

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université 8 Mai 1945 Guelma



Faculté : Sciences et technologie  
Département : Architecture  
Laboratoire de domiciliation : L.G.C.H

**THÈSE**  
**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE**  
**DOCTORAT EN 3<sup>e</sup> CYCLE (LMD)**

Domaine : Architecture, Urbanisme et Métiers de la Ville  
Filière : Architecture  
Spécialité : Architecture

Présentée par

**Kadri Meryem**

*Intitulée*

**L'OPTIMISATION DE LA PERFORMANCE THERMIQUE DES TOITURES  
DES HABITATIONS DANS LES ZONES À CLIMAT CHAUD ET ARIDE. Cas du  
Ksar de Béni Isguen**

Soutenue le : 28/02/2023

Devant le Jury composé de :

**Nom et Prénom**

**Grade**

<b>Mr</b> ALKAMA Djamel	Professeur	Univ. de 8 Mai 1945, Guelma	Président
<b>Mr</b> BOUCHAIR Ammar	Professeur	Univ. de Med Seddik Benyahia, Jijel	Rapporteur
<b>Mr</b> LAZRI Youcef	Professeur	Univ. de 8 Mai 1945, Guelma	Examineur
<b>Mr</b> ADAD Med Cherif	Professeur	Univ. de Larbi Ben M'hidi, OEB	Examineur
<b>M</b> SALAH-SALAH Hana	MCA	Univ. de 8 Mai 1945, Guelma	Examineur

**Année Universitaire : 2022/2023**

# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à toutes les personnes qui ont cru en mes capacités et ont voulu me voir réussir.*

*Une dédicace spéciale à mon directeur de thèse « Pr. Ammar Bouhair », qui m'a aidé beaucoup à accomplir ce travail, car il a été le premier à contribuer à mon entrée dans le domaine de la recherche scientifique.*

*Ses publications scientifiques précieuses m'ont beaucoup aidé à améliorer mon niveau et ont été le point de départ dans la mer de la recherche scientifique.*

*À l'âme du père de ma chère amie « M. Mohammed Merabet », qui nous a quittés, mais son âme est toujours vivante dans notre mémoire, le bon homme qui m'a soutenu à Tijel pendant des années, je dédie cet humble travail à votre grande âme.*

*À la tante, la mère, la sœur et l'amie, ma très chère « Bahdja Kh », qui m'a soutenu moralement et financièrement tout au long du parcours universitaire.*

*Aux habitants autochtones des cas d'études pour leurs accueils, leurs supports et leurs contributions très précieuses.*

*À l'ensemble du personnel de l'office de protection de la vallée du M'zab à Ghardaïa.*

**بارك الله فيكم و جعلها في ميزان حسناتكم**

## Remerciement

A l'occasion de l'élaboration de ce travail qui vient couronner les efforts de mes études supérieures, je tiens à remercier « **ALLAH** » tout puissant de m'avoir donné la force et la patience de réaliser ce modeste travail.

Je tiens à adresser mes remerciements au **Pr. Bouchair Ammar** de m'avoir encadré, conseillé, soutenue, et encouragé tout le long de ces années : Merci infiniment Professeur.

Une grande estime aux enseignants membres de jury : Pr. Alkama Djamel, Pr. Lazri Youcef, Pr. Adad Med Cherif et Madame Salah-Salah Hana qui nous ont honorés par leur présence le jour de la soutenance.

Mes remerciements à notre Cher Chef du département M. Boudjaham Hocine et notre cher Dechaicha Assoul pour leurs conseils. Leurs soutiens toutes ces années.

Mes remerciements au Pr. Bougdah Hocine et l'équipe de « l'école d'architecture de Kent » pour leurs accueils au sein de l'université de Kent, Canterbury, UK.

Un remerciement particulier à Mr. Laafer Abdelkader chercheur du CNERIB et docteur de l'université de Blida 1, à Dr. Djebaili Imed Eddine et à Dr. Telli Med Yacine à leurs contributions, leurs conseils et l'énergie positive qui m'ont donné pour accomplir ce travail.

Un grand remerciement au Laboratoire de L.G.C.H, Guelma et son directeur Mr. Nouaouria Med Saleh. Également, mes remerciements au laboratoire « Cadre bâti et environnement » à Tijel.

Mes remerciements sincères et vifs pour OPVM d'avoir m'accueillir dans ses bureaux, m'a donné de précieuses informations avec plusieurs consultations.

Le remercie également pour les familles de Béni Isguen pour sa confiance d'avoir m'accueillir dans leurs habitations ksouriennes toute la période d'investigation.

Je tiens à exprimer ma gratitude, et mes respects à tous les enseignants du département d'architecture de 8 Mai 1945.

Mes remerciements également à ma famille :

Mon frère Amine, Mes sœurs Soumia, Amel et Romaiissa.

Je tiens également à dédier ce travail à mes camarades de master avec qui j'ai passé des moments extraordinaires au sein du département d'architecture d'Oum El Bouaghi.

Et enfin à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à l'élaboration de cette thèse

## Merci

## Résumé

Dans les villes traditionnelles des régions à climat chaud et aride, les toitures sont les surfaces les plus exposées aux rayons solaires intenses. Donc, par sa position et son importance dans le bâtiment, la toiture peut jouer un rôle important dans l'amélioration de la performance thermique et énergétique du bâtiment si elle est conçue d'une manière rationnelle et bioclimatique. Une étude d'évaluation thermique de l'impact de la toiture sur la performance énergétique des bâtiments a été développée dans ce travail, en agissant sur des paramètres thermo physiques (albédo, inertie thermique, isolation) et géométriques (forme, conception, etc.).

L'étude vise à améliorer la performance thermique et énergétique de la toiture en économisant de l'énergie et évitant les situations de surchauffe. Un contexte géographique et climatique est choisi pour entreprendre cette étude. Il s'agit du Ksar de Béni Isguen dans le Sud algérien. Cette étude est menée principalement par des mesures in situ. Les paramètres mesurés sont les températures de l'air ambiant, les températures moyennes radiantes, l'humidité relative et les vitesses du vent. Aussi, l'étude d'optimisation de la performance thermique de la toiture par la modélisation d'une toiture double peau couplée avec une peinture thermo réfléchissante est réalisée par l'outil de simulation paramétrique « le système expert TRNSYS ».

Les résultats obtenus montrent que dans des conditions estivales, le niveau de surchauffe thermique ressenti est bien observé surtout dans l'étage. Également, les températures des surfaces des toits sont les plus élevées et entraînent le problème de surchauffe dans les habitations. En outre, les résultats ont montré aussi, que dans des conditions estivales, la conception d'une toiture double peau couplée avec une peinture thermo réfléchissante sur l'extérieur contribue à optimiser la performance thermique de la toiture et améliore les conditions thermiques intérieures des habitations. Celle-ci a permis de réduire la température opérative intérieure de 5°C et la consommation énergétique de 572 kW/h.

