des passages (**Voir Figure 1.19**), la modification de l'habitation avec de petites ouvertures donnant sur l'extérieur et le changement de la forme de la cellule avec l'utilisation de formes angulaires plutôt que des formes organiques (**Voir Figure 1.15**).



Figure 1.14:Vue sur l'ancien Ksar et le nouveau Ksar de Beni Izguen[9]

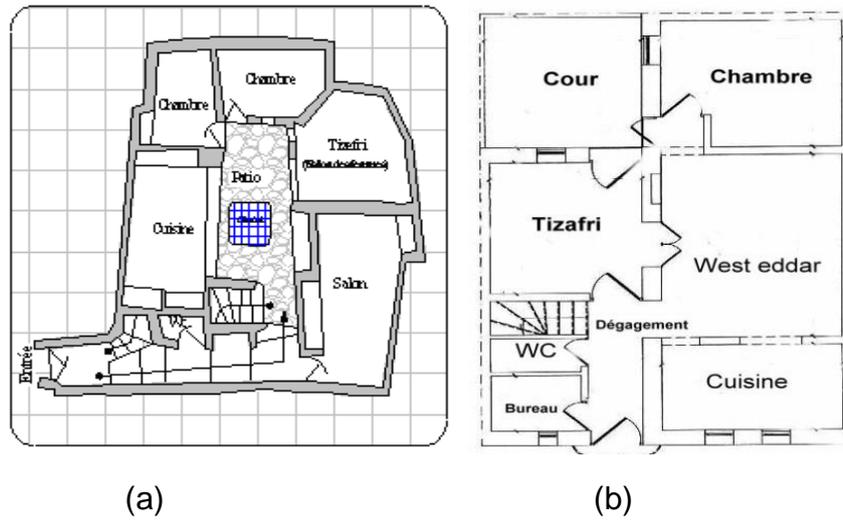


Figure 1.15: Plan de la maison mozabite : (a) ancien Ksar, (b) nouveau ksar [9]

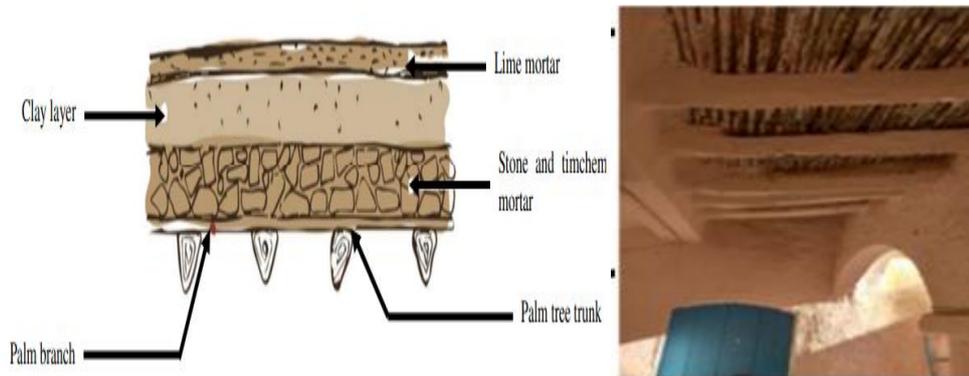


Figure 1.16: Composition de la toiture de la maison de l'ancien Ksar [9]

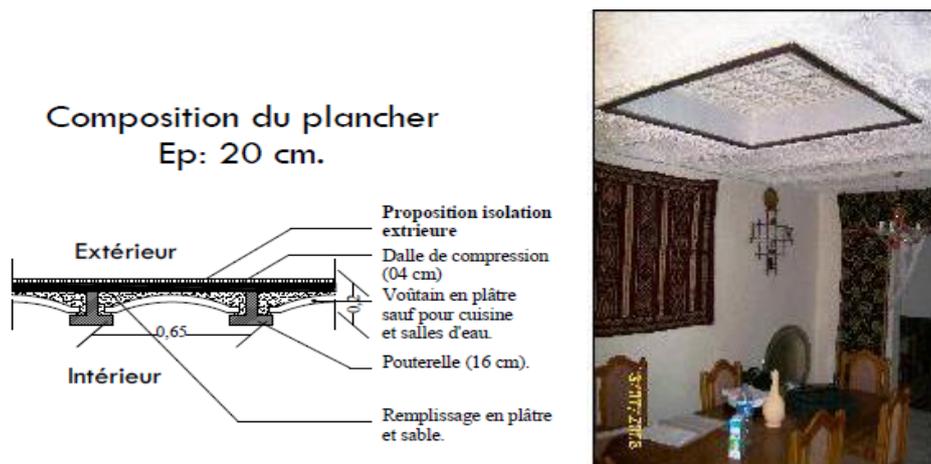


Figure 1.17: Composition de la toiture de la maison du nouveau Ksar de Tafilet [9]



Figure 1.18: Utilisation des moucharabiehs et encorbellements sur les façades du Ksar de Tafilalet [source auteur]



Figure 1.19: Aménagement de voies larges au sein de Ksar de Tafilalet [Source auteur]

Le changement des procédés constructifs a engendré un impact significatif sur le confort intérieur dans les habitations du Ksar de Tafilalet, ce qui a été prouvé par plusieurs études. Meryem KADRI et Ammar BOUCHAIR [78] ont entrepris une investigation expérimentale sur une habitation de l'ancien Ksar de Beni Izguen et une autre du nouveau ksar de Tafilalet durant la période hivernale, les résultats ont montré que le profil de température est stable dans l'habitation de l'ancien ksar avec des températures qui peuvent atteindre 19°C , par contre dans le nouveau ksar, il a été constaté des fluctuations des températures et qui pouvaient baisser jusqu'à 12°C . Les résultats ont prouvé

que la maison traditionnelle avec toiture en matériaux locaux est plus performante à celle du nouveau Ksar de Tafilalet en période hivernale . Une étude similaire a été menée par Akacem Imene[79] a permis d'identifier l'inconfort thermique durant la période estivale dans l'habitat du nouveau Ksar de Tafilalet. Cette étude a même contribué à la vérification réglementaire thermique, les résultats ont prouvé que l'habitat de Tafilalet n'est pas conforme à la réglementation thermique Algérienne, une autre étude a été faite par CHERIFI Zakaria et ZOUGAIE Oussama [80] a aussi montré que le confort estival n'est pas atteint malgré que l'écart de température a pu atteindre 5°C. Afin d'améliorer le confort dans l'habitat du Ksar de Tafilalet plusieurs recommandations ont été proposées entre autre l'intégration d'un système de rafraîchissement par humidification adiabatique [80] et la réinterprétation des tours à vent avec un refroidissement par évaporation [9]

- **Valorisation des systèmes de rafraîchissement :**

Parmi les systèmes de rafraîchissement qui ont été valorisés afin d'améliorer leurs performances, Le système de « tour à vent » qui fut beaucoup utilisé dans les pays du moyen orient, pouvait être associé à un procédé d'humidification afin d'améliorer sa performance et contribuer non seulement à ventiler mais aussi à humidifier l'air à la sortie du système surtout après confirmation de l'incapacité du système à procurer le confort estival dans les régions arides. Parmi les recherches qui ont été menées afin d'améliorer sa performance, l'analyse numérique faite par M.N. Bahadori [20] qui a permis de confirmer l'incapacité du système traditionnel (**Voir Figure 1.20**) à procurer le confort estival dans un climat chaud et aride en permettant seulement de réduire 0.4°C, cette recherche a aussi permis de proposer un nouveau système (**Voir Figure 1.21**) et de confirmer que l'intégration de l'évaporation avec supposition que les murs soient humides, et que quand l'air circule dans les conduites, l'eau s'évapore selon un processus adiabatique dans le courant d'air permettant de baisser la température et d'augmenter la teneur en eau par conséquent améliorer la performance du système traditionnel sous les mêmes conditions climatiques.

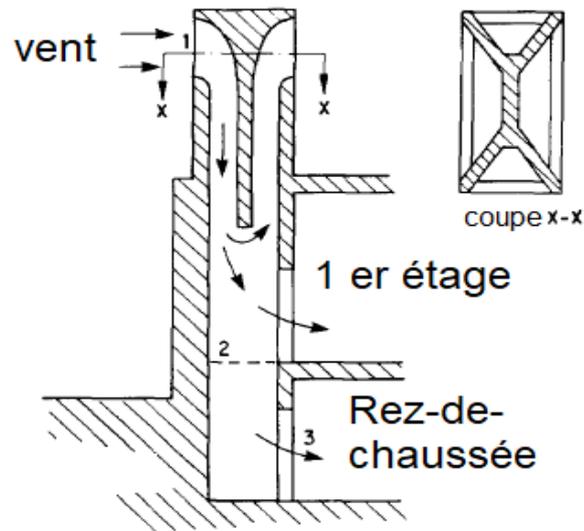


Figure 1.20: Schéma d'écoulement de l'air dans une tour à vent classique [20]

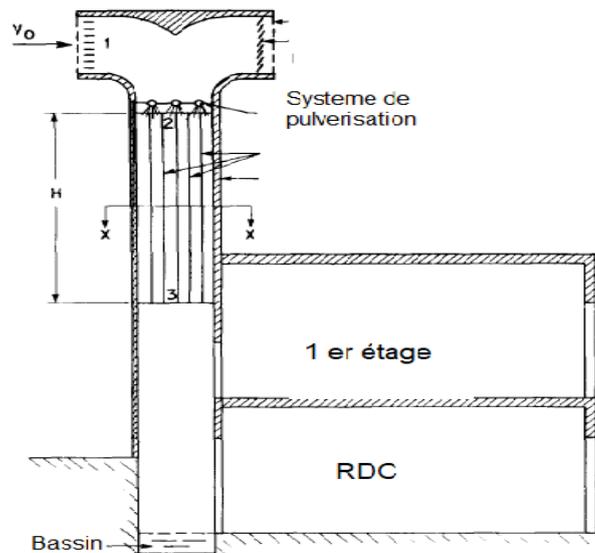


Figure 1.21: Le système proposé par Bahadori [20]

Le nouveau système refroidissement passif à courant descendant PDEC a été développé par Givoni B[81] pour le refroidissement des cours extérieurs et qui a été adapté au bâtiment et cours intérieures, le nouveau système PDEC (système de refroidissement passif à courant descendant PDEC) se compose d'un puits ouvert avec des douches en haut et un " bassin " de collecte en bas. L'eau est recyclée par une pompe. L'eau qui tombe

entraîne un grand volume d'air, créant un flux d'air refroidi dans le puits et dans le bâtiment. Un capteur de vent est installé au-dessus pour améliorer le débit d'air .

A travers des études expérimentales dont le but de tester ce système sous les conditions climatiques de trois régions , Los Angeles en Californie, USA [74],deux équations empiriques ont été déduites à partir des résultats expérimentaux et qui ont servi à calculer la température de sortie en fonction de la température de bulbe humide et le débit d'eau utilisé ainsi que le débit volumique de l'air de sortie en fonction du débit d'eau injecté et la hauteur de la tour .Les résultats ont aussi prouvé que la tour donne le même rendement en utilisant l'eau salinée que l'eau douce et aussi que quand la hauteur dépasse 3m la performance du système s'améliore , une autre expérience a été menée par Yokohama au Japon a permis aussi de déduire deux équations de régression afin de calculer la température à la sortie en fonction de température de bulbe humide et la vitesse de sortie en fonction du débit d'eau injecté et la vitesse du vent extérieur Yajima Satoshi, Givoni Baruch[82].les résultats de la troisième étude faite par Givoni, B [81] a confirmé que le système permet de favoriser le confort estival même quand les températures extérieures peuvent atteindre 45°C.

L'utilisation du refroidissement par évaporation dans les régions arides a été recommandée par de nombreuses recherches établies dans la littérature [16-19].Selon l'étude entreprise par Samir Semahi et al [19] Le refroidissement par évaporation directe est la stratégie de conception la plus efficace pour le Sud d'Algérie suite à l'aridité de son climat . Une étude expérimentale faite par Nasreddine Sakhri [83] sur une salle d'essai située à Bechar, dont le but de vérifier l'impact de l'intégration d'un nouveau système combiné de trois systèmes ; un capteur à vent, une cheminée solaire et un échangeur terre air, le but de cette étude est d'améliorer le confort thermique et la réduction de la consommation énergétique ,ce nouveau système a permis de réduire jusqu'à 50% de la consommation énergétique .Mais il a été recommandé lors de cette étude d'utiliser un système de pulvérisation d'eau à la sortie du capteur de vent (**Voir Figure 1.22**) car il génère un refroidissement par évaporation et permet d'améliorer le confort hygrométrique durant la saison estivale. Le système de

refroidissement passif à courant descendant PDEC peut être une solution adéquate à adapter dans les régions du Sud Algérien

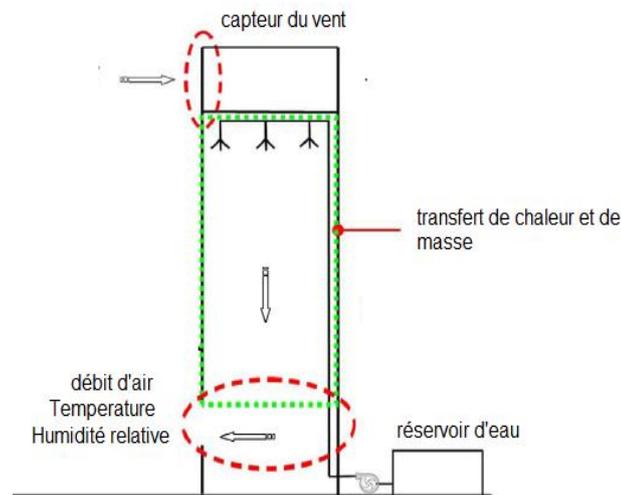


Figure 1.22: Système Pdec avec système de pulvérisation [84]

MAQSOOD BAJWA [85] à travers une étude expérimentale et aussi un vote PMV mené en Arabie Saoudite dont le but de vérifier l'efficacité énergétique du système de refroidissement par évaporation dans un bâtiment situé dans un climat aride de la province orientale de l'Arabie saoudite, le but de l'intégration du système est la réduction de la consommation et l'amélioration du confort interieur. la configuration utilisée a été déjà testée à l'aide d'un programme à Tuscon Arizona USA; La tour proposée est de 2.2m×2.2m d'une hauteur de 17.22m. Les résultats obtenus ont confirmé que même si la température extérieure dépasse 43°C mais la température de l'air à la sortie du système est de 26°C avec un écart de 16°C et concernant le taux d'humidité extérieure varie de 25% à 40% alors qu'à la sortie du système peut atteindre 70%.

Yasmina Bouchahm [86] a fait une étude expérimentale afin d'évaluer la performance thermique d'un logement bioclimatique en utilisant une tour éolienne avec un système d'évaporation directe dans la région de Ouargla au

Sud algérien, les résultats obtenus ont prouvé l'efficacité de l'intégration d'un tel système dans le climat aride.

1.4.5 Adaptation du système de refroidissement passif à courant descendant PDEC dans le bâtiment :

Malgré que le système soit adapté aux bâtiments durant les années 80 [87] Les applications PDEC ont rarement été intégrées au bâtiment même si certaines ont atteint des économies d'énergie [84], des efforts et des recherches ont été entreprises afin de surmonter les déficiences du système, parmi les recherches effectuées pour comprendre les principes fondamentaux du processus de refroidissement par évaporation en aval pour qu'il soit une solution pour améliorer la durabilité du bâtiment, Daeho Kang, Richard K. Strand [84] ont fait une étude à l'aide du logiciel Fluent afin d'étudier les caractéristiques de la distribution de l'air dans la zone effective de la tour, les résultats ont été valides après comparaison avec ceux expérimentaux du Professeur Ford à l'Université De Nottingham, UK [88], une étude paramétrique a été faite sur deux configurations sous les conditions d'un climat chaud et sec et un climat chaud et humide dont les taux d'humidités proposés sont respectivement estimés à 20% et 40%, Les résultats obtenus ont montré que Les tours PDEC équipées de systèmes de pulvérisation puissent ne pas convenir aux climats humides. Il est apparu que le taux d'humidité du climat chaud est humide (HR= 40 %) a retardé l'évaporation par courant descendant alors qu'il était atteint au sommet pour le taux d'humidité du climat chaud et sec (HR= 20%). Une baisse de température plus faible dans une condition humide a été obtenue, et les taux d'humidité de l'air à la sortie des PDEC étaient saturés dans la plupart des cas humides. En outre, une tour PDEC avec un système de pulvérisation qui est un des systèmes de refroidissement par évaporation directe dépend fortement du climat local.

Une autre étude menée par Daeho Kang, Richard K. Strand [89], a eu pour objectif d'examiner l'impact des différents paramètres qui peuvent affecter la performance du système PDEC, entre autre la hauteur de la tour, le débit massique de l'air entrant qui varie selon la surface du capteur de vent, la section transversale de la tour et la taille des gouttelettes, une analyse

Paramétrique a été faite en utilisant le modèle fluent et qui a été valide par rapport aux données expérimentales, une analyse statique a été utilisée pour formuler des modèles analytiques qui prennent en considération toutes les relations constatées lors de cette étude entre les différents paramètres, ce qui n'a pas été pris en considération par les études faites auparavant par [87,90] et qui dépendent de la dépression de bulbe humide.

L'étude a été faite sous six climats différents, une étude paramétrique a été faite en proposant plusieurs scénarios : hauteur(de 3 à 14m), configuration de tour (petite ,moyenne et grande tour), taille de gouttelettes d'eau (20um à 500um), vitesse du vent (0.5m/s à 8m/s) et le débit d'eau injecté (5L/h à 200L/h). Cette étude a permis d'examiner l'importance des différents paramètres qui peuvent affecter la performance du système. L'efficacité du système dans un milieu aride est sec a été prouvé par les recherches précédentes et peut être une solution adéquate à adapter dans les régions arides du Sud Algérien.

1.5 Conclusion

L'étude bibliographique nous a permis de tirer les recommandations nécessaires pour notre étude, nous proposons en premier lieu l'évaluation thermique de l'habitat traditionnelle de la région d'In Saleh ,en second lieu l'amélioration de la typologie moderne et la création d'un modèle adaptatif au contexte climatique aride et en dernier l'adaptation du système de rafraichissement à courant descendant (Pdec) aux conditions climatiques de la région étudiée ,le prochain chapitre sera consacré à la présentation des différents cas d'étude.

CHAPITRE 2

2 INVESTIGATION EXPERIMENTALE

2.1 Introduction :

Notre choix du périmètre d'étude a porté sur la région d'In Saleh qui est considérée comme la région la plus chaude en Algérie, dont le climat est une contrainte à toute étude visant l'amélioration de l'efficacité énergétique du logement. Nous avons étudié plusieurs cas entre typologie traditionnelle et moderne, et qui sont présentées dans ce chapitre.

2.2 Présentation de la région étudiée :

La région d'In Saleh, considérée comme la capitale des Oasis Sahariennes « Tidikelt » Louis OINOT [91], Cette région est située dans le centre du Sahara à 1062 km de la capitale Alger, à 400km au Sud-Est de la wilaya d'Adrar, à 700 Km de la région de M'Zab à et à 650km de la wilaya de Tamanrasset (**voir Figure 2.1**), elle s'étend sur une superficie envrante de 46.000 km² [92]. Elle est située à 268m d'altitude avec une longitude de 2.50° E et une latitude de 27.32°N [15].

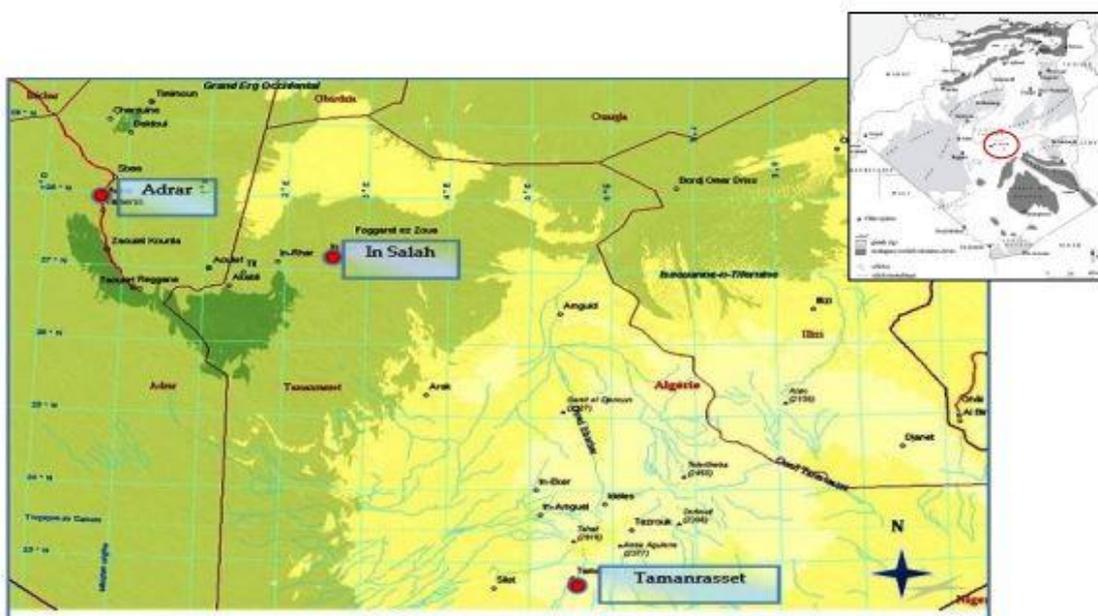


Figure 2.1: Situation de la région d'In Saleh [93]

2.2.1 Données Climatiques de la région d'In Saleh :

Selon la classification thermique d'hiver des communes d'Algérie, la région est classée dans la zone **D**, avec une température de base égale à 4°C, et selon celle de l'été est classée dans la zone **E** avec une température sèche de base égale à 44°C et un taux d'humidité égale à 10.6% [15].

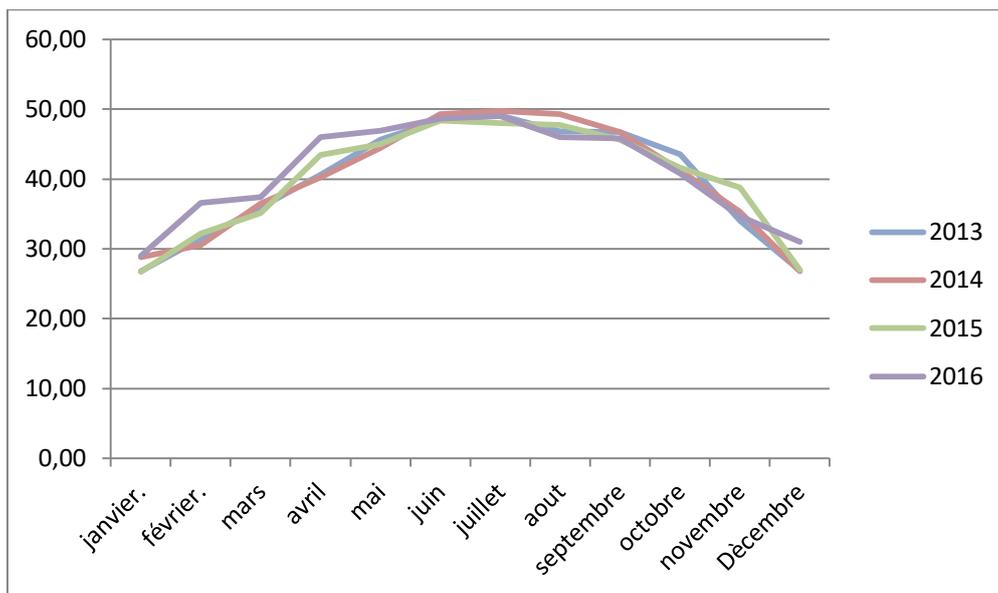


Figure 2.2: Evolution des températures maximales [94]

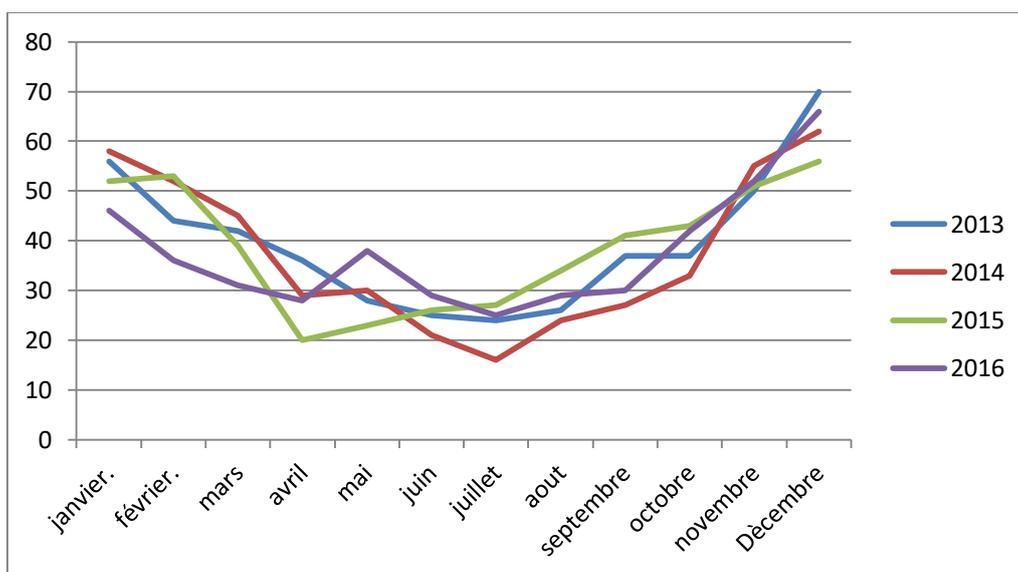


Figure 2.3: Evolution des taux d'humidité relative. [94]

Les Figures 2.2 ,2.3 et 2.4 montrent respectivement l'évolution des températures maximales, les taux d'humidité relative maximale et les précipitations durant la période 2013-2016. Les températures maximales et ont été enregistrées durant les mois de juin, juillet et Aout et qui peuvent atteindre 49°C. Les taux d'humidité les plus faibles ont été enregistrés durant les mois de juin, juillet et Aout et qui peuvent baisser jusqu'à 18%. Quant aux précipitations elles sont irrégulières.

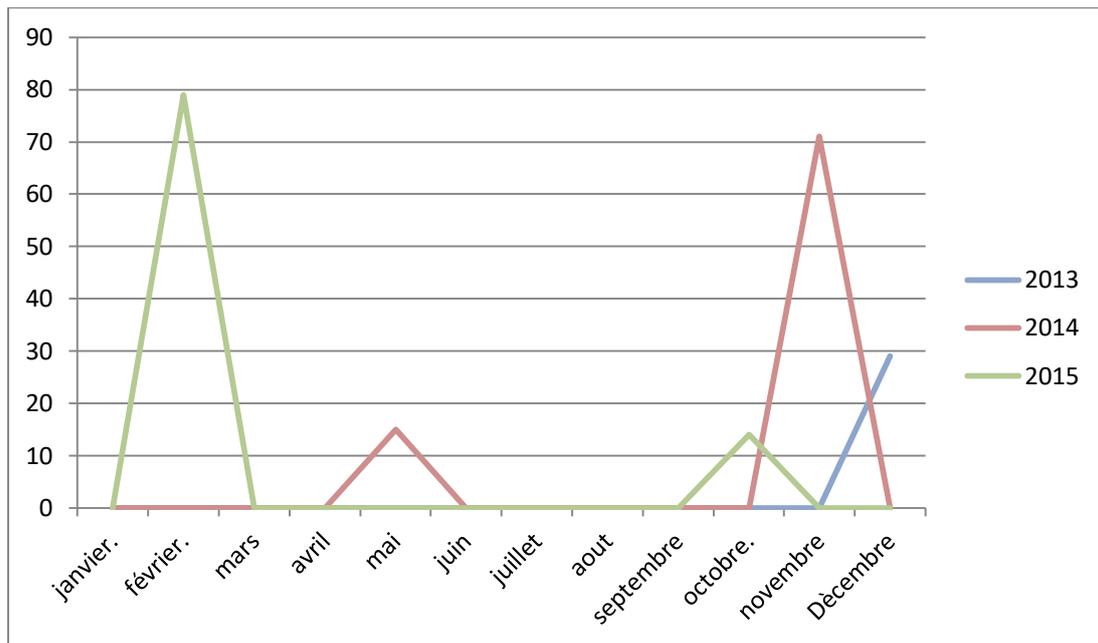


Figure 2.4:Précipitations Mensuelles [94]

2.2.2 Critères du choix du périmètre d'intervention:

Notre choix a porté sur cette région pour les critères suivants :

*la Contrainte climatique, car la région est connue par l'aridité de son climat avec des températures qui peuvent atteindre 49°C.

* Augmentation de la consommation énergétique dans cette région pendant la période estivale. Selon le zonage établis par Semmahi et al [12], la région est classée dans une zone ayant un inconfort estival de 5600h à 6300h (**voir Figure 2.5**) avec une consommation qui varie de 120 à 141kwh/m² (**voir Figure 2.6**)

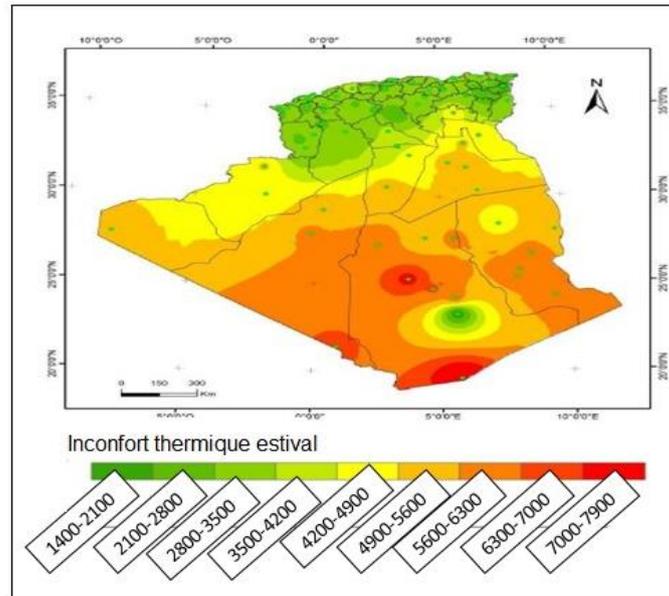


Figure 2.5: Taux d'inconfort thermique estival en Algérie [12]

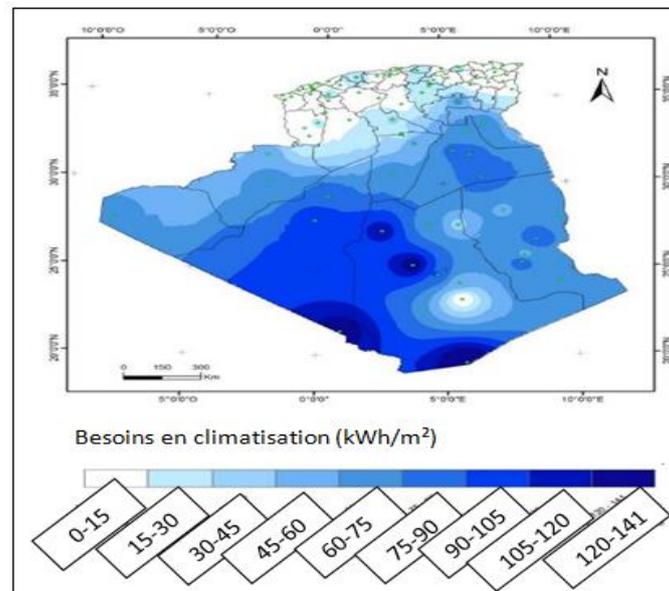


Figure 2.6: Taux d'inconfort thermique estival en Algérie [12]

2.3 Présentation des différents cas d'étude :

Lors de cette étude nous avons étudié différents type d'habitations de la région d'In Saleh (voir **Figure 2.7**), deux maisons traditionnelles (cas d'étude 01 et 02), une maison moderne ayant subi des modifications afin d'améliorer sa performance énergétique (cas d'étude 03), et une maison moderne représentative du logement contemporain adapté dans la région d'In Saleh (cas d'étude 04).

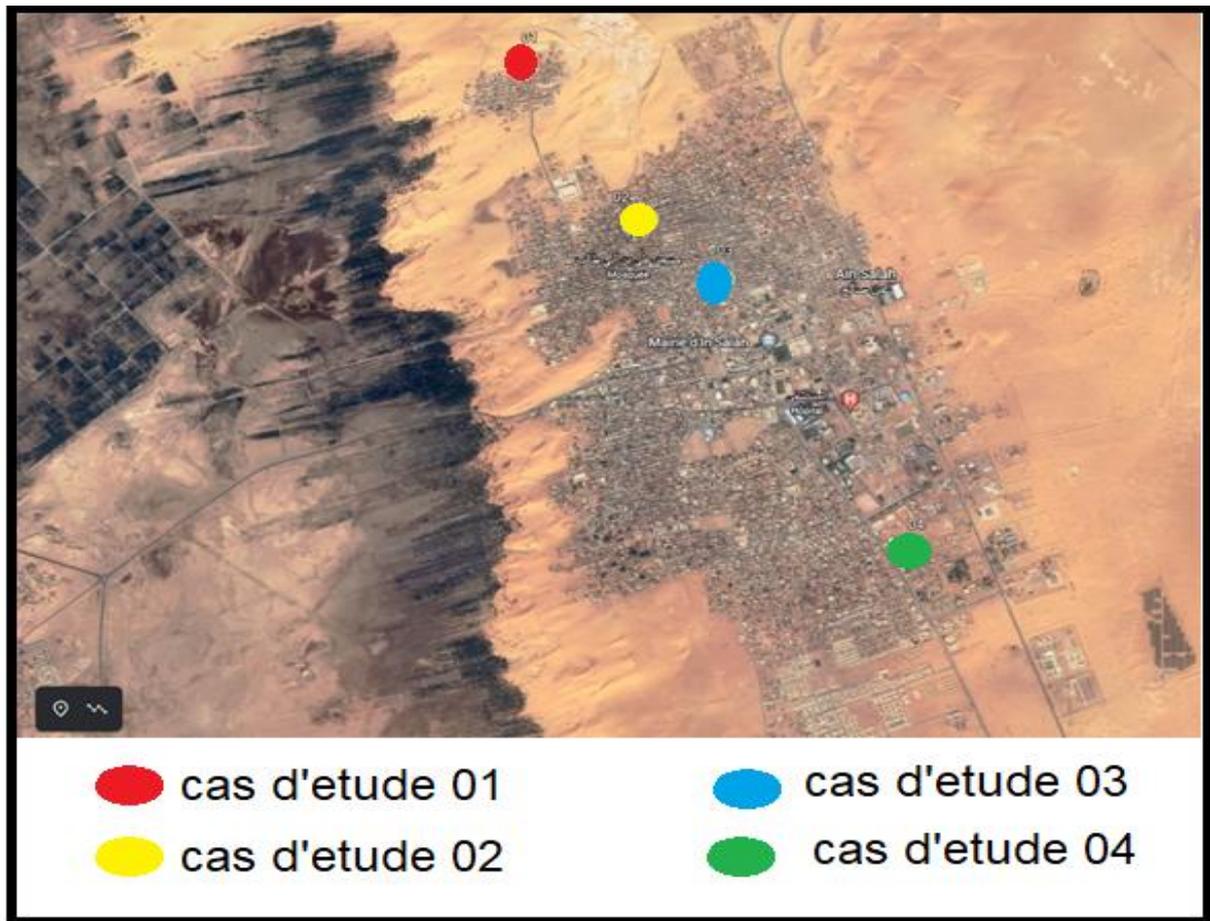


Figure 2.7: Plan de situation des différents cas étudiés [auteur]

2.3.1 Présentation du cas d'étude n°01:

L'habitat traditionnel en Algérie se présente comme une source indispensable pour l'étude de l'adaptation climatique du bâtiment, à cet effet en premier lieu nous avons étudié deux maisons traditionnelles de la région d'In Saleh (cas d'étude 01 et 02) dont le but est l'évaluation de l'impact des solutions passives intégrées sur leurs comportements thermiques ainsi que leurs performances énergétiques.

Le premier cas d'étude (cas 01) est une maison traditionnelle située dans l'ancien tissu de la région d'In Saleh (Voir **Figure 2.8**, qui se caractérise par sa forte compacité et ses rues étroites.



Figure 2.8: plan de situation du tissu traditionnel du cas d'étude 01 [auteur].



Figure 2.9: plan de masse du cas n°01 [auteur]

La maison étudiée est de type introverti et ne possède pas d'ouvertures sur l'extérieur sauf les deux accès à la maison (voir Figure 2.10, Figure 2.11). Elle est construite en brique d'adobe, d'une superficie habitable égale à 112.15m² et de volume habitable égale à 336.45m³, elle est constituée des différents espaces suivants :

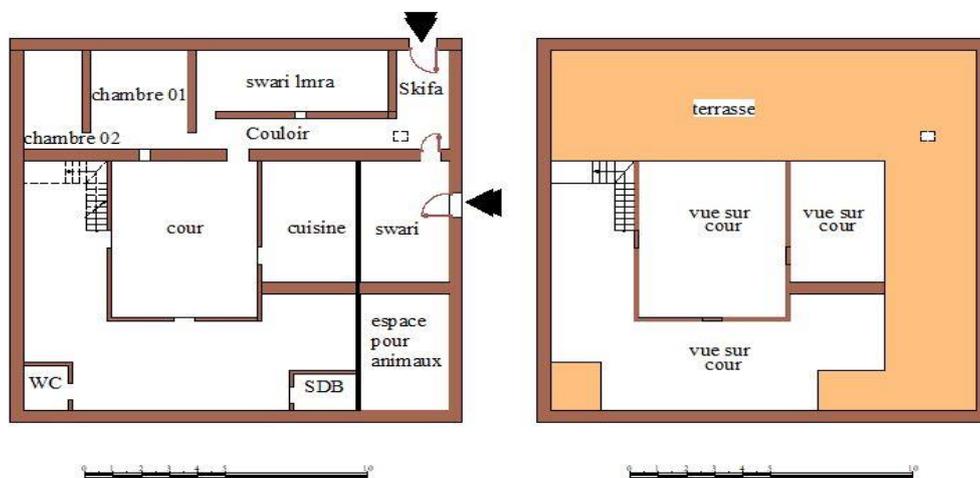


Figure 2.10: Plan cas d'étude n° :01 [auteur]

Skifa : espace intermédiaire entre l'extérieur et l'intérieur dont le but de préserver l'intimité de la maison. Cet espace possède une ouverture zénithale (voir Figure 2.12 (a)).

-Swari : espace réservé pour l'accueil des hommes, qui peut être accessible de l'extérieur ou à partir de l'espace Skifa. Seulement cet espace a eu des modifications de construction (remplacement de l'adobe par du parpaing dans la paroi orientée Est de cet espace).

-Swari Imra : espace réservé pour l'accueil des femmes, deux chambres : espace nuit de la maison.

Couloir : un espace de circulation qui joue le rôle d'espace tampon entre l'intérieur de la maison et le patio, Rahba : patio de la maison. Et un espace sanitaire.



(a)



(b)

Figure 2.11:(a) : Vue sur l'entrée principale,(b) :Façade Ouest [auteur]



(a)



(b)

Figure 2.12:Figure : (a) Vue sur l'ouverture zénithale de la skifa ,(b) Fissures dans l'espace Swari [auteur]

2.3.2 Présentation du cas d'étude n°02:

Notre choix a porté sur un autre échantillon du tissu traditionnel de la région d'In Saleh (**voir Figure 2.13**), le deuxième cas étudié diffère du premier cas par rapport à sa volumétrie (**voir Figure 2.15**), aux portes qui donnent directement sur l'espace Rahba (**voir Figure 2.14**). La maison est construite en brique d'adobe et n'a subi aucune modification. La superficie habitable égale à 160 m² et le volume habitable est égale à 480m³.

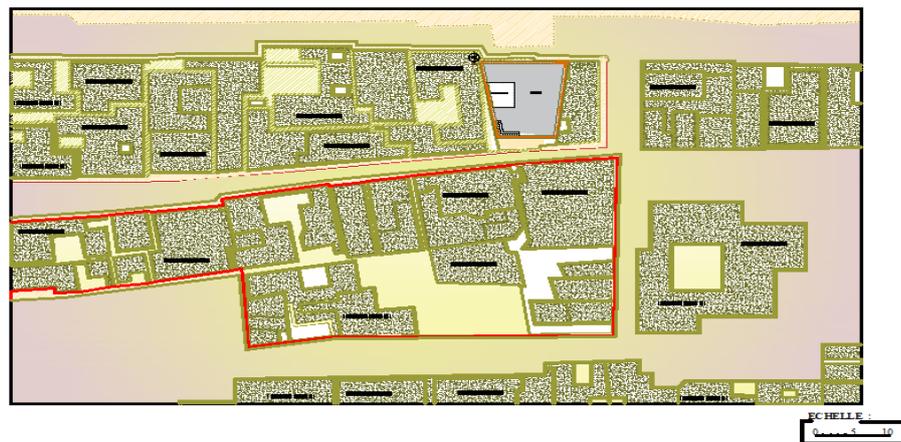


Figure 2.13: plan de masse cas 02 [auteur]

Le plan du cas n°02 est de type introverti (**voir Figure 2.13**), et se compose des espaces suivants : Skifet el bab, Swari, Swari Imra, cuisine(Asklo), mansseb(espace d'approvisionnement), espace sanitaire et espace pour animaux.

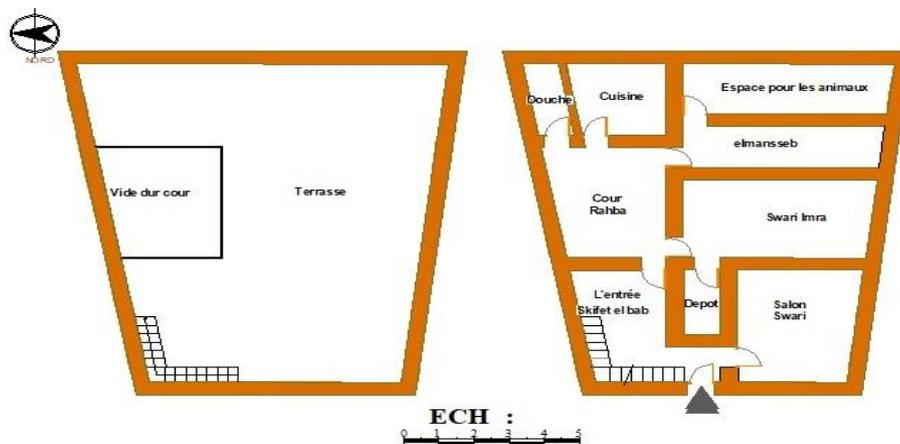
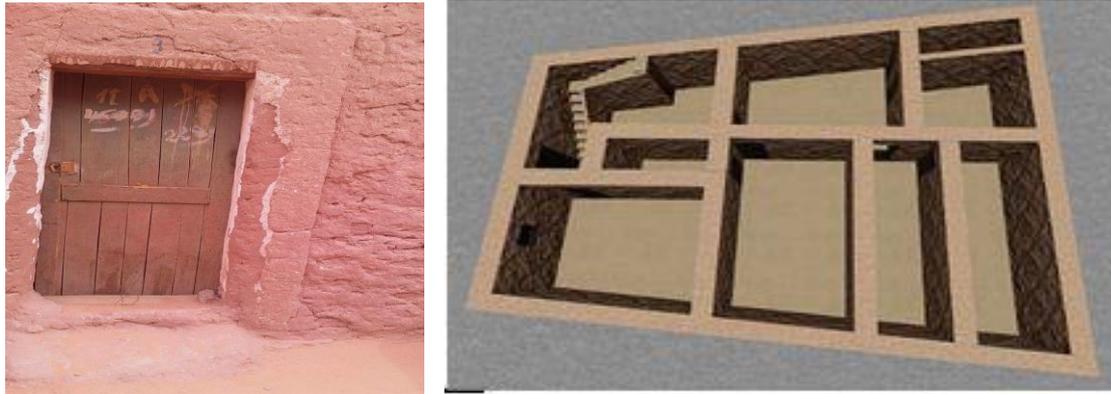


Figure 2.14: Plan du cas d'étude N°:02 [95].



(a)

(b)

Figure 2.15: Vue sur l'entrée du cas d'étude n° :02, (b) Volumétrie du cas n° :02 [95]

- **Concepts bioclimatiques intégrés dans les cas d'étude 01 et 02**

- ✓ **Implantation :**

Les cas d'étude choisis sont situés dans des tissus urbains compacts, dont les maisons sont accolées les unes aux autres afin de minimiser les apports solaires reçus et réduire les surfaces d'échanges avec l'extérieur.

- ✓ **Orientation :**

*Le cas d'étude 01 est orienté Nord –ouest et ne possède aucune fenêtre qui donne sur l'extérieur, l'ouverture de l'espace swari Imra donne sur le couloir et celle de la chambre donne directement sur l'espace Rahba et qui est orientée au Nord, Par contre les autres espaces ne possèdent pas d'ouvertures. La maison est mitoyenne aux maisons adjacentes de l'Est et du Sud.

*Le cas d'étude 02 est orienté Nord et de typologie introvertie dont les portes des différents espaces donnent sur Rahba (patio), La maison est mitoyenne aux maisons adjacentes du côté Nord et Sud

- ✓ **Compacité :**

La typologie compacte du tissu urbain s'intègre parfaitement avec l'environnement immédiat vu l'aridité de la région, par conséquent elle joue un rôle très important à minimiser les échanges thermiques avec l'extérieur.

✓ **Ventilation naturelle :**

*Les différentes pièces du cas d'étude 01 sont aérées et ventilées par l'ouverture zénithale de la skifa (**voir Figure 2.12**) ainsi qu'à travers la fenêtre et la porte de la Rahba et qui est orientée au Nord.

*Les différentes pièces du cas d'étude 02 sont aérées et ventilées par les portes qui donnent sur le patio ainsi que par l'ouverture de la cage d'escalier (ventilation par tirage thermique) et qui est située dans l'espace Skifa (**voir Figure 2.13**).

✓ **Matériaux de construction :**

Les deux cas étudiés sont construits avec des matériaux locaux (sauf le mur Est de l'espace Swari du cas d'étude 01(**Voir Figure**)).

*Murs massifs en brique d'adobe qui se caractérisent par leur forte inertie thermique.

* traitement des surfaces extérieures et intérieures avec du mortier de terre

*Toiture isolée avec différentes parties du bois de palmier (tronc de bois de palmier, grappe de bois de palmier et pétiole de bois de palmier).

2.3.3 Présentation du cas d'étude n°03

Notre choix a porté sur une maison de typologie moderne située au centre-ville de la région d'In Saleh (**Voir Figure 2.7 et 2.16**), dans laquelle ont été intégrés des procédés traditionnels comme l'intégration de la cour intérieure et la vocation des espaces traditionnels (**Voir Figure 2.17**).



Figure 2.16: Plan de situation du cas n°03[source auteur]

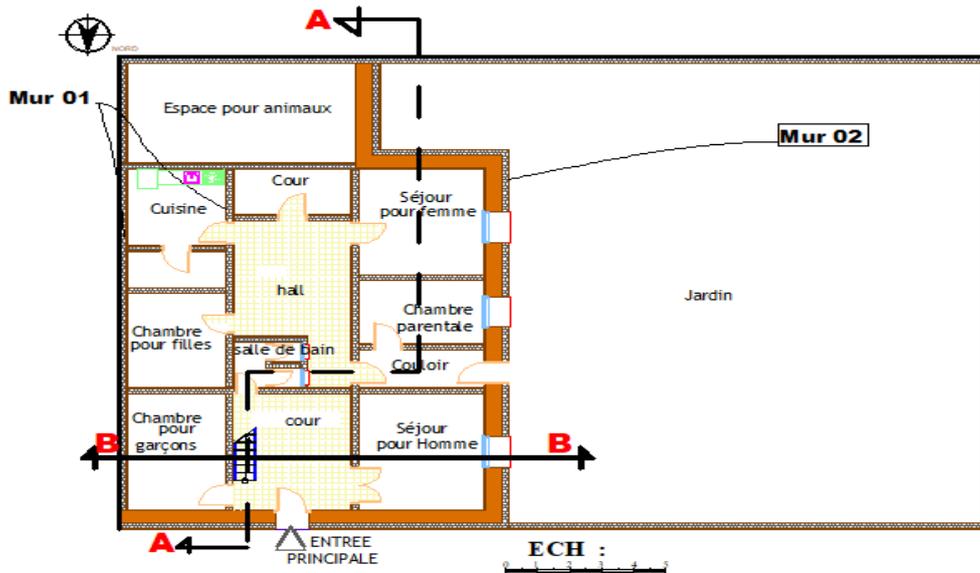


Figure 2.17:Plan du cas d'étude n° :03 [96]

La maison choisie comprend les espaces suivants :

Hall d'entrée : joue le rôle de l'espace skifa qui est un espace intermédiaire entre l'extérieur et l'intérieur (**Voir Figure 2.20**).

Séjour pour hommes : joue le rôle de l'espace Swari qui est un espace réservé pour hommes

Séjour femmes : joue le rôle de l'espace Swari Imra qui est un espace réservé pour femmes.

Espace nuit de la maison : Chambre des parents, chambre pour filles et chambre pour garçons

La cour intérieure et le hall central jouent le rôle de l'espace Rahba de la maison traditionnelle, Cuisine, espace sanitaire, un espace pour animaux et un jardin.

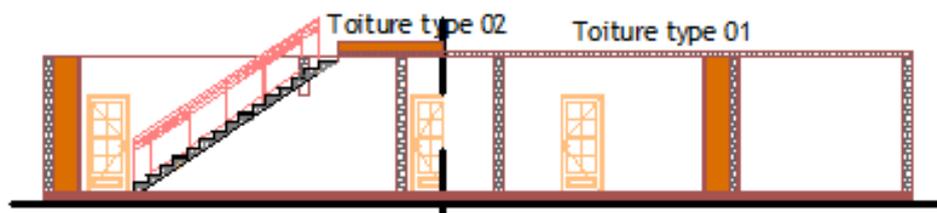


Figure 2.18:Coupe A-A

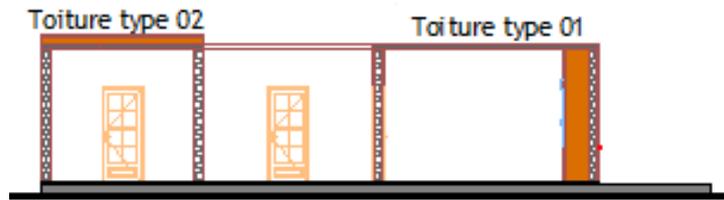


Figure 2.19: Coupe B-B

Ce modèle choisi représente une variété de composition des éléments constructifs, Cette variété nous a permis de faire une étude du comportement thermique des différents espaces selon leurs compositions. Des matériaux locaux ont été ajoutés dans les murs orientés Ouest et la toiture des espaces orientés Est (**Voir Figure 2.17, Figure 2.18 et Figure 2.19**). (Modifications entreprises par le propriétaire). la surface de la maison est de 180 m² et le volume habitable est égale à 540 m³.



Figure 2.20: Vue sur différents espaces du cas n°03[96].

2.3.4 Présentation du cas d'étude n° 04 :

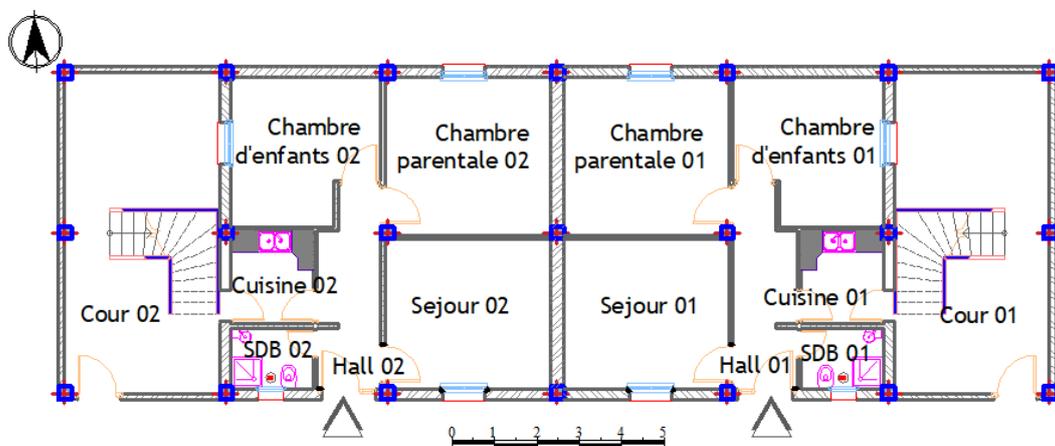


Figure 2.21: Plan d'assemblage du cas d'étude n°04[source auteur].

Le quatrième cas d'étude est une typologie moderne extravertie représentative du logement contemporain adapté dans la région d'In Saleh (**Voir Figures 2.21 et 2.22**). La typologie moderne adaptée dans la région d'In Saleh ne diffère pas de celle adaptée au Nord du pays.

Ce projet a été réalisé dans le cadre d'un programme de logement public locatif (100 logements sociaux) et qui est situé dans l'extrémité Sud de la région d'In Saleh (**Voir Figure 2.7**), le logement choisi est de Type F3 dont la surface habitable est de 60 m² et le volume habitable est de 180m³. Il comprend les espaces suivants : Séjour, chambre parentale, chambre d'enfants (**Voir Figure 2.23 et 2.24**). Les murs sont construits en parpaing et la toiture en hourdis, avec utilisation des portes en bois et des fenêtres avec simple vitrage.



Figure 2.22:Vue sur Façade Sud [Source auteur]



Figure 2.23:Vue sur la cour du cas d'étude n° :04[source auteur]



Figure 2.24: Vue sur différents espaces du cas d'étude n°04 [source auteur]

La plupart des maisons réalisées dans le cadre de ce projet ont subi des modifications par les propriétaires, pour notre étude nous avons pris le cas initial de ce cas d'étude.

2.4 Etude expérimentale effectuée sur le cas d'étude n°01 :

La partie investigation expérimentale a été faite seulement sur le cas d'étude N°01 durant la période de surchauffe de l'année, l'étude comprend deux parties la caractérisation des matériaux de construction ainsi que l'installation des compagnes de mesure.

2.4.1 Caractérisation des matériaux de construction :

Les expériences ont été faites au sein du centre de recherche CNERIB (centre national de recherches intégrées aux bâtiments), dont le but de déterminer les caractéristiques thermo-physiques de la brique d'adobe ainsi que la terre sèche extraite de la maison étudiée, ces caractéristiques seront utilisées dans la simulation thermique dynamique.

Le découpage et l'essai a été fait selon les normes exigées par l'instrument de mesure CT-METRE (Voir Figure 2.25) .son principe de fonctionnement repose sur la méthode fil chaud, qui est une méthode parmi les méthodes instationnaires qui permet de mesurer la conductivité thermique ainsi que la chaleur spécifique [97].



Figure 2.25: Découpage des échantillons

2.4.1.1 Présentation de l'instrument de mesure CT-METRE :

C'est un appareil de mesure rapide des caractéristiques thermiques, des matériaux homogènes et isotropes.



Figure 2.26: Instrument de mesure CT METRE[97]

Le CT METRE, 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, le béton cellulaire, le bitume, les liquides, les substances en poudre et les résines ou produits complexes (la précision des mesures effectuées à l'aide du CT-metre est de l'ordre de plus ou moins de 3%) :

Son principe de fonctionnement, consiste, grâce à l'association d'un élément chauffant et d'un capteur de température (tous deux associés dans la même sonde), à mesurer l'élévation de température subie par le capteur, au

cours d'une période de chauffage choisie par l'utilisateur en fonction du matériau à tester et du type de sonde utilisée

- **Constitution :**

Le CT METRE se compose de deux éléments (**Voir Figure 2.26**) :

- ✓ L'organe de commande, chargé de générer la puissance de chauffe et d'interpréter la courbe d'élévation de température induite dans le matériau à tester.

- ✓ La sonde chargée de transmettre la puissance de chauffe et de recueillir la température induite.

Type de sondes utilisées :

- ✓ La sonde anneau

Circuit imprimé souple (épaisseur 0,2 mm – dimension 60x90 mm), destiné à s'insérer entre deux morceaux plan de l'échantillon à mesurer (dont les surfaces ont été préalablement rectifiées).

Type Ø 30.R : diamètre de l'élément chauffant = 30 mm

Type Ø 15.R : diamètre de l'élément chauffant = 15 mm

Ce type de sonde, permet de réaliser les mesures suivantes :

- Conductivité thermique (W/m.K)
- Chaleur spécifique (KJ/m³K)

- ✓ La sonde fil (ou mono tige)

Circuit imprimé souple (épaisseur 0,2 mm), destiné à s'insérer entre deux morceaux, plans de l'échantillon à mesurer (dont les surfaces ont été préalablement rectifiées).

Type Std : dimension 160 x 45 mm

Type FIL 50/A : dimension 95 x 40 mm

Ce type de sonde permet de réaliser la mesure suivante :

- Conductivité thermique (W/m.K).

Pour plus de précision nous avons effectué les mesures sur deux échantillons en utilisant la sonde anneau (Voir Figure 2.27).les résultats obtenus sont indiquées dans le **Tableau 2.1** :



Figure 2.27: Mesures effectuées à l'aide du CT-metre

Tableau 2-1: Résultats obtenus de conductivité thermique et chaleur spécifique :

Essai	λ (W/m.K)	Cp(KJ /Kg .K)	Essai	λ (W/m.K)	Cp (KJ /Kg .K)
Brique d'adobe			Terre sèche		
1	1.078	2068.6	1	0.268	1025.5
2	1.09	1911.6	2	0.265	1027

2.4.2 Installation des campagnes de mesure :

Afin d'évaluer le confort thermique de notre cas d'étude, nous avons installé des campagnes de mesure durant la période de surchauffe de l'année 2018 du 04/08/2018 au 09/08/2018, les mesures ont été effectuées dans les différentes pièces, afin de vérifier l'impact des différents concepts bioclimatiques intégrés dans la maison traditionnelle (cas d'étude 01) de la région d'In Saleh.

- **Instruments et Méthodes :**

Des campagnes de mesure ont été installées afin de mesurer la température de l'air à l'intérieur et à l'extérieur de la maison, mesurer les

températures de surface des éléments constructifs ainsi que le taux d'humidité relative.

- **Mesures de Températures de l'air :**

Pour mesurer les températures de l'air dans les différents espaces de la maison, ainsi qu'à l'extérieur, 7 thermocouples de type T étalonnés et de type K (l'incertitude sur la mesure des thermocouples est estimée à plus ou moins 0.1°C) étaient reliés à une centrale des données type FLUKE HYDRA série IES2 (voir **Figures 2.28 -2.31**). sur la mesure de tension est inférieure à 0.01% Les thermocouples ont été placés au milieu de chaque espace à une distance de 1.4 m du plancher bas [62], (voir **Figures 2.32, 2.33**). Pendant la nuit les fenêtres étaient ouvertes dont le but aussi de vérifier l'impact de la ventilation nocturne.

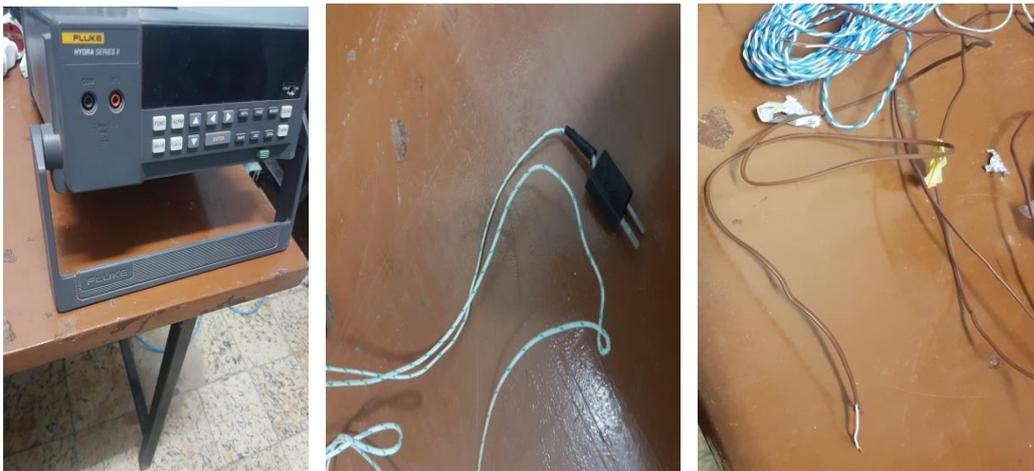


Figure 2.28: Instruments de mesure utilisés



Figure 2.29: Installation des compagnes de mesure



Figure 2.30: Localisation des appareils de mesure



Figure 2.31: Appareils installés dans l'espace Swari Imra



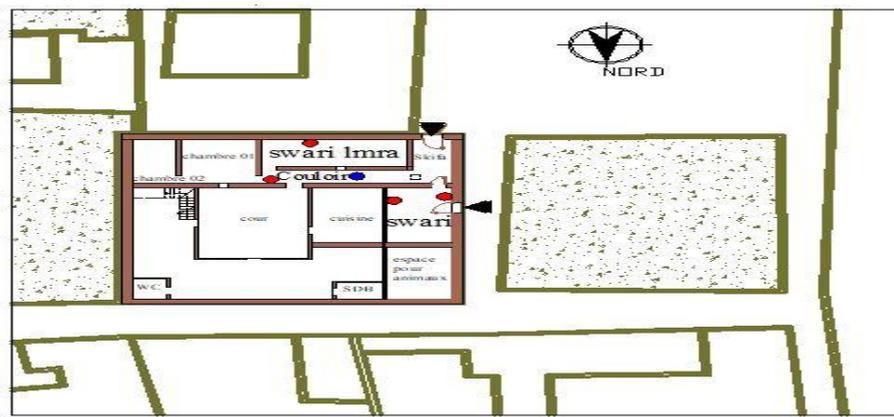
Figure 2.32: Mesures effectuées dans les différents espaces



Figure 2.33: Mesures effectuées dans l'espace Swari Imra et chambre 01

- **Mesure de Température de Surface :**

La Figure 2.34, présentée ci-dessous représente la localisation de la prise de mesure des éléments constructifs : mesures des différents murs ainsi que la toiture



(a)



(b)

Figure 2.34: Localisation de la prise des mesures des éléments constructifs. (a) en RDC, (b) sur la terrasse

✓ **Mesure de Température de la toiture**

Deux autres thermocouples ont été aussi reliés à cette acquisition et qui ont servi à mesurer la température de la face intérieure et extérieure de la toiture (**voir Figure 2.35**). Ces mesures ont été effectuées du 08/08/2018 à 14:00h jusqu'au 09/08/2018 à 14 :00h, ce qui nous a permis de collecter 24 échantillons.