**Mots clés :** Toiture, Double peau, Peinture thermo réfléchissante, Performance énergétique, Ksar de Béni Isguen.

## Abstract

In traditional cities in hot and arid climates, roofs are the surfaces most exposed to intense solar radiation. Therefore, due to its position and importance in the building, the roof can play an important role in improving the thermal and energy performance of the building if it is designed in rational and bioclimatic ways. A thermal assessment study of the impact of the roof on the energy performance of buildings has been developed in this work, acting on thermo physical (albedo, thermal inertia, insulation) and geometric (shape, design) parameters.

The study aims to improve the thermal and energy performance of the roof by saving energy and avoiding overheating situations. The Ksar of Béni Isguen located in the M'zab valley in southern Algeria is chosen as a case study. This study is conducted mainly by means of in situ measurements. The study of the optimization of the thermal performance of a double skin roof coupled with a thermo-reflective paint is also carried out by the parametric simulation tool "the TRNSYS expert system". The parameters measured are ambient air temperatures, average radiant temperatures, relative humidity and wind speeds.

The results obtained show that in summer conditions, the level of thermal overheating felt is well observed especially in the upper floor. Also, the temperatures of the roof surfaces are the highest and cause the problem of overheating in the houses. In addition, in summer conditions, the design of a double skin roof coupled with a heat reflective paint on the exterior contributes to optimise the thermal performance of the roof and improves the thermal conditions inside the dwellings. This has resulted in a reduction of the internal operating temperature by 5°C and energy consumption by 572kW/h.

**Keywords:** Roof, Double skin, Thermal reflective paint, Energy performance, Beni Isguen's Ksar.

## المخلص

في المدن التقليدية في المناطق ذات المناخ الحار والجاف، تعتبر الأسقف هي الأسطح الأكثر تعرضًا لأشعة الشمس الشديدة. لذلك ، من خلال موقعه وأهميته في المبنى ، يمكن للسقف أن يلعب دورًا مهمًا في تحسين الأداء الحراري والطاقي للمبنى إذا تم تصميمه بطريقة عقلانية ومناخية.

تم تطوير دراسة تقييم حراري لتأثير السقف على أداء الطاقة للمباني في هذا العمل ، من خلال العمل على العوامل الحرارية الفيزيائية (البياض ، القصور الذاتي الحراري ، العزل) والهندسية (الشكل والتصميم ، إلخ).

تهدف الدراسة إلى تحسين الأداء الحراري والطاقي للسقف من خلال توفير الطاقة وتجنب حالات ارتفاع درجة الحرارة. تم اختيار سياق جغرافي ومناخي لإجراء هذه الدراسة. هذا هو قصر بني يزقن في جنوب الجزائر. يتم إجراء هذه الدراسة بشكل أساسي عن طريق القياسات في الموقع. العوامل التي تم قياسها هي درجات حرارة الهواء المحيط، متوسط درجات الحرارة المشعة، الرطوبة النسبية وسرعة الرياح. كما أن دراسة تحسين الأداء الحراري للسقف من خلال نمذجة سقف مزدوج مع طلاء عاكس للحرارة يتم تنفيذه بواسطة أداة المحاكاة البارامترية "نظام الخبراء TRNSYS".

النتائج التي تم الحصول عليها تظهر أنه في ظروف الصيف، يتم ملاحظة مستوى الحرارة المرتفعة بشكل جيد، خاصة في الطابق العلوي. كما أن درجات حرارة أسطح الأسطح هي الأعلى وتؤدي إلى مشكلة ارتفاع درجة الحرارة في المنازل. بالإضافة إلى ذلك ، أظهرت النتائج أيضًا أنه في ظروف الصيف ، يساعد تصميم السقف المزدوج مع طلاء خارجي عاكس للحرارة على تحسين الأداء الحراري للسقف وتحسين الظروف الحرارية الداخلية للمساكن. وقد أدى ذلك إلى خفض درجة حرارة التشغيل الداخلية بمقدار 5 درجات مئوية واستهلاك الطاقة بمقدار 572 كيلو واط / ساعة.

### **الكلمات الدالة :**

السقف ، السقف المزدوج ، طلاء عاكس حراري ، أداء الطاقة ، قصر بني يزقن .

# Table des matières

## Table des matières

Résumés	
Table des matières.....	I
Liste des figures.....	VIII
Liste des tableaux.....	XVII
Nomenclature.....	XXI

### Introduction Générale

1. Introduction .....	1
2. Problématique.....	4
3. Hypothèses .....	6
4. Objectifs de la recherche .....	7
5. Méthode de la recherche .....	8
6. Structure de la thèse .....	8

## Première Partie : Fondements théoriques

### **Chapitre I : Les pratiques d'adaptation traditionnelle dans les zones chaudes et arides**

Introduction .....	12
I.1. l'architecture traditionnelle .....	13
I.1.1. Présentation et définition de l'architecture traditionnelle .....	13
I.1.2. Facteurs influençant l'architecture traditionnelle .....	14
I.1.3. Les caractéristiques et identité de l'architecture traditionnelle.....	14
I.1.4. Aperçu historique sur l'architecture traditionnelle .....	15
I.1.4.1. Universalité de l'architecture traditionnelle : Quelques exemples des pratiques traditionnelles dans le monde .....	16
I.1.4.2. L'architecture traditionnelle en Afrique .....	18
I.1.4.3. L'architecture traditionnelle en Algérie.....	19
I.2. Les pratiques d'adaptation traditionnelle urbaine.....	20
I.2.1. La compacité.....	20
I.2.2. L'implantation et tracé des rues .....	22
I.2.2.1. Orientation de la rue.....	23
I.2.2.2. Rapport hauteur / largeur de la rue .....	23

## Table des matières

---

I.2.2.3. Éléments d'ombrage dans la rue.....	24
I.2.3. La hiérarchisation des espaces extérieurs .....	25
I.2.4. Le troglodytisme .....	27
I.2.5. L'utilisation de la végétation .....	28
I.2.6. L'introduction de l'eau .....	29
I.3. Les pratiques d'adaptation traditionnelle architecturale .....	30
I.3.1. La forme et la géométrie .....	30
I.3.2. L'orientation .....	32
I.3.3. Le nomadisme saisonnier et journalier .....	34
I.3.4. L'utilisation des systèmes de ventilation (refroidissement) passive.....	36
I.3.4.1. Les tours à vents (Malkaf) .....	36
I.3.4.1.1. Le principe de fonctionnement .....	37
I.3.4.2. L'utilisation des espaces tampons : Le patio .....	38
I.3.4.2.1. Le rôle d'un patio.....	38
I.3.4.2.2. Le principe de fonctionnement d'un patio .....	39
I.3.5. L'utilisation des matériaux locaux.....	42
I.3.6. Protection solaire par les ouvertures .....	44
I.3.6.1. Les Moucharabiehs .....	45
I.3.6.2. Les claustras et percements.....	47
I.3.7. Couleur de l'enveloppe.....	47
I.3.8. Les toitures.....	49
I.4. L'architecture traditionnelle, entre hier et aujourd'hui : la valorisation des pratiques d'adaptation traditionnelle vers une architecture bioclimatique .....	50
I.5. L'architecture traditionnelle et la durabilité .....	51
Conclusion.....	53