Figure 2.35: Mesures de surface de la toiture

✓ **Mesure des températures des Murs**

Afin de vérifier l'impact de l'orientation, du choix des matériaux de construction, et de la compacité sur l'évolution des températures des murs,

nous avons effectué les mesures des surfaces intérieures des parois, quatre thermocouples de type K ont été placés sur les surfaces intérieures des murs suivants (**voir Figure 2.36**) :

- Mur Est de l'espace Swari(construit en parpaing)
- Mur Nord de l'espace couloir (construit en adobe).
- Mur Sud de l'espace Swari Imra (construit en adobe).
- Mur ouest de l'espace swari (construit en adobe).



Figure 2.36: Mesures des différents Murs

Les mesures ont été faites à l'aide du Thermomètre Beta 1760/2TM N° :04195544 à commande manuelle (voir Figure 2.37) dont la précision est de l'ordre de 0.5%, les mesures ont été effectuées du 07/08/2018 à 10:00h jusqu'au 08/08/2018 à 21:00h et ce qui nous a permis de collecter 37 échantillons.

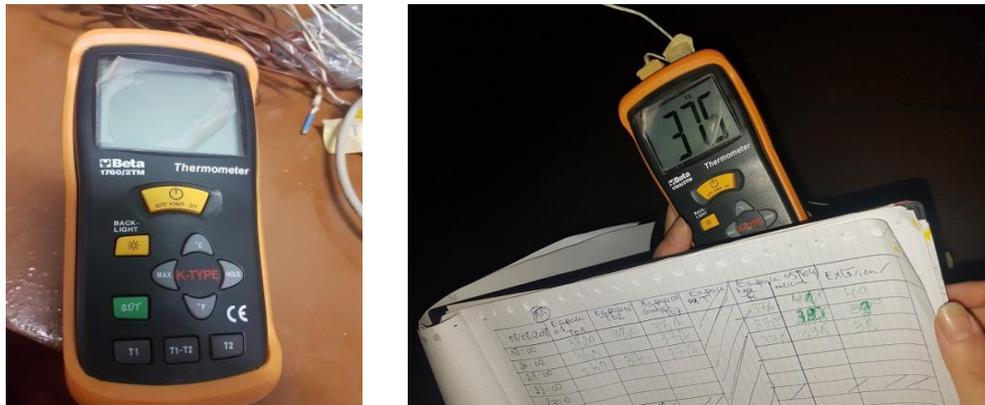


Figure 2.37: Instrument de mesure des températures de surface des murs

- **Mesure du Taux d'humidité :**

Le taux d'humidité a été mesuré à l'intérieur et l'extérieur de la maison étudiée à l'aide de l'Anémomètre à commande manuelle marque AMPROBE TMA40-A et qui permet de mesurer la température de l'air, le taux d'humidité et la vitesse de l'air (voir Figure 2.38) dont la précision est de l'ordre de plus ou moins de 3% pour les mesures du taux d'humidité relative. Les mesures ont été effectuées du 04/08/2018 à 14 :00h jusqu'au 06/08/2018 à 17:00h et ce qui nous a permis de collecter 52 échantillons.



Figure 2.38: Instrument utilisé pour mesure du taux d'humidité

Les données ont été collectées à des intervalles d'une heure, et ont été transférées et analysées sur ordinateur

2.5 Résultats et discussion de l'étude expérimentale :

- Evolution des températures dans les différents espaces :

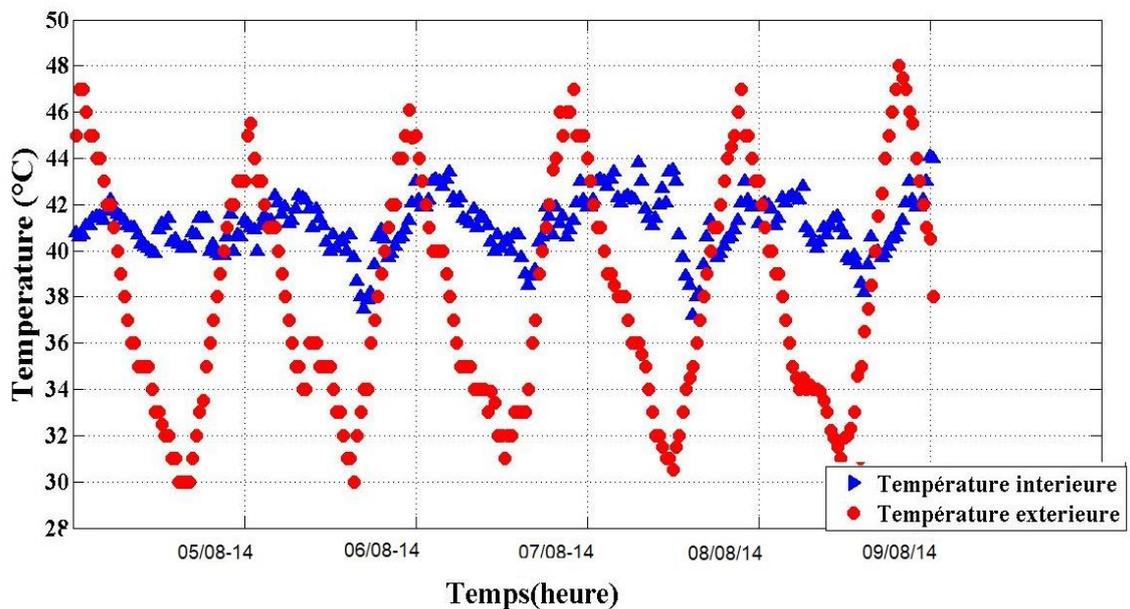


Figure 2.39: Evolution des temperatures dans l'espace Skifet el bab

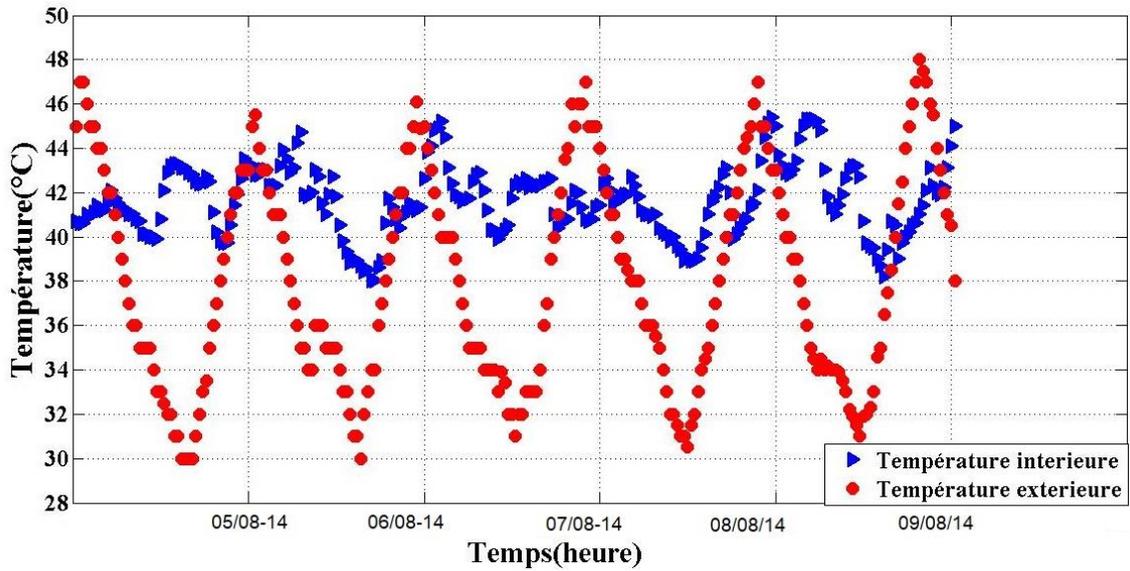


Figure 2.40: Évolution des températures dans l'espace Swari

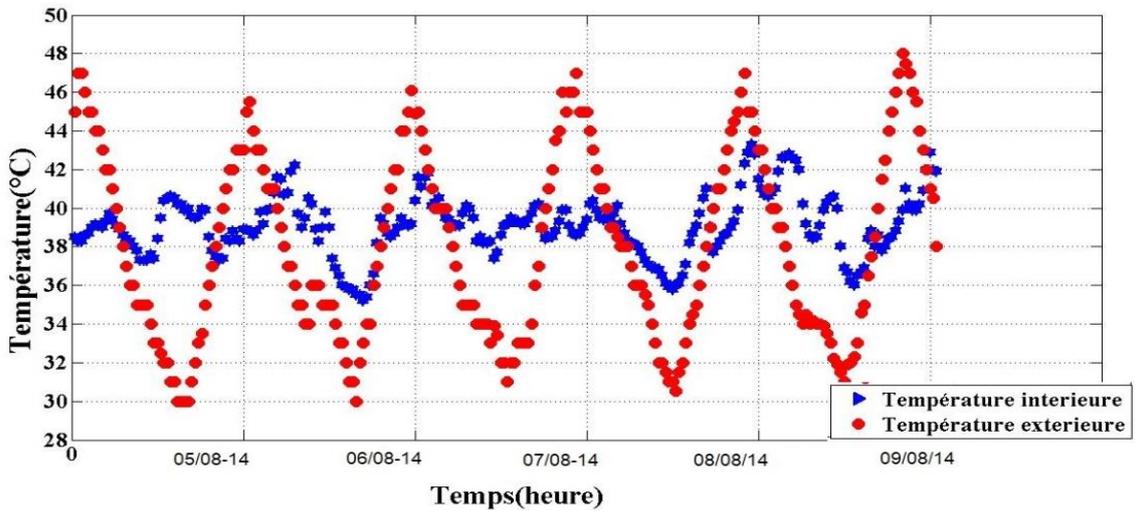


Figure 2.41: Evolution des températures dans l'espace Swari Imra

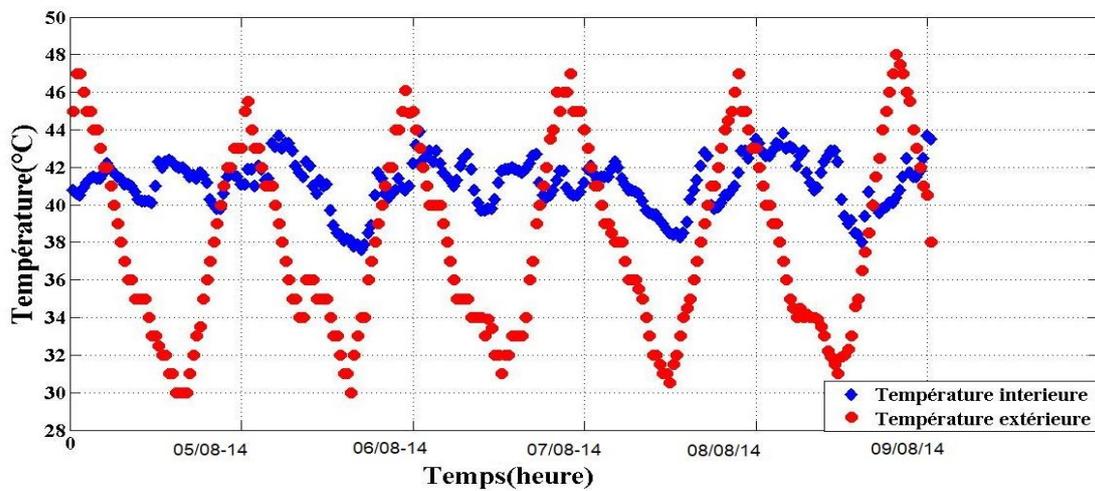


Figure 2.42: Evolution des températures dans l'espace Chambre 01

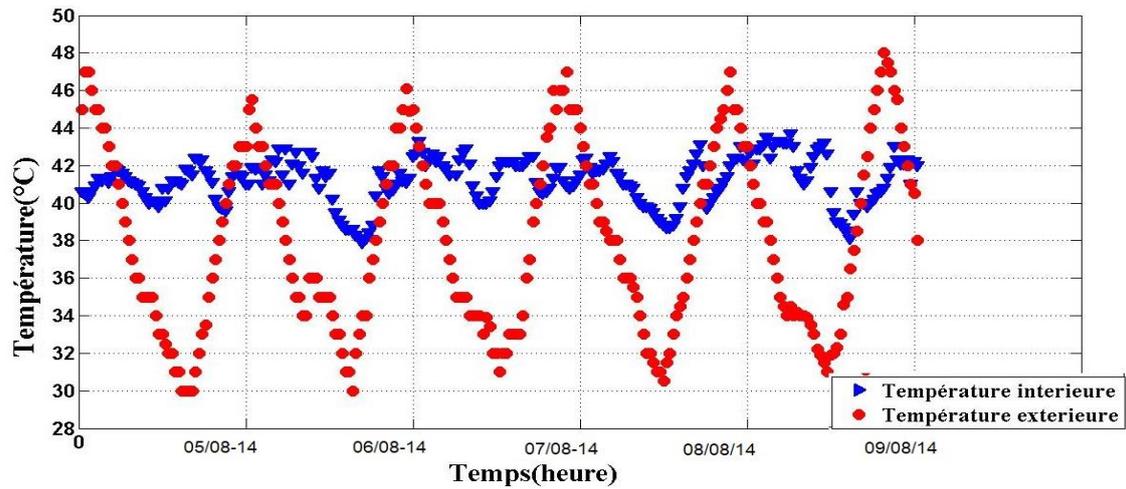


Figure 2.43: Evolution des températures dans l'espace Chambre 02

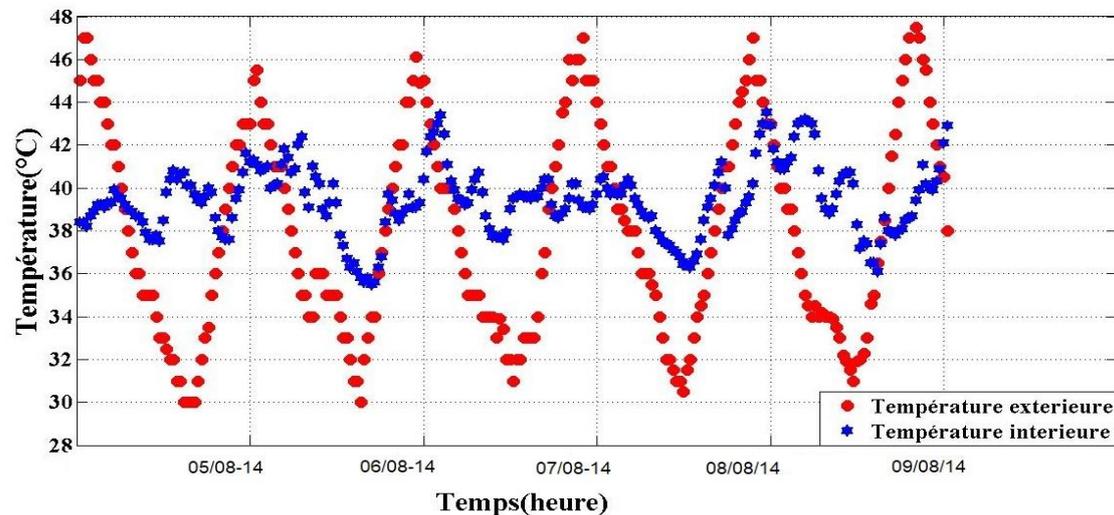


Figure 2.44: Evolution des températures dans l'espace Couloir

2.5.1 Interprétation des résultats obtenus :

- Evolution des températures dans les différents espaces :

D'après les résultats obtenus, nous avons constaté que les températures extérieures varient de 30°C à 48°C, le gradient de température diurne et nocturne est égale à 18°C (voir Figure 2.39-2.44), mais à l'intérieur les températures sont inférieures à celles de l'extérieur, le pic de température à l'intérieur des espaces est à 1 heure de temps après celui des températures extérieures. Les résultats ont montré que la variation de température diffère selon les caractéristiques conceptuelles de chaque espace.

Dans l'espace Swari, nous avons constaté des fluctuations de températures plus importantes par rapport aux autres espaces, des températures qui peuvent atteindre 45°C(voir **Figure 2.40**), et ça est dû à la faible compacité de cet espace , ainsi que le changement de matériaux de construction de la paroi orientée Est (remplacement de la brique d'adobe par du parpaing)(voir **Figure 2.10,2.30 et 2.33**).Malgré ce changement l'écart diurne de température varie de 2°C à 4°C dû à la bonne isolation de la toiture et l'utilisation de la brique d'adobe dans les autres éléments constructifs de cet espace. Nous avons remarqué aussi que les températures baissent jusqu'à 38°C pendant la nuit dû à la ventilation nocturne.

Les résultats expérimentaux obtenus ont montré aussi que la ventilation nocturne permet d'évacuer la chaleur emmagasinée par les éléments constructifs qui sont caractérisés par leur forte inertie thermique. Dans les espaces Skifa et couloir les températures baissent respectivement jusqu'à 38 °C et 36°C(voir **Figures 2.39,2.44**) la ventilation nocturne dans ces deux espaces est assurée grâce à une ouverture zénithale dans l'espace Skifa (voir **Figure 2.12 (a)**), cette ouverture dans la toiture permet d'accélérer la ventilation naturelle durant la nuit et d'évacuer l'air chaud. Mais pendant la journée les températures peuvent atteindre 42°C cet espace, l'écart diurne est estimé de 5°C à 6°C.

les températures dans l'espace couloir varient de 40°C à 42C° durant la journée avec un écart diurne qui peut atteindre 6 °C à 8°C (**Voir Figure 2.44**). L'espace couloir est orienté au Nord et joue le rôle d'espace tampon, étant un espace intermédiaire entre le patio et l'espace swari Imra ce qui a permis aussi de stabiliser les températures dans ce dernier, les températures peuvent atteindre 42°C, l'écart diurne est estimé de 6 °C à 8°C dû à l'utilisation des matériaux à forte inertie thermique et la forte compacité de cet espace et qu'il ne possède pas de surfaces d'échange avec l'extérieur, malgré qu'il soit orienté au Sud. Les températures peuvent baisser jusqu'à 38°C durant la nuit (voir **Figure 2.41**).

Dans les espaces chambre 01 chambre 02, nous avons constaté que la variation des températures est presque similaire, car ces deux espaces ont la même orientation et la même composition des éléments constructifs, ces deux

espaces ont une relation directe à travers une ouverture. Ce qui permet que la chambre 02 ait une ventilation intérieure à partir de la chambre 01. Les températures dans ces deux espaces varient entre 40°C et 43°C pendant la journée, l'écart diurne est estimé à de 4°C à 8°C (voir **Figures 2.42 ,2.43**) et pendant la nuit Les températures baissent jusqu'à 38°C grâce à la ventilation nocturne.

A travers les résultats expérimentaux obtenus, nous avons constaté que la variation des températures dépend de la surface d'échange avec l'extérieur, de l'orientation et de la typologie de la maison et aussi des matériaux de construction utilisés. Nous avons aussi constaté que l'écart diurne dans les différents espaces peut atteindre 8°C.

- **Evaluation du comportement thermique des murs :**

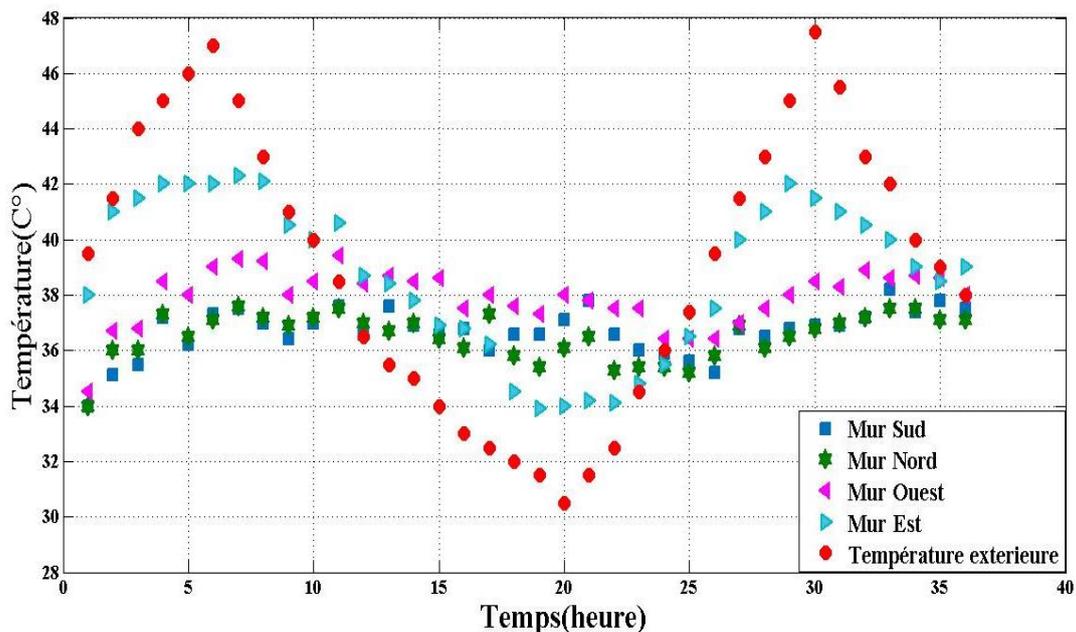


Figure 2.45: Evolution des températures des différents murs

Nous avons effectué les mesures des températures de surface des murs du 07/08/2018 à 10 :00h jusqu'au 08/08/2018 à 21 :00h, ce qui nous a permis de collecter 37 échantillons (voir **Figure 2.45**). Les résultats obtenus ont montré que les températures de surface de la paroi Est de l'espace Swari et qui est construite en parpaing suivent les fluctuations des températures extérieures (voir **Figure 2.33**).et ça est du à sa faible inertie thermique, et qu'elle donne

directement sur l'extérieur. Par contre le profil de température des autres parois est stable, dû à l'utilisation de paroi massives en brique d'adobe dans leurs construction et qui se caractérise par une forte inertie thermique, Nous avons aussi constaté que le comportement thermique de la paroi Sud est similaire à celui de la paroi Nord car le mur Sud n'a pas de surface d'échange avec l'extérieur et ne reçoit pas d'apports solaires.

- **Evaluation du comportement thermique de la toiture :**

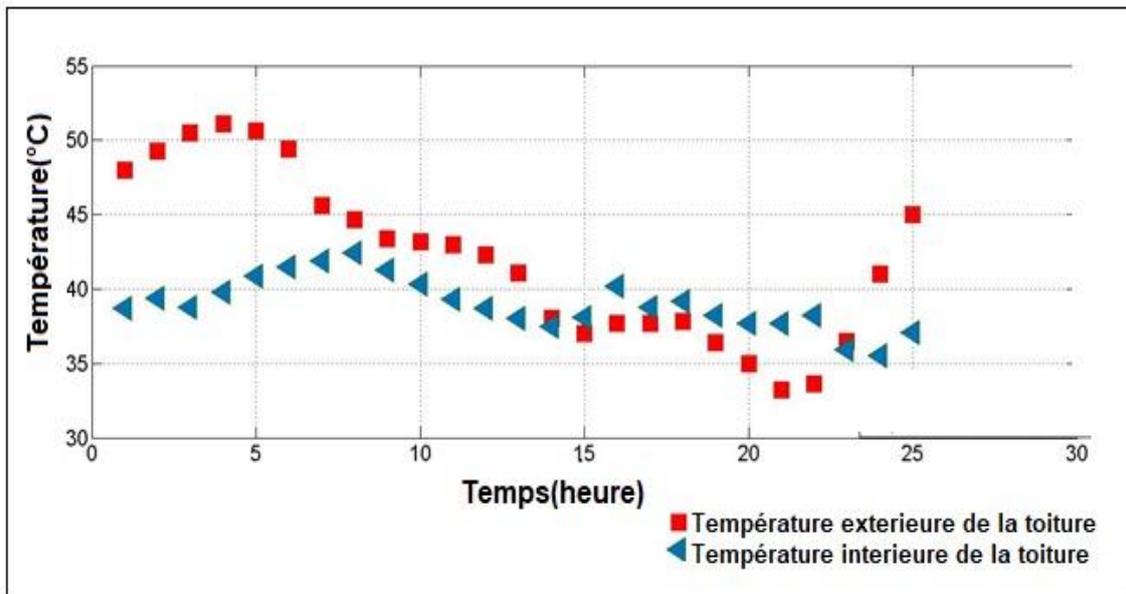


Figure 2.46: Evolution des températures de surface de la toiture

Les mesures des températures de surface de la toiture effectuées du 08/08/2018 à 12 :00h jusqu'au 09/08/2018 à 12 :00h nous ont permis de collecter 24 échantillons et qui sont montrées sur la **Figure 2.46** .Les résultats ont montré que la température de surface extérieure peut atteindre 51°C et baisser jusqu'à 33° alors que le profil de température intérieure est presque stable et ça est dû à l'intégration de l'isolation dans la toiture, et ce qui a permis de réduire les déperditions de chaleur à travers la toiture et minimiser les fluctuations des températures intérieures et d'atteindre un écart diurne de 12°C durant la période de surchauffe.

- Evolution du Taux d'humidité relative :

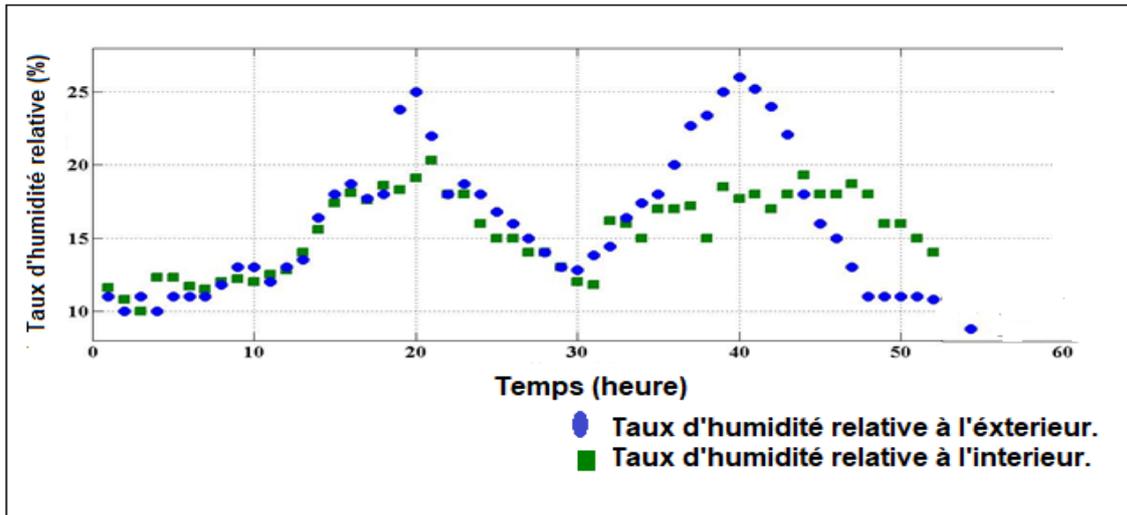


Figure 2.47: Evolution du taux d'humidité relative

Les mesures effectuées des taux d'humidité du 04/08/2018 à 14 :00h jusqu'au 06/08/2018 à 17:00h, nous ont permis de collecter 52 échantillons, les résultats obtenus ont montré que le taux d'humidité extérieur varie de 10% à 25% dû au climat aride de la région d'In Saleh et même à l'intérieur le taux d'humidité ne dépasse pas 20%(voir **Figure 2.47**),ce qui nécessite l'intégration d'un système de rafraîchissement par humidification.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre en premier lieu, nous avons présenté la région étudiée, ses caractéristiques climatiques, les différents cas d'étude. En second lieu,

Nous avons présenté l'investigation expérimentale effectuée sur le cas d'étude n°01, la méthodologie adaptée ainsi que les résultats obtenus.

Selon les résultats expérimentaux obtenus, les solutions passives intégrées dans la maison traditionnelle ont permis d'atteindre un écart de 8°C et que la toiture isolée a permis d'atteindre un écart de 12°C durant la période chaude ,mais toutes ces solutions n'ont pas suffi pour atteindre les normes de confort recommandées. Car Selon Ashrae 55 standard [67] la température de confort doit varier de 25.1°C à 32.1°C durant la période estivale et selon DTR

C 3.2/4 [15] les températures et le taux d'humidité doivent respectivement être égal à 24°C et 45% dans le cas du confort amélioré et à 27°C et 50% dans le cas du confort normal.

Dans le but d'étudier le comportement thermique à long terme du cas étudié et les autres cas d'étude, nous avons opté pour la simulation thermique dynamique à l'aide du logiciel pleaidés-comfie, et qui sera présentée dans le prochain chapitre.

CHAPITRE 03

3 MODELISATION ET SIMULATION THERMIQUE DYNAMIQUE

3.1 Introduction :

Afin d'étudier le comportement thermique des différents cas présentés dans le chapitre précédent, nous avons opté pour la simulation thermique dynamique à l'aide du logiciel pleaidés-Comfie. Le logiciel sert à calculer les flux thermiques avec prise en considération des conditions climatiques de la région étudiée. Il permet de découper le volume habitable en plusieurs volumes thermiques, d'étudier leurs comportements et de déterminer les besoins en chauffage et rafraîchissement durant toute l'année.

3.2 La modélisation thermique dynamique

Le bâtiment étudié peut être modélisé par une ou plusieurs zones thermiques, chaque zone étant considérée à température homogène. Une zone est délimitée par un certain nombre de parois, qui sont elles-mêmes découpées en mailles. Une zone peut regrouper plusieurs pièces, dans ce cas les parois séparant deux pièces d'une même zone seront appelées « parois internes ». Une maille correspond au volume d'air contenu dans la zone et aux parois internes légères (c'est à dire par convention de capacité thermique surfacique inférieure à 7 Wh/K/m^2), supposées être à la même température que l'air.

La simulation thermique consiste à étudier l'évolution des températures et des besoins énergétiques du bâtiment sur une certaine période (par exemple une année) avec un certain pas de temps (par exemple heure par heure pour le calcul des besoins de chauffage). Un bilan thermique est effectué pour chaque maille de la manière suivante : l'énergie stockée durant le pas de temps, qui dépend de la capacité thermique de la maille, est égale à l'énergie reçue (par l'équipement de chauffage, le rayonnement solaire, les occupants...) moins l'énergie perdue (déperditions).

Dans un premier temps, un modèle thermique est créé pour chaque zone thermique. Ce modèle est ensuite réduit en considérant un nombre limité

d'équations, correspondant à différentes constantes de temps du système (chaque constante de temps correspond à l'inertie thermique de certains composants, par exemple un plancher lourd, des cloisons légères, des murs etc.). Les modèles réduits de chaque zone sont ensuite couplés : dans une cloison séparant deux zones, la température du côté d'une zone constitue une sortie de cette zone et une entrée de la zone adjacente. Cette étape conduit à un modèle global du bâtiment, permettant d'effectuer un calcul à chaque pas de temps. [98]

3.2.1 Modèle pour chaque zone thermique

Le modèle thermique du bâtiment est divisé en zones de températures homogènes. Pour chacune de ces zones, chaque mur est divisé en mailles suffisamment fines pour avoir une température homogène. Il existe en plus une maille pour la température de l'air et du mobilier de la zone. Un bilan thermique est appliqué sur chaque maille du bâtiment

$$C_{\text{maille}} \cdot T_{\text{maille}} = \text{Gains-pertes} \quad (2.1)$$

Avec

C_{maille} : la capacité thermique de la maille

T_{maille} : la température de la maille

Gains, pertes les transferts thermiques par conduction, rayonnement et convection mais aussi les gains internes et équipements.

Le bâtiment est décomposé en mailles sur lesquelles un bilan thermique est écrit en supposant la température uniforme. Pour que cette hypothèse d'uniformité ne s'écarte pas trop de la réalité, il faudrait en théorie découper chaque élément en mailles très fines. Or l'objectif est de réaliser un outil adapté à une utilisation professionnelle (en particulier en termes de temps de calcul), ce qui impose des limites sur la taille du modèle. Le compromis choisi consiste à placer le petit nombre de mailles auquel on est limité de telle sorte que l'uniformité de la température soit maximale.

La première idée est de ne pas regrouper dans une maille des couches de matériaux séparées par un isolant. Ensuite, le nombre de mailles doit être plus important dans les murs massifs que dans les cloisons légères. Enfin, on s'intéresse aux températures dans les différentes zones du bâtiment, et celles-

ci sont plus influencées par les faces internes des parois, elles-mêmes influencées par les variations de puissance de chauffe (équipement régulé, intermittence), que par les faces externes. La possibilité a alors été donnée, de définir des mailles plus fines à la surface interne d'une paroi. Une raison géométrique r relie l'épaisseur des mailles successives : si e est l'épaisseur de la maille la plus interne, sa voisine a pour épaisseur $r.e$, la suivante $r^2.e$, etc. Le cas $r=1$ correspondrait à des mailles d'épaisseurs égales. La valeur de r peut être modifiée (elle vaut 3 dans la version actuelle du logiciel, suite à diverses validations), comme celle du nombre n de mailles placées dans les murs massifs (3 également).

Dans le cas d'une paroi sans isolant, on place une maille unique dans une cloison légère (inertie $< 7 \text{ Wh/ (m}^2.\text{K)}$) et n mailles dans un mur massif. Dans le cas avec isolant, on procède de même pour la partie de la paroi située du côté intérieur à l'isolant. Pour la partie extérieure, on place systématiquement une maille unique, que la paroi soit légère ou lourde. Si il y a deux isolants, on place également une maille unique entre les deux isolants, que la portion de paroi correspondante soit massive ou non.

Etant définies en fonction de n et r , les mailles ne correspondent en général pas à des couches de matériaux. Les propriétés physiques des différents matériaux constituant une maille sont alors combinées : les inerties et les résistances thermiques sont additionnées.

Une paroi interne à une zone est divisée en mailles de manière analogue, avec une légère différence dans le cas sans isolant ou si les deux parties séparées par l'isolant sont toutes les deux légères ou toutes les deux massives. Dans ces cas, tous les matériaux de la paroi sont regroupés en un matériau unique équivalent, divisé en deux parties symétriques. Le plan central est considéré comme adiabatique. On place alors n mailles dans l'une des deux moitiés, avec une condition de flux nul au niveau du plan médian. Cela permet d'accroître la précision pour un nombre de mailles donné.

Il n'y a jamais de maille dans les isolants, car leur capacité thermique est considérée comme négligeable par rapport à celle des autres matériaux : elle est alors ajoutée à celles des mailles adjacentes (s'il y a une maille de chaque côté de l'isolant, la moitié de la capacité thermique de l'isolant est ajoutée de chaque côté).

On ne place pas non plus de maille dans un vitrage : la surface des vitres est grande comparée à leur volume, et on suppose que le régime permanent est atteint rapidement dans ces composants par rapport au pas de temps de la simulation. La résistance thermique variable liée à l'usage des occultations (stores, volets,..) est prise en compte au niveau de la simulation, en introduisant une puissance de chauffe équivalente à la diminution des déperditions.

L'air, le mobilier et les cloisons légères éventuelles contenues dans la zone sont regroupés dans une maille unique. En effet, on suppose que le volume des meubles est petit par rapport à leur surface d'échange, et qu'ils sont quasiment à la température de l'air. La stratification de l'air en température n'est pas considérée, ni les transferts d'énergie liés aux variations d'humidité et à la condensation/évaporation d'eau.

- **Maille correspondant au volume d'air**

$$C_{tot} \cdot \dot{T}_{zone} = P + \sum_{\text{parois_externes}} \left[\sum_{\text{vitrages}} UA_w + UA \right] \cdot (T_{ext} - T_{zone}) + \sum_{\text{parois}} \frac{A/A_{opaque}}{1 + 1/h_{int} \cdot \frac{1}{e_{im1}/k_{im1} + e/2k}} \cdot Q_{sol} + \sum_{\text{parois}} \frac{A}{1/h_{int} + e_{im1}/k_{im1} + e/2k} \cdot (T - T_{zone}) + (\Psi L + (1 - \varepsilon) \cdot \dot{m} \cdot c_{air}) \cdot (T_{ext} - T_{zone}) \quad (2.2)$$

La capacité thermique de l'air est considérée égale à 0,34 fois le volume de la zone. La capacité thermique surfacique des parois est obtenue en sommant les capacités thermiques surfaciques de chaque couche de matériau. La capacité thermique surfacique d'une couche de matériau est égale à $e \cdot \rho \cdot c$

La capacité thermique d'une paroi est égale à la somme des capacités thermiques surfaciques des couches de matériaux qui la constituent, multipliée par sa surface.

Les valeurs de k , ρ , c , ψ données dans les textes réglementaires peuvent être considérées.

Le coefficient U d'une paroi peut être obtenu de la manière suivante :

$$U = \frac{1}{1/h_{int} + \sum_{\text{couches}} e/k + 1/h_{ext}} \quad (2.3)$$

Le flux solaire net restant dans la zone est :

$$Q'_{sol} = \left[1 - (1 - \alpha_m) \cdot A_{transparent} / (A_{opaque} + A_{transparent}) \right] \cdot Q_{sol} \quad (2.4)$$

Où α_m est le facteur d'absorption moyen des surfaces opaques de la zone (moyenne pondérée par chaque surface, y compris les parois internes éventuelles), Q_{sol} est le rayonnement solaire entrant par les différents vitrages de la zone, calculé pour l'heure considérée en tenant compte des masques éventuels (masques lointains, masques intégrés, occultations amovibles). Le calcul des flux solaires est présenté plus loin.

- **Maille d'une paroi côté intérieur**

$$C \cdot \dot{T} = \frac{A}{1/h_{int} + e_{im1}/k_{im1} + e/2k} \cdot (T_{zone} - T) + \frac{A}{e/2k + e_{im2}/k_{im2} + e'/2k'} \cdot (T' - T) + \frac{A/A_{opaque}}{1 + h_{int} \cdot (e_{im1}/k_{im1} + e/2k)} \cdot Q'_{sol} \quad (2.5)$$

- **Maille intermédiaire**

$$C' \cdot \dot{T}' = \frac{A}{e/2k + e_{im2}/k_{im2} + e'/2k'} \cdot (T - T') + \frac{A}{e'/2k' + e_{im3}/k_{im3} + e''/2k''} \cdot (T'' - T') \quad (2.5)$$

- **Maille la plus extérieure d'une paroi externe**

L'absorption du rayonnement solaire incident par les parois opaques est calculée par un bilan thermique au niveau de la surface absorbante, en fonction du facteur d'absorption de cette surface. Le rayonnement incident absorbé est réparti entre une quantité pénétrant dans la maille la plus extérieure du mur et une quantité perdue vers l'ambiance extérieure (transferts radiatifs et convectifs).

Cette dernière quantité est beaucoup plus faible dans le cas où la paroi est revêtue d'une couche d'isolant transparent, car la plus grande résistance thermique est située à l'extérieur de la surface absorbante. La plus grande partie du rayonnement incident (réduit selon le taux de transmission à travers l'isolant) pénètre ainsi vers l'intérieur du mur.

$$C'' \cdot \dot{T}'' = \frac{A}{e'/2k' + e_{im3}/k_{im3} + e''/2k''} \cdot (T' - T'') + \frac{A}{1/h_{ext} + e_{im4}/k_{im4} + e''/2k''} \cdot (T_{ext} - T'') \quad (2.6)$$

3.3 Simulation thermique dynamique

Des simulations thermiques dynamiques ont été faites sur les différents cas étudiés, dont le but est d'étudier leurs comportements thermiques à long terme, de déterminer les besoins en chauffage et climatisation des différentes variantes étudiées et de comparer les résultats théoriques par rapport à ceux expérimentaux pour le cas n°01. [98]

3.3.1.1 Présentation du logiciel Pléiades



Est un logiciel complet pour l'éco conception des bâtiments et des quartiers. Développé à partir d'une saisie graphique ou d'une maquette numérique, différents types de calculs sont accessibles: simulation thermique et énergétique dynamique (STD et SED), vérification réglementaire, dimensionnement des équipements, qualité de l'air intérieur et analyse du cycle de vie qui évalue les impacts du bâtiment sur l'environnement.

- **Différentes interfaces du logiciel :**



Pleiades bibliothèque : est La base de données des éléments constitutifs du bâtiment accessible depuis les autres composants de Pleiades. Matériaux, menuiseries, équipements, elle comporte aussi des éléments pour décrire l'usage (scénarios) et l'environnement proche du bâtiment. L'interface Bibliothèque permet d'intégrer la composition des différents éléments constructifs ainsi que de créer de nouveaux matériaux et éléments grâce à la définition de leurs caractéristiques thermo-physiques (**Voir Figure3.1**).



Pleiades Modeleur : est conçu pour faciliter la saisie des bâtiments. Il permet de définir l'ensemble des paramètres géométriques du bâtiment, d'attribuer à chacune des parois ses caractéristiques thermiques, de réaliser le zonage et d'attribuer rapidement les scénarios d'utilisation et les paramètres

propres aux différents calculs proposés par Pleiades. Il permet de visualiser la saisie en trois dimensions et Il permet enfin de lancer les calculs de STD .Lors du lancement d'un calcul depuis le modeleur, l'outil effectue 2 phases successives : un export vers Pleiades Éditeur (c'est-à-dire qu'il génère une maquette thermique du bâtiment sous format arborescent), puis le lancement du calcul depuis cette maquette "Éditeur" [99]



L'Éditeur : permet la saisie complète d'un projet sous une forme arborescente et permet de lancer les calculs de STD/SED.



STD COMFIE : La simulation thermique et énergétique dynamique avec le moteur COMFIE.



Résultats : Les résultats des calculs lancés à partir du Modeleur ou l'Éditeur sont visualisés dans le composant Résultats.

- **Processus d'application du logiciel :**

La Figure 3.1 présente le processus d'application du logiciel Pleiades (version 2022) ainsi que les étapes de simulation.

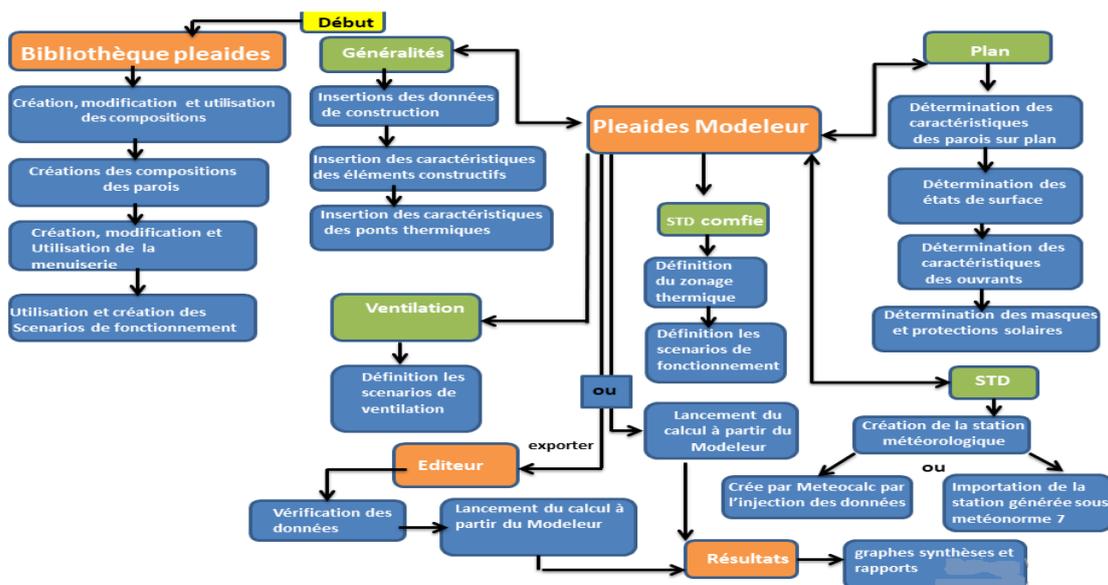


Figure 3.1:Processus d'application du logiciel

- **Création de la station météorologique :**

Le logiciel pléiades intègre le module Metéocalc qui permet d'importer et d'analyser un fichier météo crée le logiciel météoforme 7, ou Générer des fichiers de données météorologiques horaires au format (TRY).

Pour générer la station météorologique, il nous faut les données suivantes :

- Température moyenne mensuelle
- Températures Moyennes minimales mensuelles
- Températures Moyennes maximales mensuelles

Ces données permettent de générer les Températures minimales mensuelles et Températures maximales mensuelles.

- Durée d'insolation
- Irradiation globale (*optionnel).

- **Interfaces du Logiciel :**

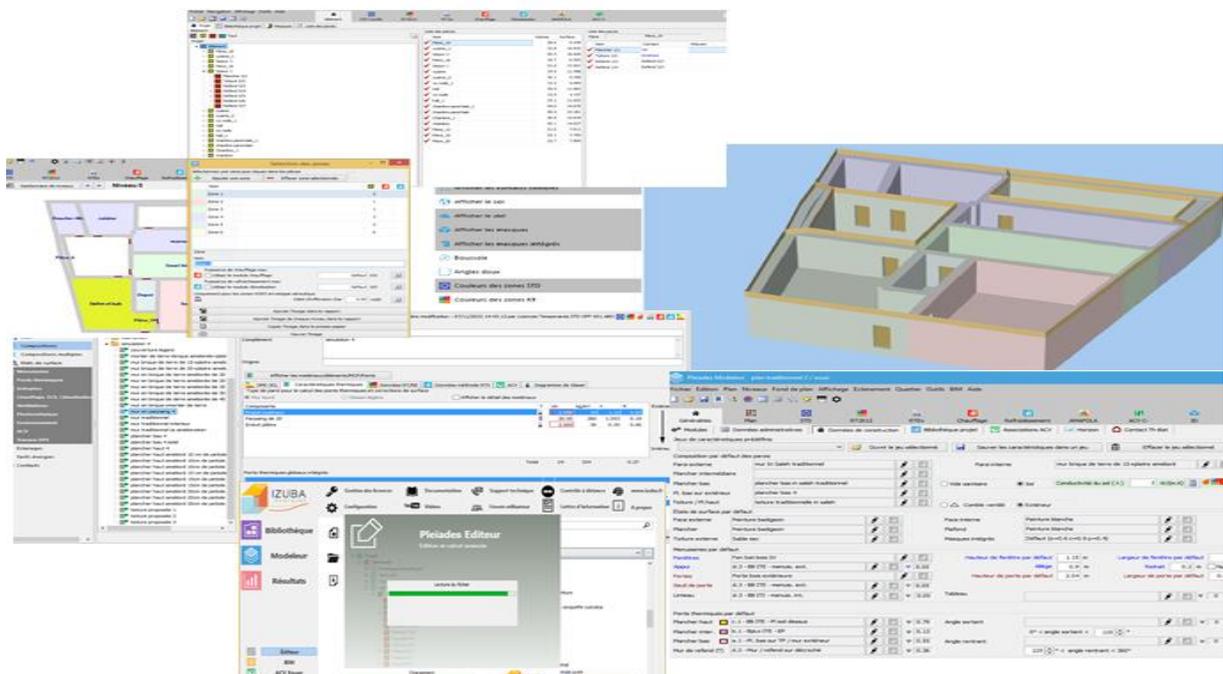


Figure 3.2: Interfaces du logiciel

- **Réponses du logiciel :**

Pleiades stocke les résultats de chaque simulation dans le dossier "Résultats Comfie" qui se trouve dans le dossier "Mes données Pleiades".

Le logiciel permet d'avoir les réponses suivantes :

Températures moyennes, températures minimales et températures maximales dans les différentes zones thermiques étudiées.

- ✓ Besoins en chauffage et climatisation, puissances de chauffage et climatisation
- ✓ Taux d'inconfort, Moyenne de surchauffe.
- ✓ Visualisation graphique des résultats obtenus durant différentes périodes de l'année.
- ✓ Génération des rapports sous format (*.odt) qui peut être exporté vers d'autres logiciels comme Excel et Word.

Pour toutes ces réponses, nous avons utilisé ce logiciel pour effectuer les simulations sur les différents cas étudiés.

3.4 Simulation thermique dynamique des différents cas étudiés :

Des simulations ont été faites sur les différents cas présentés dans le chapitre 02(cas 01, 02,03 et 04) et d'autres ont été faites sur le modèle adaptatif proposé.

3.4.1 Simulation thermique dynamique du cas d'étude n° 01

La simulation effectuée sur le cas d'étude n°01 a eu pour objectif l'évaluation de son comportement thermique, sa performance énergétique et de comparer les résultats obtenus à ceux expérimentaux.

- **Les caractéristiques thermo-physiques du cas d'étude 01**

Lors des simulations effectuées, nous avons utilisé les résultats de la caractérisation de la brique de terre et la terre sèche (**voir Figure 2.27. Tableau 2-1**), pour les autres matériaux comme le mortier de terre, et les différentes parties du palmier intégré comme isolants dans la toiture, on s'est

appuyé sur les résultats des recherches établies par [38, 100, 101]. Les caractéristiques thermo-physiques des éléments constructifs du cas d'étude 01 sont mentionnées dans le **Tableau 3-1**.

Tableau 3-1:Caractéristiques thermo-physiques des éléments constructifs du cas d'étude n° :01

Elément constructif	composition	épaisseur (m)	conductivité λ (W/m. °C)	U (W / m ² °C)
Mur extérieur en adobe	Mortier de terre	0.015	0.39	1.52
	Brique d'adobe	0.45	1.1	
	Mortier de terre	0.015	0.39	
Mur intérieur en Adobe	Mortier de terre	0.01	0.39	2
	Brique d'adobe	0.3	1.1	
	Mortier de terre	0.01	0.39	
Mur en parpaing (Mur Est de l'espace Swari)	Hourdis de 20cm	0.2		2.77
Toiture	Mortier de terre	0.02	0.39	0.29
	Brique d'adobe	0.15	1.1	
	Grappe de palmier	0.07	0.074	
	Pétiole de palmier	0.07	0.072	
	Tronc de palmier	0.15	0.122	
Plancher bas	Brique adobe	0.45	1.1	1.38
	Mortier de terre	0.05	0.39	
	Terre sèche	0.05	1.15	

- **Identification des zones thermique du cas d'étude n°01 :**

Le volume habitable du cas d'étude n°01, a été divisé en 06 zones thermiques Swari(zone 01),Swari Imra (zone 02),chambre 01(zone 03),chambre 02(zone 04),skifet el bab (zone 05),couloir(zone 06) , espace sanitaire et cuisine(zone 07).

3.4.2 Simulation thermique dynamique du cas d'étude n° 02

Le but de cette simulation est l'évaluation du comportement thermique, performance énergétique de la maison traditionnelle d'In Saleh et l'évaluation de l'impact du choix des matériaux de construction. Nous avons fait des simulations de la maison avec matériaux locaux. Ensuite nous avons remplacé ces matériaux locaux par du Parpaing, béton et hourdis en gardant la typologie de la maison et le type de menuiserie .En dernier nous avons proposé le renforcement de la toiture de la variante 02.Les variantes étudiées sont présentées ci-dessous :

- **Variantes étudiées :**

A- Variante 01 (cas initial) : maison avec utilisation des matériaux de construction locaux (Adobe, Pétiole de palmier, grappe de palmier, plâtre de gypse et sable. (**Voir Tableau 3.2**), dans ce cas d'étude ils ont utilisé le plâtre de gypse pour le crépissage des murs au lieu du mortier de terre.

B-Variante 02 : maison avec murs en parpaing et toiture en hourdis. Ces matériaux sont actuellement les plus utilisés pour la réalisation des logements dans la région d'In Saleh. (**Voir Tableau 3.3**)

C-Variante 03 : maison avec murs en parpaing et toiture améliorée par l'intégration de l'isolation dans la toiture en hourdis (**voir Tableau3.4**), nous avons opté pour l'isolation de la toiture étant la surface horizontale qui provoque plus d'échange thermique surtout en période estivale par rapport à la hauteur du soleil.

Pour le renforcement de la toiture, nous avons utilisé de la grappe de palmier, un procédé constructif qui fut utilisé dans l'habitat traditionnel du climat aride dont l'objectif est l'amélioration de l'efficacité énergétique de la maison contemporaine du Sud Algérien et l'utilisation des matériaux locaux écologiques dans la construction. (**Voir Tableau 3-4**).

3.4.2.1 Caractéristiques thermo-physiques des éléments constructifs :

Tableau 3-2:Eléments constructifs de la variante 01 (maison avec matériaux locaux) :

Elément constructif	composants	épaisseur (m)	conductivité λ (W/m. °C)	U (W / m ² °C)
Mur extérieur	Plâtre de gypse	0.02	0.42	1.38
	Brique 'adobe	0.5	1.1	
	Plâtre de gypse	0.02	0.42	
Toiture	Plâtre de gypse	5	0.42	0.29
	Adobe	15	1.1	
	Grappe de palmier	5	0.08	
		5	0.04	
	Pétiole de palmier	20	0.12	
Plancher bas	Terre sèche	10	1.15	1.31
	Brique d'adobe	50	1.1	

Tableau 3-3:Eléments constructifs de la Variante 02 : (maison en parpaing) :

Elément constructif	composants	épaisseur (m)	conductivité λ (W/m. °C)	U (W / m ² °C)
Mur extérieur	Enduit extérieur	0.02	1.15	2.28
	Parpaing de 20	0.2	1.05	
	Enduit plâtre	0.02	0.35	

Tableau 3-4:Eléments constructifs de la Variante 03 : (maison en parpaing avec isolation de la toiture (amélioration proposée) :

Elément constructif	composants	Epaisseur (m)	λ W/(m.K)	U (W / m ² °C)
Mur extérieur	Enduit extérieur	0.22	1.15	2.28
	Parpaing de 20	0.20	1.05	
	Enduit plâtre	0.02	0.35	
Toiture	Béton lourd	0.04	1.75	0.46
	Hourdis de 16cm	0.16	1.23	
	Grappe de palmier	0.07	0.04	
	Mortier	0.05	1.15	

3.4.2.2 Identification des zones thermiques :

Le volume habitable du cas d'étude n°02 a été divisé en cinq zones thermique ,Swari (zone 01), Swari Imra (zone 02), Skifet el bab (Zone 03), cuisine (zone 04) et Espace sanitaire (zone 05).

3.5 Simulation thermique dynamique du cas d'étuden°03 :

Une étude thermique paramétrique a été faite dont le but d'évaluer le comportement thermique du cas étudié choisi ainsi que la contribution à l'amélioration de sa performance énergétique.

- **Variantes étudiées :**

a-Variante A : Variante (état des lieux). Selon la composition des éléments constructifs du cas étudié (voir **Tableau 3-5**), la modification a été faite seulement dans la toiture des espaces orientés EST et dans les murs des espaces orientés Ouest (voir **Figure 3.3**). Des matériaux locaux traditionnels (Adobe, mortier de terre) ont été ajoutés dans ces éléments constructifs.

b-Variante B : afin de vérifier l'impact de l'intégration des briques d'adobe et mortier de terre sur le comportement thermique du cas étudié nous avons opté pour l'intégration de ces matériaux dans la toiture en hourdis des espaces orientés Ouest.

c-Variante C : Dans le but d'améliorer la performance énergétique de notre cas d'étude nous avons opté pour l'intégration de l'isolation dans la toiture en hourdis. Pour cette variante nous avons opté pour l'utilisation de la composition de la toiture de la maison traditionnelle de cette région. La composition traditionnelle fut caractérisée par l'intégration de la grappe de palmier, pétiole de palmier et tronc de bois de palmier. (Voir **Tableau3-6**)

d-Variante D : La solution proposée dans cette variante est d'intégrer dans la toiture en parpaing, une couche d'isolation en pétiole de palmier ainsi que le traitement de la surface intérieure de la toiture avec un plâtre à matériaux à changement de phase (voir **Tableau 3-7**). La proposition de la variante D peut être une solution adéquate dans le cadre d'une réhabilitation énergétique des maisons modernes déjà construites avec des toitures en hourdis.

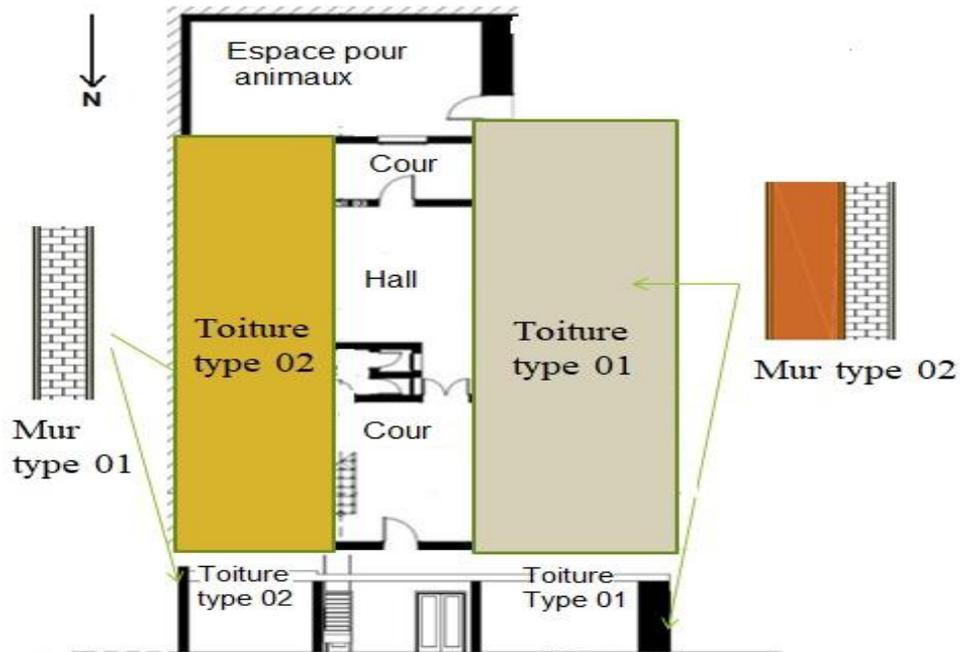


Figure 3.3:Détail des éléments constructifs

- **Caractéristiques thermo-physiques des éléments constructifs du cas n°03**

Tableau 3-5:Caractéristiques thermo-physiques des éléments constructifs (cas initial) :

Elément constructif	composants	épaisseur (m)	conductivité λ (W/m. °C)	U (W / m ² °C)
Mur Type 01	Enduit extérieur	0.02	1.15	2.28
	Parpaing de 20	0.2	1.05	
	Enduit en plâtre	0.02	0.35	

Mur Type 02	Enduit extérieur	0.02	1.15	1.08
	Parpaing de 20	0.2	1.05	
	Lame d'air > 1.3 cm	1.5	0.35	
	Brique d'adobe	0.3	1.1	
	Mortier de terre	0.02	0.5	
	Parpaing	0.2	1.05	
	Enduit extérieur	0.02	1.15	
Toiture type 01	Béton lourd	0.04	1.75	2.38
	Hourdis de 16	0.16	1.23	
	Enduit extérieur	0.05	1.15	
Toiture type 02	Mortier de terre	0.04	0.5	2
	Brique d'adobe	0.07	1.1	
	Béton lourd	0.04	1.75	
	Hourdis de 16	0.16	1.23	
	Enduit extérieur	0.05	1.15	

Tableau 3-6:Caractéristiques thermo-physiques des éléments constructifs (Toiture améliorée 01)

Elément constructif	composants	épaisseur (m)	conductivité λ (W/m. °C)	U (W / m ² °C)
Toiture améliorée 01	Mortier de terre	0.05	0.39	
	Adobe in Saleh	0.07	1.1	
	pétiole de palmier	0.07	0.072	

	grappe de palmier	0.07	0.072	0.43
	Béton lourd	0.04	1.75	
	Hourdis de 16	0.16	1.23	
	Enduit de plâtre	0.02	0.390	

Tableau 3-7:Caractéristiques thermo-physiques des éléments constructifs (Toiture améliorée 02)

Elément constructif	composants	épaisseur (m)	conductivité λ (W/m. °C)	U (W / m ² °C)
Toiture améliorée 02	Mortier de terre	0.05	0.39	0.63
	Adobe in Saleh	0.07	1.1	
	Bois de pétiole de palmier	0.07	0.072	
	Béton lourd	0.04	1.75	
	Hourdis de 16	0.16	1.23	
	Enduit de plâtre avec MCP	0.009	0.15	

• **Identification des zones thermiques du cas d'étude n°03 :**

Le volume habitable du cas d'étude 03 a été divisé en 7 zones thermiques ; Séjour pour hommes (zone 01), chambre des parents (zone 02), chambre pour femmes (zone 03), chambre pour garçons (zone 04), chambre pour filles (zone 05), cuisine (zone 06), espace de circulation +espace sanitaire (zone 07).

3.5.1 Simulation thermique dynamique du cas d'etuden°04 :

Une étude paramétrique a été faite sur le cas d'étude n°04, dont le but est l'évaluation du comportement thermique de cette typologie représentative de l'habitat moderne adapté dans la région d'In Saleh, Et la contribution à

l'amélioration de sa performance énergétique par l'adaptation des solutions passives entre autre ; Le renforcement de la toiture, renforcement des murs et intégration des protections solaires.

- **État des lieux (état initial du cas d'étude n° :04) :**

Des simulations thermiques dynamiques ont été faites sur le cas d'étude n°04 à l'état initial (état des lieux) afin d'évaluer son comportement thermique et sa performance énergétique, les caractéristiques thermo physiques des murs sont mentionnés dans le **Tableau 3.5** et celles du plancher haut, plancher bas dans le **Tableau 3-8**

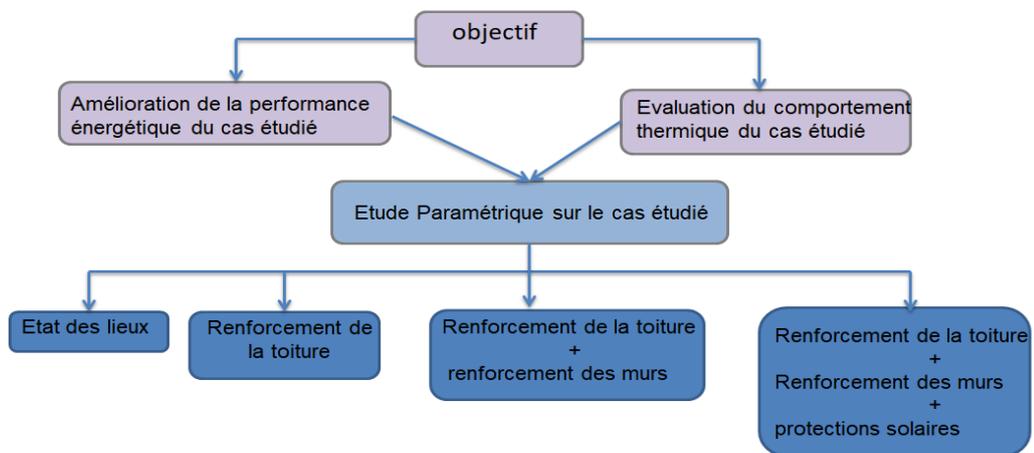


Figure 3.4:Methodologie adaptée pour le cas n°04

Tableau 3-8:Caractéristiques thermo-physiques des éléments constructifs du cas d'etude 04(état des lieux)

Elément constructif	composants	épaisseur (m)	conductivité λ (W/m. °C)	U (W / m ² °C)
Plancher haut	Carrelage	0.02	1.7	2.33
	mortier	0.05	1.15	
	Béton lourd	0.04	1.75	
	Hourdis de 16	0.16	1.23	
	Enduit de plâtre	0.02	0.390	

Plancher bas	Béton lourd	0.15	1.75	3.33
	Mortier	4	1.15	
	carrelage	2	1.7	

- **Renforcement de la toiture du cas d'étude n° :04:**

Afin d'améliorer la performance du cas étudié et choisir l'épaisseur adéquate de l'isolant pétiole de palmier, nous avons varié son épaisseur de 10 cm à 20 cm (Voir **Figure3.5**). Les caractéristiques thermo physiques de la toiture isolée avec 10 cm de pétiole de palmier sont mentionnées dans le tableau 3-9. pour les toitures isolées de 15 cm et 20 cm, les coefficients de transmission thermique sont respectivement estimés à $0.27 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ et $0.18 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$.

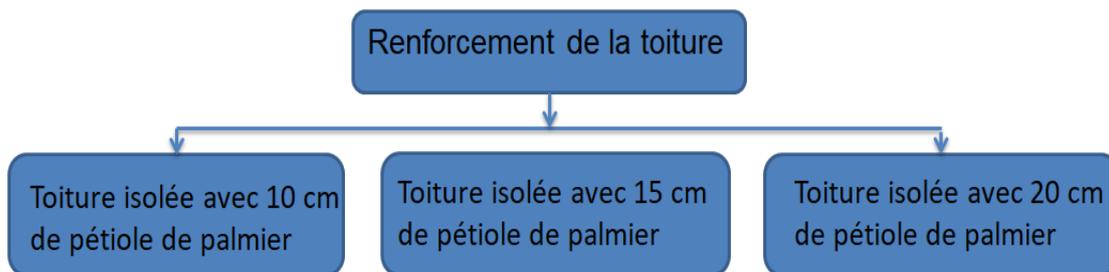


Figure 3.5:renforcement de la toiture du cas n°:04

Tableau 3-9:Caractéristiques thermo-physiques de la toiture isolée avec 10 cm de pétiole de palmier

Elément constructif	composants	épaisseur (m)	conductivité λ (W/m. $^\circ\text{C}$)	U (W / $\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$)
Toiture isolée avec 10 cm de pétiole de palmier	Carrelage	0.02	1.7	0.47
	mortier	0.05	1.15	
	Hourdis de 16	0.16	1.23	
	Bois de pétiole de palmier	0.1	0.058	
	Enduit de plâtre	0.02	0.390	

- **Renforcement des Murs du cas d'étude n° :04**

Pour cette étape nous avons utilisé la variante retenue de l'étape renforcement de toiture ,et nous avons proposé plusieurs configurations de murs extérieurs(**Voir Figure 3.4**) :en premier lieu nous avons remplacé les murs en parpaing par ceux traditionnels en brique de terre ayant une épaisseur de 49cm (même composition mentionnée sur le **Tableau 3.1**) , ensuite nous avons proposé de remplacer les murs en parpaing par ceux en brique de terre améliorée et varié l'épaisseur de 20cm à 40 cm ,en dernier nous avons ajouté du mortier de terre amélioré à la variante retenue. Les caractéristiques thermo physiques de la variante Mur en brique de terre améliorée de 40 cm+ mortier de terre amélioré sont mentionnées dans le **Tableau 3-10**.

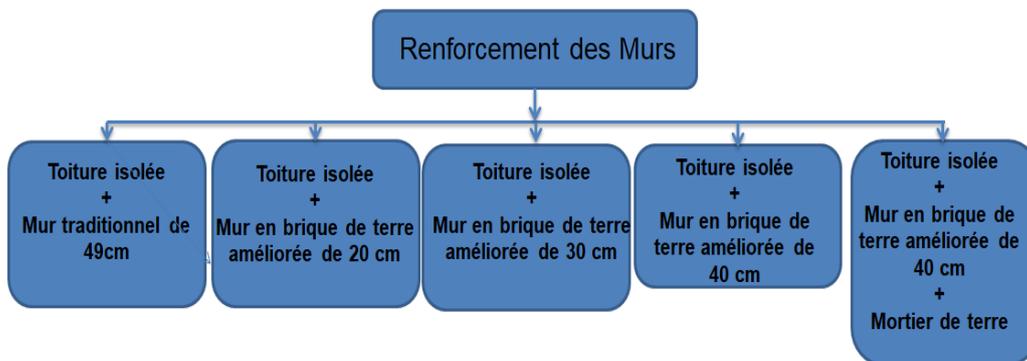


Figure 3.6:Configuration des murs proposés pour l'amélioration du cas n°:04

Tableau 3-10:caracteristiques thermo-physiques du Mur en brique de terre ameliorée de 40 cm+mortier de terre

Elément constructif	composants	épaisseur (m)	conductivité λ (W/m. °C)	R	U (W / m ² °C)
Mur de 40 cm en brique de terre améliorée+mortier de terre amélioré	Mortier de terre	0.02	0.39	0.8	1.25
	Brique d'adobe	0.4	0.75		
	Mortier de terre	0.02	0.39		

- **Intégration des protections solaires :**
- ✓ **Protections solaires sur surfaces vitrées :**

Afin de choisir la configuration la plus adéquate de brise soleil et qui permet d'améliorer la performance énergétique du cas étudié, nous avons proposé des brises soleil à lames verticales et horizontales avec variation de leurs profondeur, les différentes configurations proposées sont présentées sur la Figure 3.7.

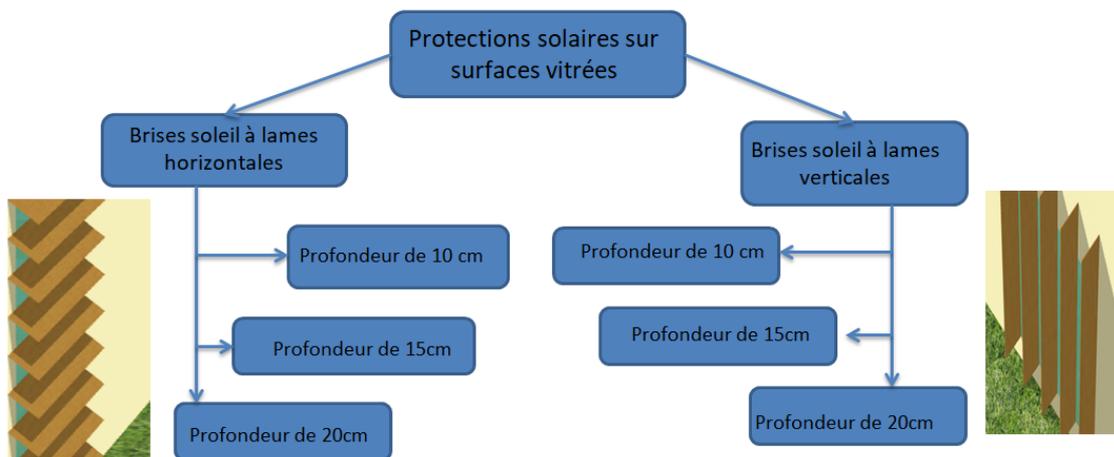


Figure 3.7:protections solaires sur surfaces vitrées proposées

- ✓ **Protections solaires dans la cour :**

Dans le but d'améliorer la performance énergétique du cas étudié, nous avons opté pour la création des protections dans la cour afin de réduire les apports solaires reçus sur les zones orientées Est et Ouest. (Voir **Figure 3.8**), nous avons proposé de couvrir le 1/3 et le 1/2 de la largeur de la cour et comparer les résultats afin de choisir la configuration la plus adéquate.

- ✓ **Protections solaires sur surfaces opaques :**

Afin de réduire les apports solaires reçus sur les zones orientées Sud nous avons proposés d'intégrer des protections solaires sur cette partie, ensuite nous avons comparé les résultats des simulations des différentes variantes proposées afin de choisir la variante la plus adéquate. (Voir **Figure 3.8**)

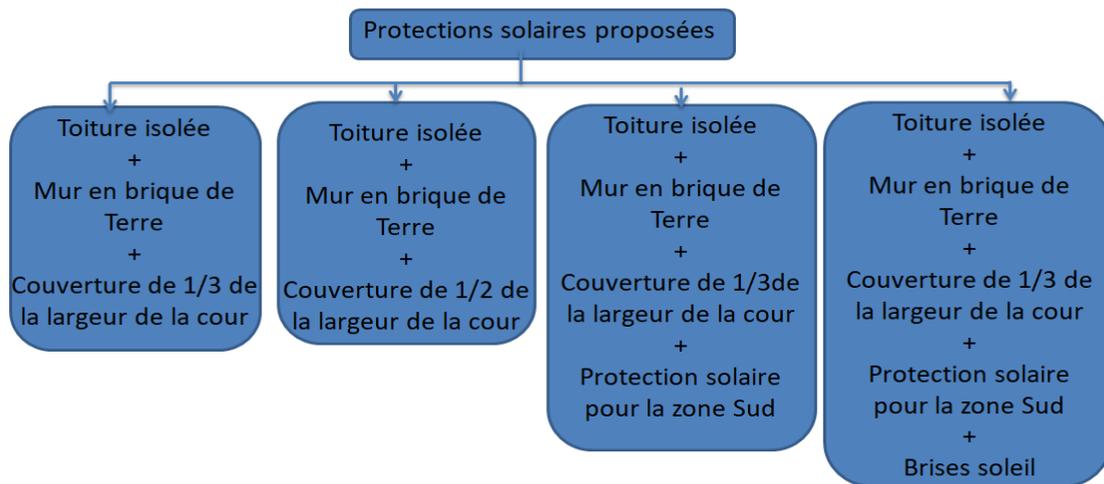


Figure 3.8: Différentes protections solaires proposées

En dernier lieu nous avons comparé les résultats des différentes variantes retenues lors des simulations effectuées et qui ont permis d'évaluer l'impact de chaque solution passive proposée sur la performance énergétique du cas étudié.

- **Identification des zones thermiques du cas d'étude n°04**

Le volume habitable du cas d'étude 04 a été divisé en quatre zones thermiques, Séjour1+sejour 2 (Zone 01), chambre d'enfants 01+chambre d'enfants 02) (zone 02), chambre parentale 01 (zone 03) et chambre parentale 02(zone 04).

3.5.2 Scenarios de fonctionnement

- **Renouvellement d'air :**

Le renouvellement d'air est assuré par une ventilation naturelle. Nous avons calculé le débit de ventilation en utilisant le diagramme psychrométrique avec prise en considération des conditions climatiques de la région étudiée. Le débit de ventilation est estimé à 0.5 vol/h pour les différents cas étudiés, pour l'espace couloir et skifa du cas d'étude 01, nous avons utilisé le débit proposé par le logiciel de simulation thermique dynamique dans le cas d'une ouverture zénithale, et qui est estimé à 1.32 vol/h. Lors de simulation nous avons pris en considération l'impact de la ventilation nocturne.

- **Les apports internes :**

Les apports internes émis par le métabolisme des occupants et les apports émis par les appareils électriques ont été intégrés au modèle thermique

dynamique du bâtiment. Le nombre d'occupants est de 04 personnes pour le cas 01, 05 pour le cas 02, 06 pour le cas 03 et 08 pour le cas 04 (04 personnes pour chaque logement). Chaque personne émette 80W, des scénarios ont été intégrés selon le taux de fréquentation de chaque espace. Le même scénario est reproduit pour toute la semaine et durant les différentes périodes de l'année.

Aussi nous avons pris en considération la puissance dissipée des appareils utilisés (lampe, ordinateur, réfrigérateur, four....) dans chaque cas d'étude.

Les scénarios ont été intégrés selon le fonctionnement de chaque volume thermique de chaque cas étudié (Voir annexe) et qui sont :

*Scénario d'occupation : afin de déterminer les apports internes produits par les occupants de notre cas d'étude.

*Scénario de ventilation : afin de déterminer le taux de renouvellement d'air par heure.

*Scénario d'occultation : afin de gérer la fermeture et l'ouverture des volets.

*Scénario de puissance dissipée : afin de déterminer les apports internes produits par les appareils.

*Consigne de thermostat : La température a été fixée à 27° durant la période estivale et à 20° durant la période hivernale.

*Les simulations des différents cas étudiés ont été faites sans et avec consigne de thermostat durant la période hivernale et estivale.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation thermique, la simulation thermique dynamique des différents cas étudiés, les méthodologies adaptées, les étapes de simulation pour chaque variante étudiée et les scénarios proposés. Les résultats des différentes simulations seront présentés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 04

4 RESULTATS ET DISCUSSION

4.1 Introduction :

Nous avons effectué les simulations des différents cas étudiés, présenté les résultats obtenus ainsi que leurs discussions.

4.2 Résultats et Discussion :

4.2.1 Résultats et Discussion du cas d'étude n°01 :

- Simulation sans consigne de thermostat durant la période hivernale :

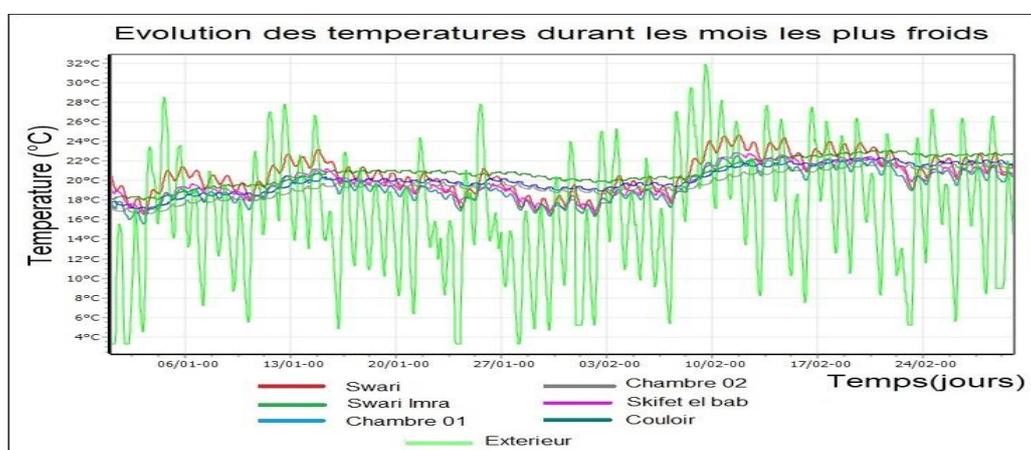


Figure 4.1: Evolution des températures durant la période la plus froide

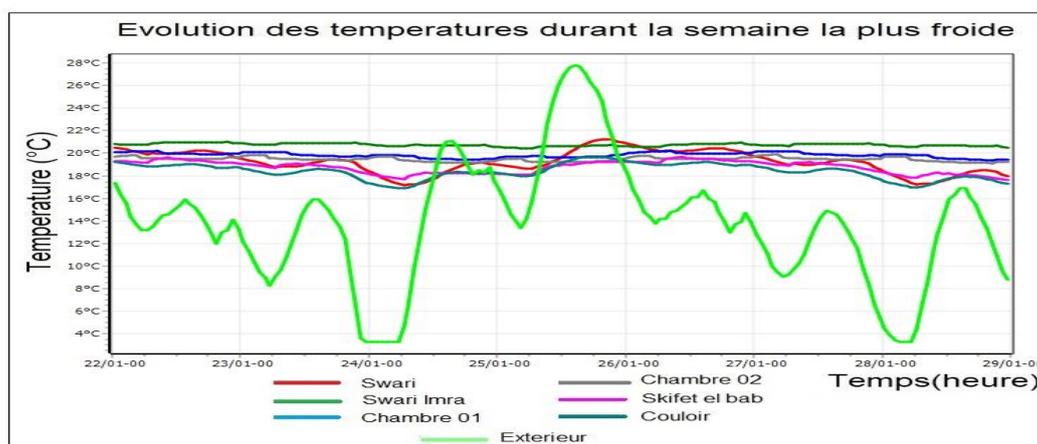


Figure 4.2: Evolution des températures durant la semaine la plus froide

Selon les résultats obtenus durant la période la plus froide de l'année les températures extérieures baissent jusqu'à 3°C et peuvent atteindre 28°C (Voir

Figure 4.1 et 4.2).de légères fluctuations de température dans les espaces Swari, skifa et couloir ont été constatées avec des températures qui varient de 17°C à 21°C dans l’espace Swari et de 18°C à 19°C dans l’espace skifa et de 17°C à 19.5°C dans l’espace couloir alors que dans les espaces Swari , chambre 01 et chambre 02 les températures sont presque constantes et sont estimées à 20°C.Les résultats obtenus montrent que les températures obtenus dans les espaces (Swari, Swari Imra, chambre 01 et chambre 02) sont conformes à la plage de confort sans recourir à un système de chauffage.

- **Simulation sans consigne de thermostat durant la période estivale :**

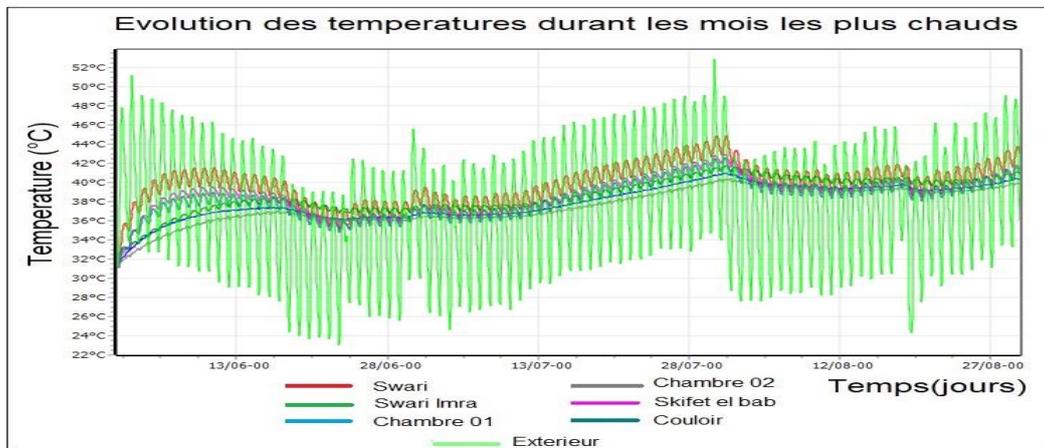


Figure 4.3:Evolution des températures durant la période la plus chaude

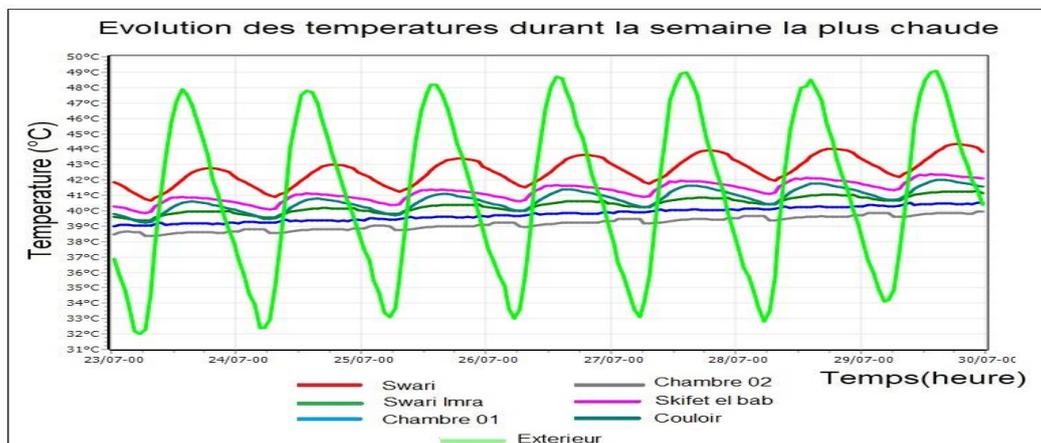


Figure 4.4:Evolution des températures durant la semaine la plus chaude

D’après les résultats obtenus(Voir Figures 4.3 et 4.4), nous avons constaté que les températures extérieures peuvent atteindre 49°C et baisser jusqu’à 32°C, alors qu’à l’intérieur des espaces Swari Imra, chambre 01,chambre 02 sont presque constantes et sont respectivement estimées à 38°C 39°C et

40°C, l'écart diurne peut atteindre respectivement 11°C, 10°C et 9°C. de légères fluctuations ont été constatées dans les espaces couloir et skifa du à l'impact de la ventilation assurée par l'ouverture zénithale ce qui permet d'accélérer l'évacuation de la chaleur emmagasinée par les éléments constructifs durant la nuit et baisser les températures respectivement jusqu'à 39°C, l'écart dans ces espaces peut atteindre 8°C. alors que dans l'espace swari les fluctuations sont plus importantes par rapport aux autres espaces avec des températures qui peuvent atteindre 43°C et baisser jusqu'à 40°C, du aux changements des procédés constructifs et que cet espace ait plus de surface d'échange avec l'extérieur.

- **Résultats de la simulation du 04 au 09 Aout (durant l'installation des compagnes de mesure) :**

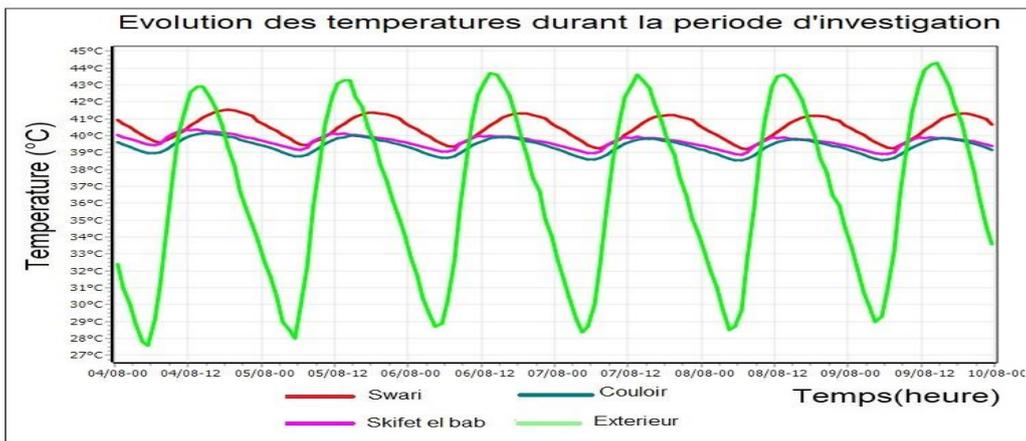


Figure 4.5: Evolution des températures dans les espaces Swari, Skifa et couloir

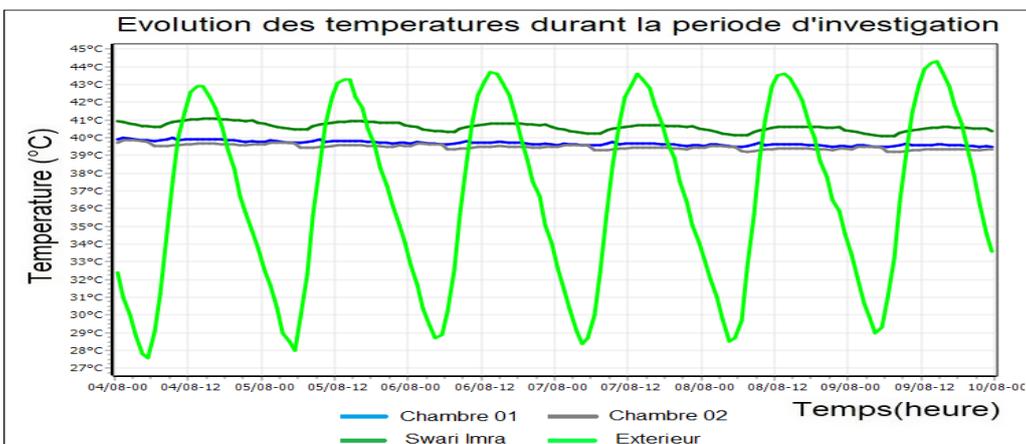


Figure 4.6: Evolution des températures dans les espaces Swari Imra, chambre 01 et chambre 02.

Afin de comparer les résultats théoriques avec ceux expérimentaux, nous avons présenté les résultats de la simulation du 04 au 09 Aout (voir **Figures 4.5, 4.6**), les températures extérieures varient de 28°C à 44°C, le gradient de température est estimé à 16°C. Alors qu'à l'intérieur des différents espaces, les températures sont inférieures à celles de l'extérieur ; la variation des températures et les écarts de température varient selon les caractéristiques des différents espaces ce qui a été déjà constaté dans les résultats expérimentaux.

Nous avons constaté que dans les espaces :Swari,skifa et couloir les fluctuations des températures intérieures suivent celles des températures extérieures (voir **Figure 4.5**) ;dans l'espace Swari les températures peuvent atteindre 41.3°C et abaissent jusqu'à 39.2°C,l'écart diurne est estime de 2°C à 3°C. Et dans les espaces Skifa et couloir, les températures peuvent respectivement atteindre 40°C et 40.3°C et baissent respectivement jusqu' à 38.8°C et 38.5°C. L'ecart de température durant la journée est estimé à 4°C.les fluctuations constatées dans ces espaces sont dus à leurs faible compacité, au scénario de ventilation nocturne proposé lors de la simulation thermique dynamique, la ventilation dans les espaces skifa et couloir est assurée par l'effet de cheminée (tirage thermique). Aussi le changement du matériau de la paroi orientée Est et qui a pu engendrer plus de fluctuations dans l'espace Swari.

Alors que dans les espaces Swari Imra ,chambre 01,chambre 02 ,Nous avons constaté que les températures intérieures varient de 40 à 41°C dans l'espace swari Imra, l'écart diurne est estimé de 3 à 4°C ,et dans les espaces chambre 01 et chambre 02(voir **Figure 4.6**),les températures sont presque constantes et varient de 39.5°C à 40°C l'écart est estimé à 4°C.Ce comportement thermique est dû à la forte compacité de ces espaces(voir plan) ainsi que l'inertie thermique des éléments constructifs.

- **Comparaison des résultats obtenus :**

Les mesures simulées ont été comparées à celles mesurées sous les mêmes conditions et le même fonctionnement du cas étudié en utilisant l'équation ci-dessus et qui sert à calculer l'erreur moyenne de biais (MBE)

$$MBE = \frac{\sum_{i=0}^{Np} (Mi - Si)}{\sum_{i=1}^{Np} Mi} (\%) \dots\dots\dots(4.1)$$

Ou Mi et Si sont les valeurs mesurées et simulées à un intervalle de temps et Np est le nombre total de valeurs de données utilisées pour le calcul. La comparaison des résultats expérimentaux avec ceux théoriques (**Voir Figures 4.7-4.12**) ,250 échantillons ont été comparés et l’erreur a été calculée pour chaque espace mesuré comme est montré sur le tableau 4-1

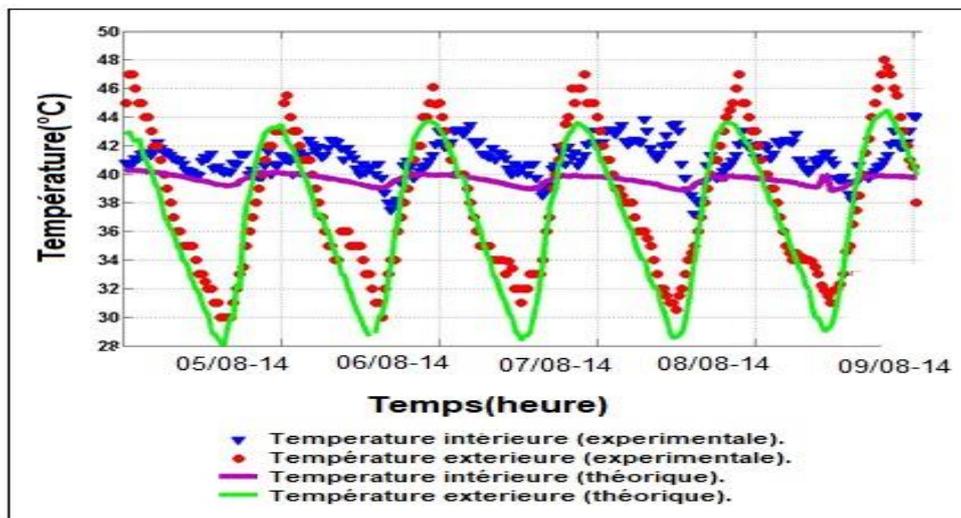


Figure 4.7: comparaison des résultats dans l’espace Skifet el bab

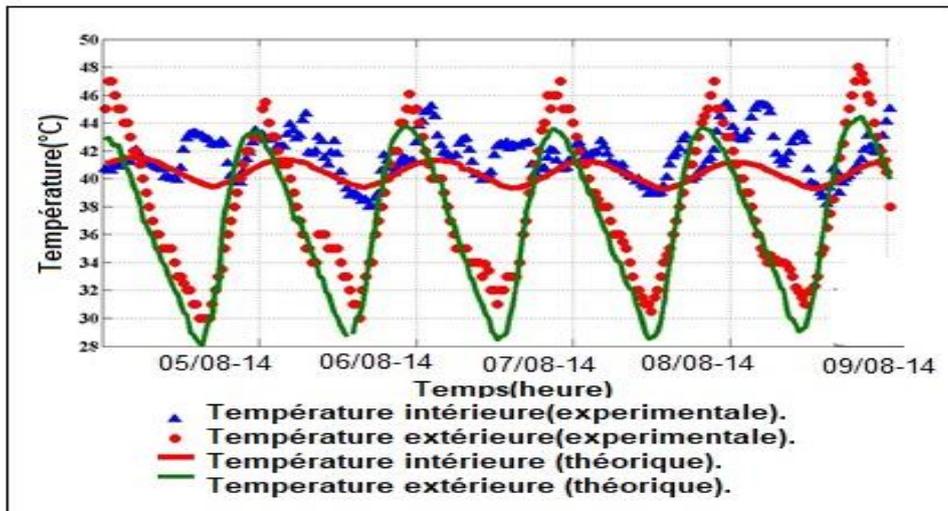


Figure 4.8: comparaison des résultats dans l’espace Swari

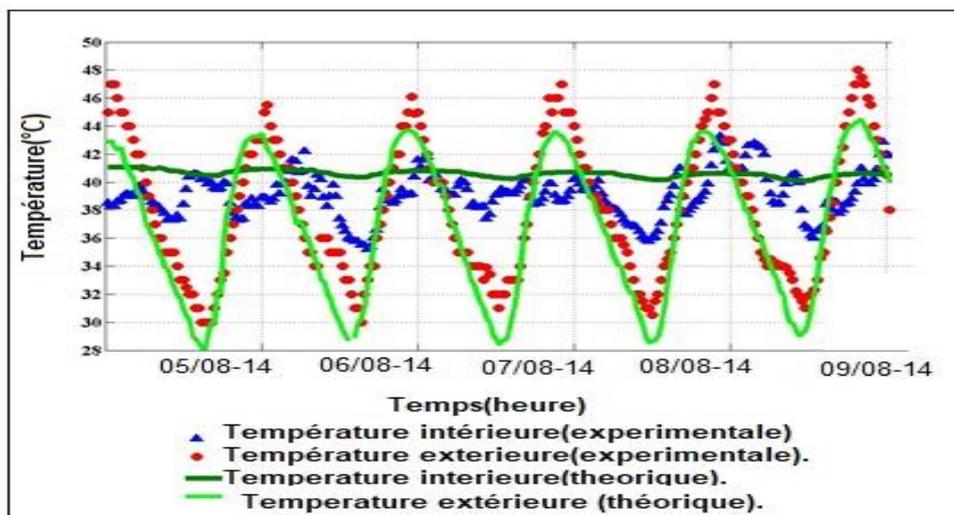


Figure 4.9: comparaison des résultats dans l'espace Swari Imra

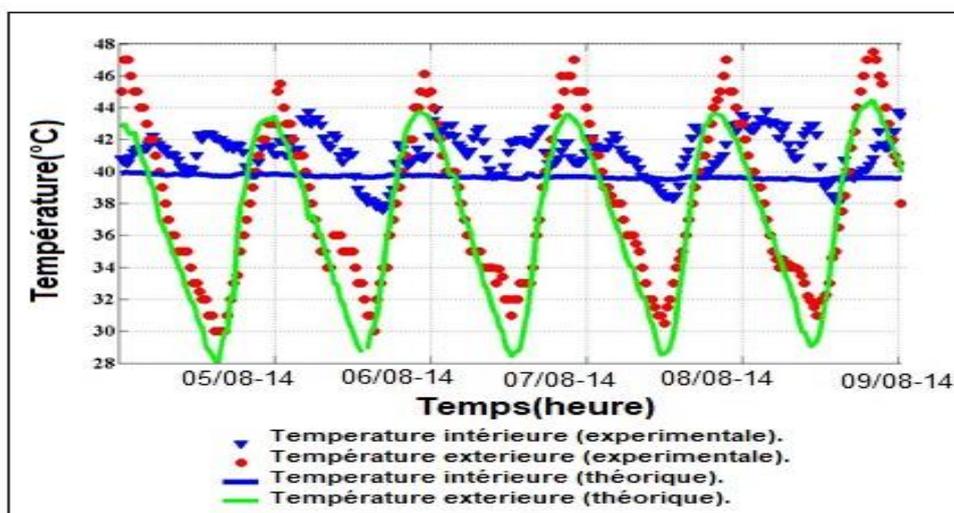


Figure 4.10: comparaison des résultats dans l'espace chambre 01

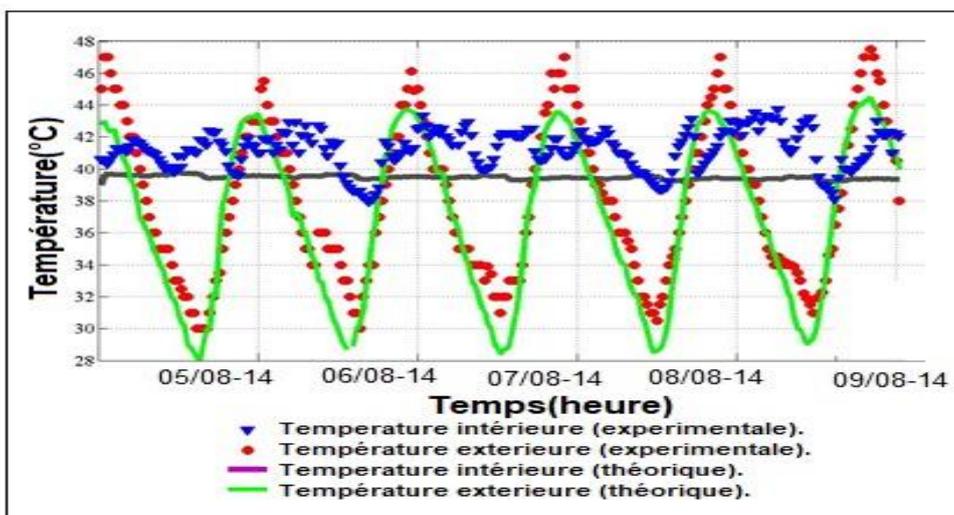


Figure 4.11: comparaison des résultats dans l'espace chambre 02

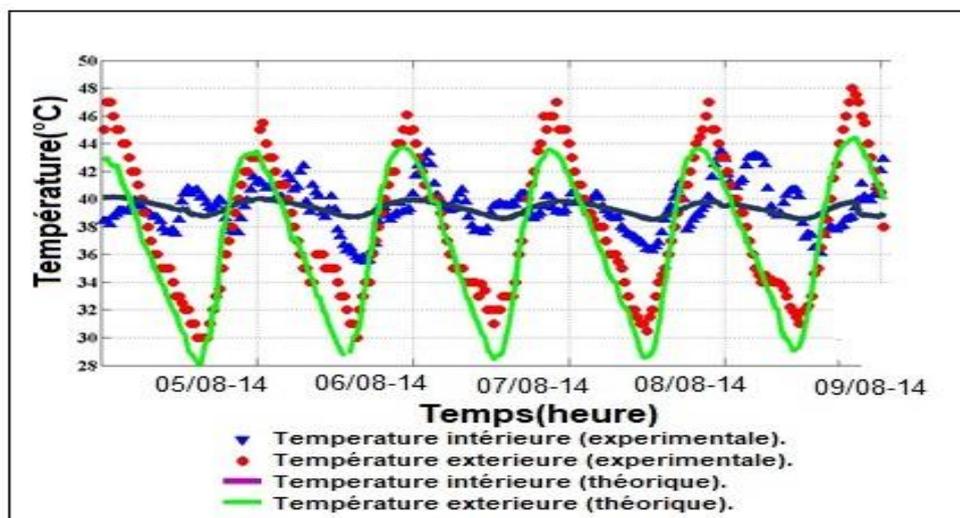


Figure 4.12: comparaison des résultats dans l'espace couloir

Tableau 4-1: calcul de l'erreur pour chaque espace :

Espace	Erreur
Swari	3.89%
Swari Imra	2.88%
skifa	3.71%.
couloir	0.203%,
Chambre 01	3.61%
chambre 02	4.24%.

- Interprétation des résultats de comparaison :**

Après comparaison des résultats expérimentaux avec ceux théoriques, Nous avons constaté que les résultats expérimentaux sont proches à ceux théoriques (voir **Figures 4.7-4.12**). Mais les fluctuations sont plus importantes dans les résultats expérimentaux et ça est du à plusieurs facteurs entre autre la surestimation de l'inertie thermique des éléments constructifs, leurs homogénéité lors de la simulation thermique dynamique, la dégradation du cas

étudié et de ses matériaux de construction (présence de fissures dans les espaces (voir **Figure2.12**)) ainsi qu'aux erreurs de mesure.

D'après les résultats expérimentaux et théoriques obtenus du cas d'étude n°01, nous avons déduit que le confort estival n'est pas conforme aux exigences recommandées par Ashrae standard 55 et DTR .malgré toutes les solutions bioclimatiques intégrées et ça est dû aux conditions extrêmes de la région d'In Saleh qui se caractérisé par de longues périodes de surchauffe.

4.2.2 Résultats de la simulation avec consigne de thermostat :

Afin de définir les besoins en chauffage et climatisation nous avons effectué des simulations avec consigne de thermostat(les consignes de chauffage et climatisation ont été respectivement fixé à 20°C et 27°C pour les différents cas étudiés). Les besoins en climatisation ont été estimés à 7491 kWh/an d'une moyenne de 118kwh/m² /an , et ceux en chauffage ont été estimés à 223 kWh /an d'une moyenne de 4 kWh/m² /an (voir **Figure 4.13**). La consommation énergétique est au-dessus du seuil de l'indicateur de performance énergétique de 50 kWh/m² /an, elle est estimée à 122 kWh/m²/an. Le taux de consommation pour la climatisation est très important par rapport à celui pour chauffage et qui représente 96% de la consommation totale. Malgré toutes les solutions passives adaptées le confort estival n'est pas atteint dû aux conditions climatiques défavorables du site avec des températures qui peuvent dépasser 48°C.

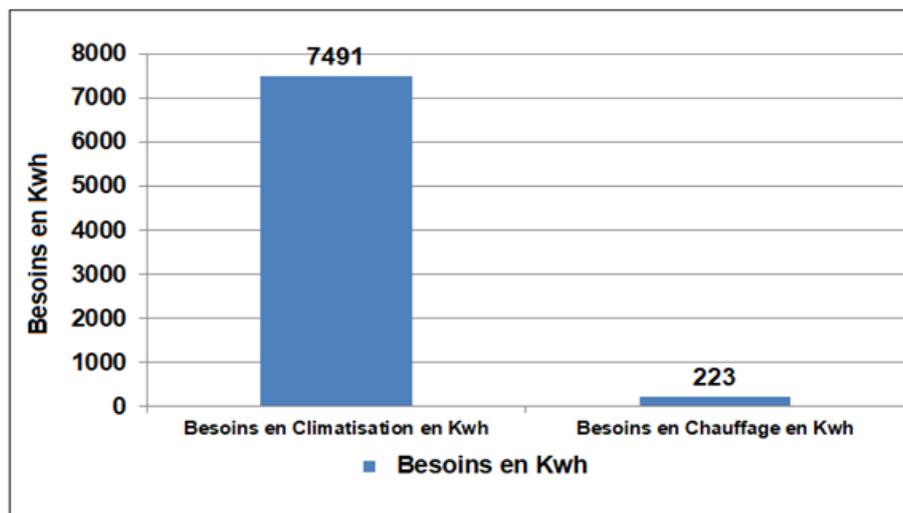


Figure 4.13: Besoins en climatisation et chauffage du cas d'étude n° 01

4.3 Résultats et discussions du cas d'étude n°02 :

4.3.1 Simulation sans consigne de thermostat durant la période estivale :

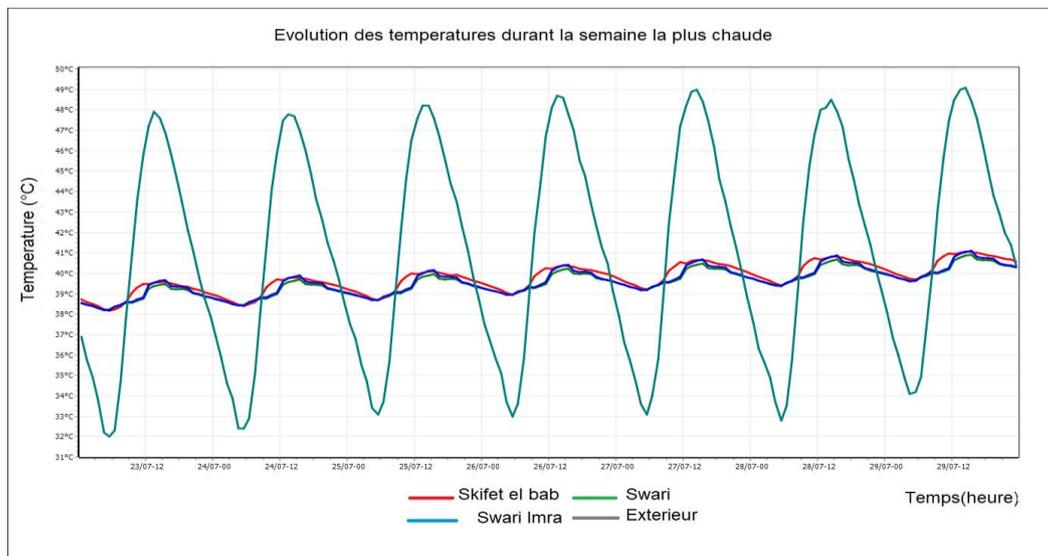


Figure 4.14: Evolution des températures durant la semaine la plus chaude de la variante 01

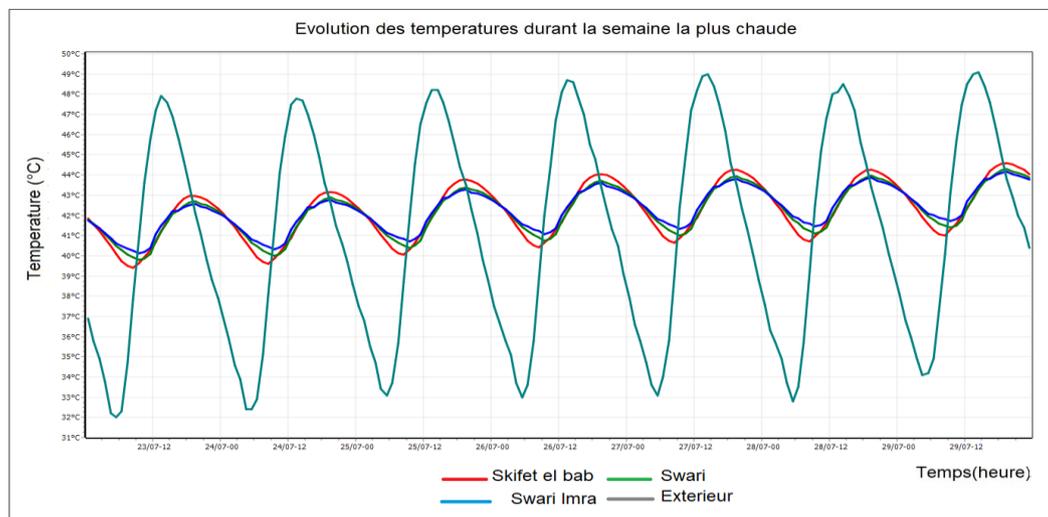


Figure 4.15: Evolution des températures durant la semaine la plus chaude de la variante 02

Les résultats montrent que les températures extérieures varient de 32°C à 49°C, mais à l'intérieur de la maison avec matériaux locaux le profil de température est presque stable durant le saison estivale (voir **Figure 4.14**), les températures maximales peuvent atteindre 38°C et 39°C dans les pièces de

confort (Swari et Swari Imra). L'écart diurne a été estimé à 10°C ,et ça est dû à la bonne inertie des matériaux locaux et l'isolation intégrée dans la toiture et aux coefficients de transmission des éléments constructifs et qui sont estimés respectivement à, alors qu'à l'intérieur de la maison en parpaing les températures suivent les fluctuations de celles de l'extérieur durant la période estivale (voir **Figures 4.15**) et peuvent atteindre 44 °C dans les pièces de confort Swari et Swari Imra,et ça est dû à la faible inertie des matériaux de construction modernes et à la valeur élevée des coefficients de transmission des différents éléments constructifs .

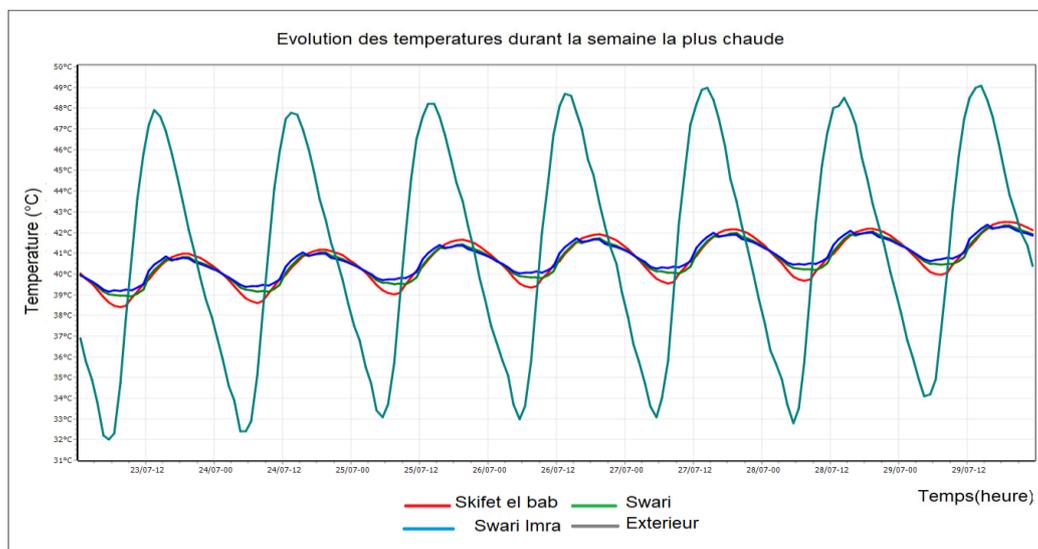


Figure 4.16: Evolution des températures durant la semaine la plus chaude de la variante 03

Mais après renforcement de l'enveloppe extérieure par l'isolation de la toiture avec de la grappe de palmier (voir composition de toiture), nous avons constaté que les températures ont baissé et le profil de température est devenu plus stable durant la période estivale (**voir Figure4.16**), les températures maximales peuvent atteindre 41°C dans les pièces de confort (Swari Imra et Swari), l'écart diurne a été estimé à 7°C .Cette amélioration est dû au renforcement de la toiture étant la surface horizontale qui reçoit plus de rayonnement par rapport aux surfaces verticales sachant que la région à une durée d'ensoleillement qui dépasse 12 heures durant la période estivale.

4.3.2 Simulation sans consigne de thermostat durant la période hivernale :

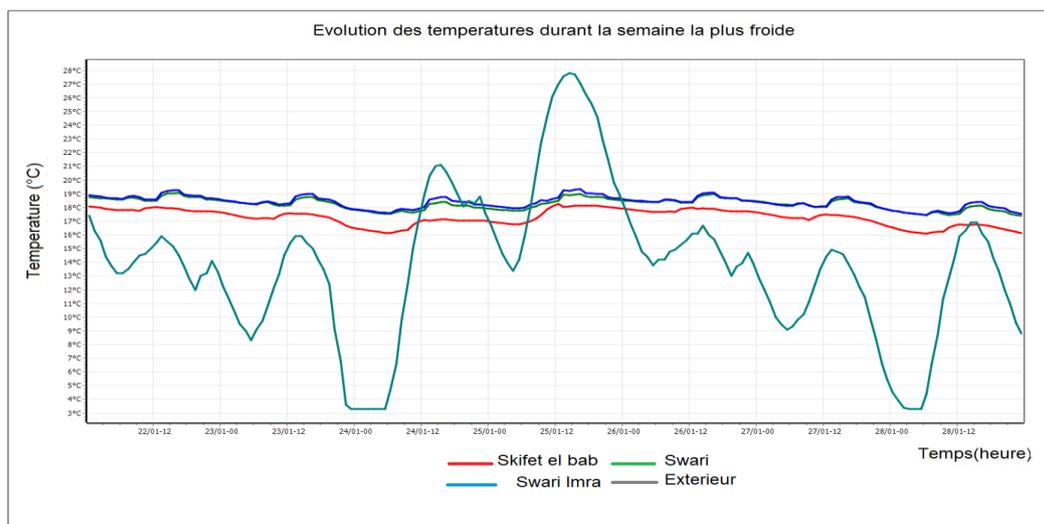


Figure 4.17: Evolution des températures durant la semaine la plus froide de la variante 01

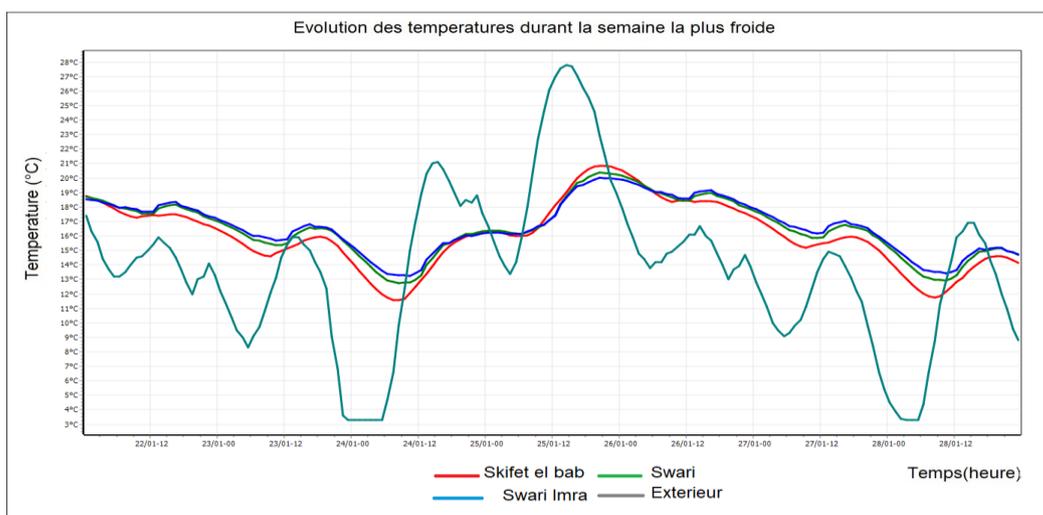


Figure 4.18: Evolution des températures durant la semaine la plus froide de la variante 02

Les résultats montrent que les températures extérieures durant la période hivernale baissent jusqu'à 3°C, par contre les températures intérieures dans la maison avec matériaux locaux restent constantes avec une moyenne de 19°C (Voir **Figure 4.17**), L'effet de l'enveloppe extérieure est satisfaisant, le confort peut être garanti sans recourir à un système de chauffage et ça est dû à la forte inertie des éléments constructifs, ainsi qu'à l'intégration de l'isolation dans la toiture et ce qui a été aussi déduit à travers les résultats de l'évaluation thermique du cas d'étude n° :02 , alors que dans la maison en parpaing les

températures intérieures suivent les fluctuations des températures extérieures et baissent jusqu'à 14°C (Voir **Figure 4.18**). Mais après intégration de l'isolation nous avons constaté que les températures ont augmenté et peuvent atteindre jusqu'à 19°C et baisser à 17°C dans les zones Swari et Swari Imra (Voir **Figures 4.19**). L'écart de température entre la maison en parpaing et la maison avec renforcement de toiture est de 2°C (voir **Figures 4.18, 4.19**).

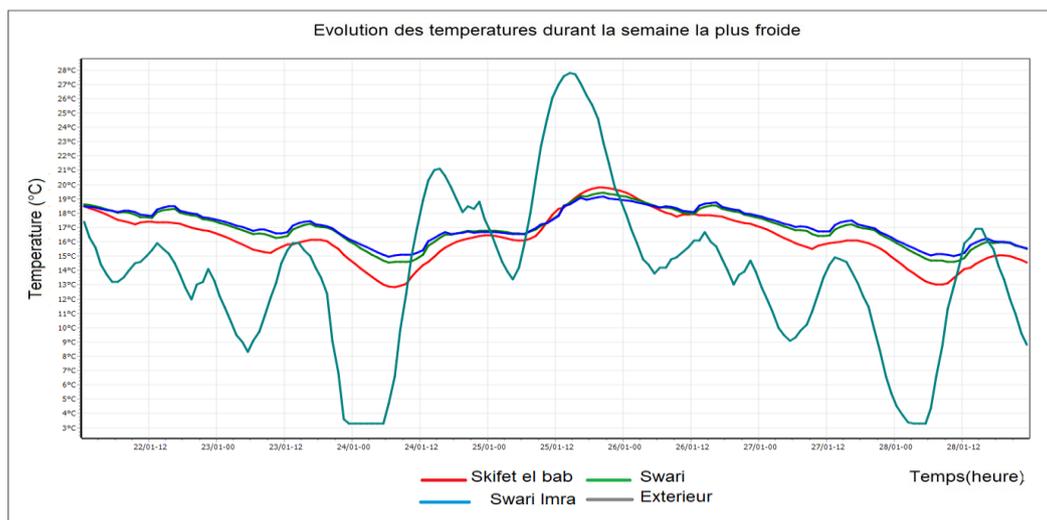


Figure 4.19: Evolution des températures durant la semaine la plus froide de la variante 03

4.3.3 Simulation avec consigne de thermostat durant la période estivale :

Les besoins en climatisation ont été estimés à 6912 kWh /an d'une moyenne de 83 kWh/m² /an dans la maison avec matériaux locaux alors qu'ils sont estimés à 14485 kWh /an d'une moyenne de 164 kWh/m²/an dans la maison avec matériaux modernes (**Figure 4.20**). Nous avons constaté que la consommation a augmenté deux fois dans la maison en parpaing par rapport à la maison avec matériaux locaux. Mais après intégration de l'isolation, les besoins ont diminué par rapport à la simulation précédente et ont été estimés à 8413 kWh /an d'une moyenne de 95 kWh/m²/an. La réduction est estimée à 42% par rapport à la maison en parpaing.

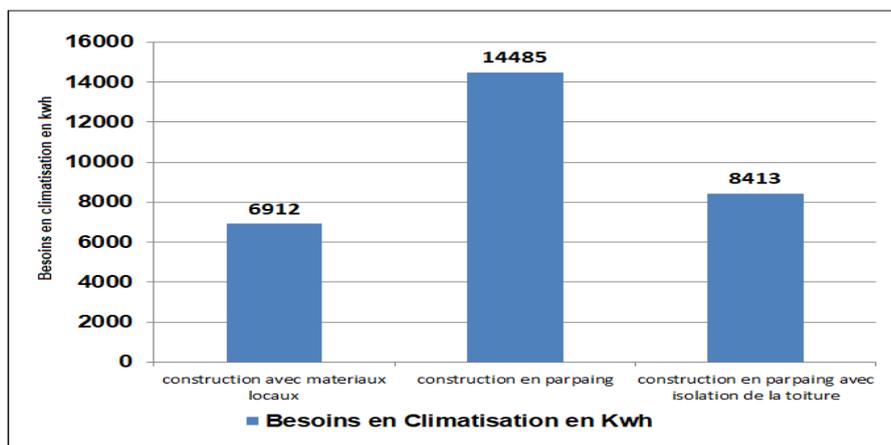


Figure 4.20: Comparaison des besoins en climatisation

4.3.4 Simulation avec consigne de thermostat durant la période hivernale :

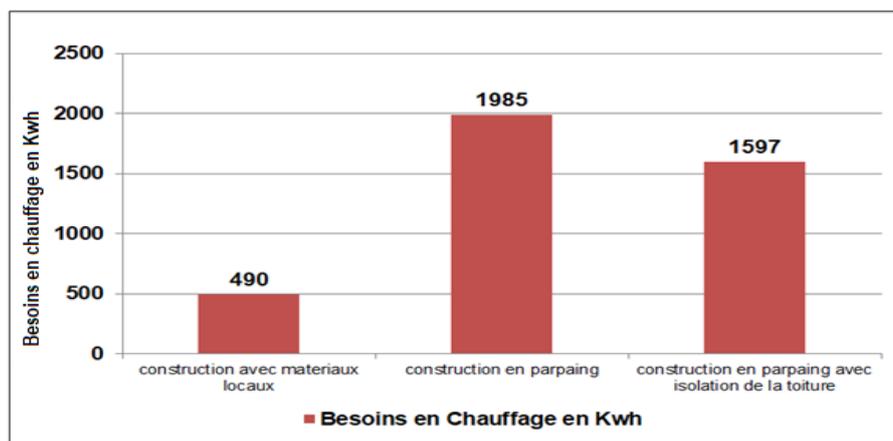


Figure 4.21: Comparaison des besoins en chauffage

Les besoins en chauffage ont été estimés à 490 kWh /an d'une moyenne de 6 kWh /m² /an dans la maison avec matériaux locaux. Alors qu'ils ont été estimés à 1985 kWh /an d'une moyenne de 23 kWh /m²/an dans le cas de la maison avec matériaux modernes (**Figure 4.21**). Ce qui confirme l'impact du choix des matériaux de construction sur la performance énergétique du cas étudié. Mais après intégration de l'isolation dans la toiture les besoins ont diminué jusqu'à 1597 kWh /an d'une moyenne de 18 kWh /m² /an.

A travers les résultats obtenus de l'étude paramétrique effectuée sur le cas d'étude n°02, nous avons constaté que même dans le cas le plus performant est qui est celui de la maison avec matériaux locaux, la consommation énergétique dépasse le seuil de 50Kwh/ m² pour chauffage et

climatisation et ça est dû au taux de consommation énergétique durant la période estivale.

Malgré que le confort n'est pas atteint mais l'utilisation des anciens procédés constructifs permet de réduire les fluctuations des températures durant les périodes de surchauffe et d'atteindre des écarts de 9°C à 10°C. mais cette typologie a été abandonnée et remplacée par celle moderne, dans laquelle il a été constaté l'utilisation de nouvelles techniques constructives. Cet abandon a engendré la perte du patrimoine architectural, l'inconfort et la surconsommation énergétique, pour cette raison nous avons choisi d'étudier différents cas de maisons modernes de la région d'In Saleh (cas 03 et cas 04), dont le but de tirer les recommandations nécessaires pour améliorer leurs performances ainsi que la création d'un modèle adaptatif.