## **Chapitre II : La toiture et la performance thermique dans les zones à climat chaud et aride**

Introduction .....	54
II.1. Définition et description .....	55
II.2. Fonctions de la toiture : Une toiture, pourquoi ?.....	55
II.2.1. Fonction physique.....	55
II.2.2. Fonction thermique.....	55
II.2.3. Fonction environnementale .....	56

## Table des matières

---

II.2.4. Fonction psychologique.....	57
II.3. Types de toitures.....	58
II.3.1. Les toitures conventionnelles .....	58
II.3.1.1. La toiture plate ou toiture-terrasse.....	59
II.3.1.1.1. Toiture chaude .....	60
II.3.1.1.2. Toiture froide.....	61
II.3.1.1.3. Toiture combinée (Toiture « DUO »).....	62
II.3.1.2. Toiture inclinée ou en pente .....	63
II.3.1.3. Toiture courbée (arrondie).....	64
II.3.1.4. Toiture végétale .....	65
II.3.2. Toitures traditionnelles (non conventionnelles) .....	71
II.3.2.1. Toitures traditionnelles plates.....	71
II.3.2.2. Les dômes et les voûtes .....	73
II.3.2.2.1. La voûte nubienne .....	77
II.4. Les toitures des constructions traditionnelles dans la vallée du M'Zab.....	81
II.4.1. Les toitures terrasses plates .....	81
II.4.1.1. Toitures (planchers) plates en troncs et branches de palmiers .....	82
II.4.1.2. Toitures (planchers) composées de troncs de palmiers et de voûtains.....	85
II.4.1.3. Toitures (Planchers) composées de troncs d'arbres/palmier et de pierres plates.....	86
II.4.2. Les coupoles dans les constructions mozabites.....	87
II.4.3. Les voûtes dans les constructions mozabites.....	88
II.5. Le comportement thermique d'une toiture .....	91
II.6. La performance thermique de la toiture .....	93
II.7. Comment la toiture réagit sur le confort thermique ?.....	94
Conclusion.....	95

## Table des matières

### **Chapitre III : Revue de littérature sur l'optimisation de la performance thermique des toitures**

Introduction .....	97
III.1.L'optimisation de la performance thermique et énergétique des toitures et le refroidissement passif.....	98
III.2.Optimisation de la performance thermique des toitures par « Évaporation ».....	99
III.3.Optimisation de la performance thermique des toitures par « Radio-évaporation » .....	106
III.4.Optimisation de la performance thermique des toitures par « Inertie des matériaux ».....	110
III.5.Optimisation de la performance thermique des toitures par « Isolation » .....	113
III.6.Optimisation de la performance thermique des toitures par « Ombrage ».....	115
III.7.Optimisation de la performance thermique des toitures par « Ventilation » .....	121
III.8.Optimisation de la performance thermique des toitures par « Réflexion ».....	123
Conclusion.....	134

## **Deuxième Partie : Partie pratique**

### **Chapitre IV : Présentation du contexte et les cas d'étude**

Introduction .....	137
IV .1. Le Ksar de Béni Isguen .....	138
IV.1.1. Présentation du ksar de Béni Isguen .....	138
IV .1.2.Composition de la Vallée : les 5 Ksour.....	139
IV.1.3.Les ressources territoriales du Ksar .....	140
IV .1.4. Héritage matériel.....	140
IV.1.5.Héritage immatériel.....	141
IV.1.6. Mode d'urbanisation du Ksar : Association homme-culture-climat .....	142
IV.1.7. Principe d'organisation urbaine du Ksar .....	143
IV.1.8. Les éléments du Ksar .....	143
IV.1.8.1. Les rues.....	144
IV.1.8.2. Les ruelles.....	145
IV.1.8.3. La mosquée.....	145
IV.1.8.4. Le souk.....	145
IV.1.8.5. Cimetière.....	146
IV.1.8.6. Palmeraie.....	146

## Table des matières

---

IV.1.9.les éléments de la maison mozabite .....	146
IV.1.9.1. Maison introvertie à Chebek.....	147
IV.1.9.2. Chebek.....	147
IV.1.9.3. Le toit-terrasse.....	148
IV.1.9.4. Matériaux de construction.....	148
IV.1.9.5. Ensoleillement/orientation et éclairage de la maison ksourienne .....	148
IV.1.9.6. Ventilation et aération de la maison ksourienne .....	150
IV.2.L'étude climatique du Ksar de Béni Isguen.....	152
IV.2.1. Les données climatiques du Ksar de Béni Isguen.....	152
IV.2.2. Les outils graphiques d'évaluation du confort thermique.....	154
IV.2.3. Le diagramme psychrométrique (bioclimatique) de Givoni.....	154
IV.2.4. Analyse de diagramme de Givoni selon les données climatiques du Ksar de Béni Isguen.....	157
IV.2.5. Quelles stratégies faut-il adapter pour atteindre un confort thermique dans ce cas ? .....	159
IV.2.6.Calcul de l'indice d'aridité de MARTONE .....	160
IV.2.7. Les isothermes.....	160
IV.3. Présentation des cas d'étude .....	161
Conclusion.....	171
<b><u>Chapitre V: Étude expérimentale par des mesures in situ</u></b>	
Introduction .....	173
V.1. Processus expérimental .....	174
V.2. Observation .....	175
V.3. Description des campagnes de mesure : procédures et instrumentation .....	177
V.4. Problèmes rencontrés .....	177
V.5. Les paramètres climatiques mesurés .....	177
V.6. Les instruments de mesure .....	178
V.7. Déroulement des campagnes de mesure en période estivale.....	180
V.8. Protocole de la prise des mesures .....	181
V.8.1. Choix des points des mesures.....	181
V.9. Déroulement des campagnes de mesure en période hivernale .....	182
V.10. Justification du choix de la méthode d'investigation à travers des mesures in situ	182
V.11. Résultats de l'étude sur terrain .....	185

## Table des matières

---

V.11.1. Résultats de la saison chaude .....	185
V.11.1.1. Résultats des mesures in situ du premier cas d'étude .....	185
V.11.1.2. Résultats des mesures in situ du deuxième cas d'étude .....	190
V.11.1.3. Comparaison des résultats des mesures in situ des deux premiers cas d'étude simultanément .....	200
V.11.1.4. Résultats des mesures du troisième cas d'étude .....	204
V.11.1.5. Résultats des mesures du quatrième cas d'étude .....	210
V.11.1.6. Discussion .....	215
V.11.2. Résultats des mesures in situ de la période hivernale .....	217
V.11.2.1. Résultats des mesures in situ du premier cas d'étude .....	218
V. 11.2.2. Résultats des mesures in situ du deuxième cas d'étude .....	220
V.11.2.3. Résultats des mesures in situ du troisième cas d'étude .....	221
V.11.2.4. Résultats des mesures in situ du quatrième cas d'étude .....	222
Conclusion.....	224

### **Chapitre VI : Optimisation de la performance thermique de la toiture :**

#### **Simulation numérique**

Introduction .....	226
VI.1. La simulation numérique .....	227
VI.1.1. TRNSYS Simulation Studio .....	227
VI.1.2. Description du logiciel TRNSYS.....	227
VI.2. Justification de choix de la méthode d'investigation par simulation dynamique ....	227
VI.3. Simulation numérique par le logiciel TRNSYS.....	228
VI.3.1. Les scénarios .....	230
VI.3.2. Déroulement et détails sur la simulation numérique.....	232
VI.3.3. Les conditions aux limites (The boundary condition) .....	233
VI.4. Résultats et discussion .....	241
VI.4.1. Validation des résultats mesurés .....	241
VI.4.2.La toiture double peau couplée à une peinture thermo réfléchissante comme solution pour optimiser les performances thermiques de la toiture .....	244
VI.4.2.1. Peinture au lait de chaux .....	248
VI.4.2.2. Peinture à l'argile .....	249
VI.4.3. Résultats de la saison chaude .....	251
VI.4.4. Consommation énergétique annuelle .....	256

## Table des matières

---

VI.4.5. Justification des résultats après amélioration des propriétés thermiques de la toiture.....	259
VI.4.6. Résultat de la simulation thermique en période hivernale .....	265
VI.5.Comparaison des résultats de l'étude avec les résultats des études similaires.....	266
Conclusion.....	268
Conclusion générale .....	269
Limites de la recherche .....	274
Recommandations pour futurs recherches .....	276
Références	
Annexes	
Annexe 01 : Récapitulatif de revue de littérature	
Annexe 02 : Données climatiques du Ksar de Béni Isguen	
Annexe 03 : Carte climatique mondiale	
Annexe 04 : Paramètres climatiques	
Annexe 05 : Résultats des mesures in situ de la période hivernale par FI 84FD	
Annexe 06 : Simulation numérique avec TRNSYS	

## Liste des figures

### Chapitre I

Figure I.1 : les facteurs affectant l'architecture traditionnelle.....	14
Figure I.2 : Vue générale de l'ancienne ville traditionnelle de Shibam.....	15
Figure I.3 : Villes traditionnelles .....	17
Figure I.4 :(a) photo d'un trullo typique situé dans le centre historique d'Alberobello ; (b) photo d'un Igloo dans le pôle Nord .....	18
Figure I.5 : (a) vue du village nubien et la rivière Nil sur l'île d'Éléphantine, Assouan, Haute-Égypte ; (b) le village « Vieux Gournà », à Louxor ; (c) vue sur la ville de Ghadamès en Libye.....	19
Figure I.6 : Architecture traditionnelle en Algérie.....	19
Figure I.7 : Villes compactes .....	21
Figure I.8 : Rues des villes traditionnelles .....	22
Figure I.9 : Photos montrant les ruelles à l'intérieur du Ksar de Béni Isguen .....	23
Figure I.10 : Croquis montrant l'impact des immeubles de grande hauteur avec des rues étroites sur l'ombrage .....	24
Figure I.11 : Sabat dans la ville de Yazd .....	25
Figure I.12 : Ruelles ombragées .....	25
Figure I.13 : Schéma conceptuel de la hiérarchisation spatiale tripartite des tissus traditionnels.....	26
Figure I.14 : Photos montrant différents types des rues et ruelles dans le Ksar de Béni Isguen.....	26
Figure I.15 : Habitat troglodyte.....	28
Figure I.16 : Différences microclimatiques introduites par la présence de l'arbre.....	29
Figure I.17 : Utilisation de la végétation et l'eau.....	30
Figure I.18 : Forme compacte des maisons.....	31
Figure I.19 : Trajectoire du soleil en été et en hiver et son impact sur les surfaces exposées des bâtiments verticaux .....	32
Figure I.20 : (a) pénétration des rayons solaires dans la maison ; (b) bâtiments attenants et pénétration du soleil dans l'espace .....	33
Figure I.21 : (a) l'ensoleillement de la maison traditionnelle ; (b) photo montrant la pénétration du soleil dans le patio.....	33
Figure I.22 : (a) Ensoleillement des maisons mozabites ; (b) photo montre l'inclinaison	

## Liste des figures

---

des maisons .....	34
Figure I.23 : Types des maisons mozabites .....	35
Figure I.24 : Perspective montrant l'utilisation de la terrasse par les habitants.....	35
Figure I.25 : (a) tour à vent Yazd ; (b) le capteur de vent dans le jardin de Dolat Abad, Yazd, Iran.....	36
Figure I.26 : Tour à vent intégrée avec refroidissement souterrain .....	37
Figure I.27 : Coupe schématique du principe de fonctionnement d'un patio en été.....	39
Figure I.28 : Le patio chez les mozabites.....	40
Figure I.29 : Intégration de la végétation et l'eau dans le patio .....	41
Figure I.30 : Maison traditionnelle qui combine la cour ouverte avec les tours à vent .....	42
Figure I.31 : Technique de terre crue .....	44
Figure I.32 : Matériaux locaux dans la vallée du M'Zab .....	44
Figure I.33 : Ouvertures donnant sur le patio (Yazd) .....	45
Figure I.34 : Le Qamariya.....	45
Figure I.35 : (a) vue de Rowshan dans la vieille ville de Djedda ; (b) vue de Moucharabieh de l'extérieur en Égypte .....	46
Figure I.36 : Schéma d'un Moucharabieh montrant ses caractéristiques et ses principales fonctions.....	46
Figure I.37 : (a), (b), (c), (d) percement de ventilation dans le Ksar de Tinemmirine ; (e), (f) vue des claustras de l'extérieur dans le Ksar de Tafilelt ; (g) vue de l'intérieur .....	47
Figure I.38 : Couleur claire de l'enveloppe .....	48
Figure I.39 : (a) Terrasse des maisons de la ville de Shibam ; (b) Toit voûté avec fenêtres croisées dans la ville de Yazd .....	49
Figure I.40 : La ville de Masdar.....	51
Figure I.41 : Ksar de Tafilelt.....	51
Figure I.42 : Schéma montrant la relation entre l'architecture traditionnelle et durable .....	52

## **Chapitre II**

Figure II.1 : Schéma résumant les fonctions d'une toiture.....	58
Figure II.2 : Toiture plate .....	59
Figure II.3 : Toiture chaude .....	60
Figure II.4 : (a) schéma d'une toiture compacte ; (b) schéma d'une toiture inversée.....	61
Figure II.5 : (a) schéma d'une toiture froide ; (b) coupe sur une toiture froide .....	62