4.4 Résultats et discussions du cas d'étude n° 03 :

Les simulations thermiques dynamiques du cas d'étude n°03 ont été faites sans et avec consigne de thermostat sur les quatre variantes (A, B, C, D) durant la période hivernale et estivale. Ce qui nous a permis d'avoir les résultats suivants :

4.4.1 Simulation sans consigne de thermostat durant la période estivale

- Résultats de la variante A

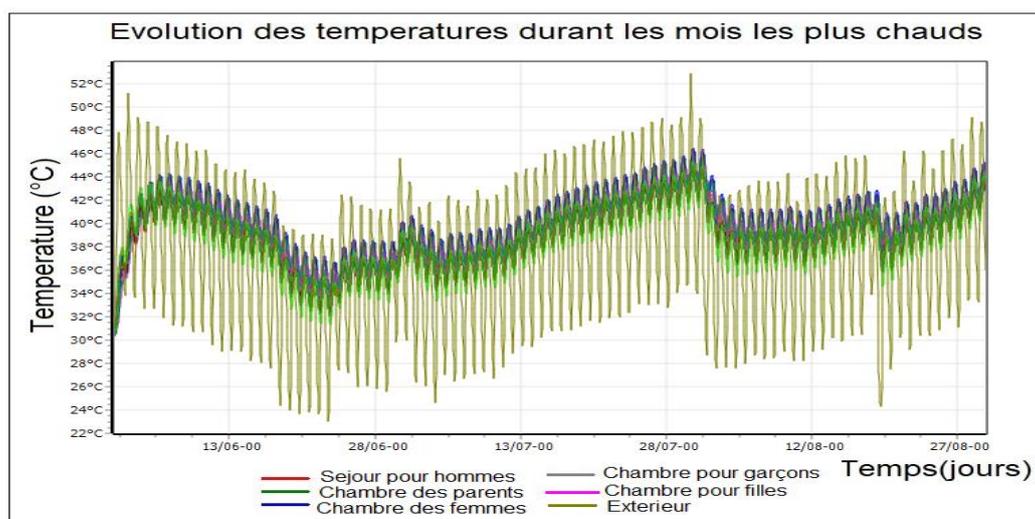


Figure 4.22: Evolution des températures durant la période la plus froide de la variante A

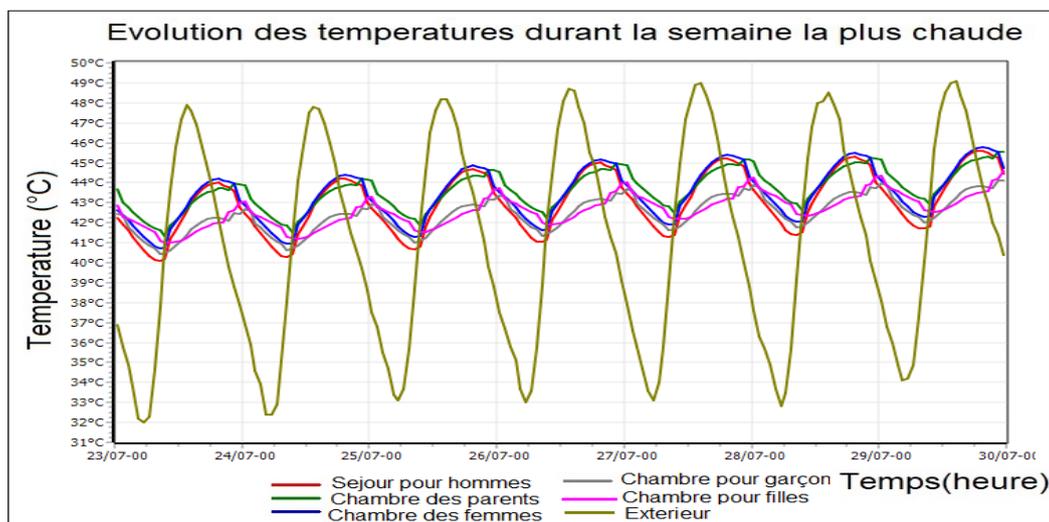


Figure 4.23: Evolution des températures durant la semaine la plus chaude de la variante A

D'après les résultats obtenus, Il a été constaté que les températures extérieures peuvent atteindre jusqu'à 49°C durant la période de surchauffe, mais dans les espaces dont la toiture est de type 01, Nous avons constaté que les températures intérieures suivent les fluctuations des températures extérieures et peuvent atteindre jusqu'à 45°C ,(Voir **Figures 4.22,4.23**) ,l'écart a été estimé à 3°C.Ce comportement thermique est dû à l'ajout des briques d'adobe dans les murs construits en parpaing (voir composition du mur type 02 sur le **Tableau 3-5**) malgré que la toiture soit construite en hourdis.

Alors qu'il a été aussi constaté que dans les espaces avec la toiture type 02 (voir composition de la toiture type 02 présentée sur le **Tableau 3-5**), les températures sont presque constantes et varient de 42 C° à 43C°, l'écart a été estimé à 5°C durant la période de surchauffe et ça est dû à l'ajout du mortier de terre et des briques d'adobe dans la toiture(modifications faites par le propriétaire).

• Résultats de la variante B :

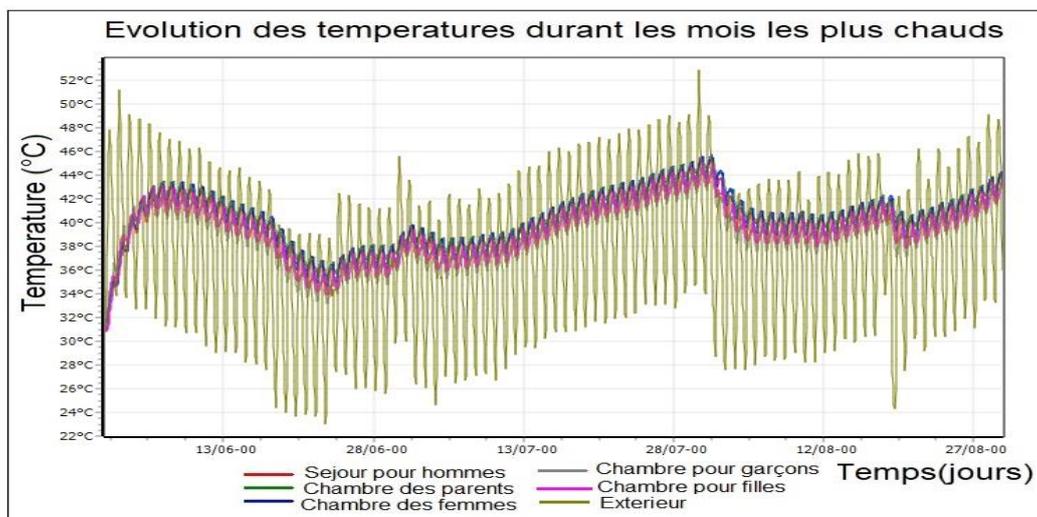


Figure 4.24: Evolution des températures durant la période la plus froide de la variante B

Après intégration des briques d’adobe et le mortier de terre dans la toiture type 01 (Voir composition de la toiture améliorée type 01 présentée sur **Tableau 3-6**), nous avons constaté que les températures ont diminué avec une variation de 41°C à 43°C dans les espaces orientés Ouest (voir **Figures 4.24 et 4.25**), l’écart peut atteindre 4°C par rapport aux températures extérieures.

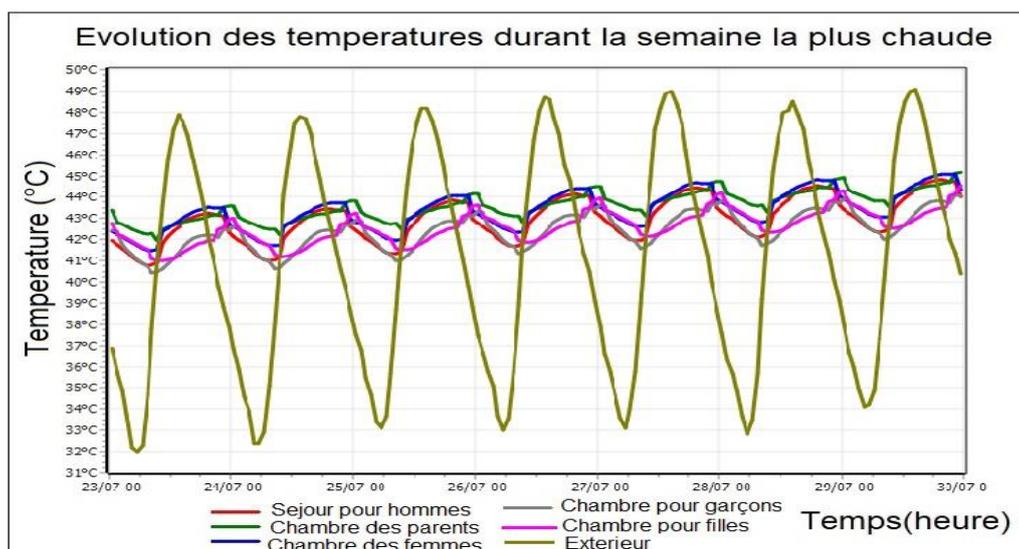


Figure 4.25: Evolution des températures durant la semaine la plus chaude de la variante B

- Résultats de la variante C (Toiture améliorée 01):

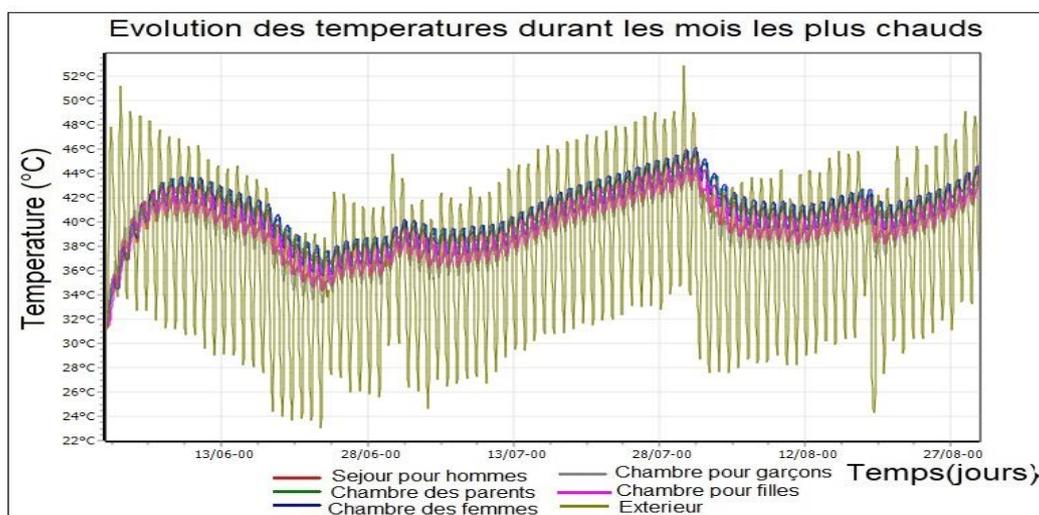


Figure 4.26: Evolution des températures durant la période la plus chaude de la variante C

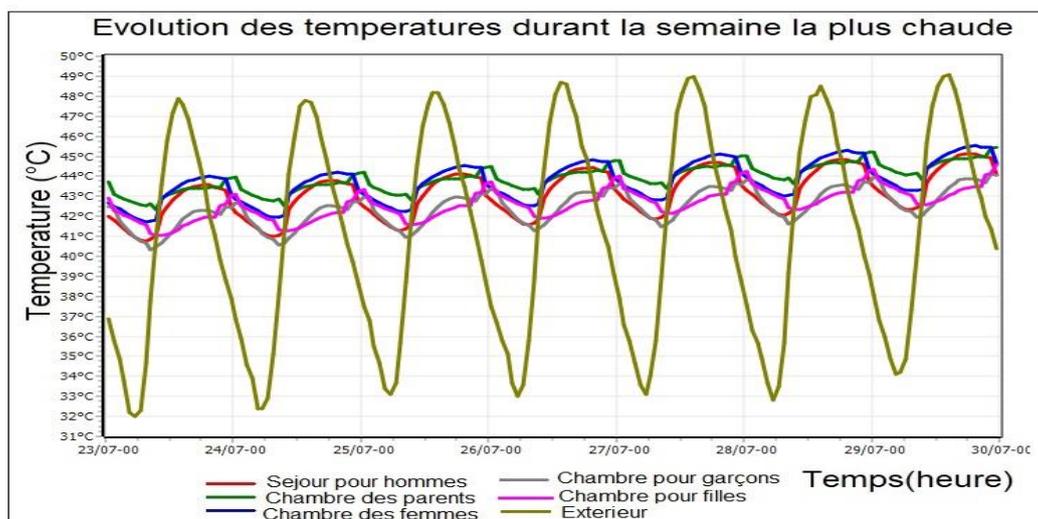


Figure 4.27: Evolution des températures durant la semaine la plus chaude de la variante C

Les figures 4.26 et 4.27 représentent les résultats de la variante C, les températures sont devenues presque constantes dans les différents espaces du cas étudié, l'écart varie de 6°C à 7°C dans les différents espaces. L'intégration des matériaux naturels isolants ainsi que le mortier de terre amélioré par l'ajout de 5% de fibre du palmier dattier (Voir composition de la toiture 01 améliorée présentée sur le **Tableau 3-6**) ont permis de réduire les fluctuations des températures durant la période de surchauffe.

- Résultats de la variante D (Toiture améliorée 02):

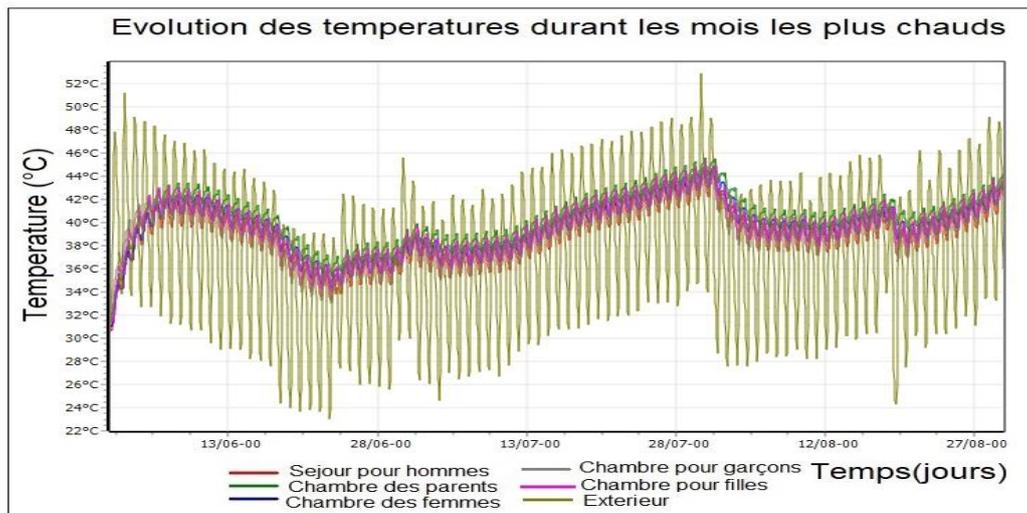


Figure 4.28: Evolution des températures durant la période la plus chaude de de la variante D

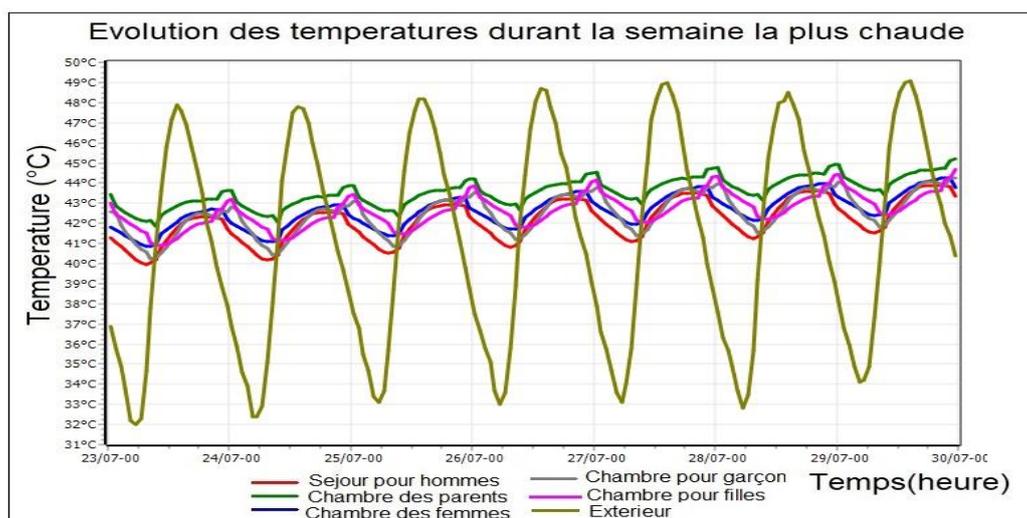


Figure 4.29: Evolution des températures durant la semaine la plus chaude de la variante D

D'après les résultats obtenus de la variante D (voir **Figures 4.28, 4.29**), il a été constaté que les températures sont presque constantes dans les différents espaces après ajout d'une couche de 7 cm d'isolation en pétales de palmier et le traitement de la surface intérieure de la dalle par une couche de plâtre à matériaux de changement de phase (Voir la composition de la toiture améliorée 02 présentée sur le **Tableau 3-7**), cette solution a permis de

stabiliser le profil de température et d'atteindre un écart de 7°C par rapport aux températures extérieures.

4.4.2 Simulation sans consigne de thermostat durant la période hivernale :

- **Résultats de la variante A :**

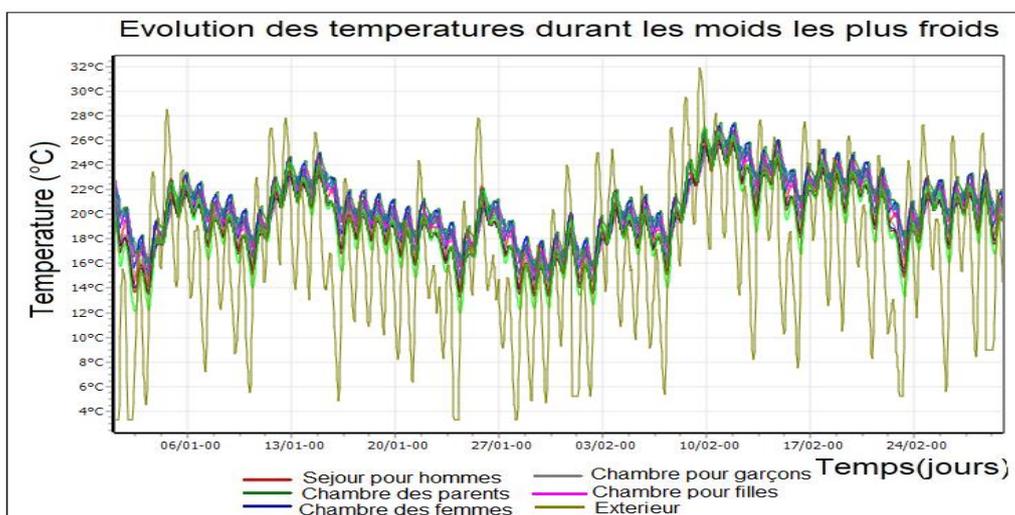


Figure 4.30: Evolution des températures durant la période la plus froide de de la variante A

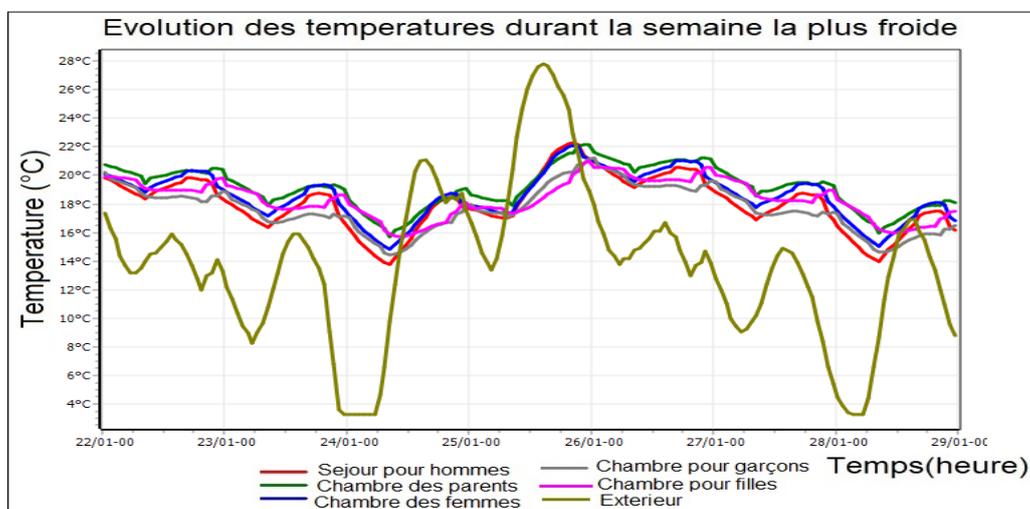


Figure 4.31: Evolution des températures durant la semaine la plus froide de de la variante A

Selon les résultats obtenus de la variante A (voir Figures 4.30, 4.31), il a été constaté que les températures extérieures peuvent baisser jusqu'à 3°C durant la période la plus froide de l'année. Alors que les températures dans les différents espaces varient entre 16°C et 18°C.

- Résultats de la variante B :

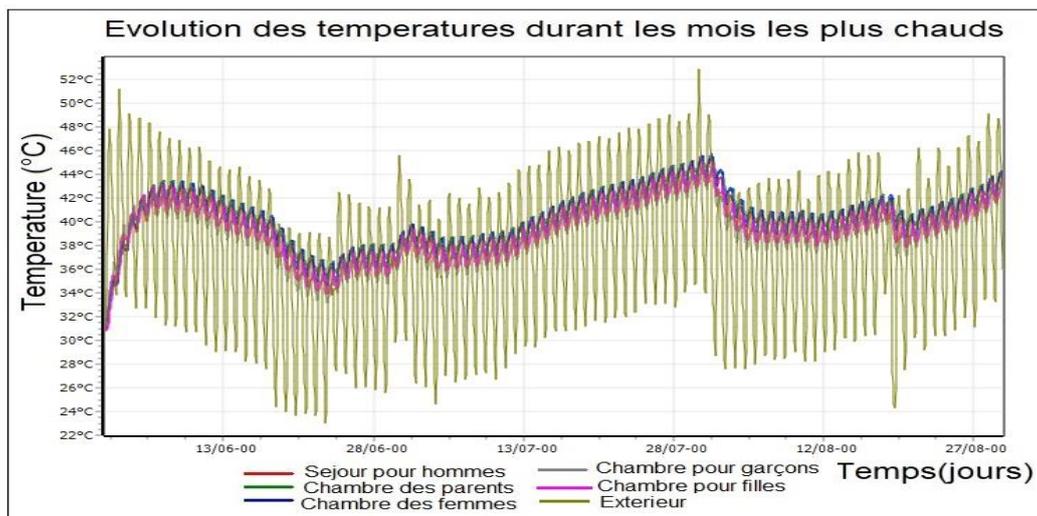


Figure 4.32: Evolution des températures durant la période la plus froide de de la variante B

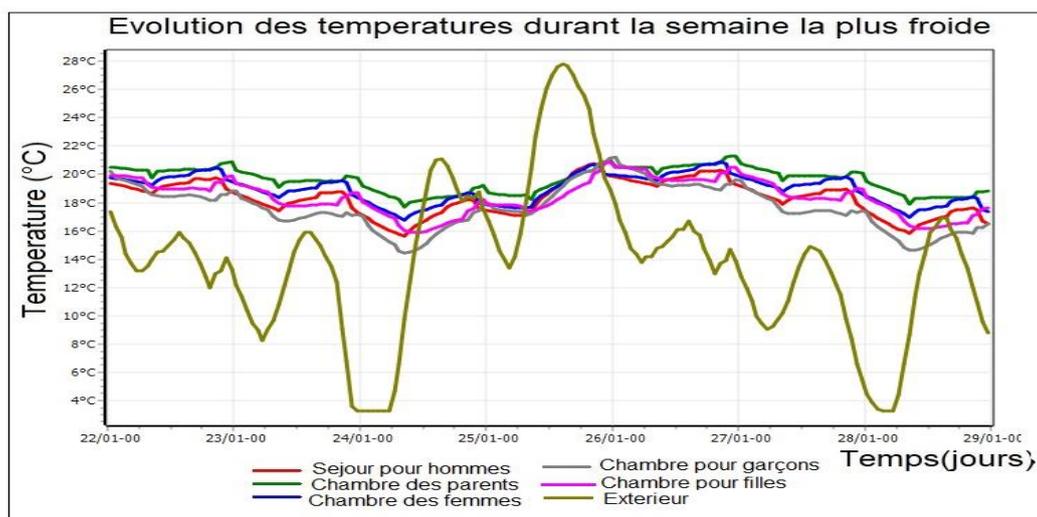


Figure 4.33: Evolution des températures durant la semaine la plus froide de de la variante B

Après intégration des briques d'adobe et le mortier de terre classique dans la toiture type 01, il a été constaté que les températures ont augmenté et varient entre 18°C et 20°C (voir **Figures 4.32,4.33**) dans les différents espaces, Il a été aussi constaté que les températures dans les espaces qui donnent sur le jardin (orientation ouest) sont devenues conformes à la plage de confort car ces espaces peuvent en profiter des apports solaires durant la période hivernale (voir plan présentée sur la **Figure 3.3**).

- Résultats de la variante C (Variante améliorée 01) :

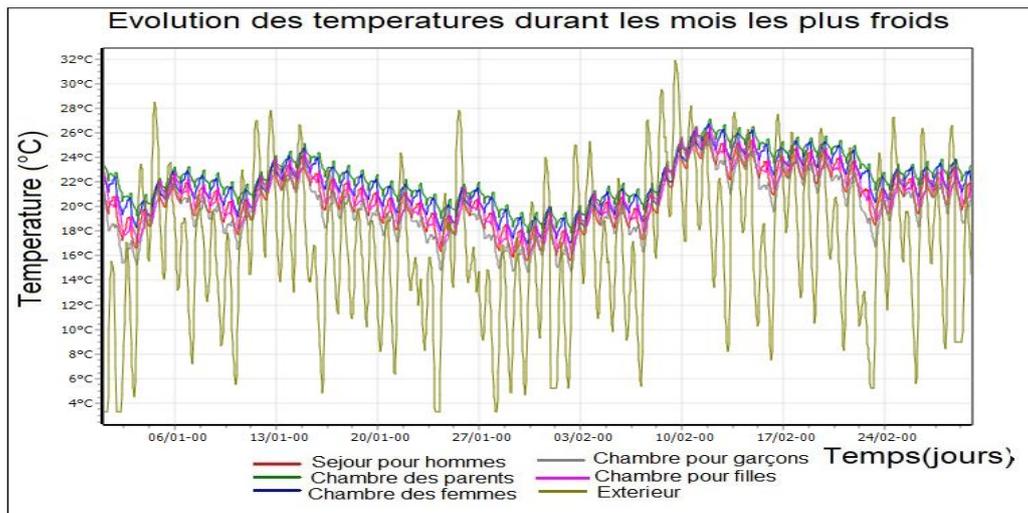


Figure 4.34: Evolution des températures durant la période la plus froide de de la variante C

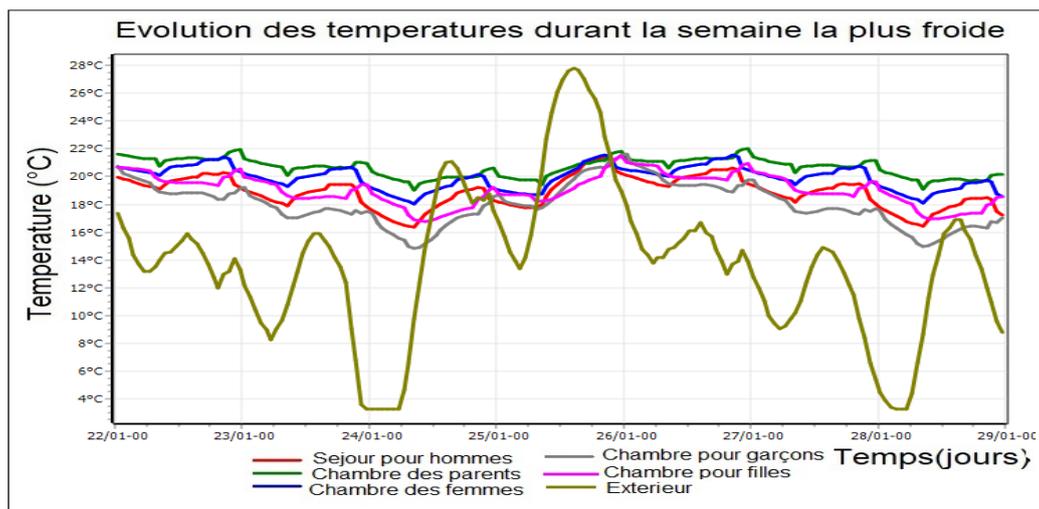


Figure 4.35: Evolution des températures durant la semaine la plus froide de de la variante C

Les résultats de la variante C et qui sont présentés sur les **Figures 4.34,4.35** ont montré que les températures intérieures ont atteint la plage de confort après renforcement de la toiture par l'intégration de l'isolation (voir **Tableau 3-6**), avec des températures qui varient de 20 °C à 22°C dans tous les espaces. Le confort est garanti sans recourir à un système de chauffage.

- **Résultats de la variante D :**

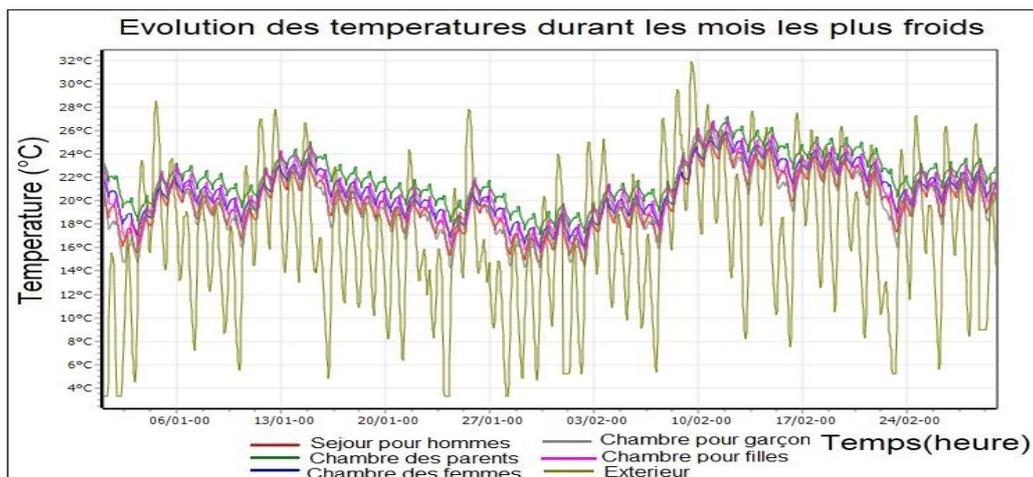


Figure 4.36: Evolution des températures durant la période la plus froide de la variante D

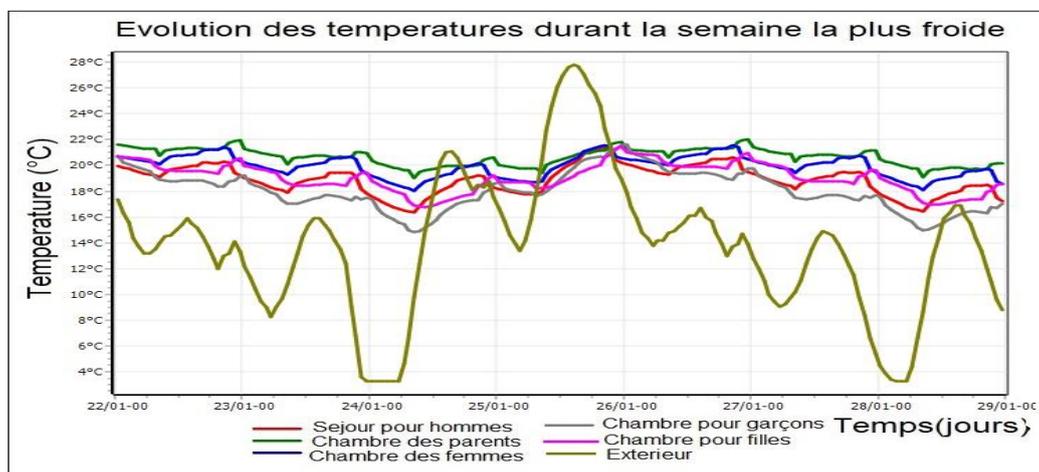


Figure 4.37: Evolution des températures durant la semaine la plus froide de la variante D

Les températures intérieures ont atteint la plage de confort, après renforcement de la toiture par l'intégration d'une couche de 7 cm d'isolation en pétiote de palmier ainsi que le traitement de la couche intérieure de la dalle par un enduit en plâtre à matériaux à changement de phase, les températures intérieures varient de 19°C à 21°C dans tous les espaces durant la période la plus froide de l'année (Voir **Figures 4.36,4.37**).

La proposition de composition de toiture de la variante D (**Voir Tableau 3-7**) peut être une solution adéquate pour le renforcement de la toiture en hourdis et permet d'améliorer la performance des habitations du climat aride surtout durant la période estivale.

4.4.3 Simulation avec consigne de thermostat :

Afin de déterminer les besoins en chauffage et climatisation, nous avons intégré la consigne de thermostat dans les différents cas étudiés durant la période estivale et hivernale.

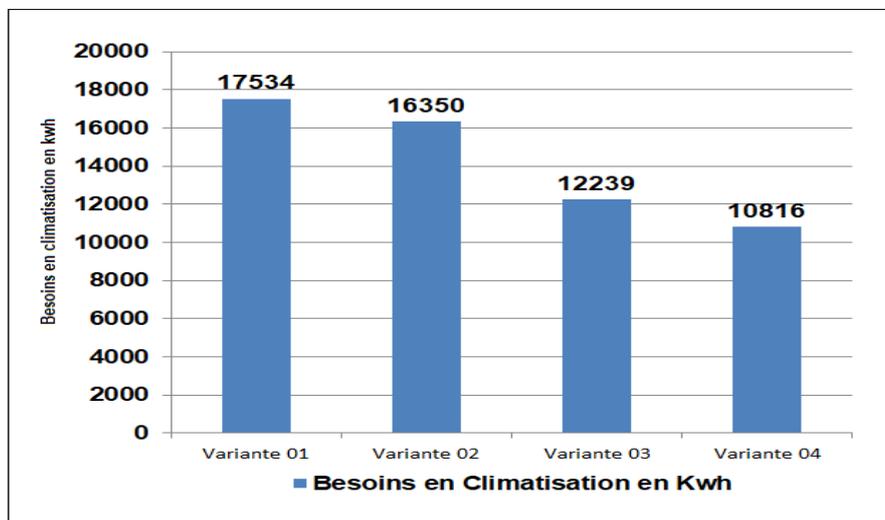


Figure 4.38: Comparaison des besoins en climatisation

La Figure 4.38 représente les besoins en climatisation et qui ont été estimés à 17535 kWh d'une moyenne de 212 kWh/m²/an pour la variante **A**, à 16350 kWh d'une moyenne de 198 kWh/m²/an pour la variante **B**, à 12239 kWh d'une moyenne de 148 kWh/m²/an pour la variante **C** et à 10816 kWh d'une moyenne de 131 kWh/m²/an pour la variante **D**. Les résultats obtenus montrent que la variante **D** est la plus performante durant la période estivale.

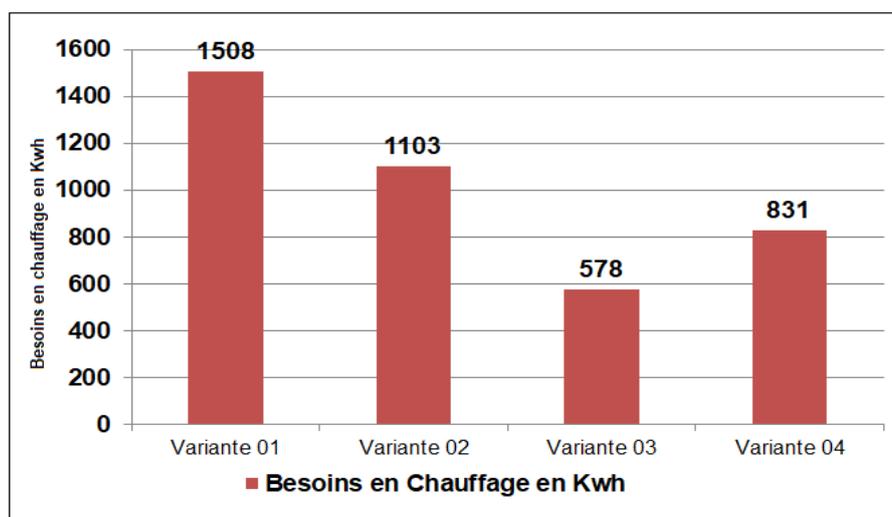


Figure 4.39: Comparaison des besoins en chauffage

La Figure 4.39 représente la comparaison des besoins en chauffage pour les différentes variantes, et qui ont été estimés à 1508 kWh d'une moyenne de 18 kWh/m² /an pour la variante **A**, à 1103 kWh d'une moyenne de 13 kWh/m² /an pour la variante **B**, à 578 kWh d'une moyenne de 7 kWh/m² /an pour la variante **C** et à 831 kWh d'une moyenne de 10 kWh/m² /an pour la variante **D**.

A travers les résultats obtenus nous constatons que la variante **C** est la plus performante durant le période hivernale par rapport aux autres variantes.

D'après les résultats obtenus, le renforcement de la toiture a contribué à l'amélioration de l'efficacité énergétique du cas étudié. Les résultats de simulation de la variante C ont montré que le taux de réduction de consommation a été estimé à 60% pour le chauffage et à 30% Pour la climatisation par rapport au cas initial (variante A) (**Voir Figures 4.38, 4.39**). Aussi les résultats de la simulation de la variante D ont montré que la solution proposée permet d'améliorer l'efficacité énergétique du cas étudié, le taux de réduction a été estime à 45% Pour le chauffage et à 38% Pour la climatisation.

4.5 Résultats et discussions du cas d'étude n°04 :

4.5.1 Résultats de la variante Etat des lieux

- **Simulation estivale sans consigne de thermostat durant la période estivale (Etat des lieux) :**

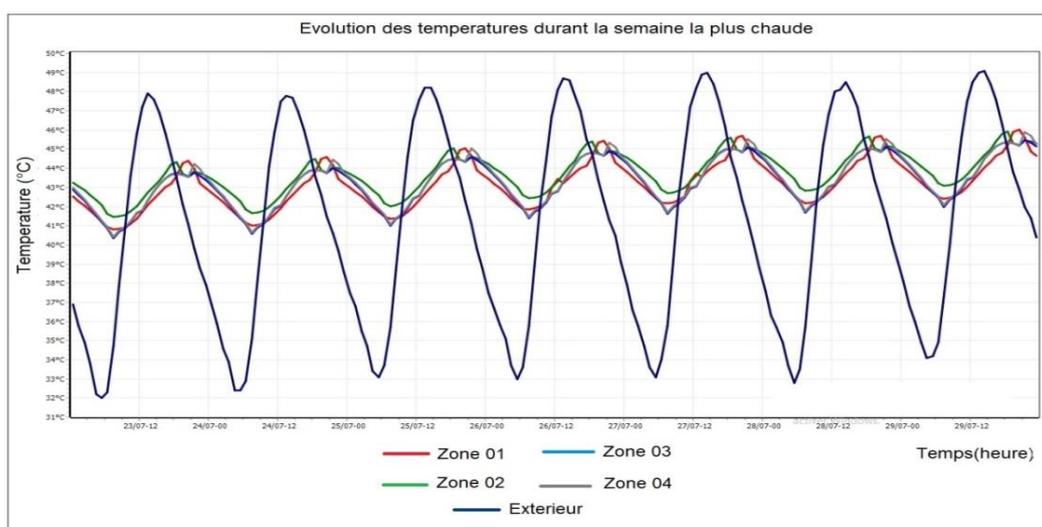


Figure 4.40: Evolution des températures de la variante (Etat des lieux) durant la semaine la plus chaude

- **Simulation estivale sans consigne de thermostat durant la période hivernale (Etat des lieux) :**

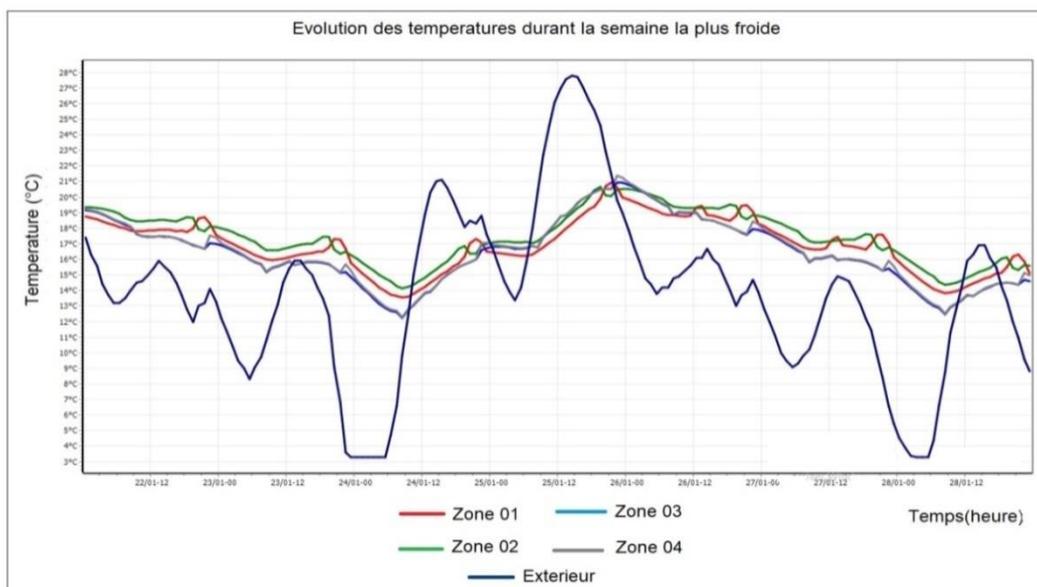


Figure 4.41: Evolution des températures de la variante (Etat des lieux) durant la semaine la plus froide

D'après les résultats obtenus et qui sont montrés sur la **Figure 4.40**, Les températures extérieures varient de 27°C à 49°C durant la semaine la plus chaude de l'année, et que les températures intérieures suivent les fluctuations des températures extérieures et ça est dû à la faible inertie thermique des matériaux de construction utilisés (parpaing dans la construction des murs ainsi que l'hourdis et le béton dans la toiture), à la valeur élevée des coefficients de transmission des éléments constructifs et qui sont respectivement estimés pour les murs et la toiture à 2.28 W/m² °C 2.33 W/m² °C (voir **Tableau3-5** et **Tableau 3-8**), ainsi qu'à la typologie extravertie du cas étudié. Les températures peuvent atteindre 46°C dans la zone 01(sejour1+sejour 2) du à son orientation Sud, et atteindre respectivement 45,19°C, 45,20°C et 45.15°C dans la zone 02, Zone 03 et la zone 04.

Les fluctuations des températures ont été aussi constatées durant la période hivernale avec des températures qui peuvent atteindre 20°C dans les différentes zones et baisser respectivement jusqu'à 13.54°C,14.15°C,12.23°C et 12.31°C dans les zones 01,02,03 et 04 (voir **Figure 4.41**).

- **Simulation avec consigne de thermostat :**

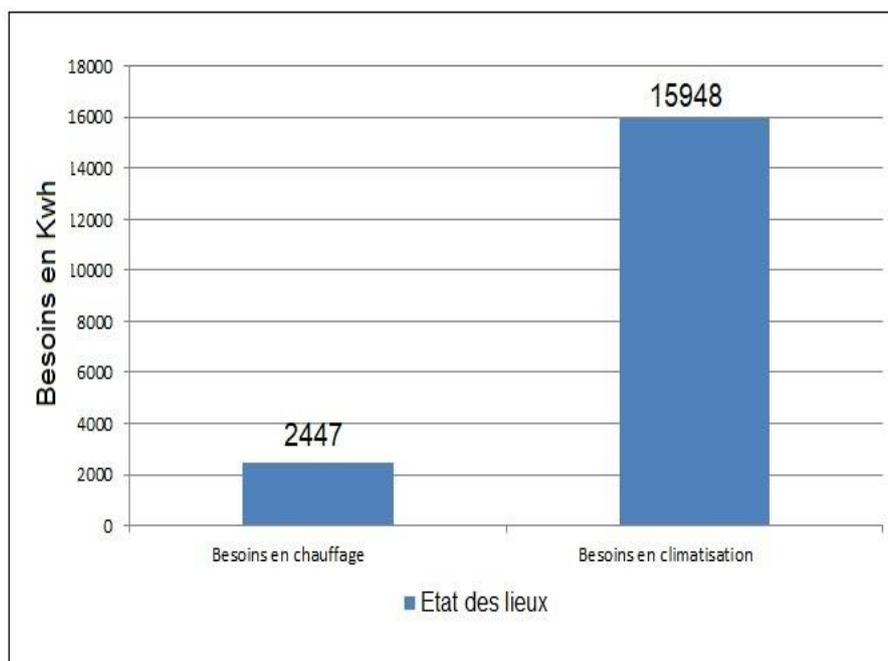


Figure 4.42: Besoins en chauffage et climatisation de variante Etat des lieux

La simulation avec consigne de thermostat, nous a permis de définir les besoins en climatisation et ceux en chauffage. Les besoins en climatisation ont été estimés à 15948 kWh /an d'une moyenne de 215 kWh /m² /an et ceux du chauffage ont été estimés à 2447 kWh /an d'une moyenne de 33 kWh /m² /an (**Voir Figure 4.42**). Afin d'améliorer l'efficacité énergétique du cas étudié, nous avons fait une étude paramétrique qui nous a permis de vérifier l'impact des solutions passives proposées sur le comportement thermique du cas étudié ainsi que sa performance énergétique, les résultats de notre étude paramétrique sont présentés ci-dessous :

4.5.2 Impact du renforcement de la toiture :

Afin de vérifier l'impact de l'isolation de la toiture sur l'évolution des températures et les besoins en chauffage et climatisation du cas d'étude n°04, nous avons fait une étude paramétrique en variant l'épaisseur de l'isolant, les résultats des différentes variantes sont présentés ci-dessous :

- **Simulation sans consigne de thermostat durant la période estivale :**

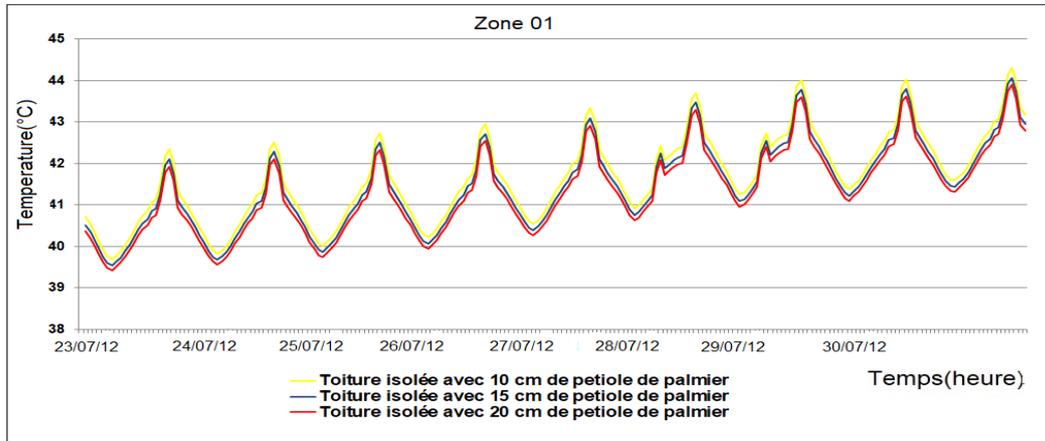


Figure 4.43: Evolution des températures dans la zone 01 durant la semaine la plus chaude

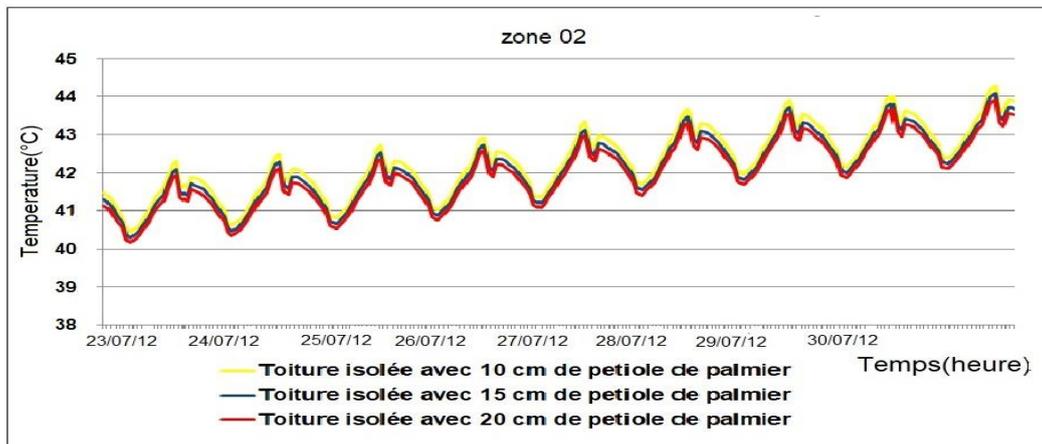


Figure 4.44: Evolution des températures dans la zone 02 durant la semaine la plus chaude

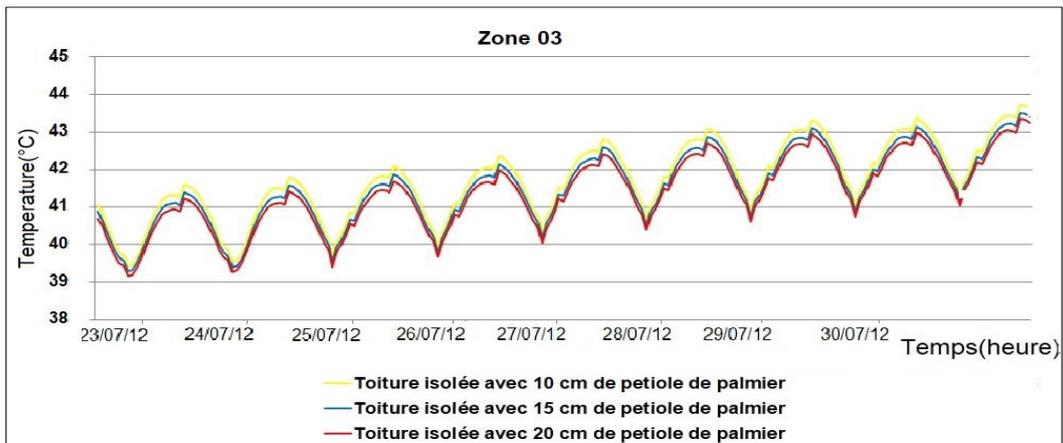


Figure 4.45: Evolution des températures dans la zone 03 durant la semaine la plus chaude

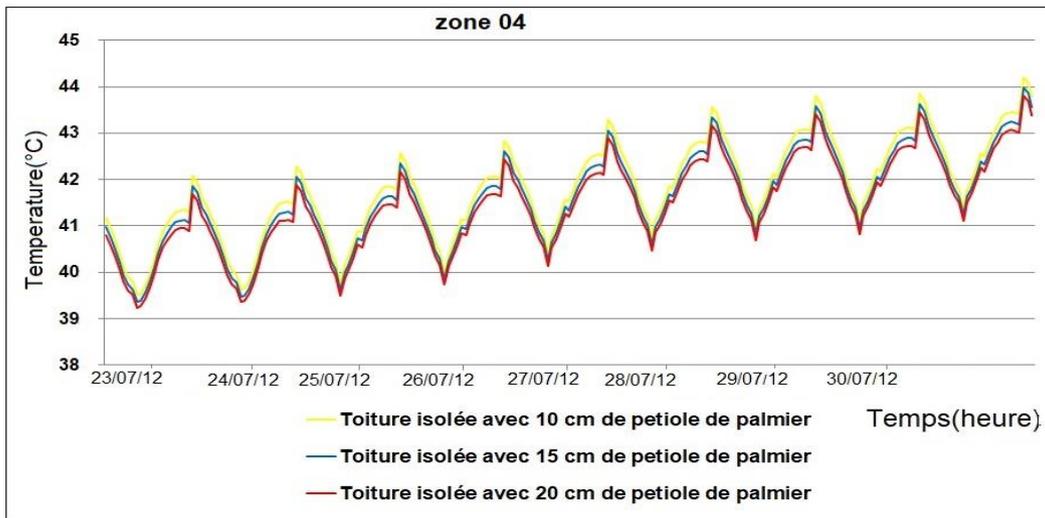


Figure 4.46: Evolution des températures dans la zone 04 durant la semaine la plus chaude

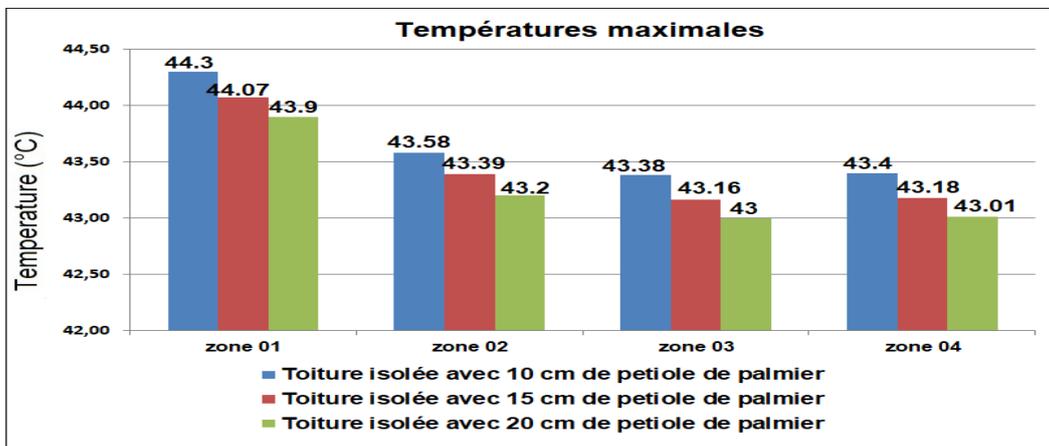


Figure 4.47: Comparaison des températures maximales dans les différentes zones (période estivale).

L'intégration de l'isolation dans la toiture a permis de réduire les fluctuations des températures intérieures durant la période estivale dans les différentes zones thermiques (voir **Figures 4.44-4.46**). L'augmentation de l'épaisseur de l'isolant a permis aussi de baisser les températures durant la période estivale (Voir **Figure 4.47**), et qui peuvent respectivement atteindre 44.30°C, 43.58°C, 43.38°C, 43.40°C dans les zones 01, 02, 03 et 04 dans le cas du renforcement de la toiture par 10 cm de pétiole de palmier, 44.07°C, 43.39°C, 43.16°C et 43.18°C dans celui du renforcement de la toiture par 15 cm de pétiole de palmier et 43.90°C, 43.2°C, 43°C et 43.01°C dans les zones 01, 02, 03 et 04 dans celui du renforcement de la toiture par 20 cm de pétiole de palmier.

Les résultats ont montré que l'utilisation d'une épaisseur de 20 cm d'isolation dans la toiture permet de minimiser les fluctuations et réduire les températures de 0.4°C par rapport à la variante dont l'épaisseur est de 10 cm.

- **Simulation sans consigne de thermostat durant la période hivernale**

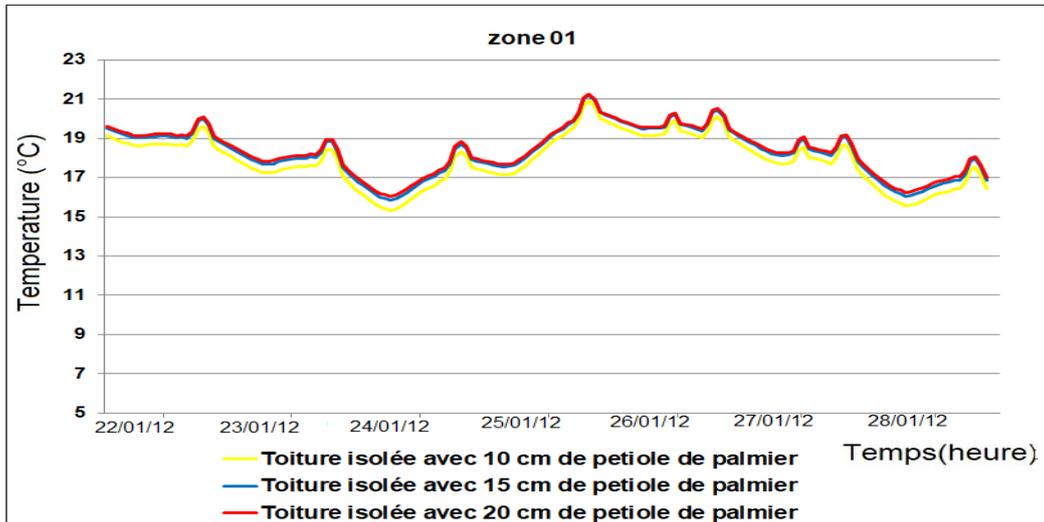


Figure 4.48: Evolution des températures dans la zone 01 durant la semaine la plus froide

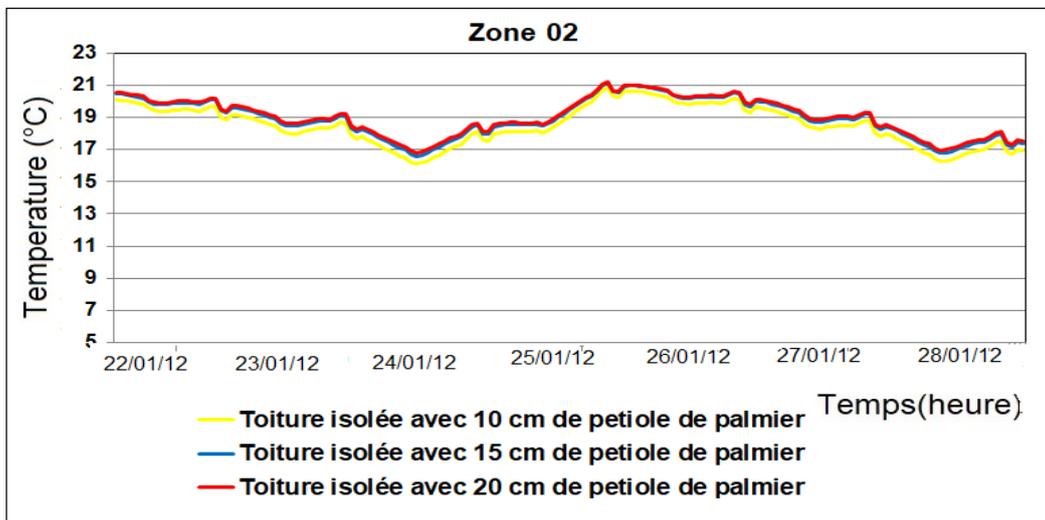


Figure 4.49: Evolution des températures dans la zone 02 durant la semaine la plus froide

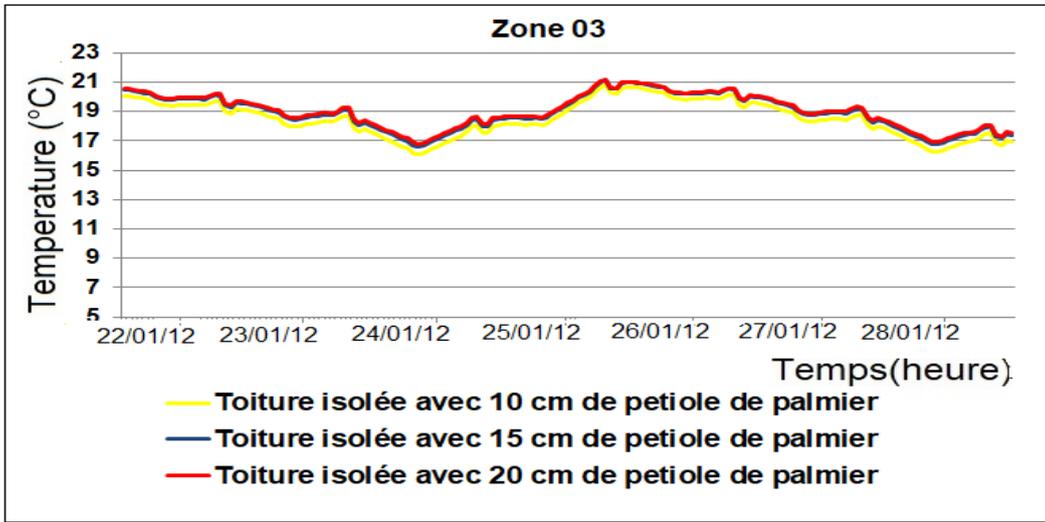


Figure 4.50: Evolution des températures dans la zone 03 durant la semaine la plus froide

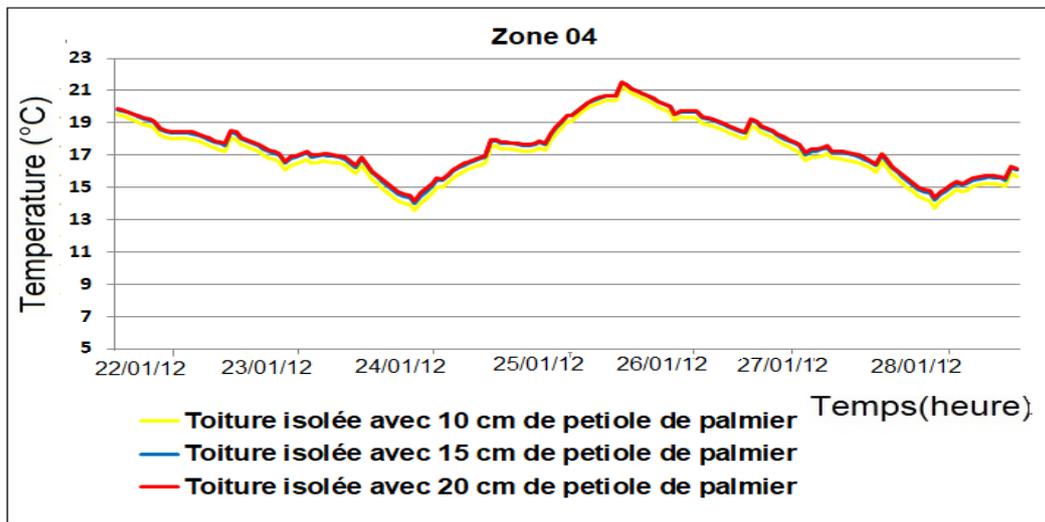


Figure 4.51: Evolution des températures dans la zone 04 durant la semaine la plus froide

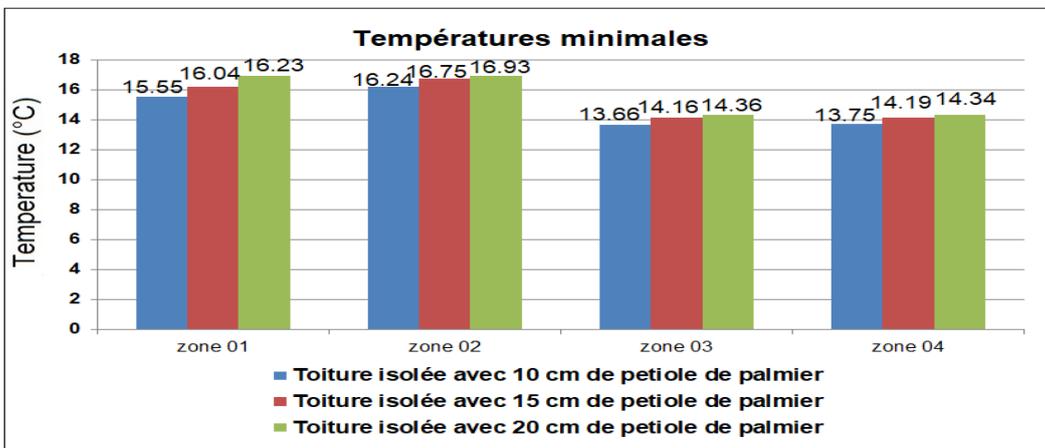


Figure 4.52: Comparaison des températures minimales dans les différentes zones (période hivernale).