## Liste des figures

---

Figure II.6 : (a) schéma d'une toiture combinée ou DUO, (b) collage de l'isolant & mise en place de la membrane d'étanchéité ; (c) lestage en gravier dans la technique de toiture inversée ou combinée.....	63
Figure II.7 : Toiture inclinée.....	64
Figure II.8 : Des projets architecturaux avec des toitures courbées.....	65
Figure II.9 : Représentation schématique des composants d'une toiture végétalisée.....	66
Figure II.10 : Schéma des étapes pour végétaliser une toiture-terrasse.....	66
Figure II.11 : Les principales caractéristiques de trois types de toiture verte.....	67
Figure II.12 : Bâtiments avec toiture végétale.....	69
Figure II.13 : (a) Bilan énergétique schématique du toit vert ; (b) bilan énergétique de surface simplifié pour un système générique de toiture verte ; (c) structure schématique d'un toit vert extensif et d'un toit vert intensif, et le mécanisme de refroidissement pendant la journée.....	70
Figure II.14 : Vue des toitures terrasses traditionnelles.....	72
Figure II.15 : Villes traditionnelles utilisant des toits en dômes et voûtes.....	73
Figure II.16 : Les toits traditionnels en Iran.....	74
Figure II.17 : Les différents cas de fonctionnement des dômes.....	75
Figure II.18 : Phénomènes radiatifs des dômes.....	76
Figure II.19 : Performance des toits en dôme.....	76
Figure II.20 : Formes des toits incurvés.....	77
Figure II.21 : Voûte du village de Gourna.....	78
Figure II.22 : Habitation « Case Obus » au Cameroun.....	78
Figure II.23 : Construction en voûte nubienne dans l'architecture sahélienne.....	79
Figure II.24 : La forme des toitures dans la vallée du M'Zab, en Algérie.....	81
Figure II.25 : Coupe sur une maison traditionnelle mozabite montrant les différents planchers.....	82
Figure II.26 : Coupe sur un toit en tronc et branches de palmiers.....	83
Figure II.27 : Photo d'un plancher en troncs et branches de palmiers d'un passage couvert du Ksar.....	83
Figure II.28 : Coupe sur un toit en palmes et argile.....	84
Figure II.29 : Photo réelle montrant les différentes couches de toit en palmes et argile.....	84
Figure II.30 : Plancher d'un passage couvert en roseaux dans le Ksar d'Al Atteuf.....	84
Figure II.31 : Coupe sur une toiture de troncs de palmiers et voûtains.....	85

## Liste des figures

---

Figure II.32 : Photos montrant le toit en troncs de palmiers et voûtains dans un cas d'étude traité .....	85
Figure II.33 : Plancher en troncs de palmiers et voûtains dans un passage couvert .....	86
Figure II.34 : Photo montrant le coffrage d'un toit en troncs de palmier au cours de réalisation .....	86
Figure II.35 : Coupe sur un toit en troncs d'arbre et de pierre plate .....	87
Figure II.36 : Coupe Transversale Mosquée Baba-Oueldjemma, Ghardaïa .....	88
Figure II.37 : Photos des constructions en coupoles dans la vallée du M'Zab .....	88
Figure II.38 : Utilisation des voûtes .....	89
Figure II.39 : Forme de plancher sous-sol (la cave) en voûte .....	89
Figure II.40 : Photos des arcs dans le Ksar .....	90
Figure II.41 : Utilisation des arcs dans les portes d'entrée .....	90
Figure II.42 : Photos montrant l'utilisation des arcs à l'intérieur des maisons .....	90
Figure II.43 : Comportement radiatif de la toiture .....	91
Figure II.44 : Modèle utilisé pour le calcul de l'absorption et émission de chaleur .....	92
Figure II.45 : Mécanismes de transfert de chaleur dans les toits des bâtiments .....	93
Figure II.46 : La couverture mobile sur le toit .....	94
Figure II.47 : Les différentes méthodes de protection de la toiture .....	94

### **Chapitre III**

Figure III.1 : Techniques d'optimisation de la performance thermique et énergétique des toitures.....	98
Figure III.2 : Les systèmes de refroidissement passifs sur les toits.....	101
Figure III.3 : Variations dans le temps des températures calculées .....	101
Figure III.4 : Représentation schématique de (a) la mise en page expérimentale, (b) un toit avec de la brique de rétention d'eau, (c) un toit avec un écran de rayonnement, (d) un toit ordinaire sans refroidissement passif. (e) expérience de mesure de la distribution des points .....	102
Figure III.5 : La structure en brique et le mécanisme de transfert de masse.....	103
Figure III.6 : Quelques systèmes de refroidissement évaporatif examinés.....	104
Figure III.7 : Refroidissement passif par évaporation à courant descendant dans le centre de recherche de Torrent, Ahmedabad.....	106
Figure III.8 : Description du modèle .....	107
Figure III.9 : Conception et vues du SHETRE.....	109

## Liste des figures

---

Figure III.10 : Vue du système (Approche expérimentale).....	109
Figure III.11 : Schéma d'installation et d'exploitation de SHETRE dans la démarche expérimentale .....	109
Figure III.12 : Vue réelle du prototype .....	112
Figure III.13 : Conception de prototypes expérimentaux .....	113
Figure III.14 : Ombrage de toit par couverture solide.....	115
Figure III.15 : Ombrage du toit par couvert végétal .....	116
Figure III.16 : Ombrage du toit par des pots en terre.....	116
Figure III.17 : Stores de toit amovible .....	117
Figure III.18 : Les cinq méthodes de refroidissement étudiées.....	118
Figure III.19 : Processus thermique et modèle physique simplifié du photovoltaïque ajouté au toit.....	119
Figure III.20 : Comparaisons du gain de chaleur et de la charge de refroidissement et de chauffage à travers les toits .....	120
Figure III.21 : Le système d'ombrage.....	121
Figure III.22 : Construction de toit.....	122
Figure III.23 : Phénomène de climatisation passive avec un rayonnement solaire incident de $1 \text{ kW m}^{-2}$ .....	125
Figure III.24 : Plate-forme de toiture expérimentale de climatisation de $48 \text{ m}^2$ avec 5 matériaux différents.....	125
Figure III.25 : (a) Toit en béton de ciment armé avec configuration et le prototype ; (b) Toit froid avec configuration et le prototype .....	128
Figure III.26 : Variation de la température de surface du toit (Cool Roof) en Mai .....	128
Figure III.27 : Principe de fonctionnement du cool roof.....	129
Figure III.28 : Différents flux participant au bilan énergétique du Cool-Green Roof .....	130
Figure III.29 : Photo des cellules de test avec les techniques passives .....	131

### Chapitre IV

Figure IV.1 : (a) Localisation géographique de la vallée ; (b) Situation du Ksar de Béni Isguen .....	138
Figure IV.2 : Position du Ksar de Béni Isguen par rapport des cinq Ksour dans la Vallée .....	138
Figure IV.3 : Vue satellite de localisation du Ksar de Béni Isguen .....	139

## Liste des figures

Figure IV.4 : Plan du Ksar de Béni Isguen avec les étapes d'extension du Ksar .....	140
Figure IV.5 : Habillement des M'Zab .....	141
Figure IV.6 : Vue d'ensemble du Ksar de Béni Isguen .....	142
Figure IV.7 : Aménagement du ksar .....	143
Figure IV.8 : Photo montrant le tissu urbain compact du ksar.....	143
Figure IV.9 : Plan de structure viaire du Ksar de Béni Isguen.....	144
Figure IV.10 : (a) Photo montrant les rues commerçantes du Ksar de Béni Isguen, (b) photo montrant les rues intimes de Béni Isguen .....	144
Figure IV.11 : Photos montrant les ruelles à l'intérieur du Ksar .....	145
Figure IV.12 : (a) Photo montrant le minaret de la mosquée du Ksar, (b) photo montrant le souk de 'Lala Achou' dans le Ksar de Béni Isguen .....	145
Figure IV.13 : (a) Plan d'une maison mozabite avec patio ; (b) vue du patio couvert par tapis pendant la journée d'été.....	147
Figure IV.14 : (a) Vue de chebek depuis la terrasse ; (b) vue de couvert de chebek dans la terrasse d'une maison à béni Isguen.....	147
Figure IV.15 : (a) Mur en terre dans la maison de palmeraie de Béni Isguen ; (b) Toit en palmier.....	148
Figure IV.16 : Ensoleillement du Ksar.....	149
Figure IV.17 : Orientation et ensoleillement de la maison traditionnelle mozabite dans le Ksar de Béni Isguen .....	150
Figure IV.18 : Stratégies passives d'aération, de ventilation et d'ensoleillement de la maison ksourienne.....	151
Figure IV.19 : Diagramme bioclimatique du Ksar de Béni Isguen.....	156
Figure IV.20 : Isothermes indiquant les différentes zones thermiques .....	161
Figure IV.21 : Situation des cas d'études dans le Ksar .....	163
Figure IV.22 : Situation des cas d'études.....	164
Figure IV.23 : Plan de la maison 1 avec photos.....	165
Figure IV.24 : Photos de la maison 2 avec photos .....	166
Figure IV.25 : Plan de maison 3 avec photos.....	167
Figure IV.26 : Plan de maison 4 avec photos.....	168
Figure IV.27 : Coupe sur un toit en tronc et branches de palmier dans les cas d'étude	169
Figure IV.28 : Coupe sur une toiture de troncs de palmiers et voûtains .....	169
Figure IV.29 : Photo de plancher de troncs de palmiers et voûtains dans la chambre de	

## Liste des figures

---

l'étage dans le premier cas d'étude .....	170
Figure IV.30 : Photo de plancher en tronc et branches de palmiers dans la chambre des parents et des enfants dans l'étage du deuxième cas d'étude.....	170
<b><u>Chapitre V</u></b>	
Figure V.1 : Processus expérimental développé dans l'étude .....	174
Figure V.2 : Mode d'occupation des espaces d'une maison mozabite pendant une journée d'été.....	176
Figure V.3 : Instruments de mesure .....	180
Figure V.4 : Coupe représentative du protocole de prise de mesure.....	184
Figure V.5 : Graphe de variation de température moyenne de l'air ambiant pour trois jours d'été typiques de juillet 2018 du premier cas d'étude .....	186
Figure V.6 : Graphe de variation de température moyenne radiante des parois pour trois journées typiques d'été de juillet 2018 du premier cas d'étude.....	187
Figure V.7 : Humidité relative moyenne en % pour trois jours d'été typiques de juillet 2018.....	188
Figure V.8 : Graphe de variation de vitesse de l'air dans le premier cas d'étude.....	188
Figure V.9 : Graphe de variation de température moyenne de l'air ambiant des trois jours d'investigation du deuxième cas d'étude (Chambre 01).....	192
Figure V.10 : Graphe de variation de température moyenne radiante des parois des trois jours d'investigation du deuxième cas d'étude (Chambre 01).....	192
Figure V.11 : Graphe d'humidité relative moyenne en % des trois jours d'investigation du deuxième cas d'étude (Chambre 01).....	194
Figure V.12 : Graphe de variation de vitesse de l'air des trois jours d'investigation du deuxième cas d'étude (Chambre 01).....	194
Figure V.13 : Graphe de variation de température moyenne de l'air ambiant des trois jours d'investigation du deuxième cas d'étude (Chambre 02).....	196
Figure V.14 : Graphe de variation de température moyenne radiante des parois des trois jours d'investigation du deuxième cas d'étude (Chambre 02).....	196
Figure V.15 : Graphe de variation de l'humidité relative moyenne en % des trois jours d'investigation du deuxième cas d'étude (Chambre 02).....	198
Figure V.16 : Graphe de variation de vitesse de l'air des trois jours d'investigation du deuxième cas d'étude (Chambre 02).....	198
Figure V.17 : Comparaison entre la variation de température ambiante des deux	

## Liste des figures

---

premiers cas d'étude en °C.....	201
Figure V.18 : Graphe de variation de température moyenne radiante des parois des cas d'étude en 03 août 2018 .....	202
Figure V.19 : Graphe de variation d'humidité relative moyenne en % pour les deux cas d'étude d'août 2018.....	203
Figure V.20 : Graphe de variation de vitesse de l'air des deux cas d'étude .....	203
Figure V.21 : Graphe de variation de température moyenne de l'air ambiant des trois jours d'investigation du troisième cas d'étude.....	206
Figure V.22 : Graphe de variation de température moyenne radiante des parois des trois jours d'investigation du troisième cas d'étude.....	206
Figure V.23 : Graphe de variation de l'humidité relative moyenne en % des trois jours d'investigation du troisième cas d'étude.....	208
Figure V.24 : Graphe de variation de vitesse de l'air des trois jours d'investigation du troisième cas d'étude.....	208
Figure V.25 : Graphe de variation de température moyenne de l'air ambiant des trois jours d'investigation du quatrième cas d'étude.....	212
Figure V.26 : Graphe de variation de température moyenne radiante des parois des trois jours d'investigation du quatrième cas d'étude.....	212
Figure V.27 : Graphe de variation d'humidité relative moyenne en % des trois jours d'investigation du quatrième cas d'étude.....	213
Figure V.28 : Graphe de variation de vitesse de l'air des trois jours d'investigation du quatrième cas d'étude.....	214
Figure V.29 : Variation de température, humidité relative et vitesse de l'air du premier cas d'étude durant la période d'investigation hivernale.....	218
Figure V.30 : Variation de température, humidité relative et vitesse de l'air du deuxième cas d'étude durant la période d'investigation hivernale .....	220
Figure V.31 : Variation de température, humidité relative et vitesse de l'air du troisième cas d'étude durant la période d'investigation hivernale.....	221
Figure V.32: Variation de température, humidité relative et vitesse de l'air du quatrième cas d'étude durant la période d'investigation hivernale.....	223