La réduction des fluctuations des températures suite à l'augmentation de l'épaisseur de l'isolant a été aussi constatée durant la période hivernale (Voir Figure 4.48-4.52). Les températures peuvent respectivement baisser dans les zones 01, 02,03 et 04 à 15.55°C, 16.24°C, 13.66°C et 13.75 °C dans le cas du renforcement de la toiture par 10 cm de pétiole de palmier, à 16.04°C, 16.75°C, 14.16°C et 14.19°C dans celle renforcée par 15 cm et à 16.23°C,16.93°C,14.36°C et 14.34°C dans celle renforcée par 20 cm (Voir **Figure 4.52**). L'écart de température obtenu par l'utilisation de l'épaisseur de 20 cm est de 0.5°C par rapport à l'utilisation d'une épaisseur de 10 cm d'isolation.

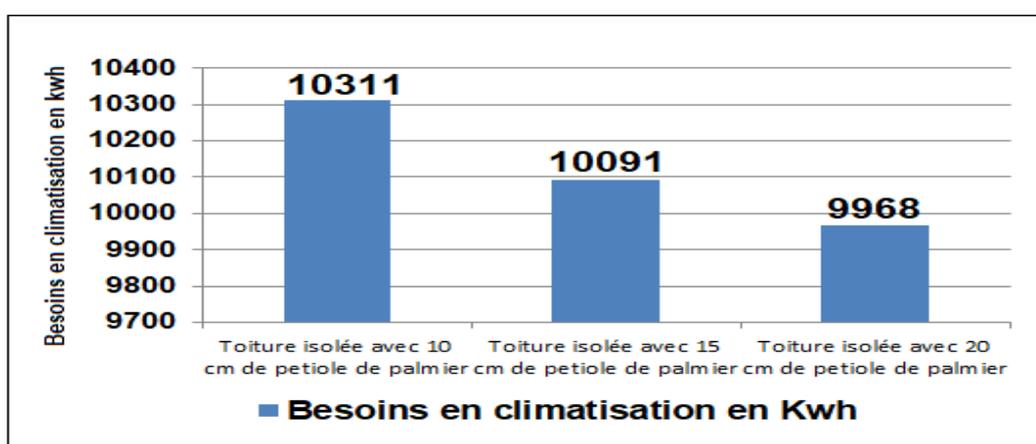


Figure 4.53: Comparaison des besoins en climatisation

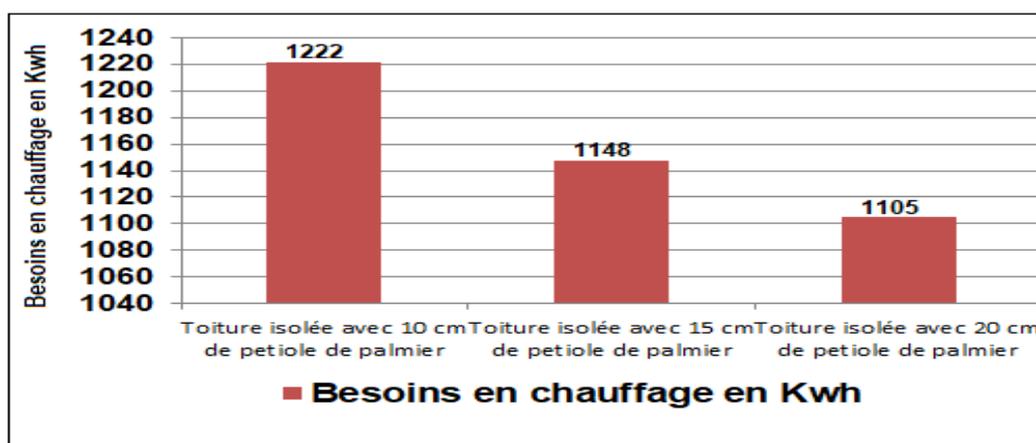


Figure 4.54: Comparaison des besoins en chauffage

Les Figures 4.53 et 4.55 représentent les besoins en climatisation et en chauffage des différentes épaisseurs d'isolation de toiture proposées. Les résultats ont montré que les besoins en climatisation ont été estimés à 10311 kWh/an dans le cas de la toiture isolée avec 10 cm de pétiole de palmier, d'une

moyenne de 139 kWh /m² /an, à 10091 kWh /an d'une moyenne de 136 kWh /m² /an pour celle isolée avec 15 cm et à 9968 kWh /an pour celle isolée avec 20 cm de pétiole de palmier d'une moyenne de 134 kWh /m² /an.

Concernant les Besoins en chauffage, ils ont été estimés à 1222 kWh /an dans le cas de la toiture isolée avec 10 cm de pétiole de palmier, d'une moyenne de 16 kWh /m² /an, à 1148 kWh /an d'une moyenne de 15 kWh /m² /an pour celle isolée avec 15 cm et à 1105 kWh /an pour celle isolée avec 20 cm de pétiole de palmier d'une moyenne de 15 kWh /m² /an.

D'après les résultats obtenus, la variante ayant une épaisseur de 20 cm d'isolation a permis de réduire les besoins en climatisation et chauffage par rapport aux autres épaisseurs proposées, le taux de réduction en climatisation a été estimé à 3% et celui en chauffage a été estimé à 10% par rapport à la variante ayant une épaisseur de 10 cm. la composition retenue pour les autres simulations est celle d'une toiture isolée en 20 cm pétiole de palmier.

4.5.3 Renforcement des Murs :

Afin de choisir la composition et l'épaisseur des murs la plus adéquate aux conditions climatiques de la région étudiée, nous avons fait une étude paramétrique en utilisant la toiture isolée en 20 Cm de pétiole de palmier avec variation des matériaux de construction des murs extérieurs ainsi que leurs épaisseurs. Les résultats des différentes variantes étudiées sont présentés ci-dessous :

- **Simulation sans consigne de thermostat durant la période estivale**

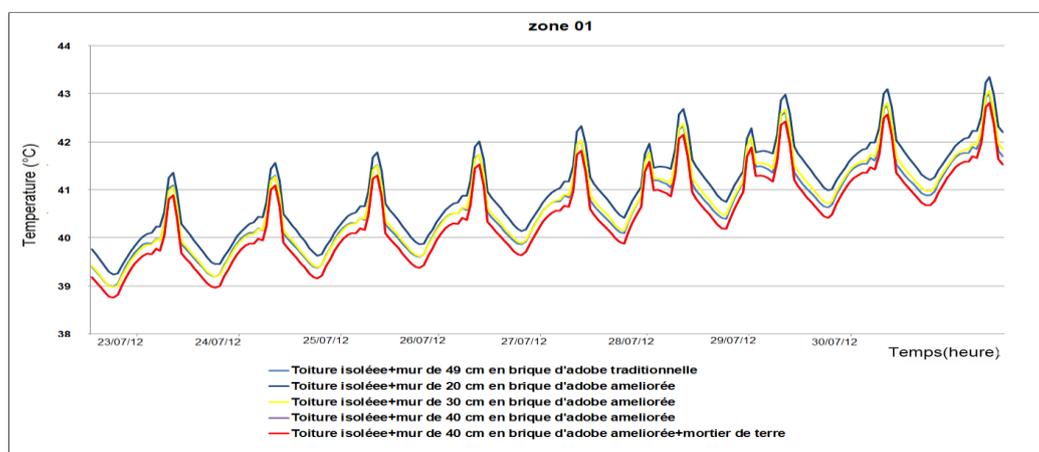


Figure 4.55: Evolution des températures dans la zone 01 durant la semaine la plus chaude

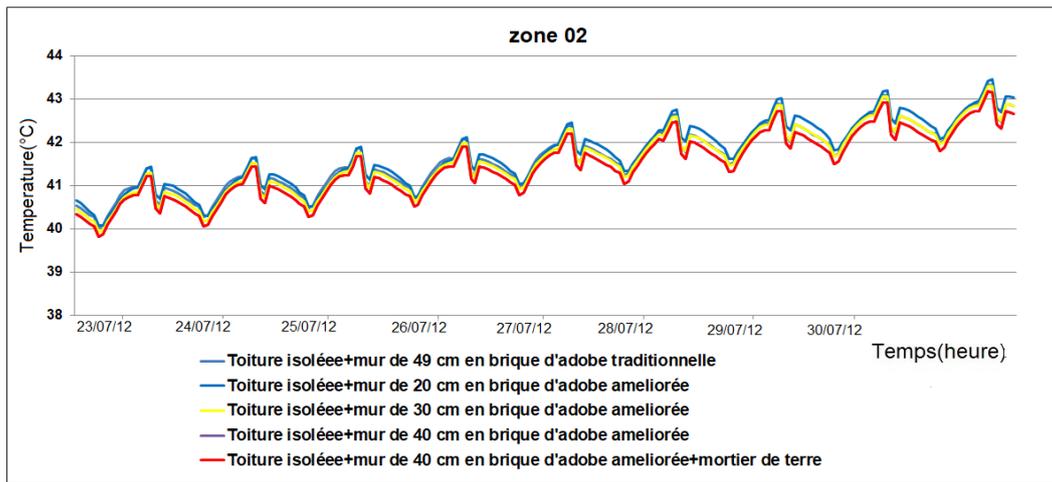


Figure 4.56:Evolution des températures dans la zone 02 durant la semaine la plus chaude

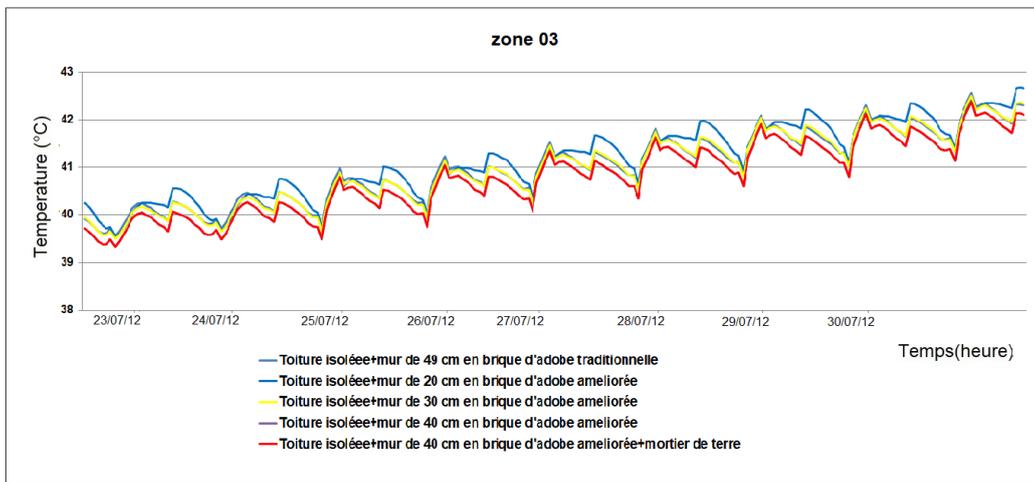


Figure 4.57:Evolution des températures dans la zone 03 durant la semaine la plus chaude

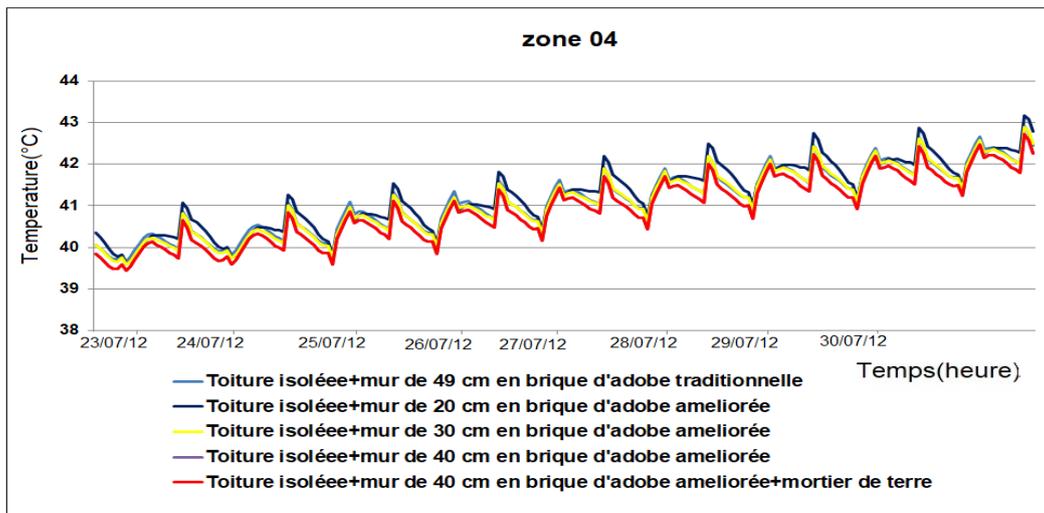


Figure 4.58:Evolution des températures dans la zone 04 durant la semaine la plus chaude

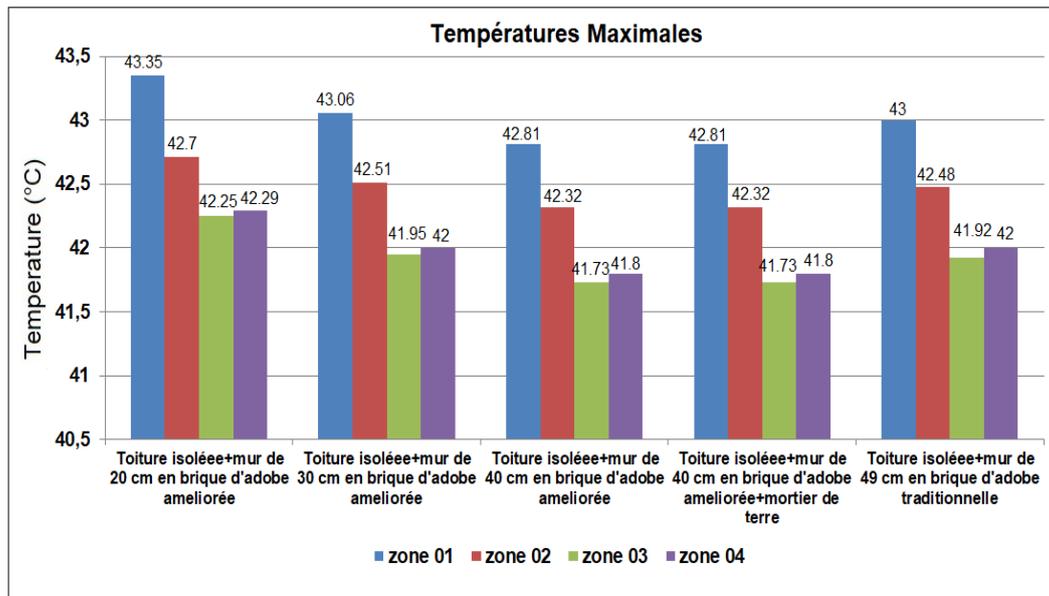


Figure 4.59: Comparaison des températures maximales dans les différentes zones (période estivale).

- Simulation sans consigne de thermostat durant la période hivernale

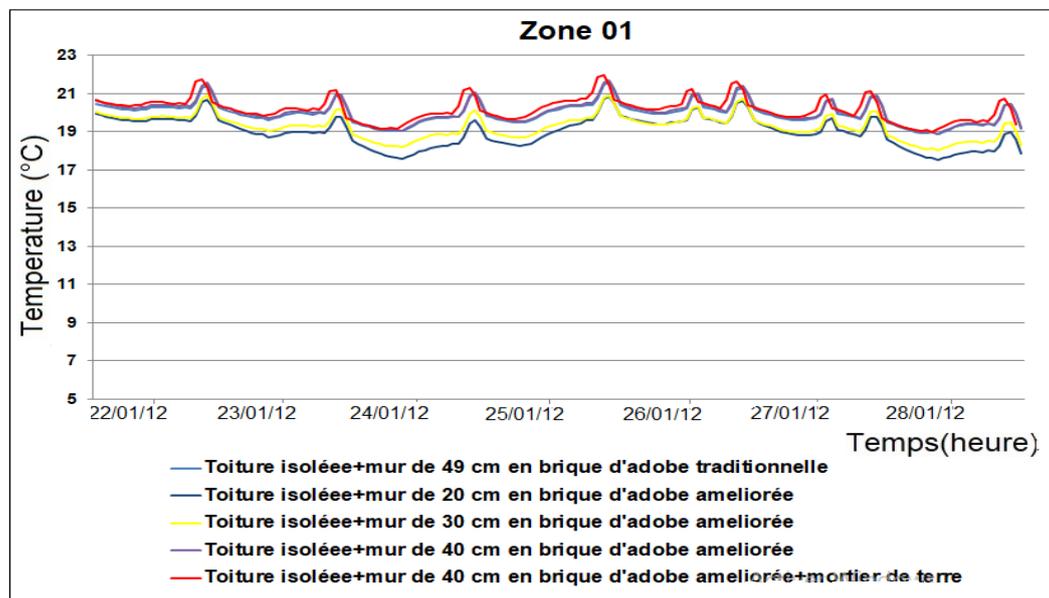


Figure 4.60: Evolution des températures dans la zone 01 durant la semaine la plus froide

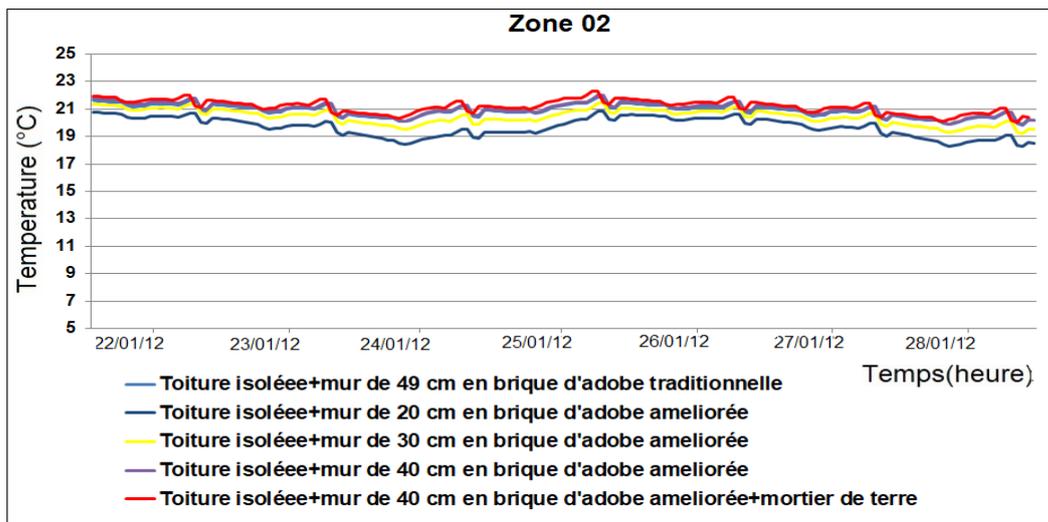


Figure 4.61: Evolution des températures dans la zone 02 durant la semaine la plus froide

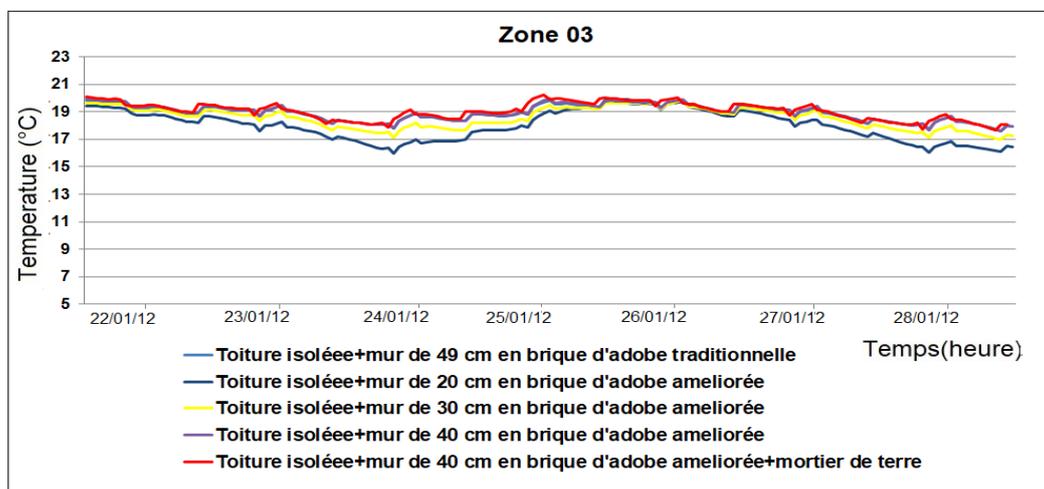


Figure 4.62: Evolution des températures dans la zone 03 durant la semaine la plus froide

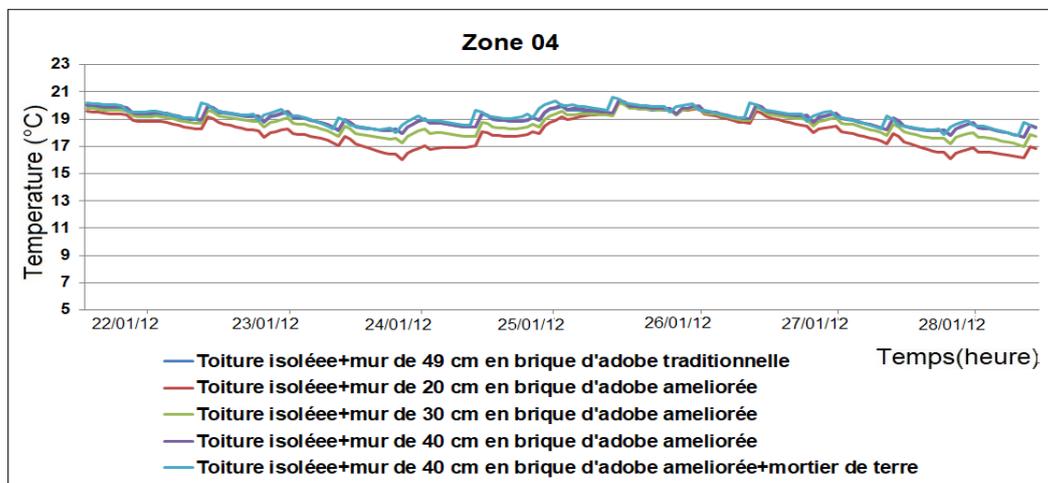


Figure 4.63: Evolution des températures dans la zone 04 durant la semaine la plus froide

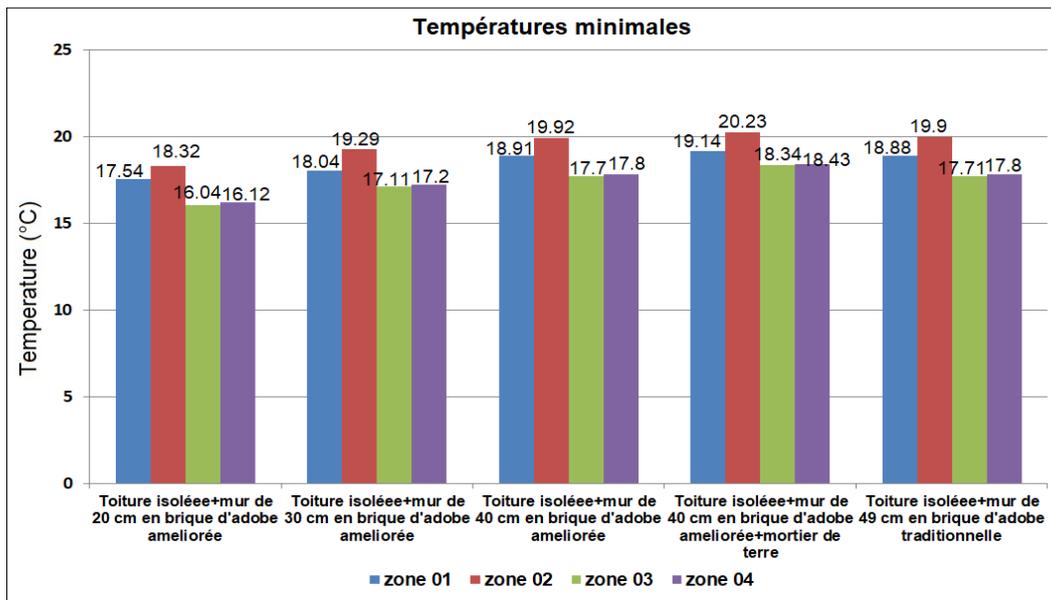


Figure 4.64: Comparaison des températures minimales dans les différentes zones (période hivernale)

Les résultats obtenus des différentes variantes étudiées ont montré que l'augmentation de l'épaisseur des murs extérieurs et l'utilisation de la brique de terre qui se caractérise par sa forte inertie thermique ont permis de réduire les fluctuations des températures durant la période estivale ainsi que celle hivernale (Voir **Figures 4.55-4.59** et **Figures 4.60-4.64**). Les températures maximales durant la période estivale ont été estimées dans le cas de l'utilisation du mur en brique améliorée de 20 cm d'épaisseur (Voir **Figure 4.59**). Nous avons aussi constaté que l'augmentation de l'épaisseur du mur à 40 cm ainsi que l'ajout du mortier de terre ont permis de réduire 0.5°C par rapport à la variante avec mur en brique de terre améliorée ayant une épaisseur de 20 cm.

Et ce qui a été aussi constaté durant la période hivernale l'écart de température a été estimé de 1°C à 1.5°C (Voir **Figure 4.64**). aussi les résultats de la comparaison de l'évolution des températures ont montré que le comportement thermique du mur traditionnel en brique de terre classique ayant 59cm d'épaisseur est similaire à celui d'un mur en brique de terre améliorée ayant une épaisseur de 30cm.

• **Simulation avec consigne de thermostat :**

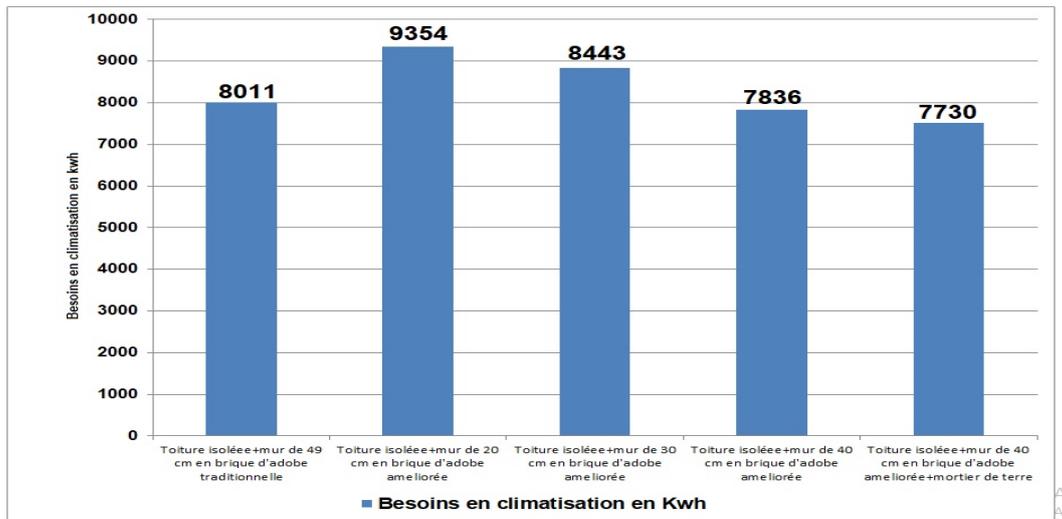


Figure 4.65: Comparaison des besoins en climatisation

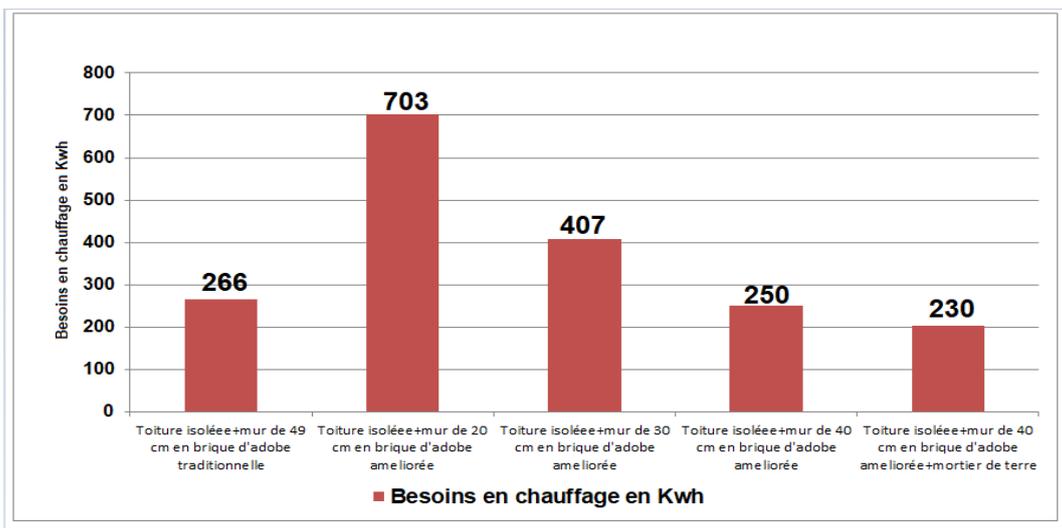


Figure 4.66: Comparaison des besoins en chauffage

Les **Figures 4.65 et 4.66** présentent la comparaison des besoins en chauffage et climatisation des différentes configurations proposées et montrent que les variantes dont le mur est construit en brique de terre améliorée ayant une épaisseur de 40 cm et celle ayant une épaisseur de 40 cm avec ajout de mortier de terre permettent respectivement de réduire les besoins en climatisation de 16% et 17.36% et les besoins en chauffage de 64% et 67% par rapport à la variante ayant une épaisseur de 20 cm de brique de terre .

4.5.4 Impact de l'intégration des protections solaires :

Afin de vérifier l'impact de l'intégration des protections solaires sur le comportement thermique du cas étudié, nous avons fait une étude paramétrique en proposant plusieurs configurations avec variation des dimensions.

4.5.4.1 Impact de l'intégration des protections solaires sur surfaces vitrées :

Afin de choisir la configuration la plus adéquate de brise soleil et qui permet d'améliorer la performance énergétique du cas étudié, nous avons proposé des brises soleil à lames verticales et horizontales avec variation de leurs profondeur. Les résultats sont présentés ci-dessous :

*Brises soleil à lames verticales :

- **Simulation sans consigne de thermostat durant la période estivale :**

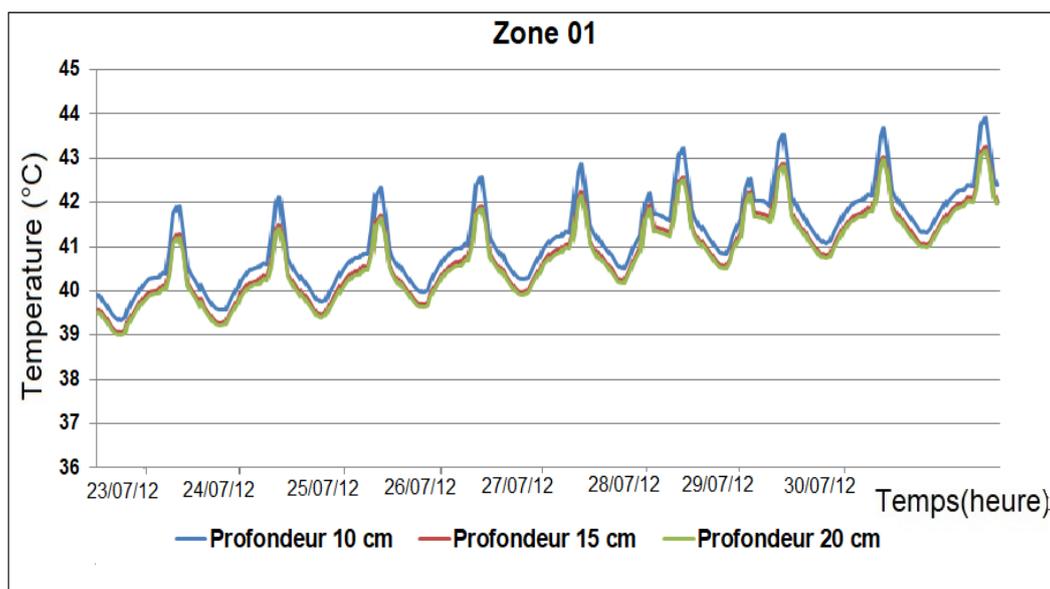


Figure 4.67: Evolution des températures dans la zone 01 durant la semaine la plus chaude

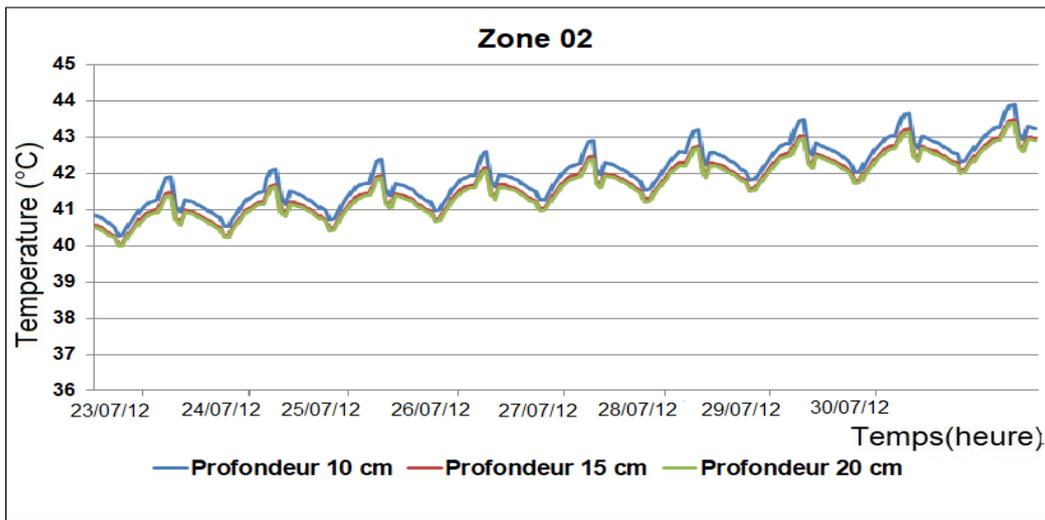


Figure 4.68: Evolution des températures dans la zone 02 durant la semaine la plus chaude

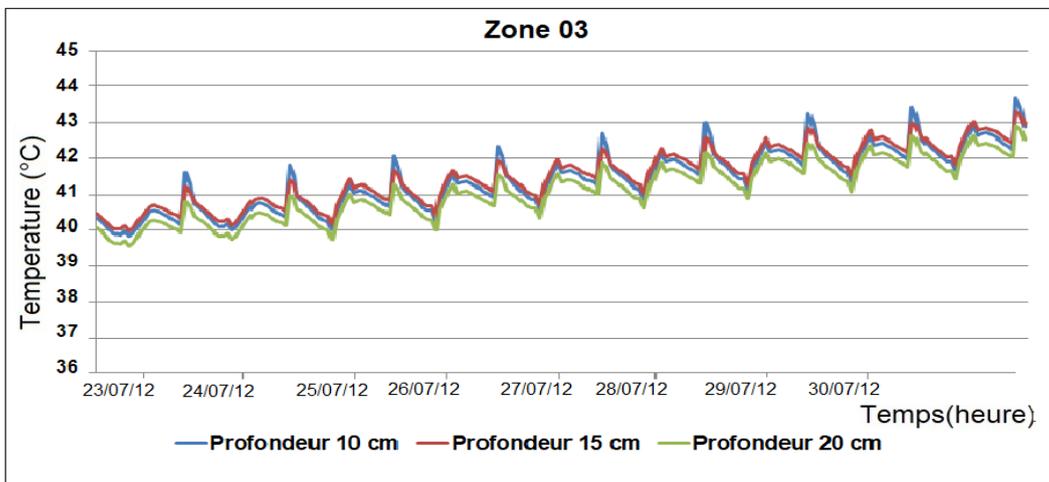


Figure 4.69: Evolution des températures dans la zone 03 durant la semaine la plus chaude

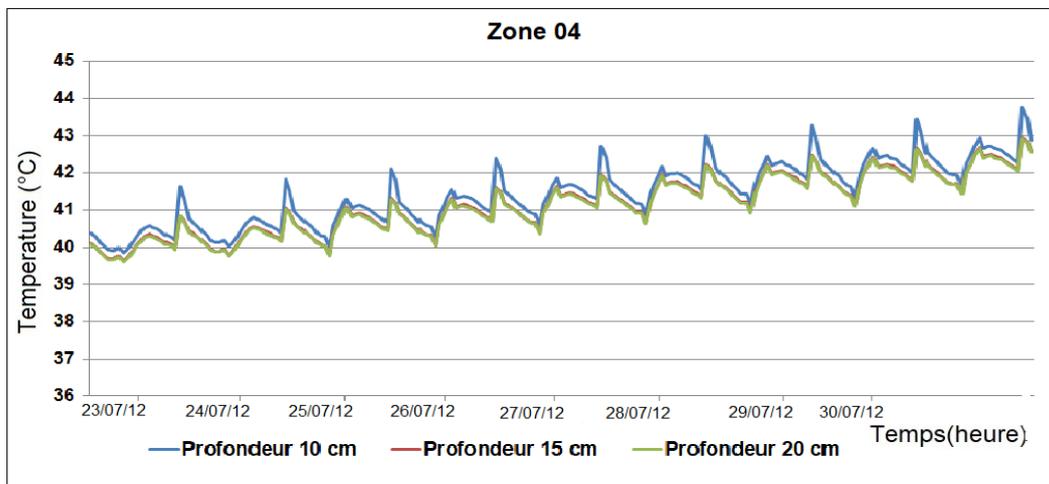


Figure 4.70: Evolution des températures dans la zone 04 durant la semaine la plus chaude

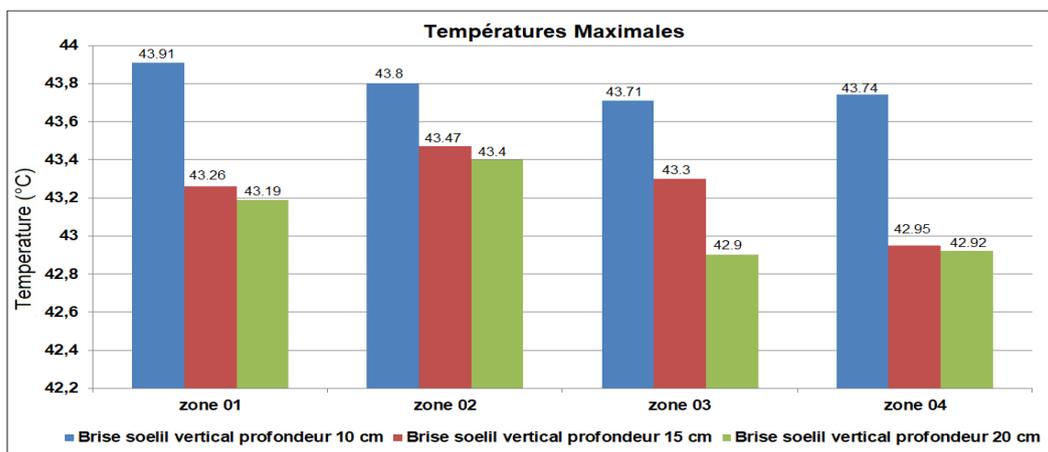


Figure 4.71: Comparaison des températures maximales dans les différentes zones (période estivale)

Les résultats présentés sur les **Figures 4.67-4.71** montrent que le profil des températures est devenu plus stable, malgré l'augmentation des températures maximales par rapport à la variante sans brises soleil (voir **Figure 4.71**), est ça est dû à la configuration verticale des lames et qui permet de capter les apports solaires et chauffer la partie vitrée par rayonnement. Il a été aussi déduit que la configuration à lames verticales ayant une épaisseur de 20 cm permet de réduire les températures de 0.4°C à 0.8°C par rapport à celle ayant une profondeur de 10 cm.

- **Simulation sans consigne de thermostat durant la période hivernale :**

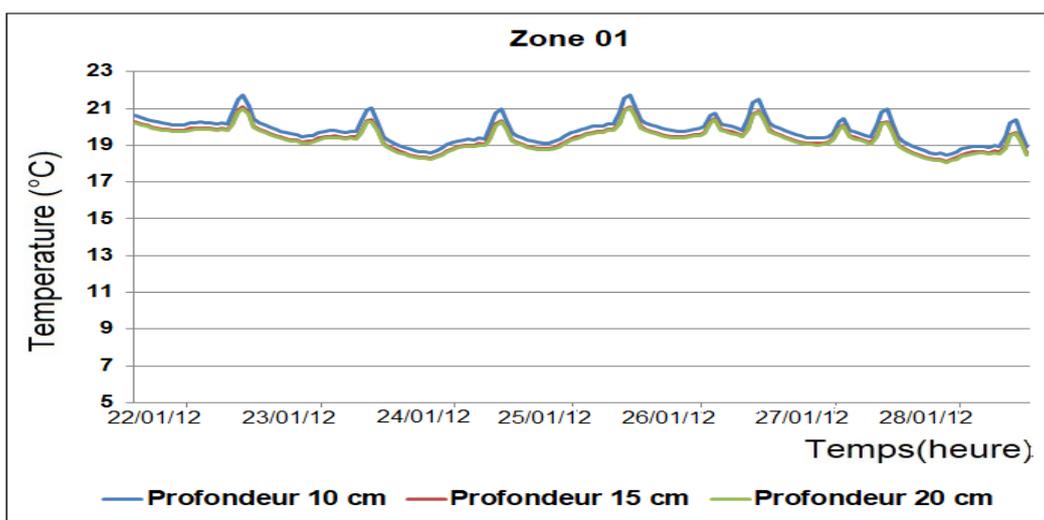


Figure 4.72: Evolution des températures dans la zone 01 durant la semaine la plus froide

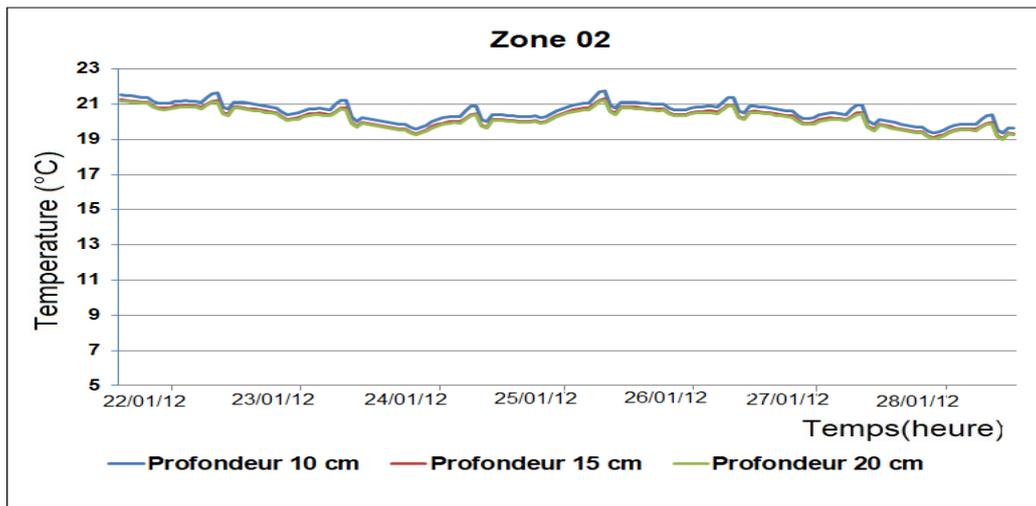


Figure 4.73: Evolution des températures dans la zone 02 durant la semaine la plus froide

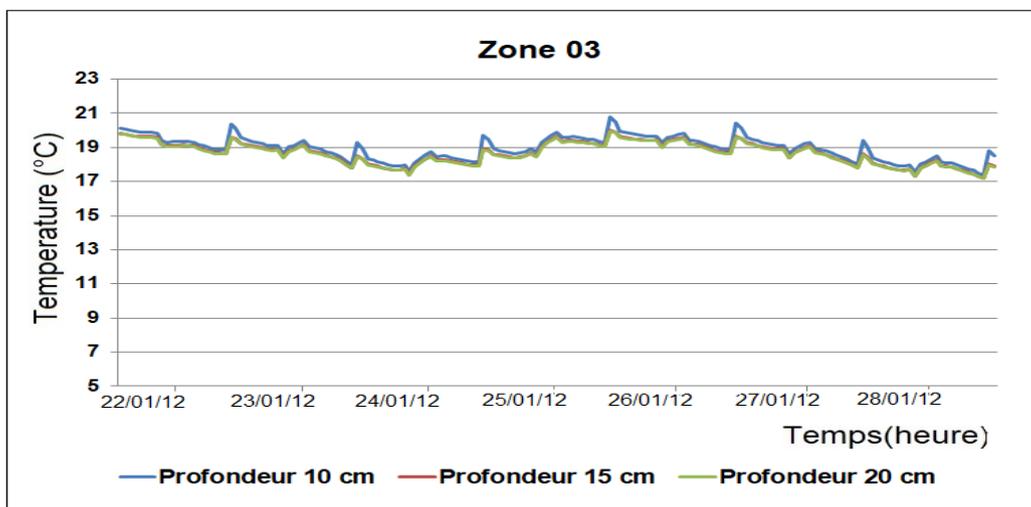


Figure 4.74: Evolution des températures dans la zone 03 durant la semaine la plus froide

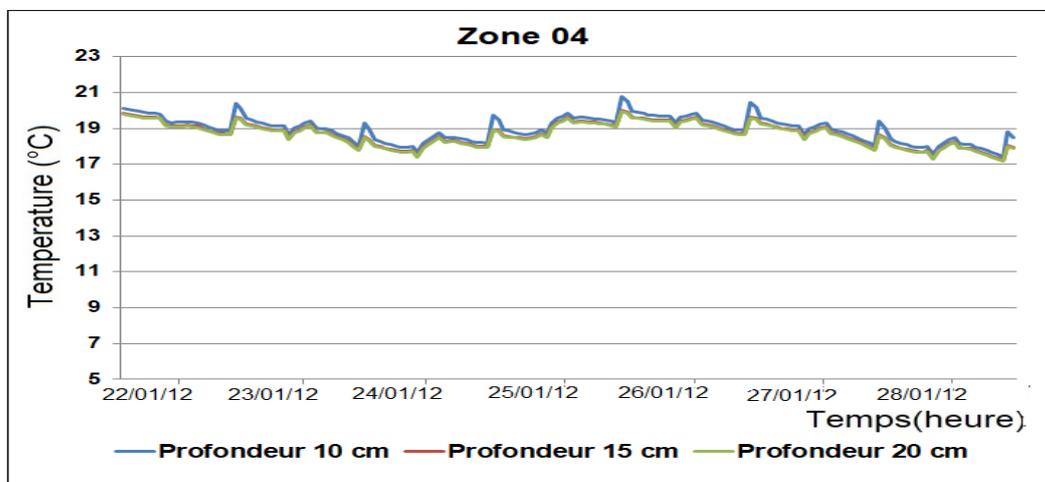


Figure 4.75: Evolution des températures dans la zone 04 durant la semaine la plus froide

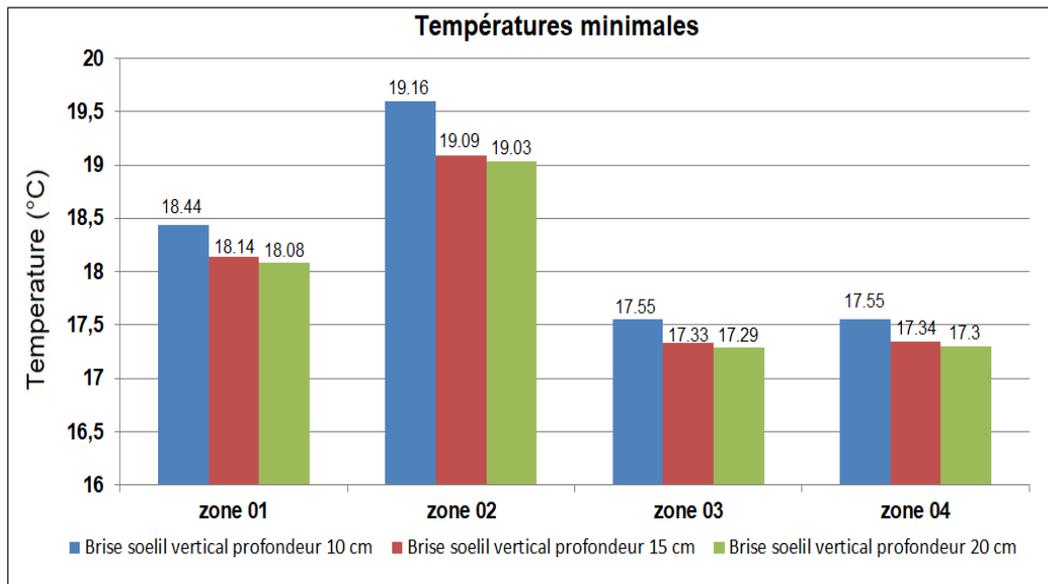


Figure 4.76: Comparaison des températures minimales dans les différentes zones (période hivernale)

D'après les résultats obtenus et qui sont montrés sur les Figures 4.73-4.76 nous constatons que la variante la plus adéquate durant la période hivernale et celle ayant une profondeur de 5 cm et qui permet d'augmenter les températures de 0.8°C par rapport à celle avec lames verticales ayant une profondeur de 20cm (voir **Figure 4.76**).

- **Simulation avec consigne de thermostat :**

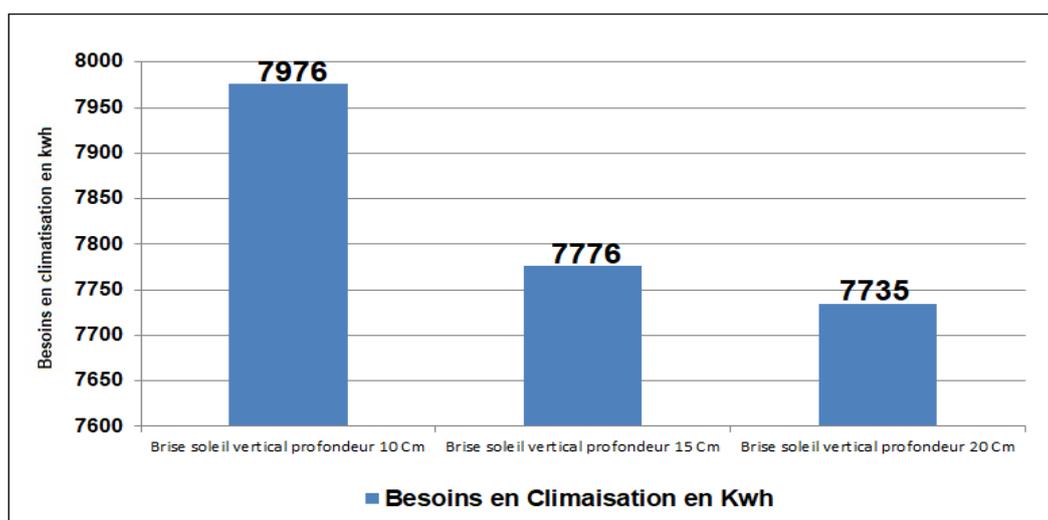


Figure 4.77: Comparaison des besoins en climatisation

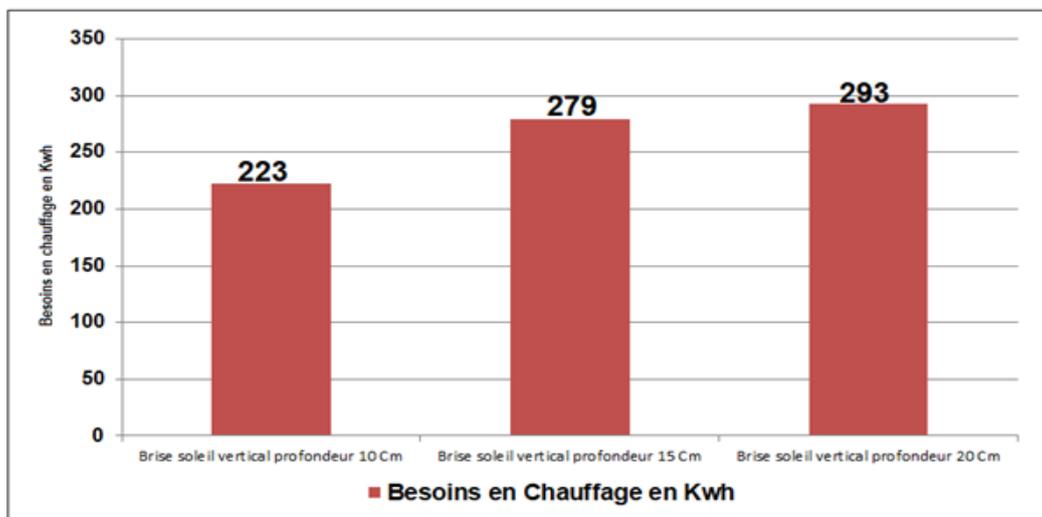


Figure 4.78: Comparaison des besoins en chauffage

La comparaison des résultats des besoins en climatisation et chauffage présentée sur les **Figures 4.77 et 4.78**, montrent que l'utilisation des brises soleil à lames verticales ayant une profondeur de 20 cm permet de réduire les besoins en climatisation de 3% par rapport à celle ayant une profondeur de 5 cm. contrairement pour les besoins en chauffage, nous constatons que la configuration à lames verticales d'une profondeur de 5 cm permet de réduire les besoins en chauffage de 31 % par rapport à celles de 20 cm d'épaisseur .