### **Chapitre VI**

Figure VI.1: Résumé de méthode d'investigation utilisée dans la recherche .....	228
Figure VI.2 : Schéma de principe de la méthode de simulation dynamique.....	229

## Liste des figures

---

Figure VI.3 : Schéma représentatif de toiture existante .....	230
Figure VI.4 : Schéma représentant une toiture double-peau combinée à une peinture thermo réfléchissante.....	230
Figure VI.5 : Interface du TRNBuild .....	233
Figure VI.6 : Comportement thermique pendant la nuit .....	237
Figure VI.7. Graphe de comparaison entre températures mesurées et simulées.....	242
Figure VI.8 : Graphe de comparaison entre les résultats de température mesurés et simulés pour le 28 juillet 2018 .....	243
Figure VI.9 : Graphe de comparaison entre les résultats de température mesurés et simulés pour le 29 juillet 2018 .....	243
Figure VI.10 : Graphe de comparaison entre les résultats de température mesurés et simulés pour le 30 juillet 2018 .....	243
Figure VI.11 : Valeurs moyennes des résultats de température mesurés et simulés pour la période étudiée .....	243
Figure VI.12 : Composition schématique de la peinture.....	247
Figure VI.13: Étapes d'application d'une peinture naturelle au lait de chaux.....	248
Figure VI.14: Composants d'une peinture à l'argile.....	249
Figure VI.15 : Coupe sur toiture double peau combinée à la peinture thermo réfléchissante du modèle développé et simulé .....	250
Figure VI.16 : Résultats de simulation du modèle étudié et amélioré par TRNSYS	251
Figure VI.17 : Résultat des simulations de la température opérative dans le cas existant	252
Figure VI.18 : Résultats des simulations de la température opérative dans le cas d'une toiture double peau couplée à une peinture thermo réfléchissante.....	253
Figure VI.19 : La fonction thermique du modèle de toit proposé.....	256
Figure VI.20 : Histogramme montrant la consommation d'énergie au cours des différents mois de l'année pour le cas existant et le cas optimisé .....	258
Figure VI.21 : Consommation d'énergie annuelle des cas étudiée.....	258
Figure VI.22 : Principe de fonctionnement d'une toiture froide.....	261
Figure VI.23 : Effet positif de toiture froide .....	261
Figure VI.24 : Coupe représentant la toiture double peau combinée à la peinture thermo réfléchissante et l'effet sur la température .....	264
Figure VI.25 : Histogramme de la consommation énergétique hivernale.....	265

## Liste des tableaux

---

### Liste des Tableaux

#### Chapitre IV

Tableau IV.1 : Types d'habitat dans le Ksar.....	146
Tableau IV.2 : Température moyenne mensuelle en °C du Ksar de Béni Isguen .....	153
Tableau IV.3 : Humidité relative moyenne mensuelle en % du Ksar de Béni Isguen .....	153

#### Chapitre V

Tableau V.1 : Valeurs de température de l'air ambiant extérieur pendant les trois jours d'enquête avec la température moyenne.....	185
Tableau V.2 : Valeurs de température de l'air ambiant intérieur au premier étage pendant les trois jours d'enquête avec la température moyenne.....	185
Tableau V.3 : Valeurs de température de l'air ambiant intérieur au rez-de-chaussée pendant les trois jours d'enquête avec la température moyenne.....	185
Tableau V.4 : Valeurs moyennes de la température radiante au premier étage pendant les trois jours d'enquête .....	186
Tableau V.5 : Valeurs d'humidité relative extérieure en % pendant les trois jours d'enquête avec la moyenne.....	187
Tableau V.6 : Valeurs d'humidité relative intérieure en % en étage pendant les trois jours d'enquête avec la moyenne.....	187
Tableau V.7 : Valeurs d'humidité relative intérieure en % au rez-de-chaussée pendant les trois jours d'enquête avec la moyenne .....	188
Tableau V.8 : Valeurs de température de l'air ambiant extérieur pendant les trois jours d'enquête avec la température moyenne du 2ème cas d'étude .....	190
Tableau V.9 : Valeurs de température de l'air ambiant intérieur au premier étage pendant les trois jours d'enquête avec la température moyenne.....	191
Tableau V.10 : Valeurs de température de l'air ambiant intérieur au rez-de-chaussée pendant les trois jours d'enquête avec la température moyenne.....	191
Tableau V.11: Valeurs moyennes de la température radiante au premier étage pendant les trois jours d'enquête .....	191
Tableau V.12: Valeurs d'humidité relative extérieure en % pendant les trois jours d'enquête avec moyenne.....	193
Tableau V.13: Valeurs d'humidité relative intérieure en % en étage pendant les trois jours d'enquête avec la moyenne.....	193
Tableau V.14 : Valeurs d'humidité relative intérieure en % au rez-de-chaussée	

## Liste des tableaux

---

pendant les trois jours d'enquête avec la moyenne.....	193
Tableau V.15 : Valeurs de température de l'air ambiant extérieur pendant les trois jours d'enquête avec la température moyenne de chambre 02 .....	195
Tableau V.16 : Valeurs de température de l'air ambiant intérieur au premier étage pendant les trois jours d'enquête avec la température moyenne.....	195
Tableau V.17: Valeurs de température de l'air ambiant intérieur au rez-de-chaussée pendant les trois jours d'enquête avec la température moyenne.....	195
Tableau V.18: Valeurs moyennes de la température radiante au premier étage pendant les trois jours d'enquête .....	195
Tableau V.19: Valeurs d'humidité relative extérieure en % pendant les trois jours d'enquête avec moyenne.....	197
Tableau V.20 : Valeurs d'humidité relative intérieure en % en étage pendant les trois jours d'enquête avec la moyenne.....	197
Tableau V.21 : Valeurs d'humidité relative intérieure en % au rez-de-chaussée pendant les trois jours d'enquête avec la moyenne.....	197
Tableau V.22 : Valeurs de température de l'air ambiant extérieur et intérieur du premier cas d'étude (03 août 2018).....	200
Tableau V.23 : Valeurs de température de l'air ambiant extérieur et intérieur du deuxième cas d'étude (03 août 2018).....	200
Tableau V.24 : Valeurs moyennes de la température radiante au premier étage pendant les trois jours d'enquête .....	201
Tableau V.25 : Valeurs d'humidité relative extérieure et intérieure en % du premier cas d'étude (3 août 2018) .....	202
Tableau V.26 : Valeurs d'humidité relative intérieure et extérieure en % du deuxième cas.....	202
Tableau V.27 : Valeurs de température de l'air ambiant extérieur pendant les trois jours d'enquête avec la température moyenne du troisième cas.....	204
Tableau V.28 : Valeurs de température de l'air ambiant intérieur au premier étage pendant les trois jours d'enquête avec la température moyenne.....	205
Tableau V.29 : Valeurs de température de l'air ambiant intérieur au rez-de-chaussée pendant les trois jours d'enquête avec la température moyenne.....	205
Tableau V.30 : Valeurs moyennes de la température radiante au premier étage pendant les trois jours d'enquête du troisième cas d'étude.....	205