***Brise soleil à lames horizontales**

- **Simulation sans consigne de thermostat durant la période estivale :**

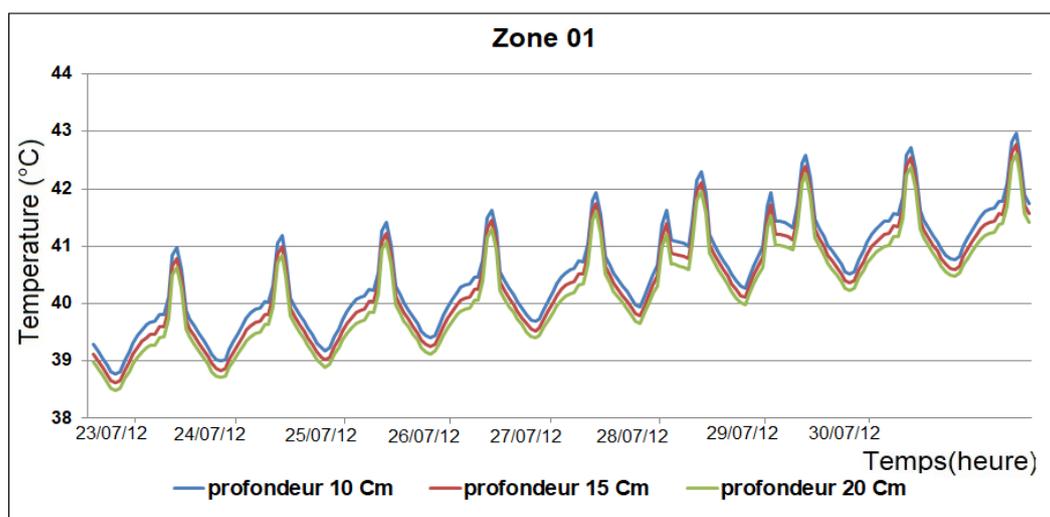


Figure 4.79: Evolution des températures dans la zone 01 durant la semaine la plus chaude

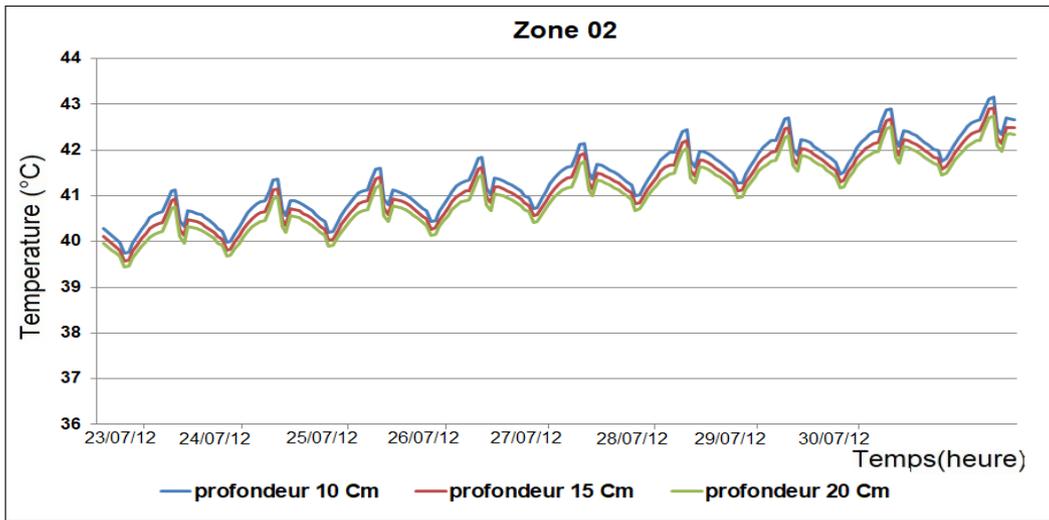


Figure 4.80: Evolution des températures dans la zone 02 durant la semaine la plus chaude

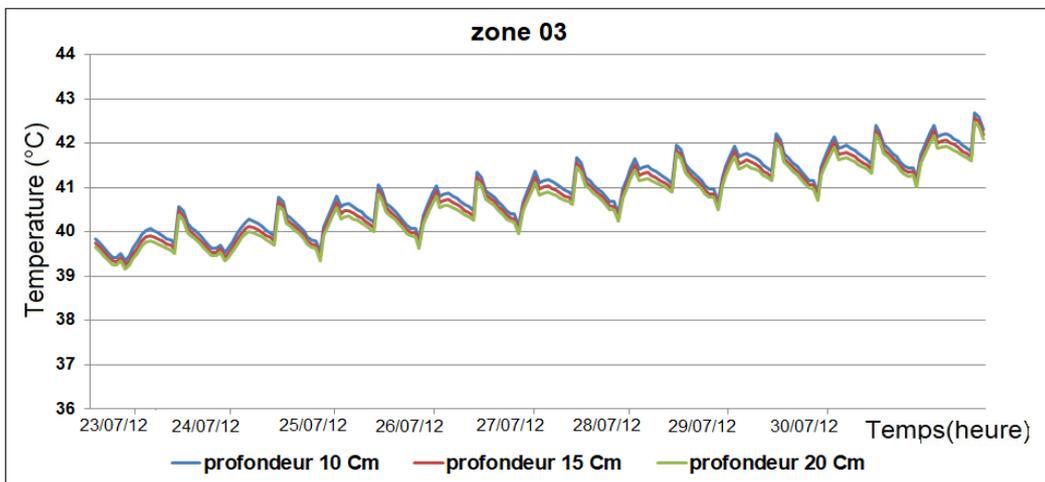


Figure 4.81: Evolution des températures dans la zone 03 durant la semaine la plus chaude

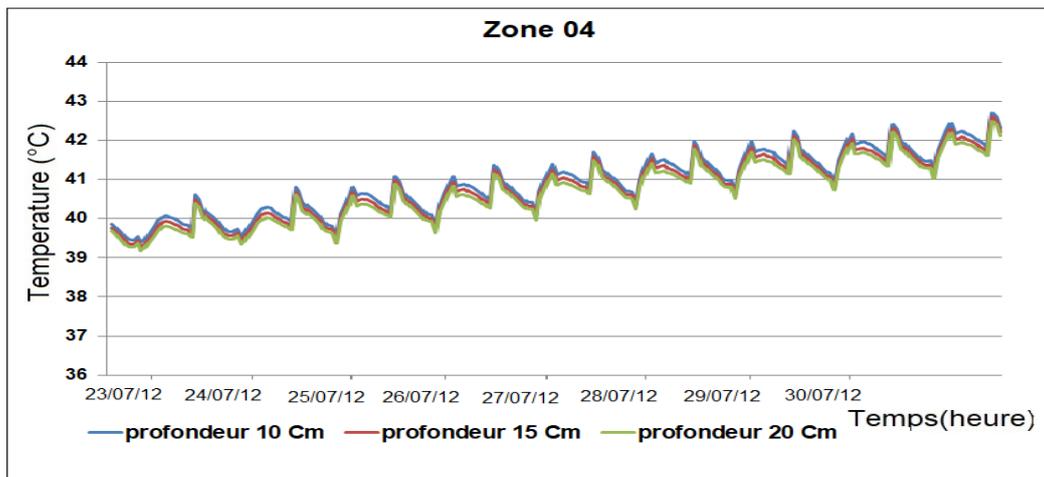


Figure 4.82: Evolution des températures dans la zone 04 durant la semaine la plus chaude

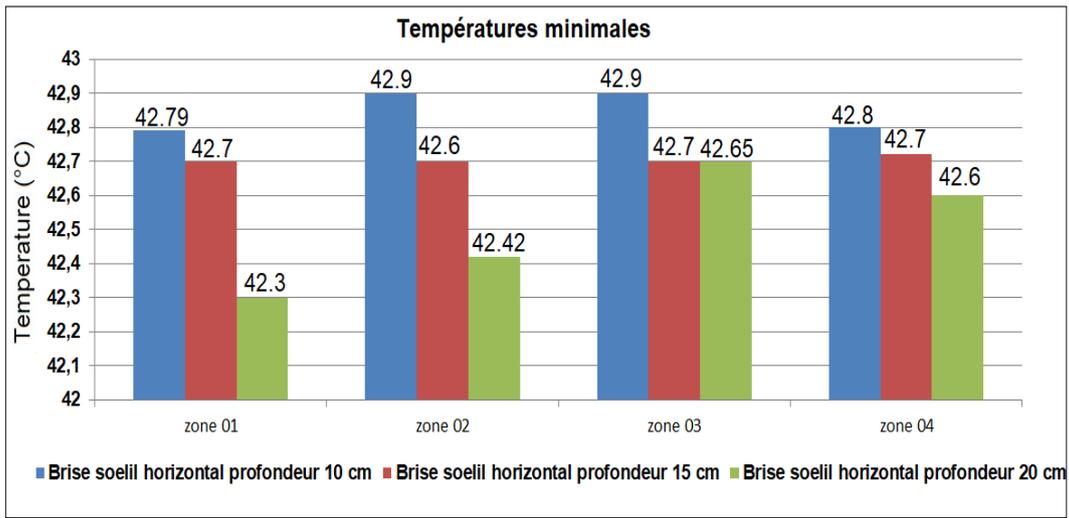


Figure 4.83: Comparaison des températures maximales dans les différentes zones (période estivale)

- Simulation sans consigne de thermostat durant la période hivernale :

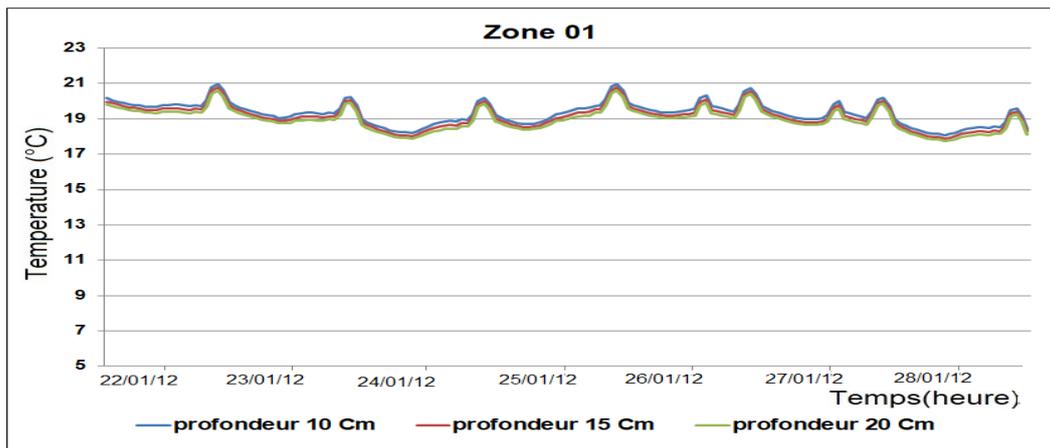


Figure 4.84: Evolution des températures dans la zone 01 durant la semaine la plus froide

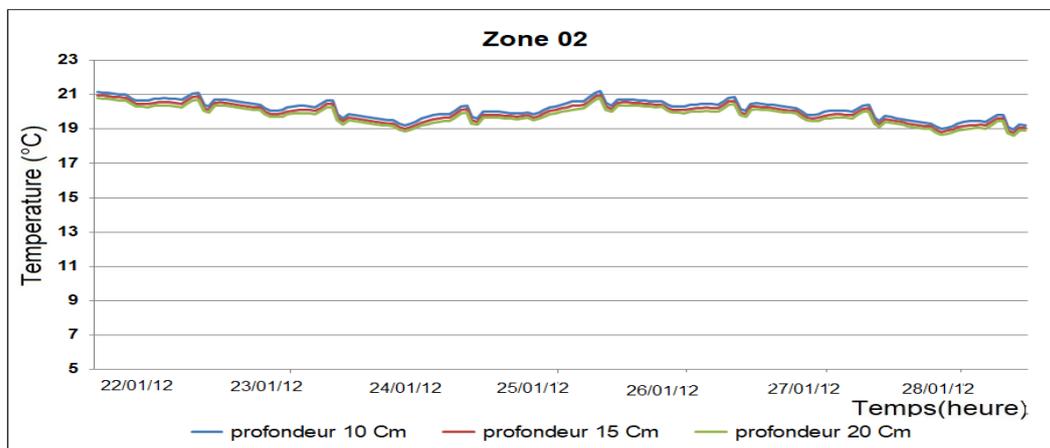


Figure 4.85: Evolution des températures dans la zone 02 durant la semaine la plus froide

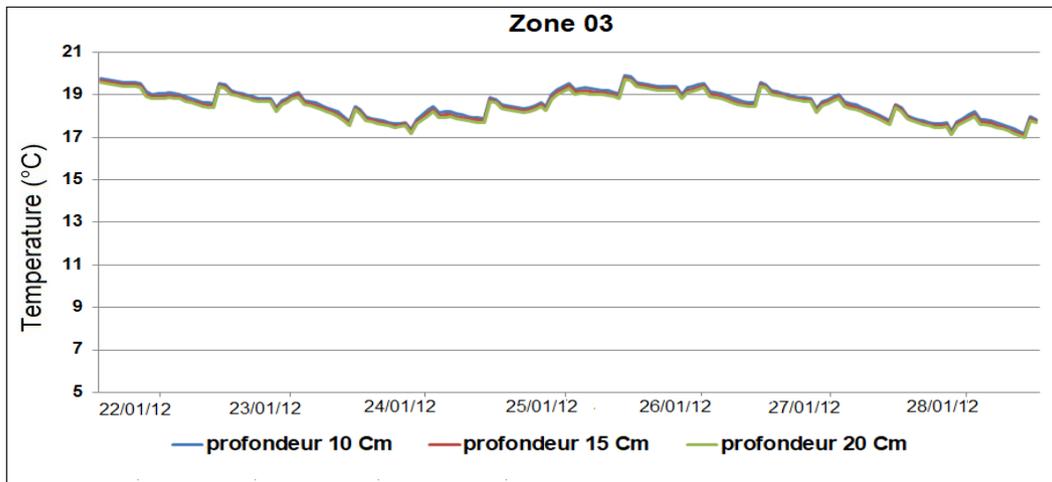


Figure 4.86: Evolution des températures dans la zone 03 durant la semaine la plus froide

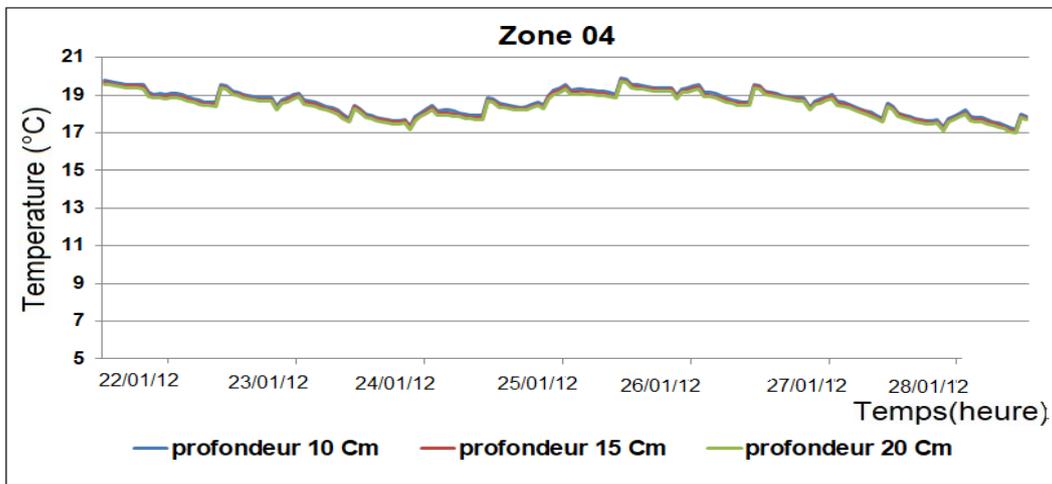


Figure 4.87: Evolution des températures dans la zone 04 durant la semaine la plus froide

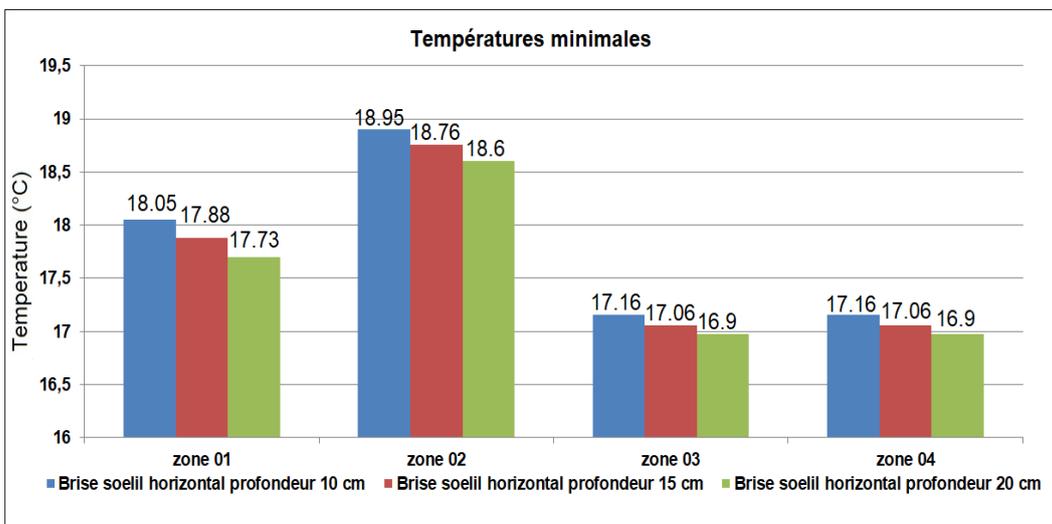


Figure 4.88: Comparaison des températures minimales dans les différentes zones (période hivernale)

- **Simulation avec consigne de thermostat :**

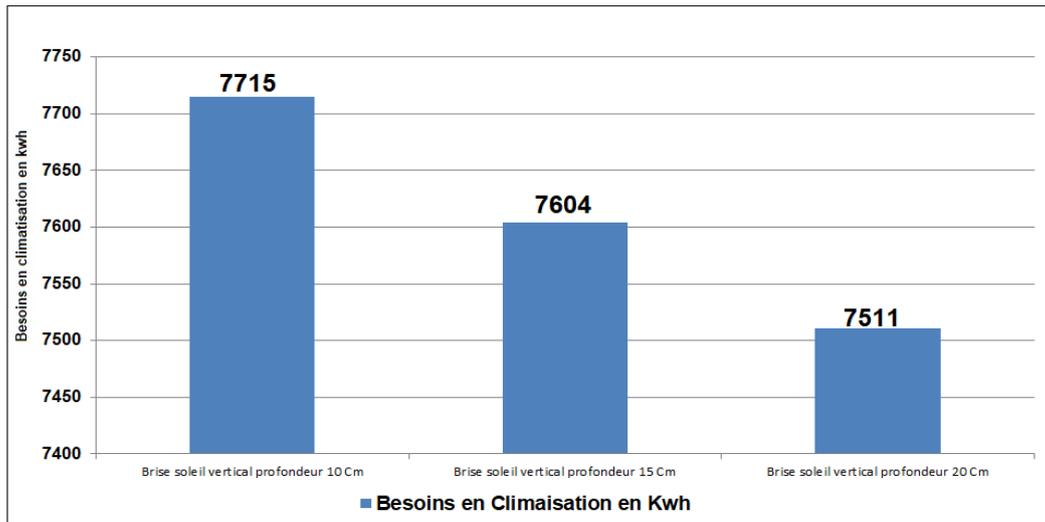


Figure 4.89: Comparaison des besoins en climatisation

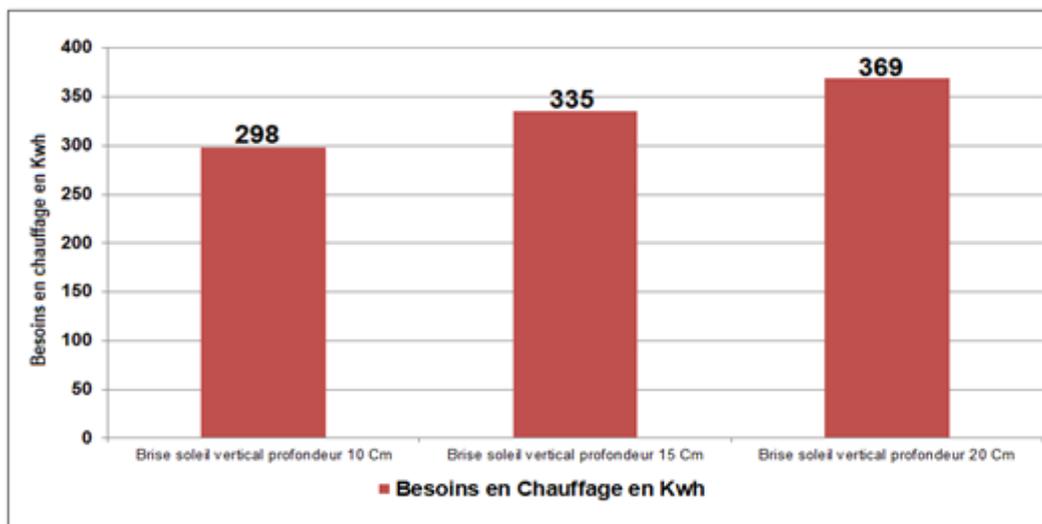


Figure 4.90: Comparaison des besoins en chauffage

Les Figures 4.79-4.83 et 4.85-4.88 présentent la comparaison de l'évolution des températures des différentes profondeurs proposées pour les brises soleil à lames horizontales. Les résultats montrent que la profondeur la plus adéquate en période estivale est celle ayant une profondeur de 20 cm en permettant de minimiser les apports solaires reçus sur les surfaces vitrées, et en période hivernale la variante la plus adéquate et celle ayant une épaisseur de 5 cm.

A travers les résultats obtenus, nous avons constaté que les brises soleil à lames horizontales permettent de baisser les températures durant la période

estivale et que la configuration ayant des lames de profondeur de 20 cm permet de réduire la température de 0.4°C par rapport à celle ayant une profondeur de 10 cm (Voir **Figure 4.83**), mais durant la période hivernale la configuration la plus adéquate est celle ayant une profondeur de 10cm (Voir **Figure 4.88**). Mais puisque la région est caractérisée par de longues périodes chaudes, la variante retenue est celle de 20 cm de profondeur.

Après comparaison des résultats obtenus des deux configurations. Verticales et horizontales inclinée à 45°C, nous avons déduit que les brises ayant une configuration horizontale permettent de réduire jusqu'à 1°C par rapport à celle verticale durant la période estivale. Les brises soleil à lames horizontales sont plus adéquates pour les régions arides en permettant de stabiliser le profil de température, réduire les températures durant la période estivale et par conséquent réduire les besoins en climatisation (Voir **Figures 4.89 et 4.90**). La variante retenue pour notre étude paramétrique est celle à lames horizontales ayant une profondeur de 20 cm.

4.5.4.2 Impact de l'intégration des protections solaires dans la cour :

Afin de vérifier l'impact de la couverture de la cour, la création d'une protection solaire pour les zones orientées Sud et l'intégration de ces protections solaires avec ajout des brises soleil sur la performance de notre cas d'étude, nous avons fait une étude comparative entre les différentes variantes.

- **Simulation sans consigne de thermostat durant la période estivale :**

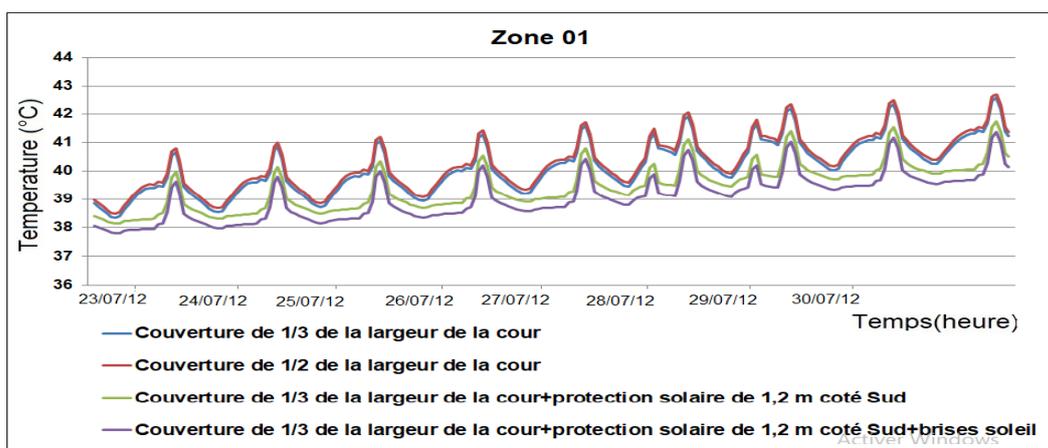


Figure 4.91: Evolution des températures dans la zone 01 durant la semaine la plus chaude

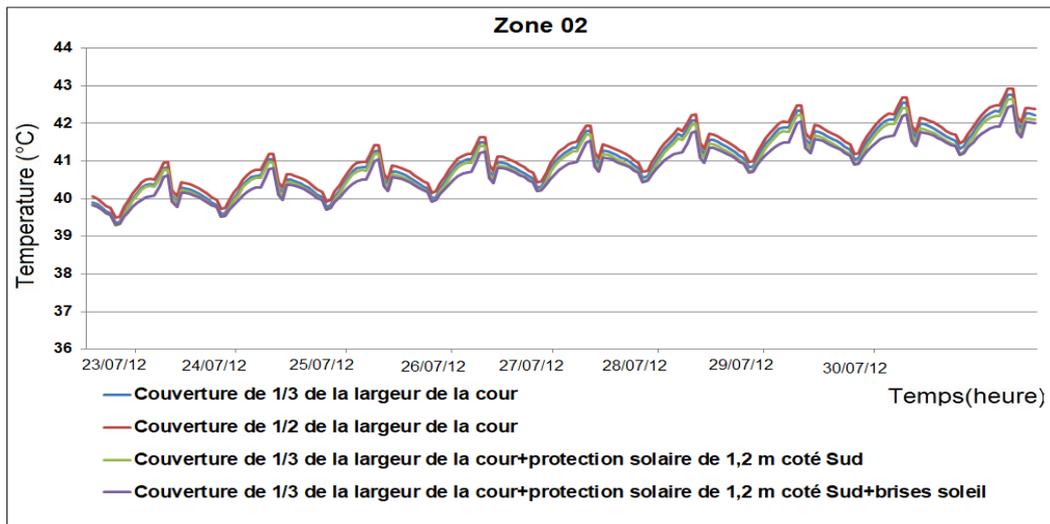


Figure 4.92:Evolution des températures dans la zone 02 durant la semaine la plus chaude

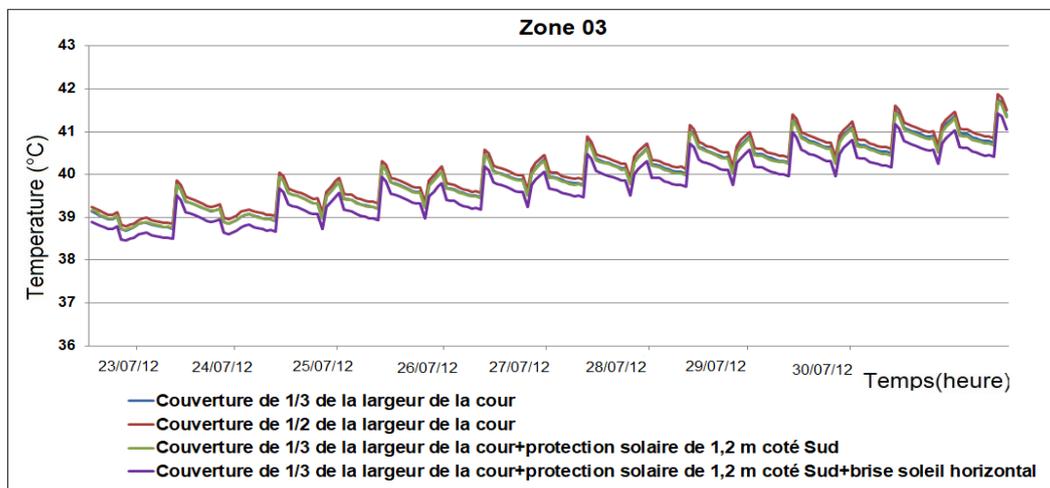


Figure 4.93:Evolution des températures dans la zone 03 durant la semaine la plus chaude

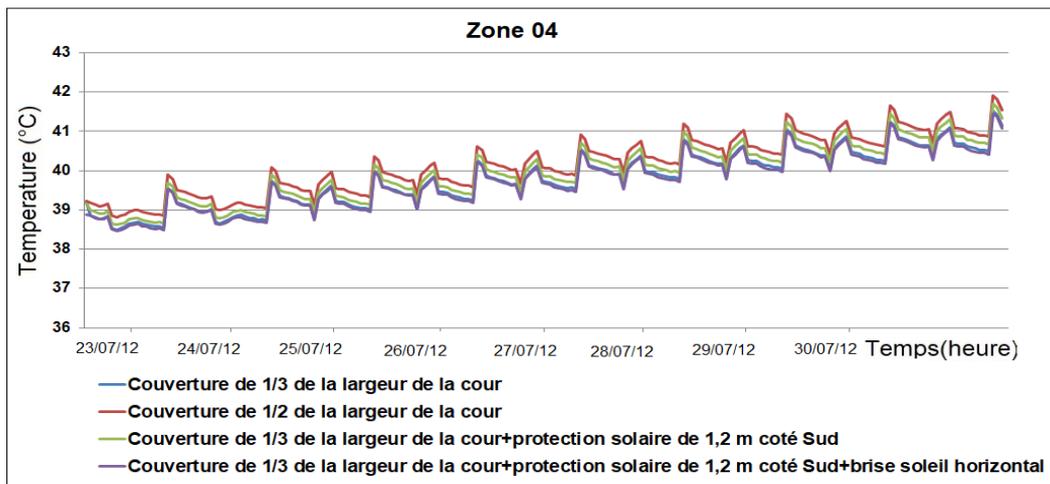


Figure 4.94:Evolution des températures dans la zone 04 durant la semaine la plus chaude

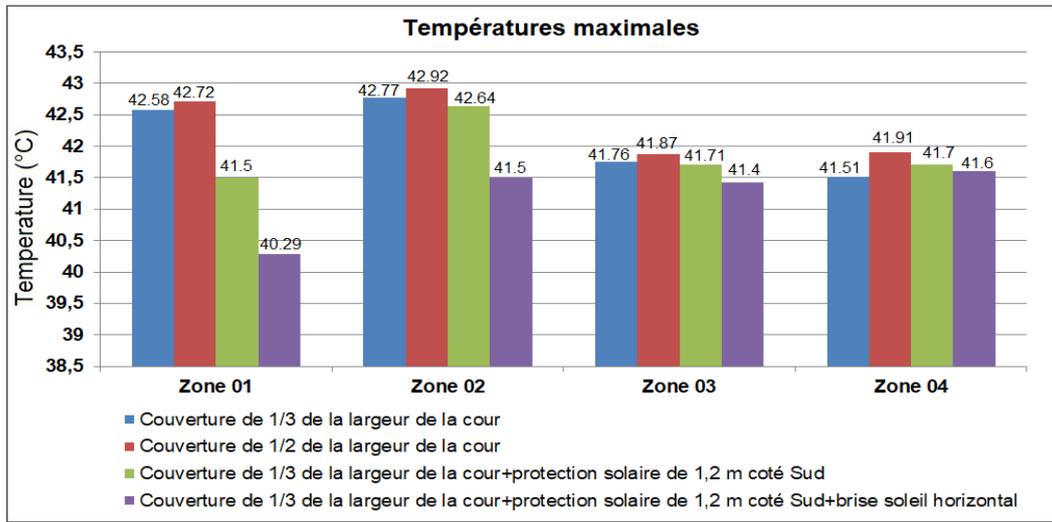


Figure 4.95: Comparaison des températures maximales dans les différentes zones (période estivale)

- Simulation sans consigne de thermostat durant la période hivernale :

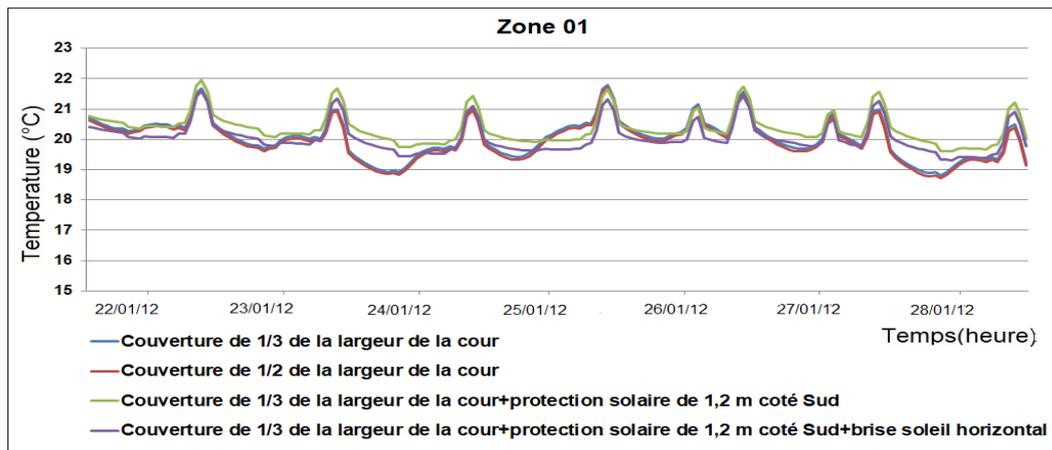


Figure 4.96: Evolution des températures dans la zone 01 durant la semaine la plus froide

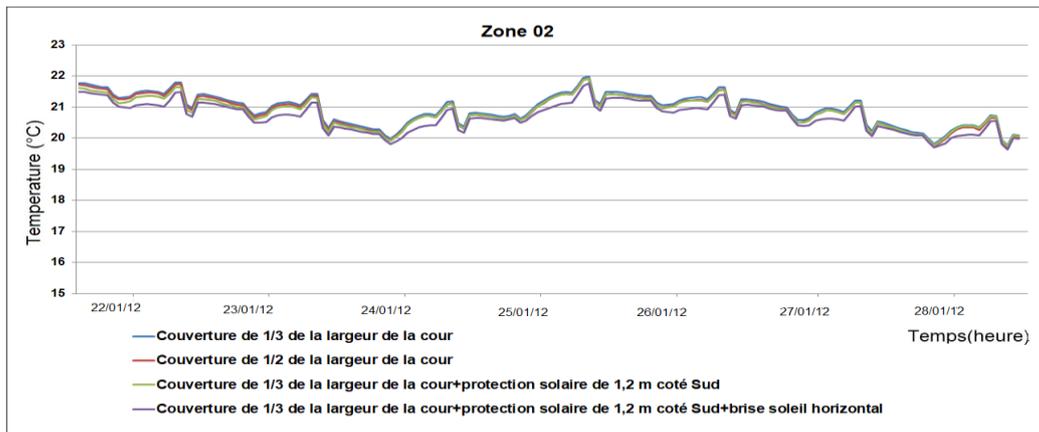


Figure 4.97: Evolution des températures dans la zone 02 durant la semaine la plus froide

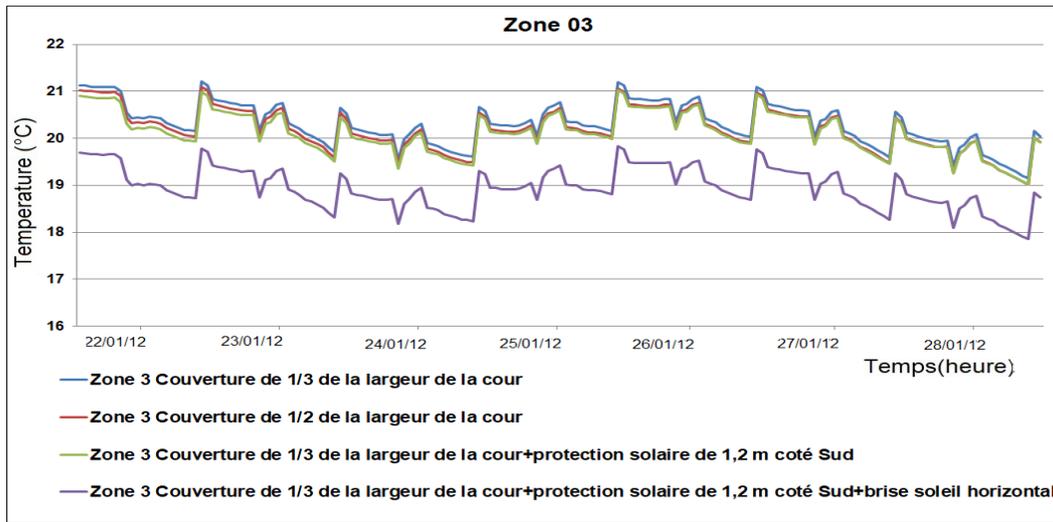


Figure 4.98:Evolution des températures dans la zone 03 durant la semaine la plus froide

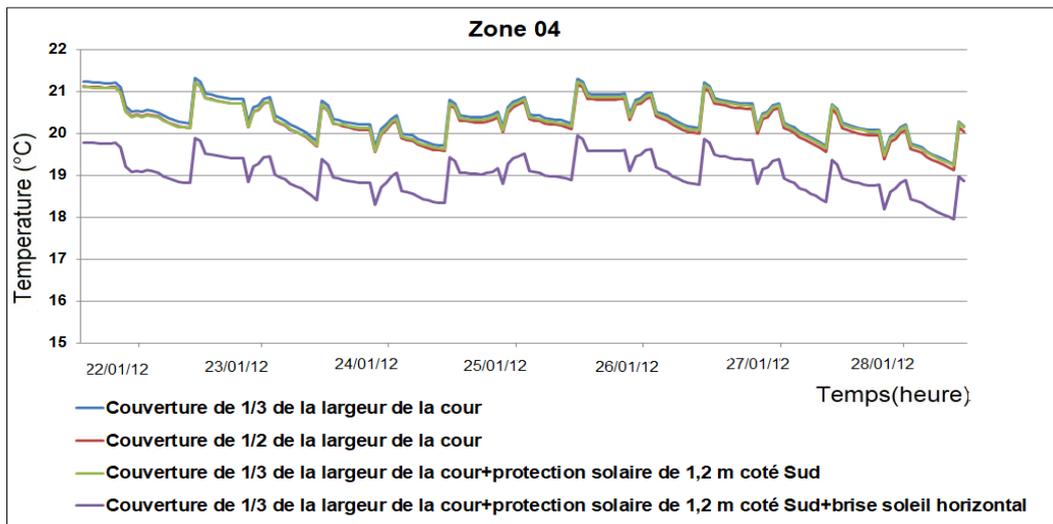


Figure 4.99:Evolution des températures dans la zone 04 durant la semaine la plus froide

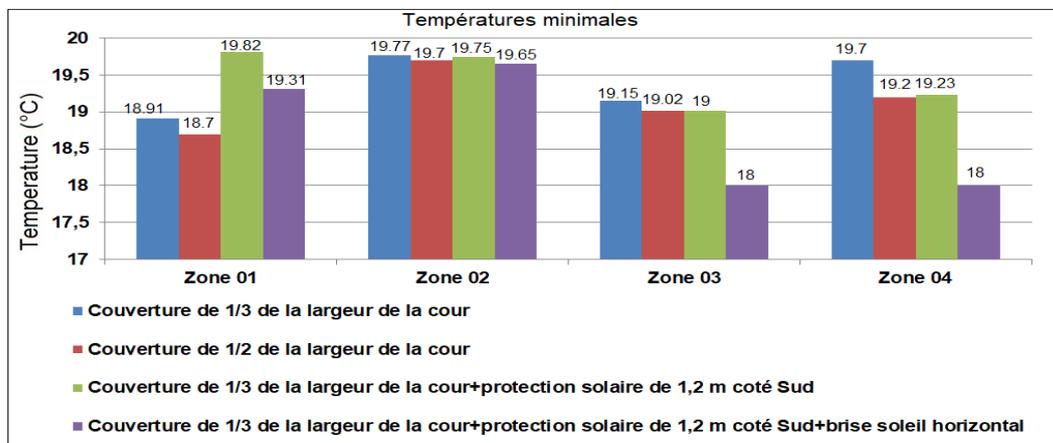


Figure 4.100:Comparaison des températures minimales dans les différentes zones (période hivernale)

D'après les résultats obtenus, nous avons constaté que la couverture du patio a permis de stabiliser le profil des températures durant la période estivale pour les deux dimensions proposées de la couverture (couverture de 1/3 et 1/2 de la largeur de la cour) ,nous avons aussi déduit que le comportement thermique des deux dimensions proposées de couverture est presque similaire ,l'écart de température entre les deux variantes est de 0.2°C (Voir **Figures 4.91-4.95**),la variante retenue dans ce cas est celle d'une couverture de 1/3 de la largeur du cour.

Les résultats ont aussi montré que l'intégration de la protection solaire pour la zone orientée Sud a permis de stabiliser le profil des températures et baisser les températures jusqu'à 38.4°C, les températures maximales dans cette zone puisse atteindre 41,5°C(Voir **Figure 4.95**). La solution proposée permet de minimiser les apports solaires en Eté et en profiter en hiver.

La variante la plus adéquate durant la période estivale est celle d'intégrer des protections solaires avec ajout des brises soleil. Cette variante a permis de baisser respectivement les températures jusqu' à 40.29°C ,41.5°C, 41.4 °C et 41.6 °C(Voir **Figure 4.95**)dans les zones 02,03 et 04. Mais durant la période hivernale, nous constatons que la variante la plus adéquate pour les zones 02,03 et 04 est celle de la couverture de 1/3 de la largeur du patio (Voir **Figure 4.96-4.100**).

- **Simulation avec consigne de thermostat :**

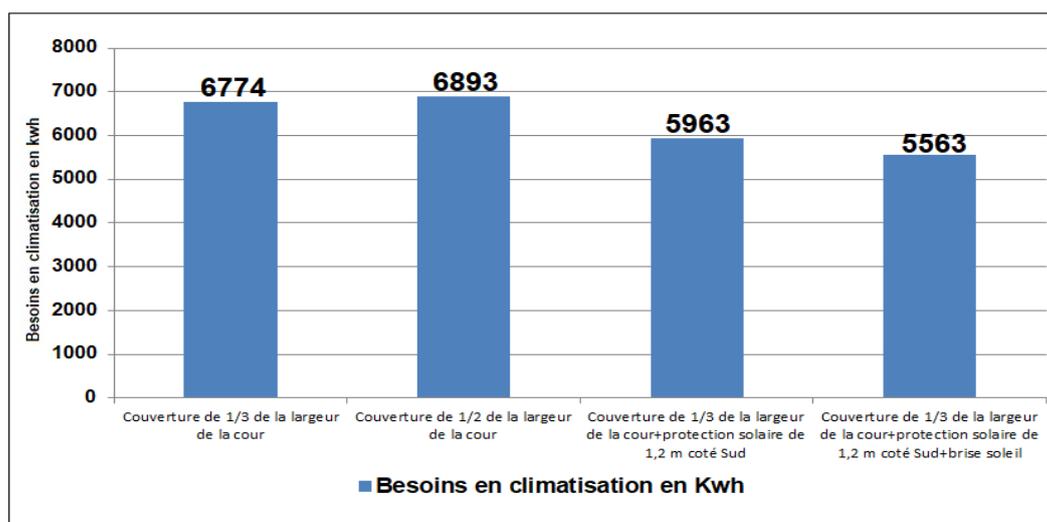


Figure 4.101:Comparaison des besoins en climatisation

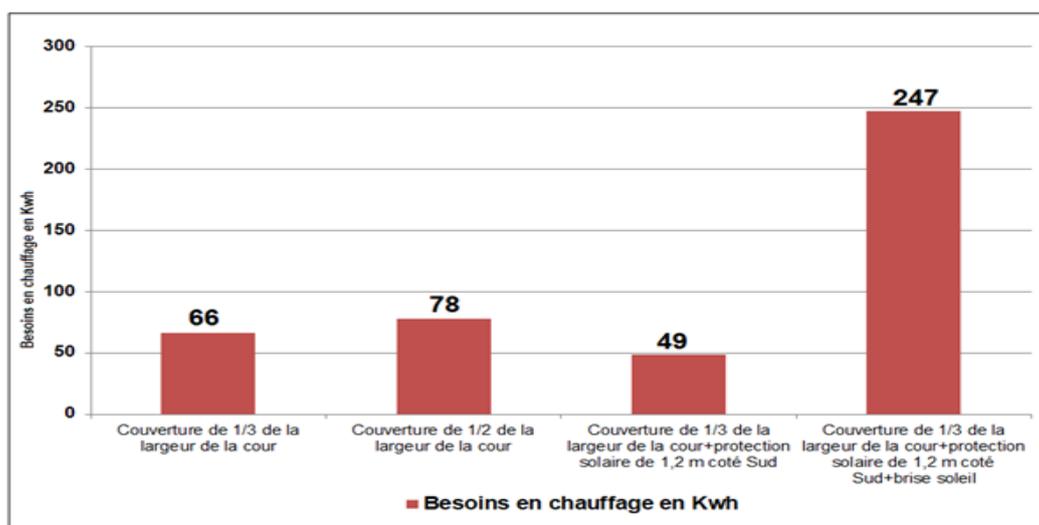


Figure 4.102: Comparaison des besoins en chauffage

Après comparaison des résultats des besoins en chauffage et climatisation obtenus des différentes variantes(Voir **Figures 4.101 et 4.102**), nous avons déduit que la variante de la couverture de 1/3 de la largeur de la cour avec intégration d'une protection solaire pour la zone orientée Sud et ajout des brises soleil permet respectivement de réduire 19% des besoins en climatisation par rapport à la variante dont la quelle nous avons proposé seulement la couverture de la cour ,mais durant la période hivernale, cette variante a fait augmenter les besoins en chauffage de 34% par rapport à la variante de couverture seulement de 1/3 de la largeur de la cour.la variante retenue des différentes variantes est la plus adéquate pour la saison estivale vu les conditions climatiques de la région d'In Saleh qui se caractérise par de longues périodes de surchauffe.

4.5.4.3 Comparaison des résultats obtenus

• Simulation sans consigne de thermostat durant la période estivale :

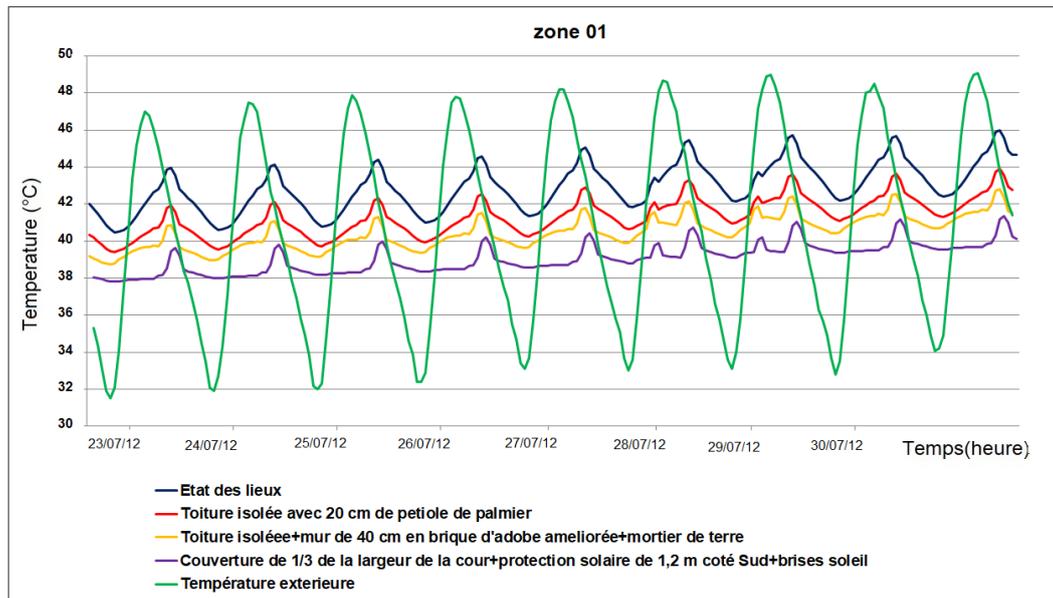


Figure 4.103: Comparaison des températures dans la zone 01 entre les différents cas étudiés durant la semaine la plus chaude

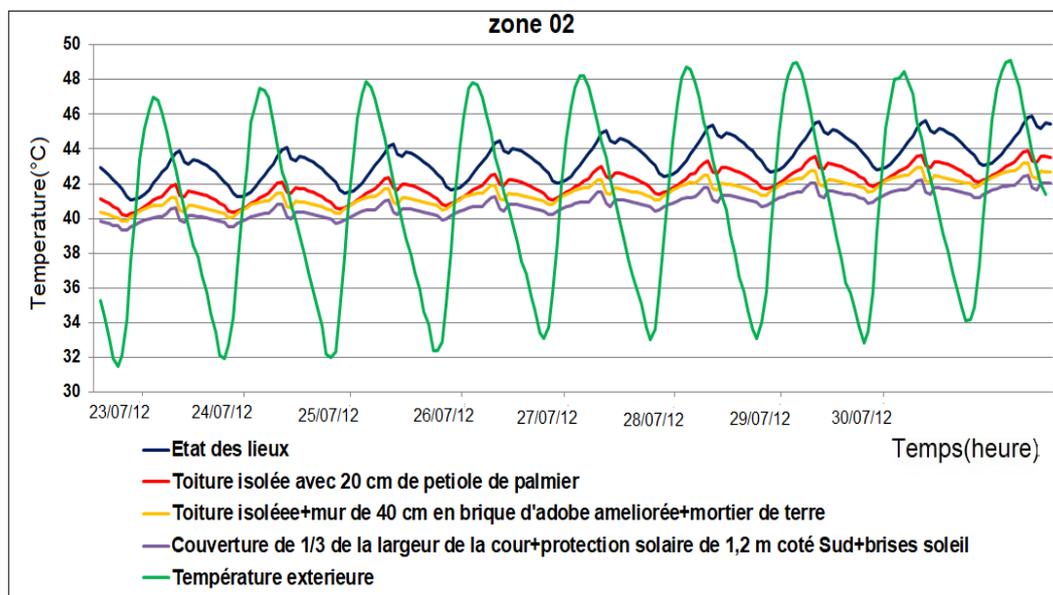


Figure 4.104: Comparaison des températures dans la zone 02 entre les différents cas étudiés durant la semaine la plus chaude

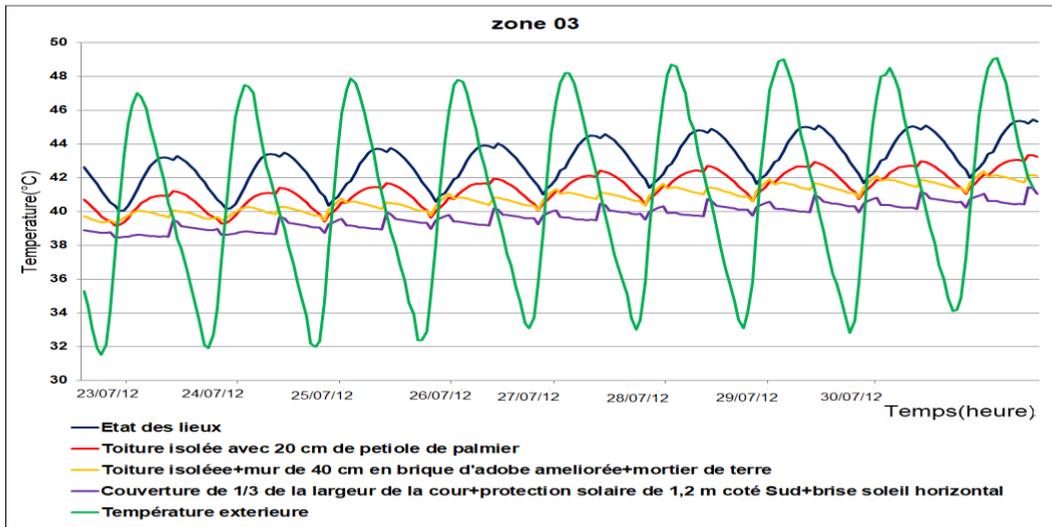


Figure 4.105: Comparaison des températures dans la zone 03 entre les différents cas étudiés durant la semaine la plus chaude

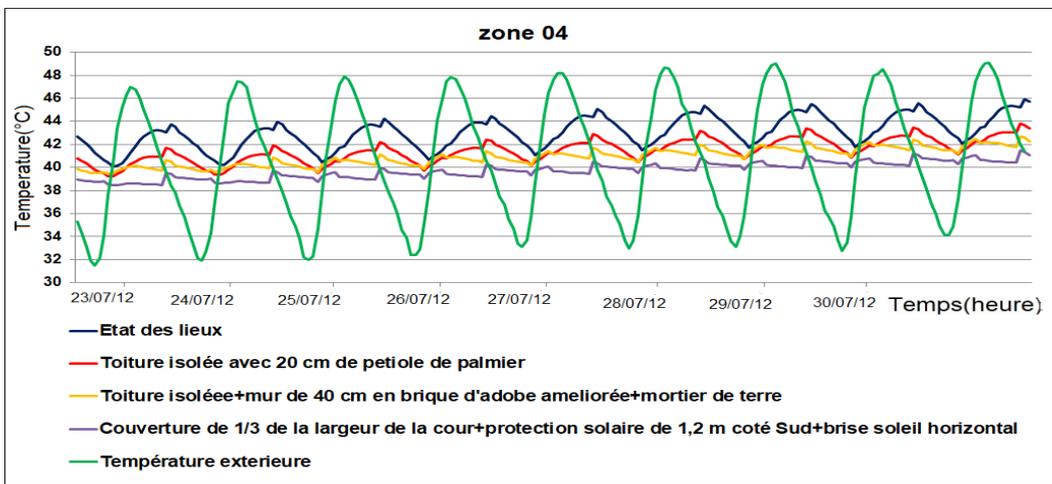


Figure 4.106: Comparaison des températures dans la zone 04 entre les différents cas étudiés durant la semaine la plus chaude

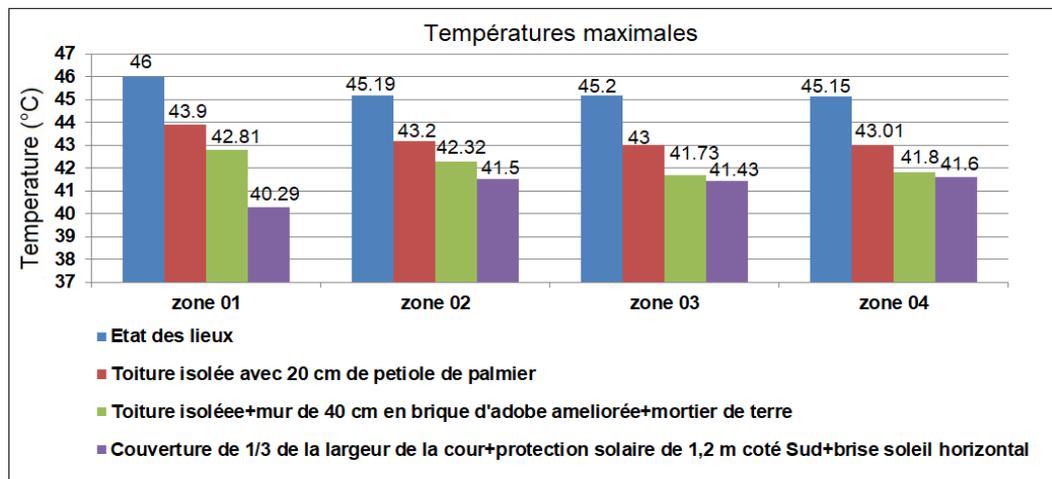


Figure 4.107: Comparaison des températures maximales entre les différents cas étudiés (période estivale)

D'après la comparaison des résultats obtenus des différentes variantes retenues et celle état des lieux, nous avons constaté que les variantes proposées ont permis de stabiliser les profils des températures des différentes zones durant la période estivale. Les résultats ont montré que l'isolation de la toiture avec 20 cm de pétiole de palmier a permis d'atteindre un écart de 2°C dans les différentes zones, aussi l'ajout des murs en brique de terre améliorée ayant une épaisseur de 40 cm et le traitement des surfaces extérieures et intérieures par du mortier de terre ont permis d'éliminer les fluctuations des températures en permettant d'atteindre un écart de température qui varie de 3°C à 4°C par rapport à l'état initial et de 6°C à 8°C par rapport à l'extérieur (Voir **Figures 4.103-4.107**).

Suite aux résultats obtenus il a été constaté que la variante dont la toiture est isolée, les murs en brique de terre améliorée avec intégration des protections solaires permet d'atteindre respectivement des écarts de 6°C et 10°C par rapport au cas initial et l'extérieur dans la zone 01 (orientée Sud), et dans les zones 02, 03 et 04 permet d'atteindre des écarts de 4°C à 5°C par rapport au cas initial et 9°C par rapport à l'extérieur, ce qui a fait réduire considérablement les besoins en climatisation par rapport au cas initial (état des lieux) dont la toiture est en béton et hourdis et les murs sont en parpaing.

- **Simulation sans consigne de thermostat durant la période hivernale :**

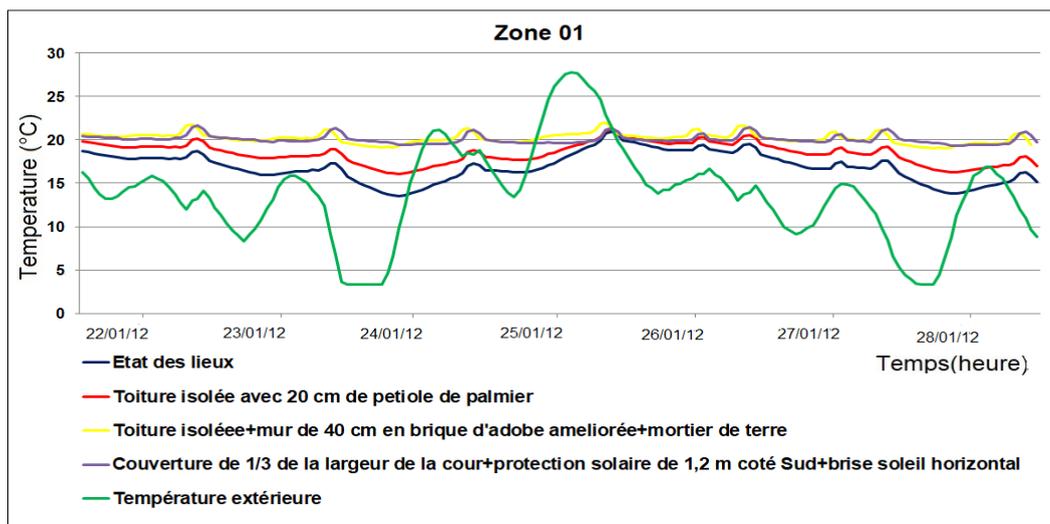


Figure 4.108: Comparaison des températures dans la zone 01 entre les différents cas étudiés durant la semaine la plus froide

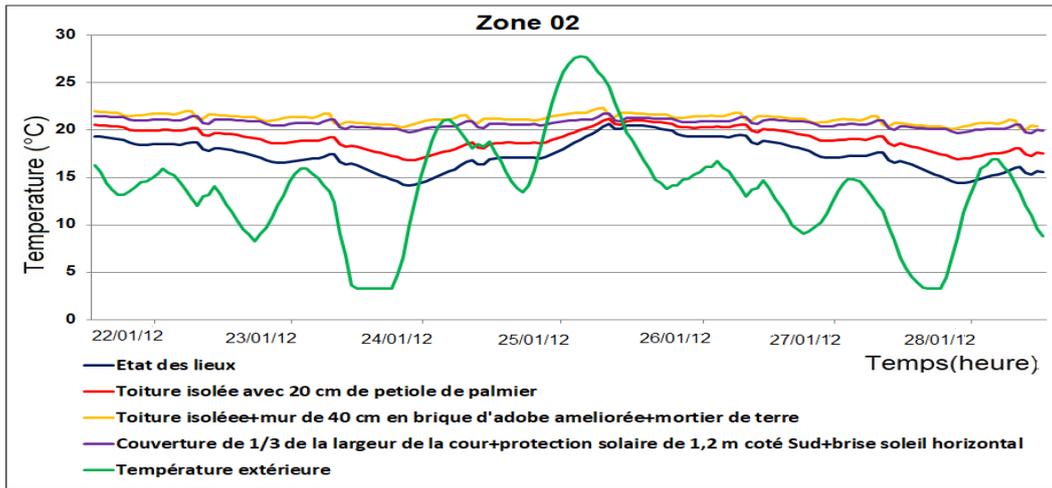


Figure 4.109: Comparaison des températures dans la zone 02 entre les différents cas étudiés durant la semaine la plus froide

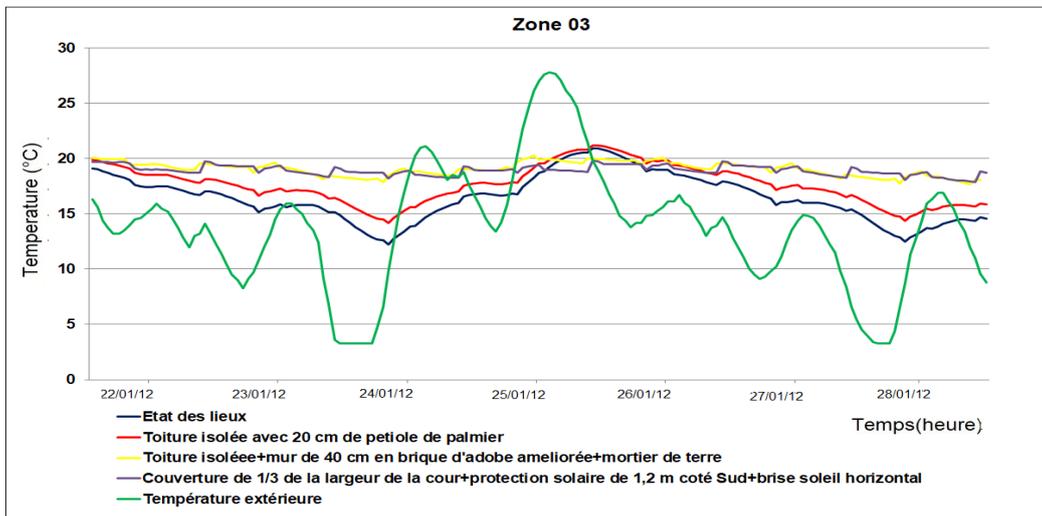


Figure 4.110: Comparaison des températures entre les différents cas étudiés dans la zone 03 durant la semaine la plus froide

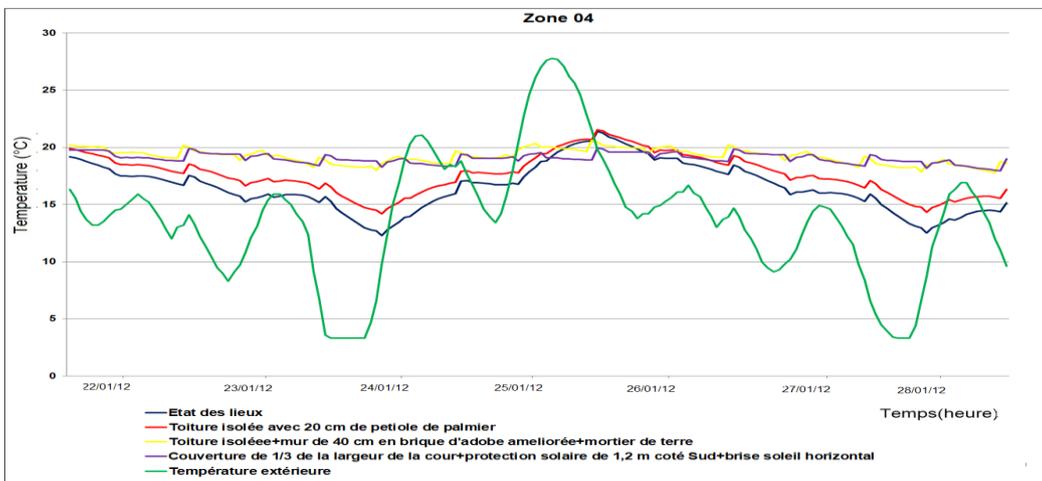


Figure 4.111: Comparaison des températures dans la zone 04 entre les différents cas étudiés durant la semaine la plus froide

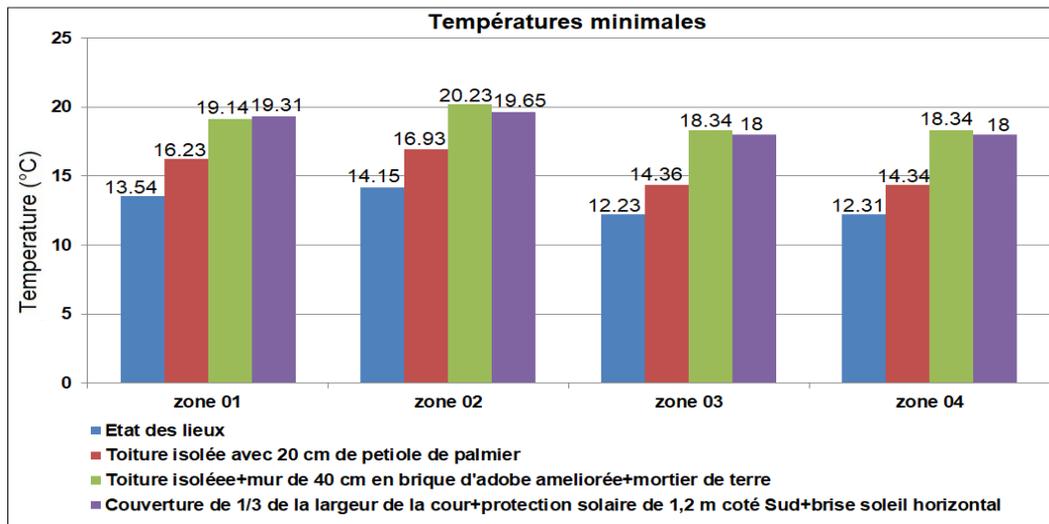


Figure 4.112: Comparaison des températures minimales entre les différents cas étudiés

Les solutions passives proposées lors de cette étude paramétrique ont permis aussi d'améliorer les conditions intérieures des zones thermiques durant la période hivernale (Voir **Figures 4.108-4.112**). Les deux variantes : toiture isolée, murs en brique de terre de 40 cm avec mortier de terre et celle avec ajout de protections solaires ont permis d'atteindre des écarts qui varient de 4°C jusqu'à 6°C par rapport au cas initial (Voir **Figure 4.112**).

- **Simulation avec consigne de thermostat :**

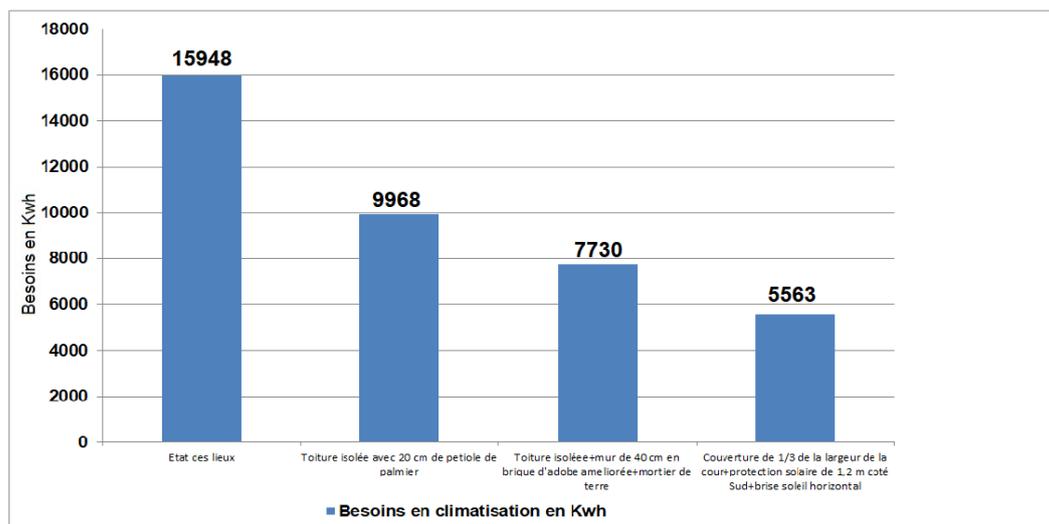


Figure 4.113: Comparaison des Besoins en climatisation des différents cas étudiés

Les besoins en climatisation ont été estimés à 15948 KWh d'une moyenne de 215 kWh /m² /an pour le cas initial, et sont passés à 9968 KWh d'une moyenne de 134 kWh /m² /an dans le cas d'une toiture isolée avec 20 cm de pétiole de palmier, le taux de réduction est de 37% par rapport au cas initial (Voir **Figure 4.113**).

Dans le cas d'une toiture isolée et murs en brique de terre améliorée les besoins en climatisation ont été estimés à 7730 KWh d'une moyenne de 113 kWh /m²/an avec un taux de réduction de 51% par rapport au cas initial. Et dans le cas de l'isolation de la toiture, murs en brique de terre avec intégration des protections solaires, ont été passés à 5563 kWh d'une moyenne de 76 kWh /m² /an, le taux de réduction a été estimé à 65% par rapport au cas initial.

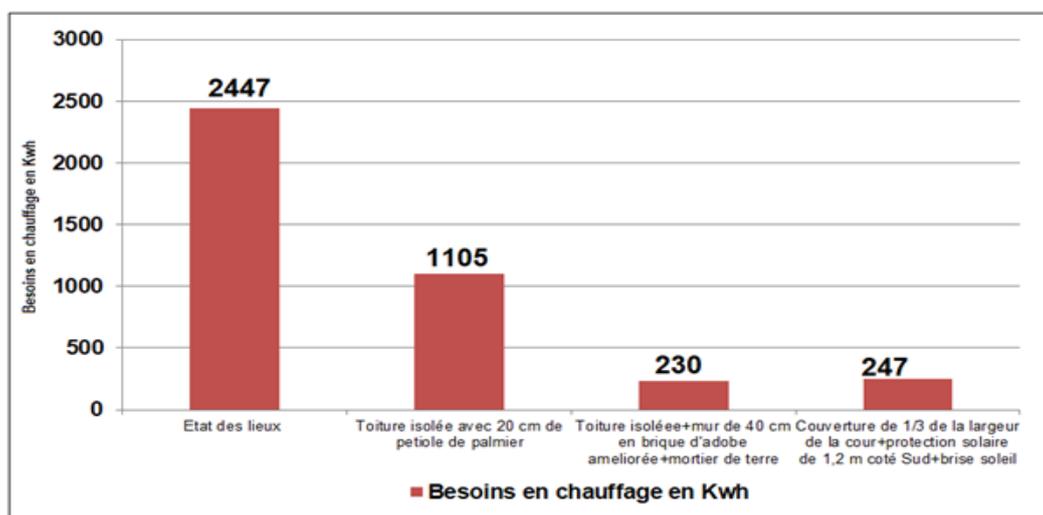


Figure 4.114: Comparaison des Besoins en chauffage des différents cas étudiés

Les besoins en chauffage ont aussi réduit par rapport au cas initial ,Ils ont été estimés à 2447 KWh d'une moyenne de 33 kWh /m² /an et sont passés à 1105 KWh d'une moyenne de 15 kWh /m² /an dans le cas de l'isolation de la toiture par 20 cm de pétiole de palmier ,le taux de réduction est de 54% .et sont passés à 230 kWh d'une moyenne de 3 kWh /m² /an dans le cas de la variante de toiture isolée et murs en brique de terre avec ajout de mortier de terre (Voir **Figure 4.114**), le taux de réduction est de 91%.

Nous avons constaté une légère augmentation des besoins en chauffage dans la variante isolation de la toiture, murs en brique de terre et intégration des protections solaires avec des besoins estimés à 247KWh, d'une

moyenne de 3 KWh /m²/an, le taux de réduction est estimé à 90 % par rapport au cas initial.

Les solutions passives proposées lors de cette étude paramétrique ont permis d'améliorer la performance du cas étudié et baisser les besoins en chauffage et climatisation de 69% par rapport au cas initial.

A partir des résultats et recommandations des études paramétriques faites sur les différents modèles d'habitation de la région d'In Saleh , ainsi que celles de la littérature nous avons proposé un modèle adaptatif aux conditions climatiques de la région d'In Saleh .

4.6 Configuration et caractéristiques du modèle adaptatif proposé :

Pour la création du modèle adaptatif, on s'est inspiré de la typologie traditionnelle, des solutions passives proposées pour l'amélioration des différents cas étudiés et de la configuration du plan du cas d'étude N°04 .car l'adaptation de la configuration en rangée de maisons mitoyennes dans le contexte climatique aride a été recommandée par plusieurs études.

4.6.1 caractéristiques du modèle proposé :

- Typologie introvertie ; aménagement de deux patio avec des dimensions réduites ; les ouvertures des différents espaces donnent sur ces patio (Voir **Figure 4.115**).
- Aménagement d'un espace central qui fait appel au patio de la maison traditionnelle (Voir Figures **4.116,4.117,4.119**).
- orientation des séjours vers le Nord (Zone 01) (Voir **Figure 115**).
- Utilisation des murs en brique de terre améliorée ayant une épaisseur de 40 cm, avec traitement des surfaces avec du mortier de terre.
- Utilisation des murs intérieurs de 15 cm en brique de terre améliorée.
- Pour la proposition de la nouvelle toiture, on s'est inspirée de la toiture traditionnelle. les caractéristiques sont mentionnées sur le **Tableau 4-2 et la Figure 4.116**.

- Intégration des protections solaires, brises soleil à lames horizontales de profondeur de 20 cm inclinés à 45°C sur surfaces vitrées, integration des protections solaires sur les zones orientées Sud ainsi que sur les patios (Voir **Figures 4.116-4.119**)

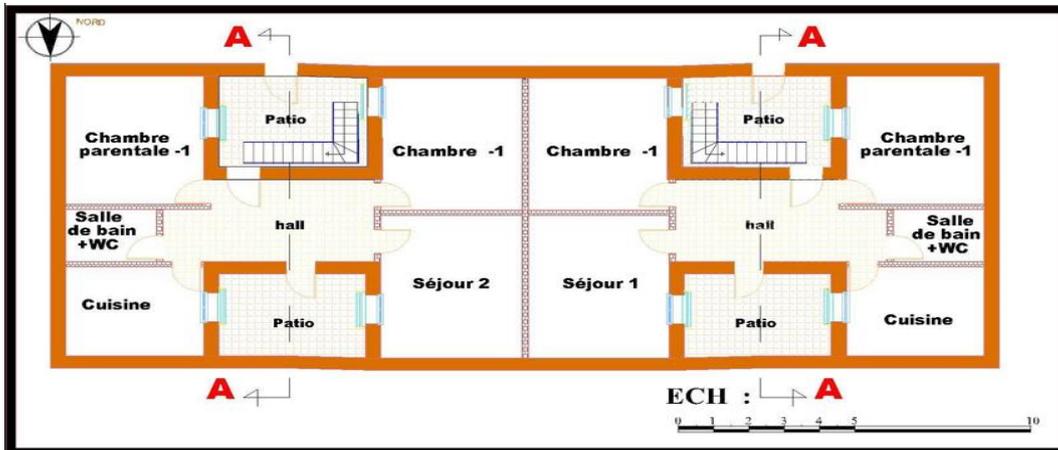


Figure 4.115: Plan du modèle adaptatif proposé

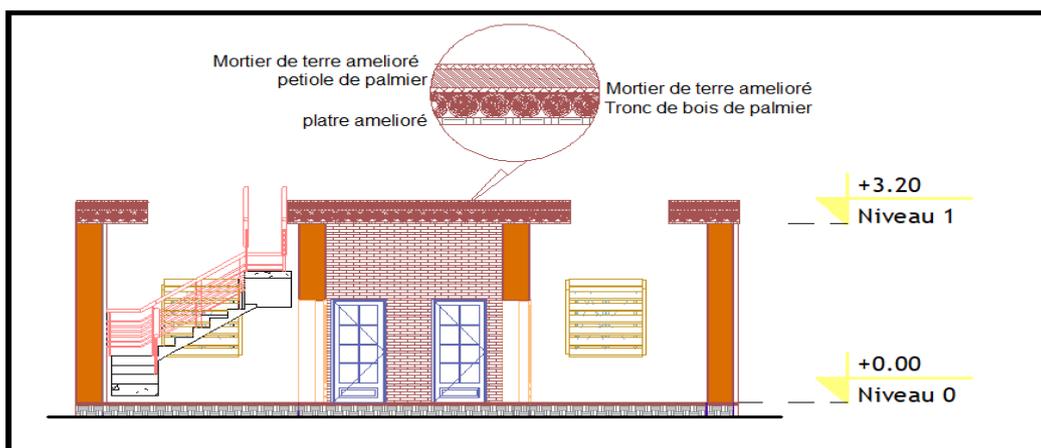


Figure 4.116: Coupe A-A du modèle adaptatif proposé



Figure 4.117: Plan d'assemblage

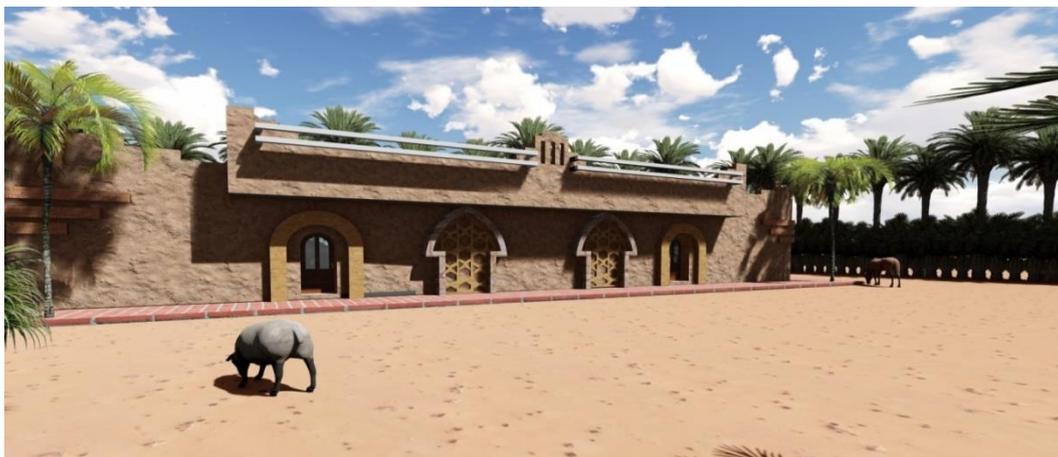


Figure 4.118:Façade Sud du modèle adaptatif proposé



Figure 4.119:Vue d'intérieur du modèle adaptatif proposé

Tableau 4-2:Toiture proposée pour le modèle adaptatif

Elément constructif	Composants	Epaisseur (cm)	λ W/(m .K)	U W/(m ² .K)
Toiture proposée pour le modèle adaptatif	mortier de terre palmier	5.0	0.390	0.2
	bois de pétiole de palmier	20.0	0.058	
	mortier de terre avec fibre de bois de palmier	4.0	0.390	
	bois de tronc de palmier	15.0	0.126	

4.6.2 Resultats et discussions :

Afin de verifier la performance énergétique du modèle proposé,nous avons effectué des simulations en periode hivernale et estivale sans et avec consigne en utilisant les mêmes scenarios proposés pour le cas 04 Simulation

- **Simulation sans consigne de thermostat durant la période estivale**

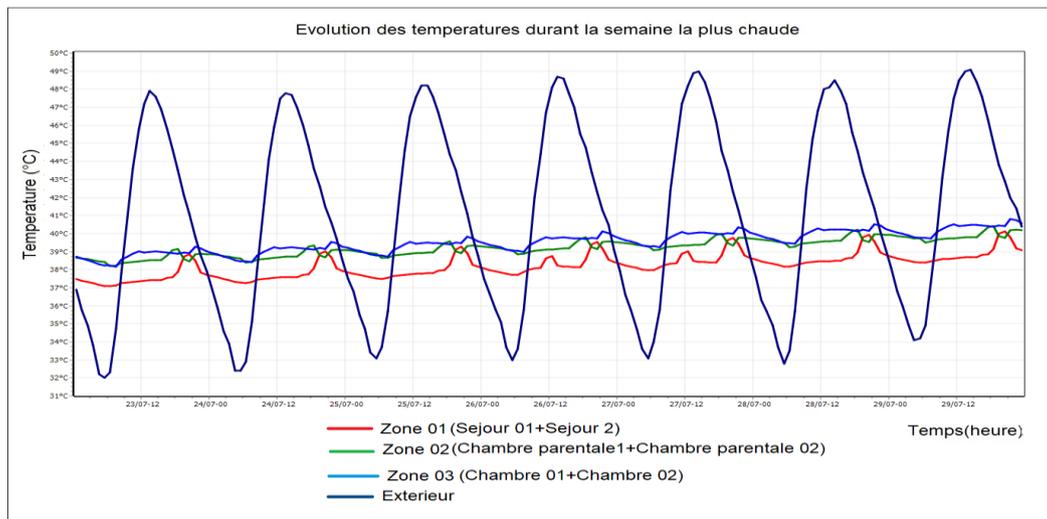


Figure 4.120:Evolution des températures du modèle proposé durant la semaine la plus chaude

- **Simulation sans consigne de thermostat durant la période hivernale**

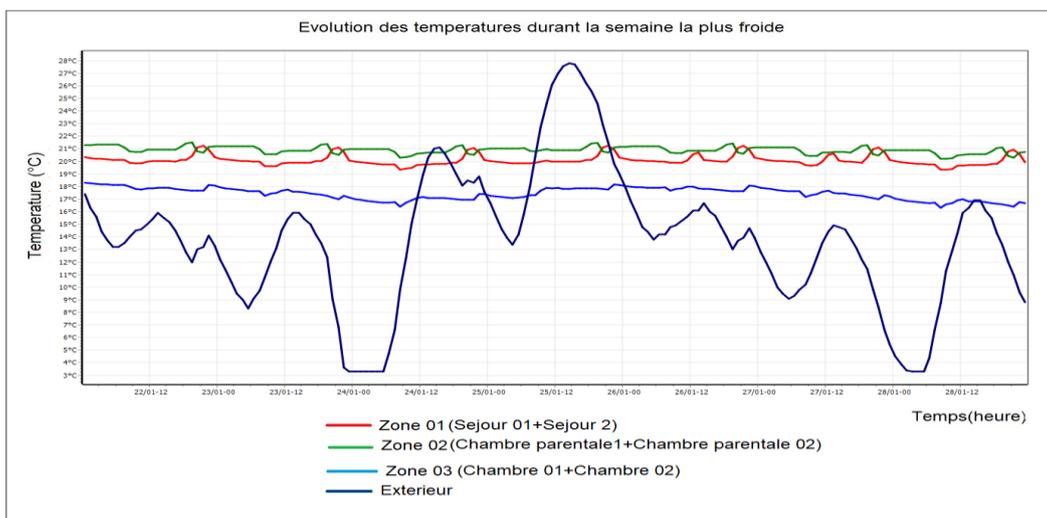


Figure 4.121:Evolution des températures du modèle proposé durant la semaine la plus froide

D'après les résultats obtenus de la simulation du modèle adaptatif proposé, nous avons constaté que le profil des températures est stable dans les différentes zones thermiques, plusieurs facteurs ont contribué à cette stabilité entre autre : La typologie introvertie (ouvertures qui donnent sur le patio), Intégration d'une isolation extérieure dans la toiture ;ce qui a permis d'éliminer les déperditions linéiques (par ponts thermiques), l'épaisseur adéquate de l'isolant intégrée dans la toiture, Utilisation des matériaux de construction valorisés comme la brique de terre et le mortier de terre améliorés par l'ajout de fibre de bois palmier, utilisation des éléments constructifs à forte inertie thermique et utilisation des protections solaires sur les surfaces vitrées, sur la partie Sud ainsi que dans le patio.

Les solutions passives adaptées dans ce modèle ont permis d'atteindre des écarts de températures estimés respectivement à 10.5°C, 9.5°C, et 9°C dans les zones 01,02 et 03. Nous avons aussi déduit que la proposition de l'orientation de la zone 01 vers le Nord (séjour 01+séjour 02) a permis d'améliorer les conditions intérieures dans cette zone (Voir **Figure 4.120**).

Durant la période hivernale, Nous avons aussi constaté que le profil des températures est stable dans les différentes zones, les températures sont respectivement estimées à 21°C, 20°C et 18°C dans les zones 02,01 et 03(Voir **Figure 4.121**).La baisse de température dans la zone 03 est due à l'utilisation des protections solaires sur les zones orientées Sud.

- **Simulation avec consigne de Thermostat**

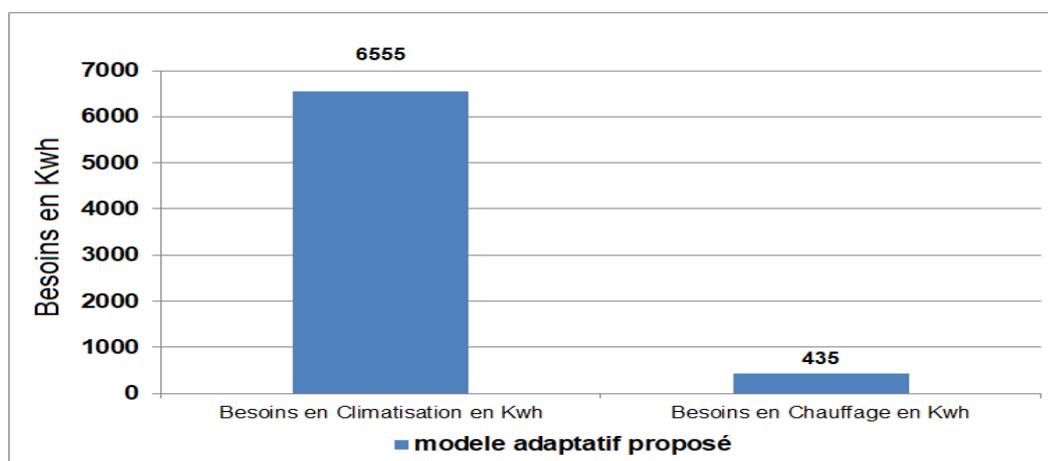


Figure 4.122: Besoins en chauffage et climatisation

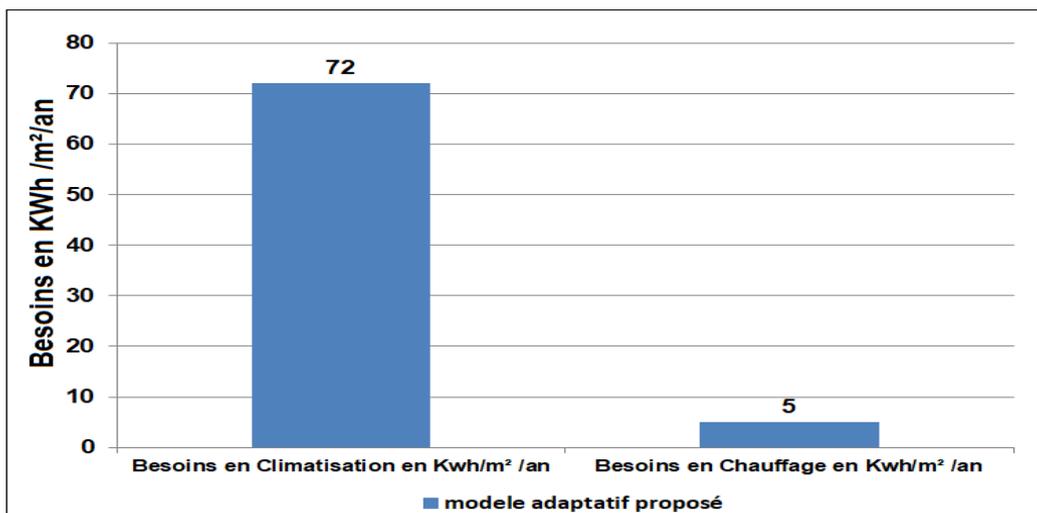


Figure 4.123: Besoins en chauffage et climatisation

Les besoins en climatisation ont été estimés à 6555 KWh d'une moyenne de 71.7 KWh /m²/an et les besoins en chauffage ont été estimés à 435 KWh d'une moyenne de 4.7 KWh /m²/an (**Voir Figures 4.122,4.123**). Le taux des besoins en climatisation représente 94% des besoins annuels.

Le modèle proposé est moins énergivore par rapport aux cas étudiés lors de cette recherche mais la consommation énergétique est au-dessus du seuil de l'indicateur de performance énergétique de 50 kWh/m² /an.

4.7 Conclusion

Les résultats obtenus des différentes typologies étudiées de la région d'In Saleh ont prouvé que le confort estival n'est pas conforme aux normes recommandées par Ashrae standard et DTR. Malgré toutes les solutions bioclimatiques passives proposées pour l'amélioration de l'habitat moderne ainsi que la création d'un modèle adaptatif aux conditions climatiques de la région étudiée, ce qui nécessite un système de rafraîchissement permettant non seulement la baisse des températures mais aussi l'augmentation du taux d'humidité relative. Nous avons opté pour l'adaptation du système rafraîchissement passif à courant descendant PDEC aux conditions climatiques de la région d'In Saleh et qui sera présenté dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 5

5 Amélioration du confort hygrothermique

5.1 Introduction :

Les résultats des différents variantes étudiées ont prouvé l'impact significatif des anciens procédés constructifs sur la performance énergétique de la typologie traditionnelle ainsi que celle moderne, les solutions d'amélioration proposées ont permis de stabiliser le profil de températures mais n'ont pas permis d'atteindre les normes de confort estival ,ce qui nécessite l'adaptation d'un système de rafraîchissement par humidification adiabatique .Nous présentons dans ce chapitre le système adapté, le modèle analytique ,l'étude paramétrique entreprise ainsi que la présentation des résultats et leurs interprétations

5.2 Adaptation du système Pdec :

Notre choix a porté sur le système de rafraichissement à courant descendant Pdec avec système de pulvérisation, car ce dernier permet d'améliorer le confort hygrothermique [89] et de faire des économies d'énergie [87], aussi il a été démontré par Kang et al [84] que le système est plus adéquat aux conditions climatiques des régions arides.

La performance du système est affectée par plusieurs paramètres entre autre : la configuration géométrique de la tour, taille des gouttelettes, débit d'eau injecté et conditions climatiques extérieures. Pour l'évaluation de la performance du système et son adaptation aux conditions climatiques de la région d'In Saleh, nous avons utilisé le modèle analytique développé par kang et al [89] ; ce modèle a été développé à travers une analyse paramétrique en utilisant un modèle FLUENT validé par rapport aux données expérimentales. Une analyse statistique a ensuite été utilisée pour formuler des modèles analytiques qui tiennent compte de toutes les relations trouvées entre les paramètres qui peuvent affecter la performance du système

5.2.1 Modèle analytique :

Deux équations de régression ont été formulées pour estimer la température et la vitesse de l'air soufflé à la sortie du système.

$$T_e = -13.6 + 1.35V_i + 0.386V_o + 0.0958\dot{m}_a - 0.07WF - 0.022D - 0.0865H + 0.686T_{db} + 0.709T_{wb} \quad (5.1)$$

L'estimation de la température dépend de la vitesse de l'air au sommet de la tour, du débit massique de l'air entrant, du débit d'eau injecté, de la hauteur de la tour, la température du bulbe humide et de la température sèche.

$$V_e = 0,107 + 0,706V_i + 0,21V_o + 0,00413 \dot{m}_a - 0,00016WF - 0,024H \quad (5.2)$$

L'estimation de la vitesse à la sortie du système dépend de la vitesse du vent au sommet de la tour, de la vitesse extérieure du vent, du débit massique, du débit d'eau injecté et de la hauteur de la tour.

Le débit de l'air et la vitesse au sommet de la tour peuvent être déterminés en utilisant la loi de conservation de la masse [102]

$$\dot{m}_a = \rho V_o A_{wc} \quad (5.3)$$

$$V_i = (A_{wc} / A_t) V_o \quad (5.4)$$

5.2.2 Paramètres étudiés:

Selon Kang et al [89], la performance du système varie significativement avec la variation du débit massique d'air, de la vitesse de l'air au sommet de la tour. Le débit massique de l'air est calculé en fonction de la zone de captation du vent et de la vitesse du vent extérieur. et la vitesse de l'air au sommet de la tour est calculée en fonction de la vitesse du vent extérieur et du rapport a ($a = A_{wc}/A_t$).

Afin d'identifier les paramètres adéquats et qui permettent d'améliorer la performance du système adapté aux conditions climatiques de la région d'In Saleh. Nous avons proposé deux tours étroites car il a été rapporté par [84,89] que les tours étroites sont les plus efficaces. Les sections transversales proposées des deux tours sont : $AT1 = 2 \times 1(m^2)$ et $AT2 = 1.2 \times 1(m^2)$, Nous avons ensuite fait varier les surfaces de captation du vent (A_{wc}) pour que les

rapports a_1 , a_2 et a_3 soient respectivement égaux à 0,25, 0,5 et 0,75, comme le montre **les Figures 5.1, 5.2** et le **Tableau 5-1**.

Pour une meilleure performance du système, Il a été recommandé que la hauteur du système soit comprise entre 3 et 5 m [86, 84, 89] et que la taille des gouttelettes soient comprises entre 30 μm à 100 μm [89]. Suite à ces recommandations nous avons fixé la hauteur de la tour à 5 m et la taille des gouttelettes à 50 μm . Nous avons également fait varier le débit de l'eau injectée pour améliorer les performances du système. **Le tableau 5-1** résume les différents paramètres proposés.

Tableau 5-1: Configuration proposée et variantes étudiées :

$A_t(\text{m}^2)$	A_{wc} (m^2)	$a = A_{wc} / A_t$	H(m)	D5(μm)	WF (L/h)
AT1 2x1	0.5x1	$a_1 = 0.25$	5	50	WF1=5
	1x1	$a_2 = 0.5$			WF2=10
	1.5x1	$a_3 = 0.75$			WF3=15 WF4=20 WF5=25
AT2 1.2x1	0.3x1	$a_1 = 0.25$	5	50	WF1=5
	0.6x1	$a_2 = 0.5$			WF2=10
	0.9x1	$a_3 = 0.75$			WF3=15 WF4=20 WF5=25

Pour le calcul des températures de l'air et des vitesses de l'air à la sortie de différentes variantes proposées, nous avons utilisé les données climatiques d'une journée typique de la période chaude. L'humidité peut être trouvée à

partir de la température de l'air de sortie, en supposant un refroidissement adiabatique [81,84- 87,89].

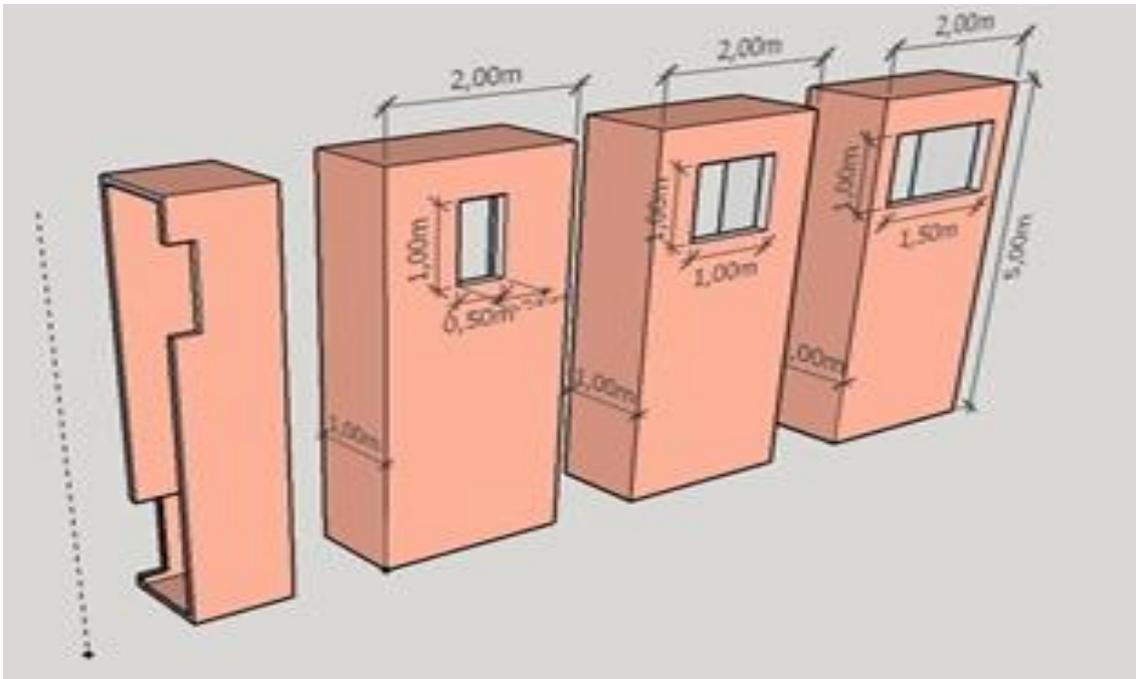


Figure 5.1: configuration géométrique de la Tour 1

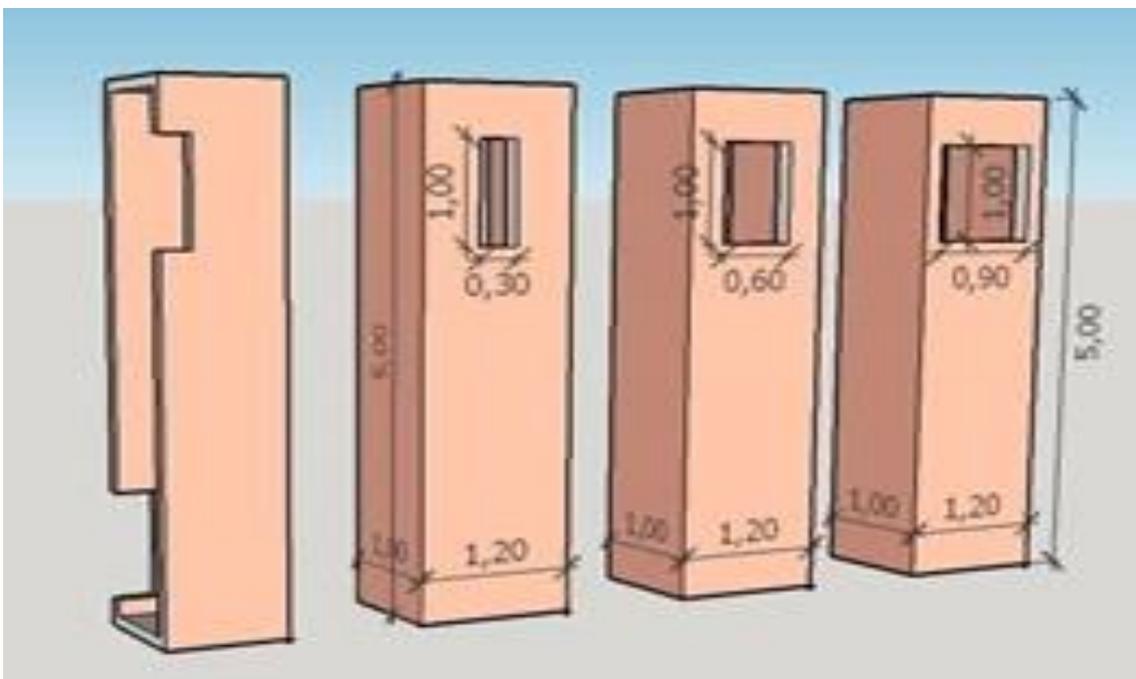


Figure 5.2: configuration géométrique de la Tour 2

Nous avons fixé la hauteur à 5m afin que le système soit plus performant et ce qui a été recommandé par [Kang et al [84], Kang et al [89], Kang et al [87]

et Yasmina Bouchahm et al[86]. Et la taille des gouttelettes à 50um. Car il a été recommandé que la taille des gouttelettes soit comprise entre 30 Um et100 Um pour que le système soit plus performant et ça permet aussi de réduire le débit d'eau injecté. [89]. Nous avons pris les données climatiques pour une journée typique de la période estivale de la région étudiée, 160 échantillons ont été estimés afin de calculer la température et la vitesse à la sortie du système. Le taux d'humidité a été déduit partir de la température on supposant que le processus de transformation est adiabatique [81, 84, 87,89].les résultats obtenus sont présentés ci-dessous :

5.3 Résultats et Discussion :

5.3.1 Résultats obtenus de la configuration AT1:

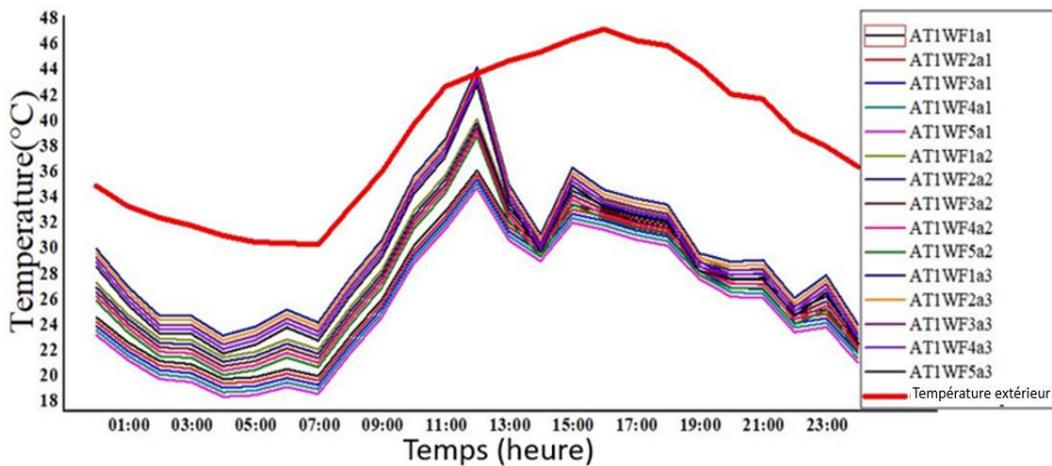


Figure 5.3:Evolution des températures de sortie de la configuration AT1.

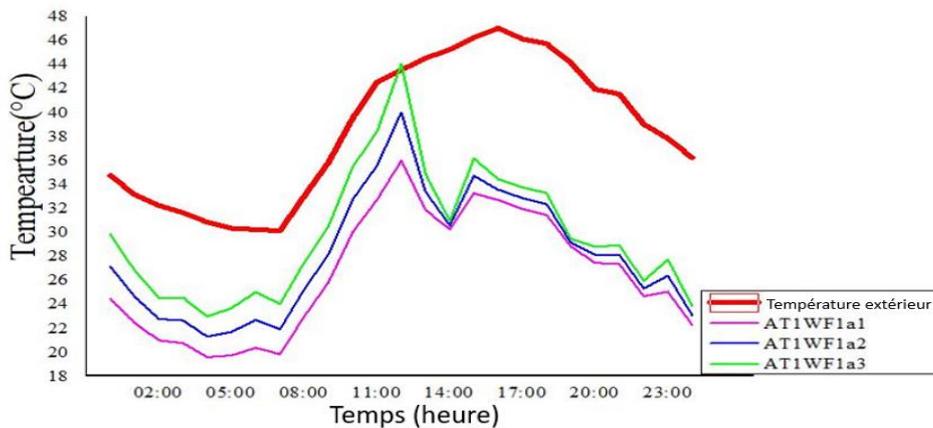


Figure 5.4:Evolution des températures de sortie de la configuration AT1 avec débit WF1=5L/h

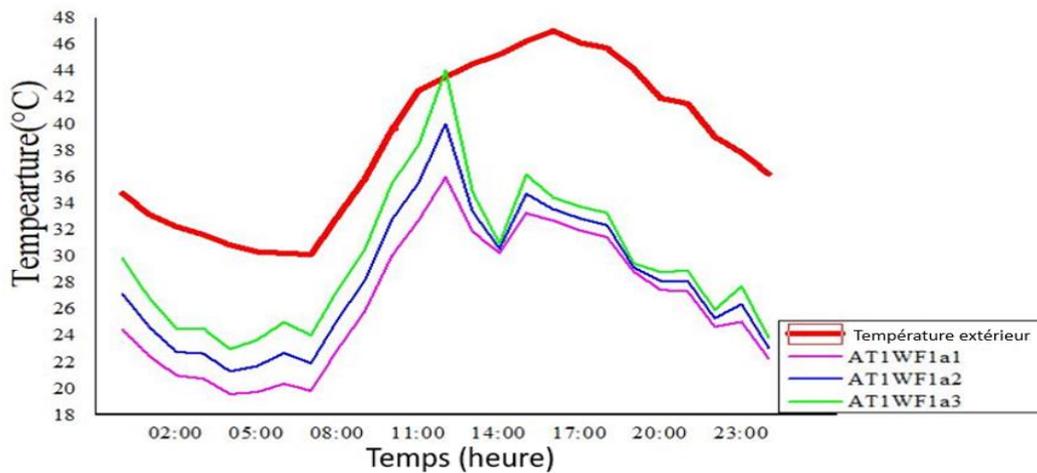


Figure 5.5: Evolution des températures de sortie de la configuration AT1 avec débit WF5=25L/h

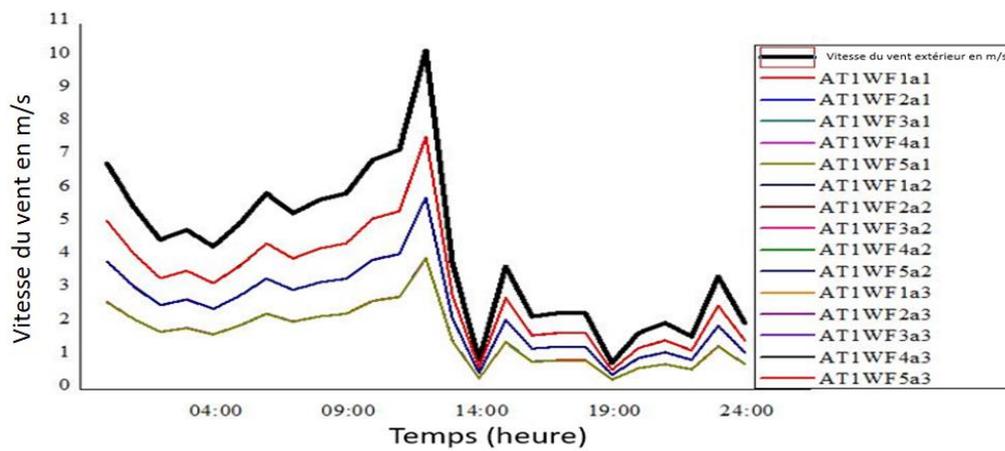


Figure 5.6: Evolution des vitesses du vent de sortie de la configuration AT1.

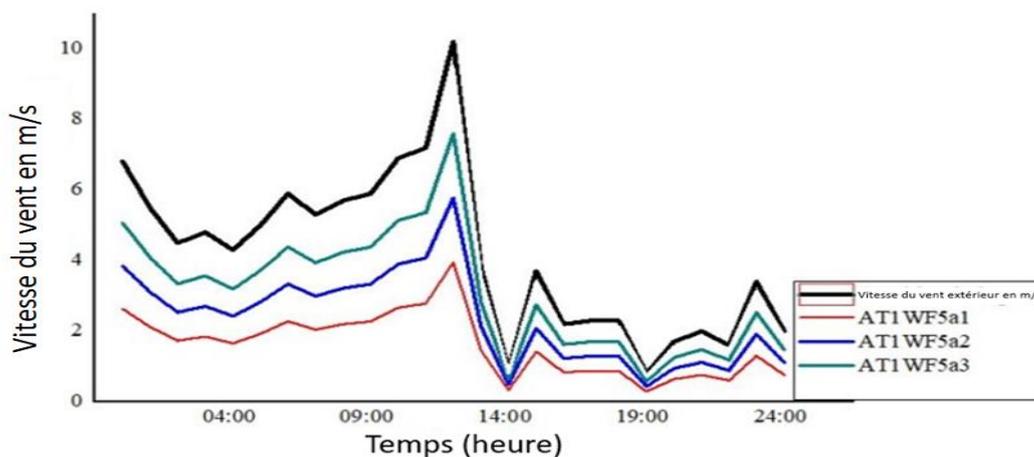


Figure 5.7: Evolution des Vitesses du vent à la sortie du système de la configuration AT1 avec débit WF5=25L/h.

5.3.2 Résultats de la configuration AT2

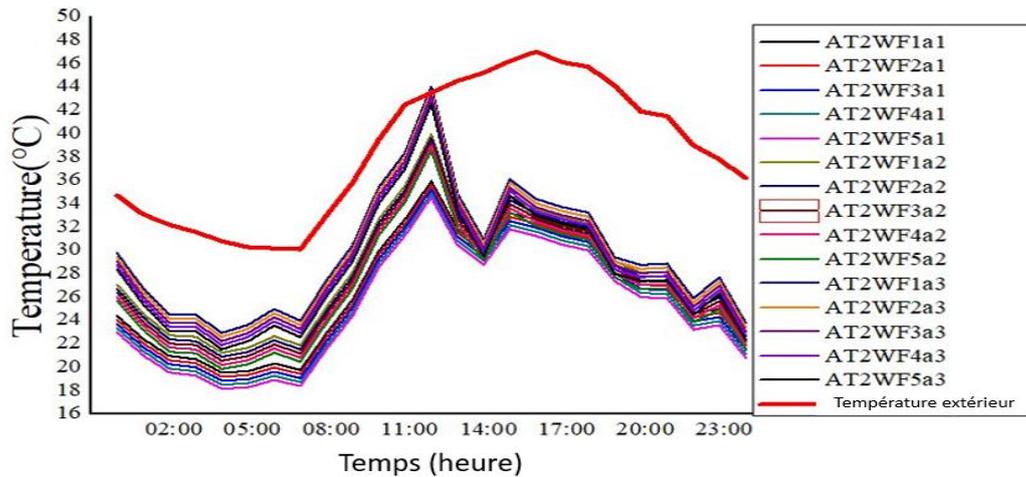


Figure 5.8: Evolution des températures de sortie de la configuration AT2.

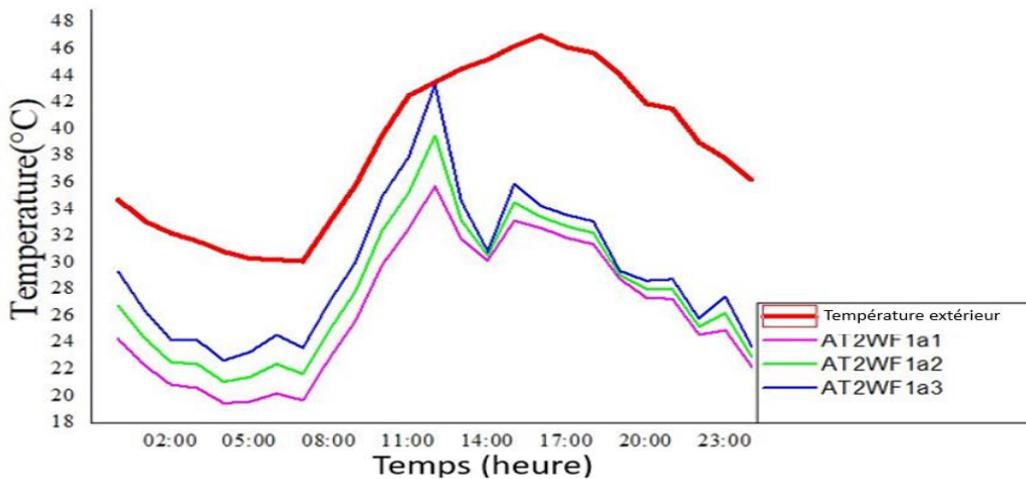


Figure 5.9: Evolution des températures de sortie de la configuration AT2 avec débit WF1=5L/h.

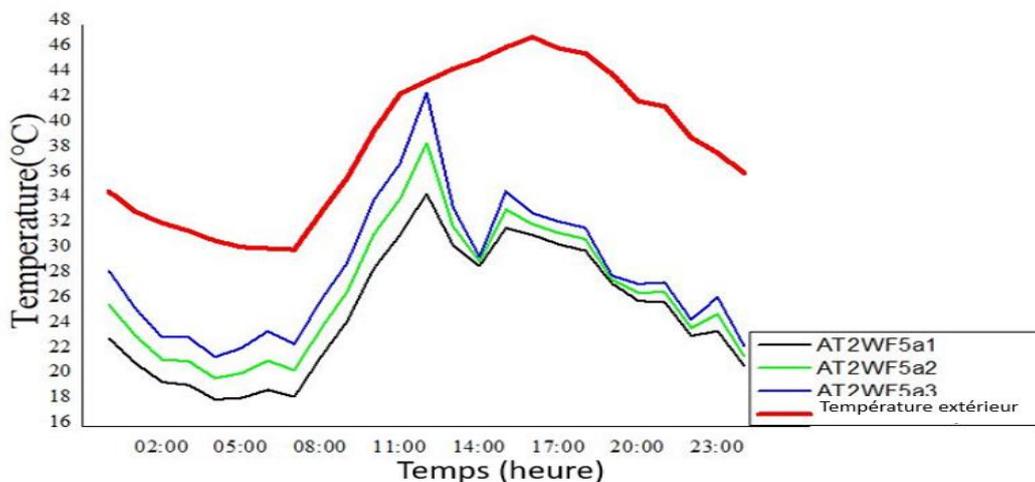


Figure 5.10: Evolution des températures de sortie de la configuration AT2 avec débit WF5=25L/h.

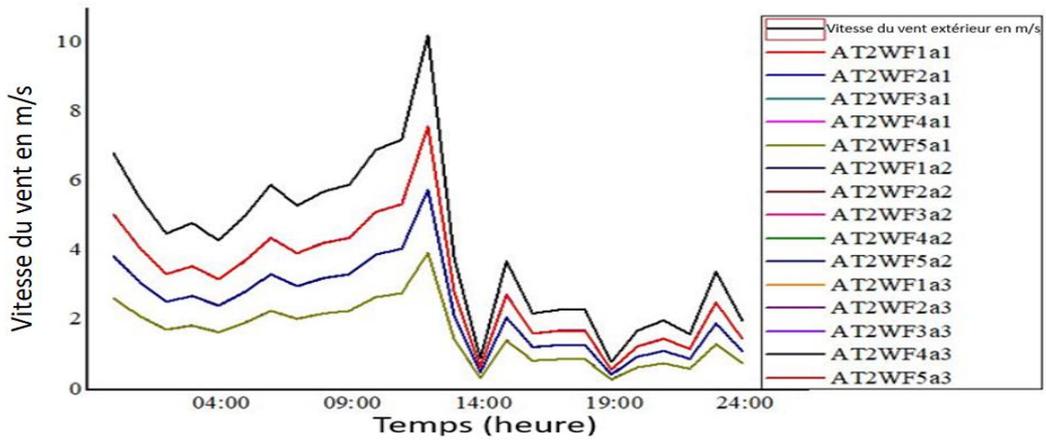


Figure 5.11: Evolution des vitesses du vent de sortie de la configuration AT2.

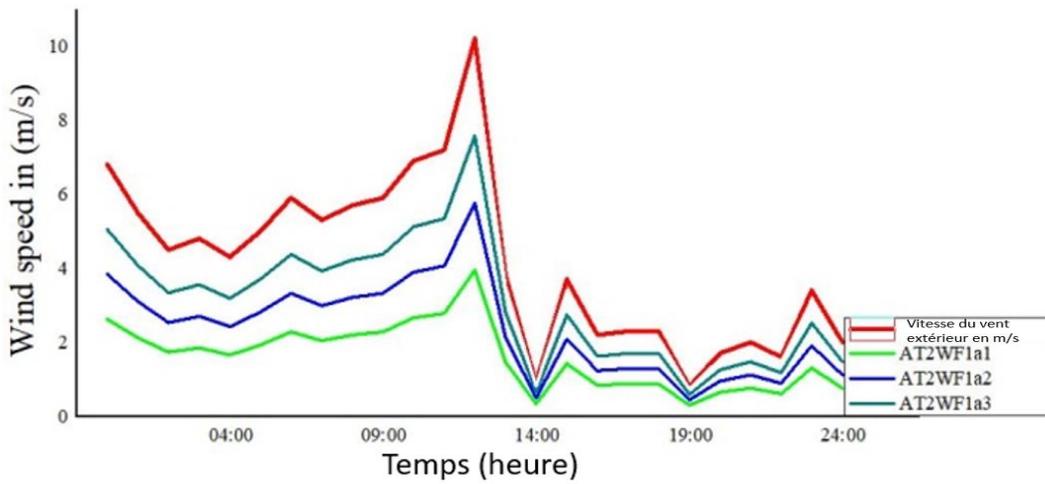


Figure 5.12: Evolution des Vitesses de sortie de la configuration AT2 avec WF1=5L/h

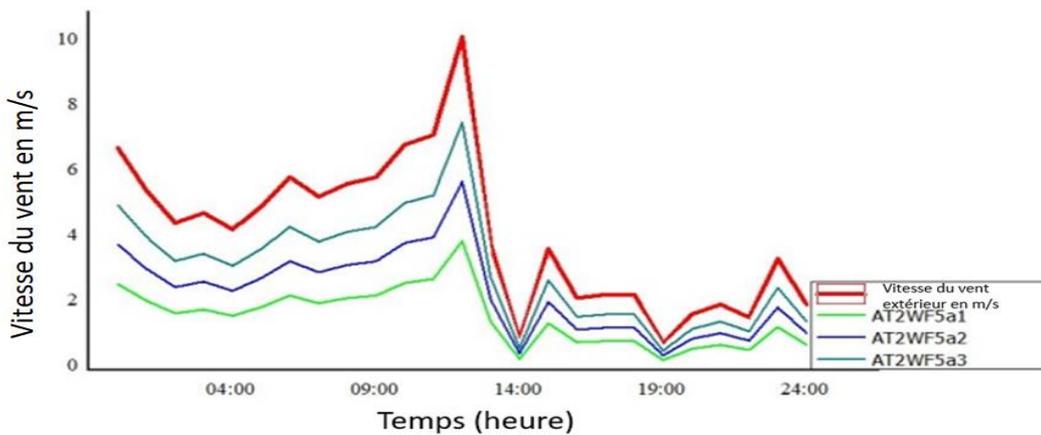


Figure 5.13: Evolution des Vitesses de sortie de la configuration AT2 débit avec débit WF5=25L/h.

5.3.3 Comparaison des résultats obtenus des deux configurations : AT1 AT2

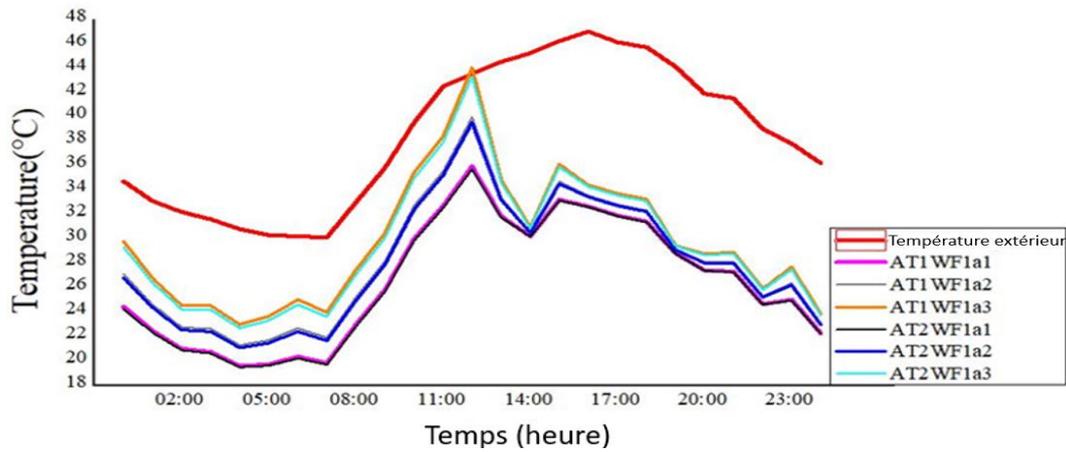


Figure 5.14: Comparaison des températures de sortie des configurations AT1 AT2, avec débit WF1=5L/h

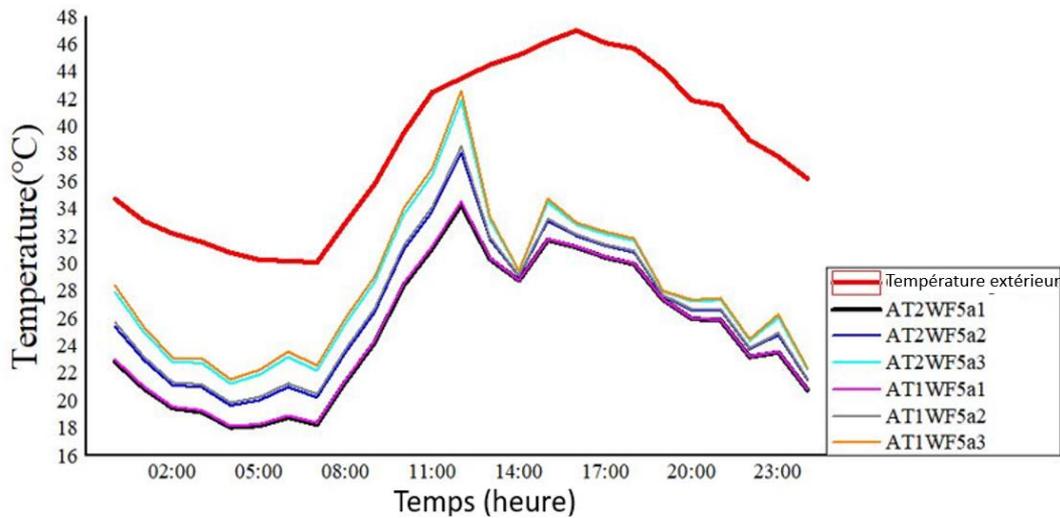


Figure 5.15: Comparaison des températures de sortie des configurations AT1 AT2, avec débit WF5=25L/h

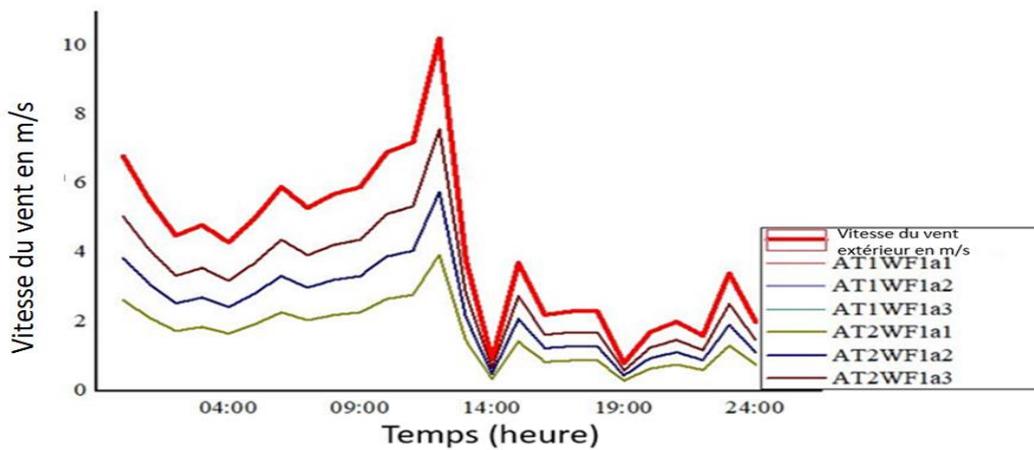


Figure 5.16: Comparaison des vitesses de sortie des deux configurations AT1 AT2 avec le débit WF1=5L/h

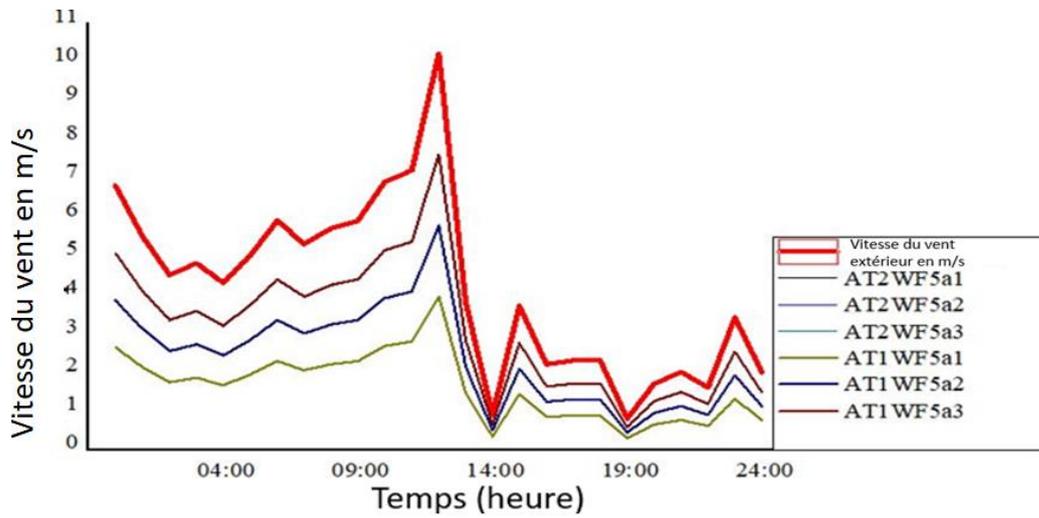


Figure 5.17: Comparaison des vitesses de sortie des deux configurations AT1 AT2 avec débit WF5=25L/h.

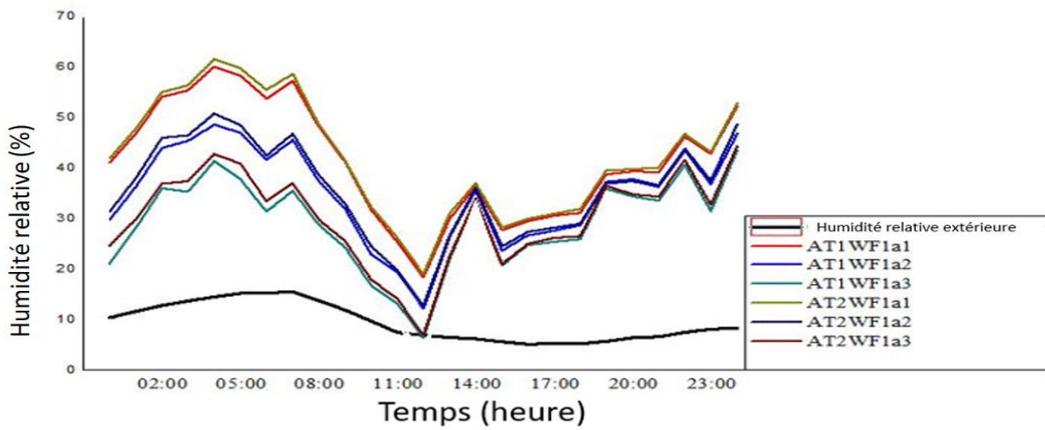


Figure 5.18: Comparaison des taux d'humidité de sortie pour les deux configurations avec débit WF1=5L/h

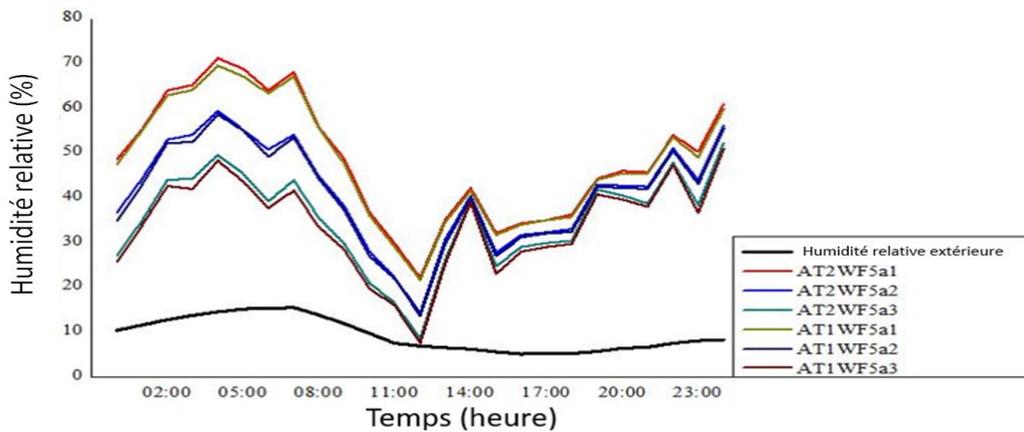


Figure 5.19: Comparaison des taux d'humidité de sortie pour les deux configurations avec débit WF5=25L/h

5.3.4 Interprétation des résultats obtenus

A partir des résultats obtenus des différentes variantes, nous avons constaté que l'évolution des températures de l'air (T_e), le taux d'humidité relative, la vitesse du vent (V_e) à la sortie du système sont presque similaires dans les cas AT1 et AT2 (Voir **Figures 5.14-5.19**), et qu'elles sont influencées par les conditions climatiques du site étudié. Cette dépendance climatique du système a déjà été confirmée dans plusieurs études antérieures [84, 87,89].

D'autres paramètres ont eu un impact significatif sur le fonctionnement du système, notamment le ratio a , le débit massique de l'air entrant et le débit d'eau injectée.

Les **Figures 5.3-5.5**, les **Figures 5.8-5.10**, les **Figures 5.14-5.15** et les **Tableaux 5-2-5-7** montrent que les températures à la sortie du système les plus élevées (T_e) ont été estimées à 12 :00 dû à la vitesse élevée du vent extérieur et qui a pu atteindre 10.2 m/s à cette heure-ci.

Afin de définir le cas le plus favorable, nous avons comparé les résultats des différentes variantes, ensuite nous avons comparé les résultats en utilisant le débit d'eau le plus défavorable ($WF1=5L/h$) et celui le plus favorable ($WF5=25L/h$).

Dans le cas du débit d'eau $WF1= 5L/h$; les températures de sortie (T_e) ont été estimées respectivement à 35,9 °C, 39,9 °C et 44°C (Voir **Figure 5.4**) pour les ratios a_1 , a_2 et a_3 pour le cas AT1, et à 35.7°C, 39.5°C et 43.3°C pour le cas AT2 (Voir **Figure 5.9**). Et pour le cas du débit d'eau $WF2 = 25L/h$ les températures (T_e) ont été estimées respectivement pour les ratios a_1 , a_2 , a_3 à 34,5°C, 38,5°C, 42,6°C pour le cas AT1 (Voir **Figure 5.5**) et à 34,3 °C, 38 °C, 41.9 °C pour le cas AT2 (Voir **Figure 5.10**). L'écart de température peut atteindre 8° C entre les résultats du rapport a_1 et a_3 pour les deux cas AT1 et AT2 à 12 :00. (Voir **Figures 5.14 et 5.15 et Tableaux 5-2 - 5-7**)

Et ce qui a été aussi constaté pour les résultats de la vitesse de l'air de sortie (V_e) pour les différents cas (Voir **Figures 5.6 et 5.7** ,**Figures 5.11-5.12** et **Figures 5.16 et 5.17**) ,les vitesses de sortie d'air les plus élevées ont été estimées à 12 :00 et qui ont pu atteindre respectivement à 3,95 m/s, 5,75 m/s, 7,6 m/s pour les deux variantes, La différence a pu atteindre 3,6 m/s entre les rapports a_1 , a_2 et a_3 (Voir **Tableaux 5-2-5-7**).

Les résultats sont presque similaires pour les deux cas AT1 et AT2 ; par conséquent, le changement des dimensions de la tour n'a pas eu d'impact significatif sur les vitesses du vent à la sortie du système (**Voir Tableaux 5-2 - 5-7**).

En ce qui concerne les taux d'humidité relative, Les taux d'humidité les plus faibles ont été estimés à 12 :00 avec le débit d'eau WF1, ils ont été respectivement estimés à 18,4 %, 12,2 % et 6. 4 % pour les rapports a1, a2, a3 dans le cas AT1 et 19 %,12.8 %,6.8 % dans le cas AT2.et avec l'utilisation du débit d'eau WF2, et ils ont été respectivement estimés à 21,7 %, 13,2 % et 7,5 % pour les rapports a1, a2, a3 dans le cas AT1 et 22.2 %,14.2 %,8.5 % dans le cas AT2. L'écart a pu atteindre 14 % entre le rapport a1 et a3 dans les différents cas à cette heure-ci (**Voir Figures 5.18 et 5.19 et Tableaux 5-2 et 5-7**).

Les résultats les plus défavorables ont été estimés à 12 :00 et ceci est dû non seulement à la température élevée à cette heure, mais aussi à la valeur élevée de la vitesse du vent extérieur qui peut atteindre 10,2 m/s. Cette vitesse a fait augmenter le débit massique de l'air entrant ainsi que la vitesse du vent au sommet de la tour, ce qui a fait par conséquent augmenter les températures et les vitesses du vent à la sortie du système et réduire les taux d'humidité (**Voir Tableaux 5-2 -5-7**).

Nous avons également constaté une chute de la température de sortie à 14 :00 (**Voir Figures 5.3-5.5, Figures 5.8-5.10 et Figures 5.14, 5.15**) malgré que la température extérieure soit égale à 45,2°C, mais les températures à la sortie du système sont presque similaires pour les deux cas AT1 et AT2, ce qui est dû à la faible vitesse du vent extérieur enregistrée à ce moment-là et qui est égale à 0,9 m/s. Les températures à la sortie du système obtenues en utilisant un débit de 5L/h Sont estimées respectivement à 30,1°C, 30,55 °C, 30,90 °C pour les rapports a1, a2, a3 pour le cas AT1, et à 30.1 °C, 30.5 °C, 30.84 °C pour le cas AT2. Et pour ceux en utilisant le débit WF5 = 25L/h les températures sont estimées respectivement pour les rapports a1, a2, a3 à 28.8 °C,29.15 °C,29.5 °C pour le cas AT1 et à 28.7 °C,29.10 °C,29.4,2.7°C pour le cas AT2.La différence de température entre le rapport a1et a3 peut atteindre 1 °C pour les deux cas AT1 et AT2 à cette heure-ci.

Les vitesses du vent extérieur ont diminué à cette heure-ci et ont été respectivement estimées à 0,33 m/s, 0.49 m/s et 0.65 m/s. Les résultats sont presque similaires pour les deux cas AT1 et AT2 avec le débit d'eau WF1 et WF5 (**Voir Figures 5.6, 5.7, 5.11, 5.12**).

En ce qui concerne les taux d'humidité relative, comme le montre **les Figures 5.18 et 5.19**, les taux d'humidité relative ont augmenté à cette heure-ci. Pour le débit WF1, ils ont été respectivement estimés à 36.4 %, 35,7 % et 33,8 % pour les rapports a1, a2, a3 dans le cas AT1 et à 37 %, 36,1 % et 34 % dans le cas de la configuration AT2. Avec l'utilisation du débit WF5 et ils ont été respectivement estimés à 41.7 %, 40 % et 39 % pour les ratios a1, a2 et a3 dans le cas AT1 et à 42 %, 40.4 % et 39.9 % dans le cas AT2. La différence peut atteindre 5 % entre le rapport a1 et a3.

Nous avons également constaté que les températures et les vitesses de l'air à la sortie système diminuent et que les taux d'humidité relative augmentent suite à la diminution de la vitesse du vent extérieur (**Voir Figures 5.18, 5.19**).

Par exemple, à 16 h, malgré que la température puisse atteindre 47 °C, et la vitesse du vent extérieur 2,1 m/s et le taux d'humidité relative extérieur 5,1 %. Les températures à la sortie du système ont été estimées à 31°C, la vitesse du vent à 0,8 m/s et le taux d'humidité à 34 %.

Pendant La nuit, les températures et les vitesses du vent à la sortie du système diminuent et les taux d'humidité relative augmentent en raison de la diminution des températures extérieures, des vitesses du vent extérieur et de l'augmentation de l'humidité relative par exemple : à 23 :00, la température extérieure diminue et atteint 37,8 °C, la vitesse du vent extérieur 3,4 m/s et l'humidité relative extérieure atteint 8,1 %, les températures à la sortie du système ont été estimées à 23.54 °C, les vitesses du vent à 1.3 m/s et les taux d'humidité à 50 %.

Après l'analyse des différents résultats obtenus, nous avons déduit que :

Le débit d'eau WF2 a permis de réduire de 1,5 °C par rapport au débit WF1, et que les résultats des cas AT1 et AT2 sont presque similaires malgré les sections transversales et les surfaces de captation du vent soient différentes, mais puisque les ratios a1, a2, a3 sont similaires, nous n'avons obtenu qu'une différence de 0,5°C C entre les cas AT1 et AT2.

Le cas le plus favorable est le cas de la tour la plus étroite AT2 avec un débit de 25L/h dans le cas du rapport $a1 = 0.25$. Ce ratio est le plus favorable car il a permis de réduire de 8 °C dans les conditions les plus défavorables.

Les Tableaux présentés ci-dessous résument les résultats les plus favorables et les plus défavorables obtenus de l'étude paramétrique effectuée.

Tableau 5-2: Résultats obtenus de la configuration AT1 avec ratio $a1$

AT1 avec debit WF1				a1			
heure	T (°C)	H %	Vo m/s	Te (°C)	H %	Ve m/s	m'a
07:00	30.1	15.5	5.3	19.8	67.1	2.2	3.18
12:00	43.5	6.9	10.2	35.9	18.4	3.95	6.12
14:00	45.2	6.2	0.9	30.1	36.4	0.33	0.54
16 :00	47	5.1	2.2	32.6 5	29.5	0.84	1.32
19 :00	44	5.7	0.8	28.8	38.8	0.29	0.48
23:00	37.8	8.1	3.4	25	42.9	1.3	2.04
AT1 avec debit WF5				a1			
heure	T (°C)	H%	Vo m/s	Te (°C)	H%	Ve m/s	m'a
07:00	30.1	15.5	5.3	18.0 4	68	2.04	3.18
12:00	43.5	6.9	10.2	34.5	21.7	3.95	6.12
14:00	45.2	6.2	0.9	28.8	41.5	0.33	0.54
16:00	47	5.1	2.2	31.2 5	34	0.84	1.32
19:00	44	5.7	0.8	27.4	44	0.29	0.48
23:00	37.8	8.1	3.4	23.3 1	49.1	1.3	2.04

Tableau 5-3: Résultats obtenus de la configuration AT1 avec ratio $a2$

AT1 avec debit WF1				a2			
heure	T (°C)	H %	Vo m/s	Te (°C)	H %	Ve m/s	m'a
07:00	30.1	15.5	5.3	21.9	45.6	2.99	6.36
12:00	43.5	6.9	10.2	39.9	12.2	5.77	12.24
14:00	45.2	6.2	0.9	30.5	35.7	0.49	1.08
16:00	47	5.1	2.2	33.5	26.7	1.25	2.64

19:00	44	5.7	0.8	29.1	36.9	0.44	0.96
23:00	37.8	8.1	3.4	26.3	36.8	1.91	4.08
AT1 avec debit WF5				a2			
heure	T (°C)	H%	Vo m/s	Te (°C)	H %	Ve m/s	m'a
07:00	30.1	15.5	5.3	20.49	53.5	2.99	6.36
12:00	43.5	6.9	10.2	38.5	13.2	5.77	12.24
14:00	45.2	6.2	0.9	29.1	40	0.49	1.08
16:00	47	5.1	2.2	32.1	31.2	1.23	2.64
19:00	44	5.7	0.8	27.11	42.5	0.43	0.96
23:00	37.8	8.1	3.4	24.9	43.1	1.91	4.08

Tableau 5-4: Résultats obtenus de la configuration AT1 avec ratio a3

AT1 avec debit WF1				a3			
heure	T (°C)	H %	Vo m/s	Te (°C)	H %	Ve m/s	m'a
07:00	30.1	15.5	5.3	23.99	35.3	3.94	9.54
12:00	43.5	6.9	10.2	44	6.4	7.6	18.4
14:00	45.2	6.2	0.9	30.9	33.8	0.65	1.62
16:00	47	5.1	2.2	34.4	24.8	1.62	3.96
19:00	44	5.7	0.8	29.4	35.9	0.58	1.44
23:00	37.8	8.1	3.4	27.7	31.5	2.52	6.12
AT1 avec debit WF5				a3			
heure	T (°C)	H%	Vo m/s	Te (°C)	H%	Ve m/s	m'a
07:00	30.1	15.5	5.3	22.59	41.6	3.94	9.54
12:00	43.5	6.9	10.2	42.6	7.5	7.6	18.4
14:00	45.2	6.2	0.9	29.5	39	0.65	1.62
16:00	47	5.1	2.2	33	28	1.62	3.96
19:00	44	5.7	0.8	28	40.8	0.58	1.44
23:00	37.8	8.1	3.4	26.3	36.6	2.52	6.12

Tableau 5-5: Résultats obtenus de la configuration AT2 avec ratio a1

AT2 avec debit WF1				a1			
Heure	T°C (°C)	H %	Vo m/s	Te (°C)	H %	Ve m/s	m'a
07:00	30.1	15.5	5.3	19.68	58.7	2.04	1.90
12:00	43.5	6.9	10.2	35.70	19	3.94	3.67
14:00	45.2	6.2	0.9	30.17	37	0.33	0.32
16:00	47	5.1	2.2	32.61	30	0.84	0.79
19:00	44	5.7	0.8	28.78	39.5	0.29	0.28
23:00	37.8	8.1	3.4	24.9	43.1	1.3	1.22
AT2 avec debit WF5				a1			
heure	T°C	H%	Vo m/s	Te (°C)	H %	Ve m/s	m'a
07:00	30.1	15.5	5.3	18.28	68	2.04	1.9
12:00	43.5	6.9	10.2	34.3	22.2	3.94	3.67
14:00	45.2	6.2	0.9m/s	28.77	42.2	0.33	0.32
16:00	47	5.1	2.2	31.23	34.3	0.84	0.79
19:00	44	5.7	0.8	27.38	44.2	0.29	0.28
23:00	37.8	8.1	3.4	23.54	50.3	1.3	1.22

Tableau 5-6: Résultats obtenus de la configuration AT2 avec ratio a2

AT2 avec debit WF1				a2			
heure	T°C (°C)	H %	Vo m/s	Te (°C)	H %	Ve m/s	m'a
07:00	30.1	15.5	5.3	21.65	46.8	2.98	3.81
12:00	43.5	6.9	10.2	39.5	12.8	5.75	7.34
02:00	45.2	6.2	0.9	30.51	36.1	0.49	0.65
16:00	47	5.1	2.2	33.43	27.4	1.23	1.58
19:00	44	5.7	0.8	29.07	37.3	0.44	0.57
23:00	37.8	8.1	3.4	26.2	37.5	1.9	2.48
AT2 avec debit WF5				a2			
heure	T°C	H%	Vo m/s	Te (°C)	H %	Ve m/s	m'a
07 :00	30.1	15.5	5.3	20.25	54	2.98	3.81
12:00	43.5	6.9	10.2	38.10	14.2	5.75	7.34
14:00	45.2	6.2	0.9	29.11	40.4	0.49	0.65

16:00	47	5.1	2.2	32.03	31.7	1.23	1.58
19:00	44	5.7	0.8	27.67	42.9	0.44	0.57
23:00	37.8	8.1	3.4	24.8	43.3	1.9	2.48

Tableau 5-7: Résultats obtenus de la configuration AT2 avec ratio a3

AT2 avec debit WF1				a3			
heure	T°C (°C)	H %	Vo m/s	Te (°C)	H %	Ve m/s	m'a
07:00	30.1	15.5	5.3	23.62	37	3.92	5.72
12:00	43.5	6.9	10.2	43.29	6.8	7.57	11
14:00	45.2	6.2	0.9	30.84	34	0.65	0.97
16:00	47	5.1	2.2	34.24	25	1.62	2.37
19:00	44	5.7	0.8	29.37	36.5	0.58	0.86
23:00	37.8	8.1	3.4	27.7	32.7	2.52	6.12
AT2 avec debit WF5				a3			
Heure(h)	T°C	H%	Vo m/s	Te (°C)	H %	Ve m/s	m'a
07:00	30.1	15.5	5.3	22.2	43.9	3.92	5.72
12:00	43.5	6.9	10.2	41.9	8.5	7.57	11
14:00	45.2	6.2	0.9	29.4	39.3	0.65	0.97
16:00	47	5.1	2.2	32.8	29	1.62	2.37
19:00	44	5.7	0.8	27.97	41.8	0.58	0.86
23:00	37.8	8.1	3.4	26.3	38.4	2.52	6.12

5.3.5 Les principales conclusions de l'adaptation du système Pdec aux conditions climatiques d'In Saleh :

Selon les résultats obtenus nous avons constaté que :

- ✓ L'augmentation du débit d'eau injecté permet de réduire les températures à la sortie du Système ; l'utilisation du débit 25L/h permet de réduire la température de sortie de 1.5°C par rapport à l'utilisation du débit 5L/h.
- ✓ Dans le cas où les températures extérieures varient de 30°C à 39°C avec des vitesses de l'air supérieur à 2m/s et inférieur à 8m/s les températures de sortie ne dépassent pas 30°C.

- ✓ Dans le cas où les températures extérieures dépassent 44°C et les vitesses de l'air sont inférieures à 2m/S aussi Les températures de sortie ne dépassent pas 30°C.
- ✓ Dans le cas où les températures extérieures sont comprises entre 30 et 35°C et la vitesse du vent extérieur inférieure à 5 m/s, les températures de sortie ne dépassent pas 25 °C.
- ✓ quand Le rapport $0.25 < a < 0.5$ permet l'obtention des résultats satisfaisants même dans le cas le plus défavorable pour les températures, taux d'humidité ainsi que la vitesse du vent à la sortie du système. Ce résultat infirme ceux trouvés par Kang et al [83] qui avait confirmé que quand a soit inférieur à 0.5, l'air à la sortie du système soit saturé. Cette contradiction est due aux conditions extrêmes du site étudié et qui diffèrent à celles proposées lors de son étude.

CONCLUSION GENERALE

Dans le cadre de cette recherche nous avons évalué l'impact de l'utilisation des anciens procédés constructifs dans les habitations traditionnelles, l'impact de changement de ces procédés et l'utilisation de nouvelles typologies modernes sur le confort thermique et la consommation énergétique dans la région aride d'In Saleh. Nous avons procédé aussi à l'amélioration de ces typologies modernes par l'intégration des procédés constructifs traditionnels et traditionnels valorisés.

les résultats de cette phase de recherche et ceux de la littérature nous ont permis de tirer les recommandations nécessaires pour la création d'un modèle adaptatif aux conditions climatiques de la région d'In Saleh. Nous avons même contribué dans le cadre de cette recherche à l'amélioration du confort hygrothermique par l'adaptation d'un système de rafraîchissement à courant descendant.

En premier lieu nous avons effectué une investigation expérimentale sur une habitation traditionnelle de la région d'In Saleh. Les résultats de cette étape d'étude ont montré qu'on peut atteindre un écart de 8°C durant la période de surchauffe, grâce aux solutions passives adaptées dans le cas étudié. Les résultats ont même montré que l'isolation de la toiture a permis d'atteindre un écart de 12°C ,malgré les écarts obtenus mais le confort n'est pas atteint durant cette période.

En second lieu, nous avons opté pour la simulation thermique dynamique à l'aide du logiciel pleades comfie afin d'étudier le comportement thermique des différents cas à long terme. En cette phase de recherche, nous avons étudié quatre maisons : deux maisons traditionnelles, une maison moderne ayant subi des modifications (intégration des matériaux locaux dans les éléments constructifs) et une maison moderne représentative du logement contemporain adapté dans la région d'In Saleh :

*la simulation thermique dynamique du cas d'étude 01, nous a permis d'évaluer son comportement thermique durant toute l'année et de déterminer les besoins en chauffage et climatisation. Les résultats ont montré qu'on peut atteindre un écart de 8°C durant la période chaude et que le confort est atteint

durant la période hivernale, il a même été montré que les résultats théoriques sont proches à ceux expérimentaux.

La simulation avec consigne de thermostat nous a permis de déterminer les besoins en climatisation et chauffage et qui ont été respectivement estimés à 118 kWh/m² /an et 4 kWh/m² /an.

*La simulation thermique dynamique du cas d'étude n°02, nous a permis de faire une étude paramétrique afin d'évaluer l'impact de choix des matériaux de construction sur la performance énergétique du cas étudié. Les résultats obtenus ont montré que l'utilisation des matériaux locaux dans la typologie traditionnelle a permis d'atteindre un écart de 10°C durant la période la plus chaude de l'année et d'atteindre le confort hivernal. Les résultats ont montré aussi que le remplacement de ces matériaux locaux par de l'hourdis, béton et parpaing a provoqué des fluctuations des températures et qui ont pu atteindre 44°C dans les pièces de confort, mais après renforcement de la toiture par l'intégration des isolants naturels, les fluctuations ont diminué et ce qui a permis d'atteindre un écart de 7°C. En terme de besoins en chauffage et climatisation ils ont été respectivement estimés à 6 kWh/m² /an et 83 kWh/m² /an dans le cas de la maison avec matériaux locaux, à 164 kWh/m² /an et 23 kWh/m² /an dans le cas de la maison en hourdis et parpaing et à 95 kWh/m² /an et 18 kWh/m² /an dans le cas du renforcement de la toiture, et ce qui a permis d'atteindre un taux de réduction de 42% par rapport la maison en parpaing.

*Les résultats de la simulation thermique dynamique du cas d'étude 03 ont prouvé l'impact de changements des procédés constructifs sur la performance du cas étudié. Des solutions passives ont été proposées afin d'améliorer la performance énergétique de cette typologie moderne

Les résultats ont montré que :

* L'ajout des déchets d'adobe et du mortier de terre dans la toiture en hourdis permet d'atteindre un écart de 4°C.

*Le renforcement de la toiture par l'intégration des différents isolants naturels du bois de palmier, permet d'atteindre un écart de 7°C durant la période estivale et de garantir le confort hivernal. Ce qui a permis de réduire

60% des besoins en chauffage et 30% en climatisation par rapport à l'état initial.

*L'intégration d'une couche de 7 cm d'isolation avec traitement de la surface intérieure de la toiture par un mortier de plâtre à matériaux de changement de phase a permis d'atteindre un écart de 7°C en période estivale et d'atteindre des températures de 19°C durant la période hivernale. Ce qui a permis de réduire jusqu'à 45% pour le chauffage et 38% pour la climatisation.

*L'étude paramétrique effectuée sur le cas d'étude 04 a permis d'identifier les paramètres adéquats des différentes solutions passives proposées, afin d'améliorer la performance énergétique du logement moderne de cette région. Nous avons pu déterminer l'épaisseur adéquate pour le renforcement de la toiture, la configuration des murs extérieurs et la configuration géométrique et dimension des protections solaires intégrés

Les résultats de cette étude paramétrique ont montré que l'utilisation de :

*La toiture isolée avec 20 cm de pétiote de palmier permet d'atteindre un écart de 2°C par rapport au cas initiale, en période estivale ce qui a permis de réduire les besoins en climatisation de 37%.

*La Toiture isolée avec 20 cm de pétiote de palmier et murs en brique de terre améliorée ayant une épaisseur de 40 cm, avec ajout de mortier de terre, permet d'atteindre un écart de 3°C à 4°C par rapport au cas initial et de 6°C à 8°C par rapport à l'extérieur ce qui a permis de réduire 51% des besoins en climatisation.

*La Toiture isolée avec 20 cm de pétiote de palmier ,murs en brique de terre améliorée ayant une épaisseur de 40 cm avec ajout de mortier de terre et intégration des brises soleil à lames horizontale d'une profondeur de 20 cm, couverture de 1/3 de la largeur de la cour et intégration d'une protection solaire côté sud a permis d'atteindre un écart de 6°C par rapport au cas initial et de 10 °C par rapport à l'extérieur ce qui a permis de réduire les besoins en climatisation de 65%.

Et durant la période hivernale les solutions proposées ont permis d'améliorer le confort hivernal, par conséquent réduire les besoins en chauffage de 54%,91% et 90% respectivement pour les 3 variantes retenues.

Les résultats obtenus des différents cas étudiés lors de cette recherche nous ont permis de proposer un modèle adaptatif dont les caractéristiques sont : Typologie introvertie, Aménagement d'un espace central, séjours orientés vers le Nord, Utilisation des murs en brique de terre améliorée ayant une épaisseur de 40 cm, traitement des surfaces avec du mortier de terre, Utilisation des murs intérieurs de 15 cm en brique de terre améliorée, utilisation d'une toiture isolée en pétiole et tronc de bois de palmier et intégration des protections solaires.

Les résultats de simulation du modèle adaptatif ont montré que les solutions proposées permettent de stabiliser le profil des températures et d'atteindre des écarts de 9,5°C et 10,5°C durant la semaine la plus chaude de l'année. Et d'atteindre des températures de 19°C à 20°C durant la période hivernale. Les besoins en climatisation ont été estimés à 71.7 kWh/m² /an et ceux en chauffage à 4.7 kWh/m² /an.

Les résultats obtenus lors de cette phase de recherche ont prouvé l'efficacité énergétique des anciens procédés constructifs et leur contribution à l'amélioration de la performance énergétique de la maison moderne de la région d'In Saleh, mais ces solutions ne suffisent pas pour garantir le confort estival d'où la nécessité de l'adaptation du système de rafraîchissement à courant descendant, qui permet la baisse de la température ainsi que l'augmentation du taux d'humidité relative.

Une étude paramétrique a été faite sur le système adapté afin d'identifier les paramètres adéquats, qui permettent d'améliorer son rendement et son adaptation par rapport aux conditions climatiques de la région, les résultats obtenus ont montré que :

- L'utilisation du débit d'eau 25L/h a permis de réduire 1.5°C par rapport à l'utilisation du débit 5L/h.

- la tour la plus étroite est la plus performante.

- l'utilisation d'un rapport a qui varie de 0.25 à 0.5 permet d'avoir des résultats satisfaisants, en permettant de réduire les températures et d'atteindre un écart de 15°C et d'augmenter le taux d'humidité jusqu'à 60%.

La solution proposée peut être une solution alternative à la climatisation classique en permettant non seulement de baisser les températures mais aussi d'augmenter le taux d'humidité relative et contribuer à l'amélioration du confort estival.

Les résultats obtenus ouvrent une nouvelle perspective de recherche, celle d'une étude expérimentale qui permettra d'évaluer le rendement du système de rafraîchissement à courant descendant intégré dans un cas d'étude réel adapté aux conditions climatiques de la région d'In Saleh.

Un autre projet de recherche pourrait être développé, s'agissant d'une étude technico-économique qui permettra d'évaluer la rentabilité des solutions constructives proposées

REFERENCES:

- [1] Le Corbusier, Vers une architecture, Champs-Flammarion, Paris, 1995(1re édition 1923), p. 73. busier 1995.
- [2] Stephen Healy.2008. Air- conditioning and the 'homogenization' of people and built environments. Building Research & Information, 36:4, 312-322,
- [3]Liu Yang a, Haiyan Yan a,b, Joseph C. Lam thermal comfort and building energy consumption implications –A review .Applied Energy 115 (2014) 164–173.
- [4]Consommation Energétique finale en Algérie. Chiffres clés Année 2015. (Edition 2017).Agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie .APRUE. <https://www.energy.dz>.
- [5] Karima Benhalilou. Impact de la végétation grimpante sur le confort hygrothermique estival du bâtiment. Cas du climat semi-aride. 2008.
- [6] Rébha Ghedamsia, Nouredine Settoua, Abderrahmane Gouarehb, Adem Khamoulic, Nadia Saifia ,Bakhta Recioub, Boubekker Dokkaraa,2015. Modeling and forecasting energy consumption for residential buildings in Algeria using bottom-up approach, Energy and Buildings, ENB-6348; No. of Pages 9.
- [7]Bulletin trimestriel de l'APRUE N°9 - Avril 2006 revue des énergies renouvelables.
- [8]Bachir Senouci.Energies Renouvelables en Algérie. Quelles perspectives ? Edition Fondation Friedrich Ebert.Alger 2012.<http://www.fes-alger.org>
- [9] M.Chabi. Etude bioclimatique du logement social-participatif de la vallée du M'Zab.cas du Ksar de Tafilelt Mémoire de magister. Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou .juin 2009.
- [10] Atlas Encyclopedia .Larousse Edition 2014.
- [11] A. Mokhtari¹, K. Brahim et R. Benziada, 2008 .Architecture et confort thermique dans les zones arides Application au cas de la ville de Béchar. Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°2 (2008) 307 – 315.
- [12] Samir Semahi, Mohammed Amin Benbouras,Waqas Ahmed Mahar ,Nouredine Zemmouri ,and Shady Attia,2020 Development of Spatial Distribution Maps for Energy Demand and Thermal Comfort Estimation in Algeria, Sustainability 2020.
- [13] S.Sami-Mecheri,D.Semmar,A.Hamid.Simulation and comparaison of energy requirements of a conventional housing.HEP housing and a reinforced insulation housing:Application of the region of Tamanrasset (Algeria).Entech'13 energy technologies conference.Istanbul-Turkey.26-28 Decembre 2015.

- [14] F. Hadji, N. Ihaddadene, R. Ihaddadene, A. Betga, A. Charick, P. Ogerais. 2020. Thermal conductivity of two kinds of earthen building materials formerly used in Algeria, *Journal of Building Engineering* .volume 32. 101823.
- [15] DTR C3.2/4, document technique réglementaire, Centre National d'Etudes et Recherches Intégrées du Bâtiment 2017, ISBN :978-9961-845-79-0.
- [16] Nasser A. Al-Hemiddi , Khalid A. Megren Al-Saud, 2001 The effect of a ventilated interior courtyard on the thermal performance of a house in a hot–arid region ,*Renewable Energy* 24 581–595.
- [17] Fezzioui, N., Khoukhi, M., Dahou, Z., Aït-Mokhtar, K., & Larbi, S. (2009). Bioclimatic Architectural Design of Ksar de Kenadza: South-west Area of Algeria Hot and Dry Climate. *Architectural Science Review*, 52(3),221–228.
- [18] S. Semahi et B. Djebri, 2013. La conception des logements à haute performance énergétique (HPE) en Algérie-proposition d'un outil d'aide à la conception dans les zones arides et semi-arides, *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 16 N°3 551 – 568.36-
- [19] Samir Semahi,d, Noureddine Zemmouri, Manoj Kumar Singh, Shady Attia,2019. Comparative bioclimatic approach for comfort and passive heating and cooling strategies in Algeria. *Building and Environment* 161 (2019) 106271.
- [20] M.N. Bahadori, An improved design of wind towers for natural ventilation and passive cooling, *Sol. Energy* 35 (2) (1985) 119–129.
- [21] I. Blom, L. Itard, A. Meijer, Environmental impact of building-related and user related energy consumption in dwellings .*Building and Environment*.2011, Vol.46:pp1657-1669.
- [22] W. A. Friess, K. Rakhshan. A review of passive envelope measures for improved building energy efficiency in the UAE. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 72(2017) 485-496.
- [23] Moncef Krarti et Dubey Kankana Dubey Benefits of Energy Efficiency Programs for Residential Buildings in Bahrain, March 2018 *Journal of Building Engineering* 18.
- [24] Samar Jaber, Salman Ajib. Optimum, technical and energy efficiency design of residential building in Mediterranean region. *Energy and Buildings* 43(2011) 1829-1834.
- [25] perspective monde, consommation d'électricité en Kwh par personne, production d'électricité à partir du gaz naturel (% de la production totale), croissance annuelle de la population (en % de la population totale, Algérie. [En ligne :<https://perspective.usherbrooke.ca/bilan/servlet/BMPays/DZA>.Accés le [1/1/2020] et le [17/10/2022].

[26] Document élaboré par SatInfo, Société du Groupe Sonelgaz, 'Programme de Développement des Energies Renouvelables et de l'Efficacité Energétique en Algérie', Ministère de l'Energie, Janvier 2016.

[27] Guide pour une construction Eco- énergétique Auteur Dr Astrid Denker Dr. S.M.K. El Hassar Grp. D'experts spécialiste en efficacité énergétique et durabilité sous la direction de Dr.-Ing Saad Baradiy

[28] Bulletin trimestriel de l'aprué, septembre 2010, Programme triennal d'efficacité énergétique" 2011-2013" revue des énergies renouvelables.

[30] Fatiha Mokhtari, Larbi Loukarfi, Mourad Chikhi, Khaled Imessad , Nouredine Ait Messaoudene. 2017. A passive wall design to minimize building temperature swings for Algerian Saharan climate. Science and Technology for the Built Environment. 23:7, 1142-1150.

[31] DJELLOUL A., DRAOUI B. et MOUMMI N., Simulation du comportement énergétique des bâtiments au sud algérien, Courrier du savoir, Université Mohamed Khider, Biskra (Algérie), 17(2013), 113-119.

[32] Nadir Abdullah Benmatti, L'habitat du tiers monde: (cas de l'Algérie) SNED, 1982.

[33] T. Moussaoui . Les techniques et les matériaux de construction en Algérie rapport interne CDER. Décembre 2014.

[34] BOREL J. 'Application du règlement de la construction en Algérie. Définition des zones climatiques ', Cahier du CSTB N° 57, Paris 1962.

[35] A. Bouchaira, H. Tebboucheb, A. Hammounic, M.C Lehtihetd, M. Bilibie 2013. Compact cities as a response to the challenging local environmental constraints in hot arid lands of Algeria , Energy Procedia 42 (2013) 493 – 502.

[36] Dutreix Armand. Bioclimatisme et performances énergétique des bâtiments, Editeur: Eyrolles, Parution 2011, ISBN 13978-2-212-12702-7

[37] Marc côte, 2005. "La ville et le désert Le Bas-Sahara Algérien», ISBN : 2-84586-733-6.

[38] Agoudjil, B., A. Benchabane, A. Boudenne, L. Ibos, and M. Fois. 2011. Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood. Energy and Buildings 43:491–7.

[39] Samira HAOUI et Samia CHERGUI. Earth, stone and wood in the vernacular architecture of the Aures and Ziban: Materials of complementary use Terre, pierre et bois dans l'architecture vernaculaire des Aurès et des Ziban: des matériaux à usage complémentaire, J. Mater. Environ. Sci. 7 (10) (2016) 3522-3531, ISSN : 2028-2508, CODEN: JMESC�

- [40] SAMI Sabrina.2018.Contribution à l'intégration de composants solaires dans la structure bâtie. Application aux sites Algériens. Thèse de doctorat.
- [41] Mohamed Tlijani. Contribution à la caractérisation thermo-physique des Matériaux bio isolants. Valorisation des déchets de bois de palmier. Thèse de doctorat. Université de Paris Est Creteil. Octobre 2017.
- [42] S -Plemenka Supic, 2000. L'aspect bioclimatique de l'habitat vernaculaire, Arch. & Comport. / Arch. & Behav., Vol. 10, no 1, pp. 27- 47,science Review,52:3, 221-228.
- [43] Hassan Fathy, natural energy Natural Energy and Vernacular Architecture: Principles and Examples with Reference to Hot Arid Climates 1986.
- [44] M, abdeltif, Algiers, in ottoman era before colonization (1830), 2008. a Complex system where interiority could be seen as Fractal, The third architecture and sustainability conference in Biskra .
- [45] Bencherif M, Chaouche S, 2013. La maison urbaine à patio, réponse architecturale aux contraintes climatiques du milieu aride chaud. Sècheresse 2, n° 3, 203–13.
- [46] Testard-Vaillant, P. (2007) « Les leçons du passé... », Article paru dans la revue Science & vie n°241 de décembre 2007 sous le titre „La maison du XXI ème siècle“. France.Dynastie qui régna sur l"Égypte et la Syrie de 1250 à 1517.
- [47] M-EDCHERIF ADAD, M.TOUFIK MAZOUZ, 2013. Les anciens et nouveaux ksour: étude comparative. Cas du m'Zab, courrier du savoir – n°16, pp.77-87.
- [48] Nawal Benslimane , Wided Ratiba Biara, Hocine Bougdah, Traditional Versus Contemporary Dwellings in a Desert Environment: The Case of Bechar, Algeria, Environmental Research, Engineering and Management, 2020.
- [49] Fazia Ali-Toudert, Moussadek Djenane, Rafik Bensalem, Helmut Mayer, 2005. Outdoor thermal comfort in the old desert city of Beni-Isguen, Algeria. CLIMATE RESEARCH, Vol.28:243-256.
- [50] Moufida Sebtia et al 2013- H. Boutabba¹, M. Mili¹, S.D. Boutabba, 2016. L'architecture domestique en terre entre préservation et modernité: cas d'une ville oasienne d'Algérie "Aoulef». J. Mater. Environ. Sci, 3558-3570, ISSN: 2028-2508.
- [51] Niccolò Aste Adriana Angelotti Michela Buzzetti. The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings, Energy and Buildings, 2009, Pages 1181-1187.
- [52] Silvia Martín Fernando R. Mazarrón Ignacio Cañas. Study of thermal environment inside rural houses of Navapalos (Spain): The advantages of reuse buildings of high thermal inertia, Construction and Building Materials, 2010.

[53] A.P.Olukoya Obafemi, Sevinç Kurt.2016. Environmental impacts of adobe as a building material: The north cyprus traditional building case. Case Studies in Construction Materials4.(2016) 32–41.

[54] A. Kemjou et L. Mba, 2011. Matériaux de construction et confort thermique en zone chaude application au cas des régions climatiques camerounaises, revue des énergies renouvelables.

[55] Jorge Fernandes, Ricardo Mateus , Helena Gervasio , Sandra M. Silva , Luís Bragança.2019. Passive strategies used in Southern Portugal vernacular rammed earth buildings and their influence in thermal performance. Renewable Energy 142 (2019) 345-363.

[56] I. AHMAD, E. KHETRISH, S. M. ABUGHRES, 1985. Thermal Analysis of the Architecture of Old and New Houses at Ghadames. Building and Environment, Vol. 20, N°:1 pp. 39-42.

[57] Nazanin Nasrollahi, Mojtaba Hatami, Seyedeh,Razieyeh Khastar, Mohammad Taleghani. November 2017 Numerical evaluation of thermal comfort in traditional courtyards to develop new microclimate design in a hot and dry climate, Sustainable Cities and Society Volume 35. Pages 449-467.

[58] Zahra Zamani,Shahin Heidari,Maryam Azmoodeh,Mohammad Taleghani, Energy performance and summer thermal comfort of traditional courtyard buildings in a desert climate. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2019.

[59]N. Fezzioui 1 , M. Benyamine 1 , N. Tadj 1 , B. Draoui 1 et S. Larbi Performance énergétique d'une maison à patio dans le contexte maghrébin (Algérie, Maroc, Tunisie et Libye) ,Revue des Energies Renouvelables Vol. 15 N°3 (2012) 399 - 405.

[60] Fezzioui Naïmaa,Benyamine Mébirikab, Draoui Belkacemc, Roulet Claude-Alain,2016.The traditional house with horizontal opening: a trend towards zero energy house in the hot dry climates, SBE16 Tallinn and Helsinki Conference; Build Green and Renovate Deep.Energy Procedia 96 (2016) 934 – 944

[61] Maatouk Khoukhi and Naïma Fezzioui, 2012. Thermal comfort design of traditional houses in hot dry region of Algeria. International Journal of Energy and Environmental Engineering 2012.

[62] S. ABDOU, M. BOUMAZA, 2004. Investigation sur l'intégration climatique dans la maison traditionnelle du ksar de Ouargla, Sciences & Technologie B – N°21, pp. 121-129.

[63] Amri Khaoula, Alkama Djamel. August 2020. Investigation on the thermal comfort of a vernacular dwelling in hot and arid Climate. International Journal of Science Engineering and Technology IJSET vol14 pp5-10.ISSN 1737-9296.

[64] Houda Nefidi , Soumia Oukaci , Abdelkader Hamid , Évaluation thermique de l'habitat traditionnel en Algérie: Cas de la région de Souf ,Éditions universitaires européennes, 2019, ISBN-13 :978-6138456131.

[65]Darda Bencheikh Madani Bederina. 2020, assessing the duality of thermal performance and energy efficiency of residential buildings in hot arid climate of Laghouat, Algeria. International Journal of Energy and Environmental Engineering (2020) 11:143–162.

[66] Givoni,B. (1998). Climate Considerations in Building and Urban Design, J. Wiley & sons, New York.

[67] ASHRAE Standard 55. 2017. ANSI/ASHRAE Standard 55-2017. Thermal Environmental , Conditions for Human Occupancy. Atlanta.

[68] S.M.A.Bekkouche,T.Benouaz,M.K.Chерier.M.Hamdani ,.Benamrane,M.R.Yaiche , 2014. Thermal resistances of local building materials and their effect upon the interior temperatures case of a building located in Ghardaïa region. Construction and Building Materials Volume 52, 15 February 2014, Pages 59-70.

[69]Nasser A. Al-Hemiddi, Khalid A. Megren Al-Saud, 2001 .the effect of a ventilated interior courtyard on the thermal performance of a house in a hot–arid region, Renewable Energy 24 581–595.

[70] Kindah Mousli, Giovanni Semprini, 2015.Thermal performances of traditional houses in dry hot arid climate and the effect of natural ventilation on thermal comfort: a case study in Damascus, Energy Procedia 78, 2893 – 2898, 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015.

[71] F.Touloum,A.Younsi,A.Kaci,A.Benchabane.Formulation d'un composite bois de palmier dattier-ciment.j.Appl.Eng.Sci.Technol.(2016) :57-63

[72] k.Almi,A.Benchabane,S.Lakel,A.Kriker.potential utilization of date palm wood as composite reinforcement. journal of Reinforced plastics and composites.2015

[73] Mourad Chikhi Boudjemaa Agoudjil Abderrahim Boudenne Abdelkader Gherablia, Experimental investigation of new bio composite with low cost for thermal insulation, Energy and Buildings Volume 66, November 2013, Pages 267-273.

[74] Hamid Benouali.la réglementation technique Algérienne de construction avec les matériaux locaux. Festival Architerre 2015.

[75] Fazia Ali-Toudert, Juliane Weidhaus, 2017. Numerical assessment and optimization of a low-energy residential building for Mediterranean and Saharan climates using a pilot project in Algeria. Renewable Energy (2017) 327-346.

[76] Meryem KADRI, Ammar BOUCHAIR, Abdelkader Laafer, "The contribution of double skin roof coupled with thermo reflective paint to improve thermal and energy performance for the 'Mozabit' houses: Case of Beni Isguen's Ksar in southern Algeria", *Energy and Buildings* Volume 256, 2022.

[77] MANEL, S., & SIHAM, B. (2019). Tafilelt, the Neo Traditional Model of Ksour in Algeria: Assessment of the Multifunctionality of Urban Spaces. *Journal of Contemporary Urban Affairs*, 3(2), 99-107. <https://doi.org/10.25034/ijcua.2018.4706>

[78] Meryem KADRI, Ammar BOUCHAIR, THE IMPACT OF THE ROOF ON INDOOR THERMAL COMFORT IN TRADITIONAL CITIES. CASE OF BÉNI ISGUEN'S KSAR, *Algerian Journal of Engineering Architecture and Urbanism* Vol. 4 Nr. 3 2020, ISSN: 2588-1760.

[79] Akacem Imane, Evaluation et amélioration d'efficacité énergétique et du confort thermique d'une réinterprétation d'un héritage architectural traditionnel en zone aride (Cas du ksar Tafilelt).

[80] CHERIFI ZAKARIA, ZOUGAIE OUSSAMA Impact de l'intégration du rafraichissement par humidification adiabatique dans l'habitat du climat aride (Cas du Ksar Tafilelt)

[81] Givoni B. Performance of the "shower" cooling tower in different climates. *Renew Energy* 1997;10:173–8.

[82] Yajima Satoshi, Givoni Baruch. Experimental performance of the shower cooling tower in Japan. *Renew Energy* 1997;10:179–83.

[83] Nasreddine Sakhri, Abdeljabar Moussaoui, Younes Menni, Milad Sadeghzadeh, Mohammad Hosein Ahmadi. New passive thermal comfort system using three renewable energies: Wind catcher, solar chimney and earth to air heat exchanger integrated to real-scale test room in arid region (Experimental study). *Int J Energy Res.* 2020;1–18.

[84] Daeho Kang, Richard K. Strand, Modeling of simultaneous heat and mass transfer within passive down-draft evaporative cooling (PDEC) towers with spray in FLUENT, *Energy Build.* 62 (2013) 196–209.

[85] MAQSOOD BAJWA, ERDAL AKSUGUR and GHAZI AL-OTAIBI.1993. THE POTENTIAL OF THE EVAPORATIVE COOLING.

[86] Yasmina Bouchahm, Fatiha Bourbia, Azeddine Belhamri, March 2011, Performance analysis and improvement of the use of wind tower in hot dry climate. *Renewable Energy* Volume 36, Issue 3, March 2011, Pages 898-906.

[87] Daeho Kang, Richard K. Strand, Analysis of the system response of a spray passive downdraft evaporative cooling system, *Building and Environment* 157 (2019) 101–111.

- [88] B. Ford, E. Francis, R. Shiano-Phan, The Architecture and Engineering of Dwindraught Cooling, PHDC Press, 2010.
- [89] Daeho Kang, Richard K. Strand, Significance of parameters affecting the performance of a passive down-draft evaporative cooling (PDEC) tower with a spray system, Appl. Energy 178 (2016) 269–280.
- [90] D.Robinson, K.J. Lomas, M.J. Cook, H. Eppel, Passive down-draught evaporative cooling: thermal modeling of an office building, Indoor Built Environ. 13 (2004) 205–221.
- [91] Louis VOINOT.TIDIKLET, étude sur la géographie, l'histoire, les mœurs du pays. ASIN : B01DPAJ048, Éditeur : FeniXX réédition numérique (Jacques Gandini) (31 décembre 1994).
- [92] Détection des mutations de l'espace agricole par imagerie satellitaire -Cas d'Ain Salah wilaya de Tamanrasset- / Saidou Ali Enseignant en Ecole Normale Supérieure (ENS) Bouzareah.
- [93] R. ZEGAIT1*, H. BENSABA2 Impact de la gestion irrationnelle des eaux d'irrigation sur l'environnement oasien du Sud algérien (Cas de l'oasis d'In-Salah) Journal Algérien des Régions Arides (JARA) 13 (2): 129–139 (2019).
- [94] Office national de la météorologie, station météorologique d'In Saleh.
- [95] OUKACI.S, ABIDALLAH.CH, HAMID AEK, SEMMAR.D. 29-30 2018. impact du choix des matériaux de construction dans un habitat du climat aride, cas d'in saleh.ICEMAEP'18 Fourth International Conference on Energy, Materials, Applied Energetics and Pollution pages :April, Constantine, Algeria <https://apps.umc.edu.dz/CIEMEAP18>.
- [96] Soumia Oukaci.A. Hamid.Djaffar Semmar.A. Naimi.Sabrina Sami Mecheri.2019. Improvement of the modern house's energy efficiency in the region of In Saleh. In book: Solutions for Sustainable Development. DOI: 10.1201/9780367824037-40 Chapter.
- [97]CT.metre « Guide d'utilisation », FT 131099-A.
- [98] Méthodes de comfie, cahier d'algorithmes <https://www.izuba>
- [99] Manuel des utilisateurs, centre énergétique et procédés Mines Tech,Bruno peupotrier et Isabelle Blanc SOMMERUX <https://www.izuba>
- [100] N.Benmancour. Développement des composites naturels et caractérisation des composites naturels locaux adaptée à l'isolation thermique dans l'habitat. Thèse de Doctorat. Université Hadj lakhdher de Batna. Mai 2015.
- [101] Mekhermeche Abdessalem. Contribution à l'étude des propriétés mécaniques et thermiques des briques de terre en vue de leur utilisation dans

la restauration des Ksours Sahariennes. Mémoire de Magister. Université d'Ouargla.2012.

[102] Daeho Kang, Richard K. Strand, IMPLEMENTATION OF ANALYTICAL MODELS FOR PASSIVE DOWN-DRAFT EVAPORATIVE COOLING (PDEC) TOWER WITH SPRAY SYSTEMS, Proceedings of BS2015:14th Conference of International Building Performance Simulation Association, Hyderabad, India, Dec.-9, 2015.

ANNEXE

SCENARIOS DE FONCTIONNEMENT INTEGRES POUR CHAQUE CAS D'ETUDE

1.1 Définition des zones thermiques du cas d'étude n° :01

Zone 01 :Swari

Zone 02 :Swari Imra

Zone 03 : chambre 01

Zone 04 : chambre 02

Zone 05 : couloir

1.2 Scenarios de fonctionnement du cas d'étude n°01

Table 1 : Scenario d'occupation du cas d'étude 01 :

La maison est occupée par 04 personnes

Heure	Skifa	Swari	Swari Imra	Chambre 01	chambre 02
00:00	0	0	50	25	25
01:00	0	0	50	25	25
02:00	0	0	50	25	25
03:00	0	0	50	25	25
04:00	0	0	50	25	25
05:00	0	0	50	25	25
06:00	0	0	50	25	25
07:00	25	0	25	25	25
08:00	25	0	25	0	0
09:00	25	0	25	0	0
10:00	0	0	50	0	0
11:00	0	0	50	0	0
12:00	0	0	50	0	0

13:00	0	0	50	0	0
14:00	0	0	50	0	0
15:00	0	0	50	0	0
16:00	0	0	50	0	0
17:00	0	0	50	0	0
18:00	0	0	50	0	0
19:00	0	0	0	0	0
20:00	0	0	0	0	0
21:00	0	0	0	0	0
22:00	0	0	0	0	0
23:00	0	0	0	0	0

Table 2 : Scenario de puissance dissipée du cas d'étude 01 :

Heure	Skifa	Swari	Swari lmra	Chambre 01	Chambre 02
00:00	0	0	133	33	33
01:00	0	0	133	0	0
02:00	0	0	133	0	0
03:00	0	0	133	0	0
04:00	0	0	133	0	0
05:00	0	0	133	0	0
06:00	0	0	133	0	0
07:00	0	0	133	0	0
08:00	0	0	133	0	0
09:00	0	0	133	0	0
10:00	0	0	133	0	0
11:00	0	0	133	0	0
12:00	0	0	133	0	0
13:00	0	0	133	0	0

14:00	0	0	133	0	0
15:00	0	0	133	0	0
16:00	0	0	133	0	0
17:00	0	0	133	0	0
18:00	0	0	133	0	0
19:00	0	0	133	0	0
20:00	0	0	133	0	0
21:00	33	33	133	33	33
22:00	33	33	133	33	33
23:00	33	33	133	33	33

Table 3 : Scenario de ventilation estivale (nocturne) du cas d'étude n°01 :

Heure	Swari	Swari Imra	chambre 01	chambre 02	Skifa	couloir
00:00	100	100	100	100	100	100
01:00	100	100	100	100	100	100
02:00	100	100	100	100	100	100
03:00	100	100	100	100	100	100
04:00	100	100	100	100	100	100
05:00	100	100	100	100	100	100
06:00	100	100	100	100	100	100
07:00	100	100	100	100	100	100
08:00	100	100	100	100	100	100
09:00	20	20	20	20	100	100
10:00	20	20	20	20	100	100
11:00	20	20	20	20	100	100
12:00	20	20	20	20	100	100

13:00	20	20	20	20	100	100
14:00	20	20	20	20	100	100
15:00	20	20	20	20	100	100
16:00	20	20	20	20	100	100
17:00	20	20	20	20	100	100
18:00	20	20	20	20	100	100
19:00	20	20	20	20	100	100
20:00	100	100	100	100	100	100
21:00	100	100	100	100	100	100
22:00	100	100	100	100	100	100
23:00	100	100	100	100	100	100

Table 4 : Scenario de ventilation hivernale du cas d'étude n°01 :(il est utilisé pour les différents cas étudiés)

Heure	Skifa	Swari	Swari lmra	chambre 01	chambre 02	Couloir
00:00	20	20	20	20	20	20
01:00	20	20	20	20	20	20
02:00	20	20	20	20	20	20
03:00	20	20	20	20	20	20
04:00	20	20	20	20	20	20
05:00	20	20	20	20	20	20
06:00	20	20	20	20	20	20
07:00	20	20	20	20	20	20
08:00	20	20	20	20	20	20
09:00	100	100	100	100	100	100
10:00	100	100	100	100	100	100
11:00	100	100	100	100	100	100

12:00	20	20	20	20	20	20
13:00	20	20	20	20	20	20
14:00	20	20	20	20	20	20
15:00	20	20	20	20	20	20
16:00	20	20	20	20	20	20
17:00	20	20	20	20	20	20
18:00	20	20	20	20	20	20
19:00	20	20	20	20	20	20
20:00	20	20	20	20	20	20
21:00	20	20	20	20	20	20
22:00	20	20	20	20	20	20
23:00	20	20	20	20	20	20

Table 5 : Scenario d'infiltration (Utilisé pour les simulations avec consigne de thermostat des différents cas étudiés) :

Heure	Skifa	Swari	Swari lmra	chambre 01	chambre 02
00:00	20	20	20	20	20
01:00	20	20	20	20	20
02:00	20	20	20	20	20
03:00	20	20	20	20	20
04:00	20	20	20	20	20
05:00	20	20	20	20	20
06:00	20	20	20	20	20
07:00	20	20	20	20	20
08:00	20	20	20	20	20
09:00	20	20	20	20	20
10:00	20	20	20	20	20

11:00	20	20	20	20	20
12:00	20	20	20	20	20
13:00	20	20	20	20	20
14:00	20	20	20	20	20
15:00	20	20	20	20	20
16:00	20	20	20	20	20
17:00	20	20	20	20	20
18:00	20	20	20	20	20
19:00	20	20	20	20	20
20:00	20	20	20	20	20
21:00	20	20	20	20	20
22:00	20	20	20	20	20
23:00	20	20	20	20	20

1.3 Définition des zones thermiques du cas d'étude n° :02

Zone 01 :Swari

Zone 02 :Swari Imra

Zone 02 :Skifet el bab

1.4 Scenarios de fonctionnement du cas d'étude n°02

Table 6 : Scenario d'occupation du cas d'étude 02 :

La maison est occupée par 05 personnes

Heure	Swari	Swari Imra	Skifet el bab
00:00	0	0	0
01:00	0	0	0
02:00	0	0	0
03:00	0	0	0
04:00	0	0	0

05:00	0	0	0
06:00	60	20	20
07:00	60	20	20
08:00	0	0	20
09:00	0	20	0
10:00	20	0	0
11:00	0	0	0
12:00	0	0	0
13:00	60	20	0
14:00	60	40	0
15:00	60	40	0
16:00	60	40	0
17:00	60	40	0
18:00	0	0	60
19:00	0	0	60
20:00	0	100	60
21:00	0	100	0
22:00	0	100	0
23:00	0	100	0

Table 7 : Scénario de ventilation estivale (nocturne) du cas d'étude 02 :

Heure	Swari	Swari lmra	Skifa
00:00	100	100	100
01:00	100	100	100
02:00	100	100	100
03:00	100	100	100
04:00	100	100	100

05:00	100	100	100
06:00	100	100	100
07:00	100	100	100
08:00	100	100	100
09:00	20	20	100
10:00	20	20	100
11:00	20	20	100
12:00	20	20	100
13:00	20	20	100
14:00	20	20	100
15:00	20	20	100
16:00	20	20	100
17:00	20	20	100
18:00	20	20	100
19:00	20	20	100
20:00	100	100	100
21:00	100	100	100
22:00	100	100	100
23:00	100	100	100

Table 8 : Scenarios de puissance dissipée du cas d'étude ° 02 :

Heure	Skifa	Swari	Swari lmra
00:00	0	0	0
01:00	0	0	0
02:00	0	0	0
03:00	0	0	0
04:00	0	0	0

05:00	0	0	0
06:00	0	0	0
07:00	33	0	0
08:00	0	0	0
09:00	0	0	200
10:00	0	200	0
11:00	0	0	0
12:00	0	0	0
13:00	0	200	200
14:00	0	200	200
15:00	0	200	200
16:00	0	200	200
17:00	0	200	200
18:00	0	0	0
19:00	0	0	0
20:00	0	0	200
21:00	33	0	200
22:00	33	0	200
23:00	33	0	200

1.5 Définition des zones thermiques du cas d'étude n° :03

Zone 01 : séjour pour hommes

Zone 02 : chambre des parents

Zone 03 : chambre des femmes

Zone 04 : chambre pour garçons

Zone 05 : chambre des filles

1.6 Scenarios de fonctionnement du cas d'étude n°03 :

Table 9 : Scenario d'occupation du cas d'étude 03 :

La maison est occupée par 06 personnes :

Heure	Chambre des parents	Chambre pour femmes	Chambre pour garçons	Chambre pour filles	Séjour pour hommes
00:00	33	0	33	33	0
01:00	33	0	33	33	0
02:00	33	0	33	33	0
03:00	33	0	33	33	0
04:00	33	0	33	33	0
05:00	33	0	33	33	0
06:00	33	0	33	33	0
07:00	33	0	33	33	0
08:00	0	17	0	0	0
09:00	0	0	17	17	0
10:00	17	50	0	0	0
11:00	0	50	0	0	0
12:00	0	50	0	0	0
13:00	0	50	0	0	0
14:00	0	50	0	0	0
15:00	0	50	0	0	0
16:00	0	50	17	0	33
17:00	0	33	0	0	50
18:00	0	0	0	0	50
19:00	0	0	0	0	50
20:00	0	0	0	0	50
21:00	33	0	33	0	33

22:00	33	0	33	0	33
23:00	33	0	33	0	33

Table 10 : Scenario de ventilation estivale (nocturne) du cas d'étude 03 :

Heure	Chambre des parents	Chambre pour femmes	Chambre pour garçons	Chambre pour filles	Séjour pour hommes
00:00	100	100	100	100	100
01:00	100	100	100	100	100
02:00	100	100	100	100	100
03:00	100	100	100	100	100
04:00	100	100	100	100	100
05:00	100	100	100	100	100
06:00	100	100	100	100	100
07:00	100	100	100	100	100
08:00	100	100	100	100	100
09:00	100	100	100	100	100
10:00	20	20	20	20	20
11:00	20	20	20	20	20
12:00	20	20	20	20	20
13:00	20	20	20	20	20
14:00	20	20	20	20	20
15:00	20	20	20	20	20
16:00	20	20	20	20	20
17:00	20	20	20	20	20
18:00	20	20	20	20	20
19:00	20	20	20	20	20
20:00	100	100	100	100	100

21:00	100	100	100	100	100
22:00	100	100	100	100	100
23:00	100	100	100	100	100

Table 11 : Scenarios de puissance dissipée du cas d'étude ° 03 :

Heure	Chambre des parents	Chambre pour femmes	Chambre pour garçons	Chambre pour filles	Séjour pour hommes
00:00	0	0	0	0	0
01:00	0	0	0	0	0
02:00	0	0	0	0	0
03:00	0	0	0	0	0
04:00	0	0	0	0	0
05:00	0	0	0	0	0
06:00	0	0	0	0	0
07:00	0	0	0	0	0
08:00	0	200	0	0	0
09:00	0	0	200	0	0
10:00	200	200	0	0	0
11:00	0	200	0	0	0
12:00	0	200	0	0	0
13:00	0	200	0	0	0
14:00	0	200	0	0	0
15:00	0	200	0	0	200
16:00	0	200	0	0	200
17:00	0	200	0	0	200
18:00	0	0	0	0	200
19:00	0	0	0	0	200

20:00	0	0	0	33	200
21:00	233	0	200	33	200
22:00	200	0	200	33	200
23:00	200	0	200	33	200

1.7 Définition des zones thermiques du cas d'étude n° :04

Zone 01 : Séjour 1+Sejour 2

Zone 02 : Chambre parentale 01+Chambre parentale 02

Zone 03 : Chambre d'enfants 01

ZONE 04 : Chambre d'enfants 02

1.8 Scenarios de fonctionnement du cas d'étude n°04 :

Table 12 : Scenario d'occupation du cas d'étude 04 :

Chaque logement est occupé par 4 personnes.

Heure	Zone 01	Zone 02	Zone 03	Zone 04
00:00	0	50	25	25
01:00	0	50	25	25
02:00	0	50	25	25
03:00	0	50	25	25
04:00	0	50	25	25
05:00	0	50	25	25
06:00	0	50	25	25
07:00	0	50	25	25
08:00	50	0	25	25
09:00	50	0	25	25
10:00	0	0	0	0
11:00	0	50	0	0
12:00	0	0	0	0

13:00	0	0	25	25
14:00	50	0	25	25
15:00	50	0	25	25
16:00	75	0	0	0
17:00	50	0	0	0
18:00	50	0	0	0
19:00	100	0	0	0
20:00	100	0	0	0
21:00	100	0	0	0
22:00	0	50	25	25
23:00	0	50	25	25

Table 13 : Scenario de ventilation estivale (nocturne) du cas d'étude 04 :

Heure	Zone 01	Zone 02	Zone 03	Zone 04
00:00	100	100	100	100
01:00	100	100	100	100
02:00	100	100	100	100
03:00	100	100	100	100
04:00	100	100	100	100
05:00	100	100	100	100
06:00	100	100	100	100
07:00	100	100	100	100
08:00	100	100	100	100
09:00	100	100	100	100
10:00	20	20	20	20
11:00	20	20	20	20

12:00	20	20	20	20
13:00	20	20	20	20
14:00	20	20	20	20
15:00	20	20	20	20
16:00	20	20	20	20
17:00	20	20	20	20
18:00	20	20	20	20
19:00	20	20	20	20
20:00	100	100	100	100
21:00	100	100	100	100
22:00	100	100	100	100
23:00	100	100	100	100

Table 14 : Scenarios de puissance dissipée du cas d'étude° 04 :

Heure	Zone 01	Zone 02	Zone 03	Zone 04
00:00	0	0	0	0
01:00	0	0	0	0
02:00	0	0	0	0
03:00	0	0	0	0
04:00	0	0	0	0
05:00	0	0	0	0
06:00	0	0	0	0
07:00	0	66	0	0
08:00	0	0	0	0
09:00	0	0	0	0
10:00	0	0	0	0
11:00	0	400	0	0

12:00	0	0	0	0
13:00	0	0	200	200
14:00	400	0	200	200
15:00	400	0	200	200
16:00	400	0	0	0
17:00	400	0	0	0
18:00	400	0	0	0
19:00	400	0	0	0
20:00	532	0	0	0
21:00	532	0	0	0
22:00	0	400	0	0
23:00	0	400	0	0

1.9 Définition des zones thermiques du modèle adaptatif :

Zone 01 : Séjour 1+Sejour 2

Zone 02 : Chambre parentale 01+Chambre parentale 02

Zone 03 : Chambre d'enfants 01+ Chambre d'enfants 02

1.10 Scenarios de fonctionnement du modèle adaptatif :

Table 15 : Scenario d'occupation du modèle adaptatif:

Chaque logement est occupé par 04 personnes :

Heure	Zone 01	Zone 02	Zone 03
00:00	0	50	50
01:00	0	50	50
02:00	0	50	50
03:00	0	50	50
04:00	0	50	50

05:00	0	50	50
06:00	0	50	50
07:00	0	50	50
08:00	50	0	50
09:00	50	0	50
10:00	0	0	0
11:00	0	50	0
12:00	0	0	0
13:00	0	0	50
14:00	50	0	50
15:00	50	0	50
16:00	75	0	0
17:00	50	0	0
18:00	50	0	0
19:00	100	0	0
20:00	100	0	0
21:00	100	0	0
22:00	0	50	50
23:00	0	50	50

Table 16 : Scénario de ventilation estivale (nocturne) du modèle adaptatif:

Heure	Zone 01	Zone 02	Zone 03
00:00	100	100	100
01:00	100	100	100
02:00	100	100	100
03:00	100	100	100
04:00	100	100	100

05:00	100	100	100
06:00	100	100	100
07:00	100	100	100
08:00	100	100	100
09:00	100	100	100
10:00	20	20	20
11:00	20	20	20
12:00	20	20	20
13:00	20	20	20
14:00	20	20	20
15:00	20	20	20
16:00	20	20	20
17:00	20	20	20
18:00	20	20	20
19:00	20	20	20
20:00	100	100	100
21:00	100	100	100
22:00	100	100	100
23:00	100	100	100

Table 17 : Scenario de puissance dissipée (nocturne) du modèle adaptatif:

Heure	Zone 01	Zone 02	Zone 03
00:00	0	0	0
01:00	0	0	0
02:00	0	0	0
03:00	0	0	0
04:00	0	0	0

05:00	0	0	0
06:00	0	0	0
07:00	0	66	0
08:00	0	0	0
09:00	0	0	0
10:00	0	0	0
11:00	0	400	0
12:00	0	0	0
13:00	0	0	400
14:00	400	0	400
15:00	400	0	400
16:00	400	0	0
17:00	400	0	0
18:00	400	0	0
19:00	400	0	0
20:00	532	0	0
21:00	532	0	0
22:00	0	400	0
23:00	0	200	0