## Liste des tableaux

---

Tableau V.31 : Valeurs d'humidité relative extérieure en % pendant les trois jours d'enquête avec moyenne.....	207
Tableau V.32 : Valeurs d'humidité relative intérieure en % en étage pendant les trois jours d'enquête avec la moyenne.....	207
Tableau V.33 : Valeurs d'humidité relative intérieure en % au rez-de-chaussée pendant les trois jours d'enquête avec la moyenne.....	207
Tableau V.34 : Valeurs de température de l'air ambiant extérieur pendant les trois jours d'enquête avec la température moyenne du quatrième cas d'étude.....	210
Tableau V.35 : Valeurs de température de l'air ambiant intérieur au premier étage pendant les trois jours d'enquête avec la température moyenne.....	210
Tableau V.36 : Valeurs de température de l'air ambiant intérieur au rez-de-chaussée pendant les trois jours d'enquête avec la température moyenne.....	211
Tableau V.37 : Valeurs moyennes de la température radiante au premier étage pendant les trois jours d'enquête du quatrième cas d'étude .....	211
Tableau V.38 : Valeurs d'humidité relative extérieure en % pendant les trois jours d'enquête avec moyenne du quatrième cas d'étude.....	212
Tableau V.39 : Valeurs d'humidité relative intérieure en % en étage pendant les trois jours d'enquête avec la moyenne.....	213
Tableau V.40 : Valeurs d'humidité relative intérieure en % au rez-de-chaussée pendant les trois jours d'enquête avec la moyenne.....	213
Tableau V.41 : Température moyenne radiante des parois de la chambre d'étage du premier cas d'étude durant la période investiguée .....	219
Tableau V.42 : Températures moyenne radiante des parois de la chambre d'étage du deuxième cas d'étude durant la période investiguée .....	220
Tableau V.43 : Température moyenne radiante des parois de la chambre d'étage du troisième cas d'étude durant la période investiguée.....	222
Tableau V.44 : Température moyenne radiante des parois de la chambre d'étage du quatrième cas d'étude.....	223

### **Chapitre VI**

Tableau VI.1 : Les caractéristiques thermiques des matériaux des murs du modèle simulé .....	231
Tableau VI.2 : Les caractéristiques thermiques des matériaux du sol du modèle simulé .....	231

## Liste des tableaux

---

Tableau VI.3 : Les caractéristiques thermiques des matériaux de toiture du modèle simulé .....	231
Tableau VI.4 : Caractéristiques thermiques des matériaux de toiture amélioré du modèle simulé .....	232
Tableau VI.5 : Paramètres généraux pour les simulations TRNSYS.....	238
Tableau VI.6 : Épaisseur de couche, composition des parois et valeurs U pour l'enveloppe de la pièce simulée .....	239
Tableau VI.7 : Variables du cas d'étude paramétrique utilisée pour les simulations TRNSYS.....	240
Tableau VI.8 : Les caractéristiques thermiques des matériaux de toiture améliorés du modèle simulé .....	250
Tableau VI.9 : Comparaison des résultats de température opérative du cas existant et amélioré.....	254
Tableau VI.10 : Récapitulatif de résultats des heures de confort calculées par pourcentage .....	256

## **Abréviation**

ASHRAE: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

CR: Cool Roof

CVRMSE: Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error

DSR : Double Skin Roof

HVAC : système de chauffage, ventilation et climatisation

NMBE : Normalized Mean Bias Error

O.N.M : Station météorologique Noumret de Ghardaïa

OPVM : Office de protection de la vallée du M'zab

RDC: Rez-de-chaussée

SHETRE: Hydrodynamics Cool Roof System with Energy Recovery

TRNSYS : Transient System Simulation

## **Indices**

Ia : Indice d'aridité

P : précipitations annuelles

Ta : Température de l'air ambiant moyen (°C)

Text : Température ambiante extérieure (°C)

Tint : Température ambiante intérieure (°C)

To : Température opérative (°C)

Tmr : Température moyenne radiante (°C)

HR moy : Humidité relative moyenne (%)

HRext : Humidité relative extérieure (%)

HRint : Humidité relative intérieure (%)

V : Vitesse du vent (m/s)

R : La résistance thermique ( $m^2.k/W$ )

U : Le coefficient de transmission surfacique ( $W/m^2.k$ )

C : Capacité thermique ( $J/kg. °C$ )

D: Densité ( $Kg/m^3$ )

## **Symboles**

$\lambda$  : Conductivité thermique ( $W/m.k$ )

$\rho$  : Réflectance solaire (%)

$\varepsilon$  : Émittance thermique (%)

# Introduction Générale

## 1. Introduction :

Depuis son apparition sur la terre, l'homme a toujours cherché à atteindre un confort optimal dans son milieu de vie. Le confort thermique humain est défini par l'ASHRAE comme l'état d'esprit qui exprime la satisfaction de l'environnement environnant (ASHRAE, 1992). De plus, le terme d'efficacité énergétique dans les bâtiments peut être défini comme offrant des conditions de confort avec un minimum de consommation d'énergie (Pandey, Hindoliya, & Mod, 2012). Les économies d'énergie sont importantes dans le secteur mondial du bâtiment en raison de préoccupations concernant la sécurité énergétique (Toe & Kubota, 2015). Les facteurs environnementaux fondamentaux qui influent sur le confort thermique des habitants sont : la température de l'air ambiant, les températures radiuses des surfaces environnantes, l'humidité de l'air et les mouvements d'air (Sebti, Alkama, & Bouchair, 2013). En général, le sud de l'Algérie est l'un des déserts les plus vastes et les plus arides du monde à plus de 1500 kilomètres du nord au sud et de 1 200 km d'est en ouest, situé sur 8,5 millions de km<sup>2</sup> (Ahriz, Zemmouri, & Fezzai, 2017). Le climat est chaud et sec pendant l'été avec des nuits douces et des jours doux pendant l'hiver. La température est élevée et l'humidité relative est basse surtout pendant l'été (Sebti et al., 2013). Dans ce type de climat chaud et sec, on estime que la moitié de la consommation d'énergie demandée est dédiée vers le refroidissement surtout en été (Dabaieh, Wanas, Hegazy, & Johansson, 2015). Malgré la rudesse du Sahara, l'homme a construit de grands établissements humains compacts connus sous le nom du Ksar (au pluriel Ksour). Ces derniers ont été construits dans le climat chaud et sec du sud de l'Algérie pour s'adapter aux conditions environnementales locales dures. Ils ont exploité les ressources disponibles localement pour assurer un confort agréable pour l'homme (Bouchair, 2015). Les Ksour bien connus dans le désert de l'Algérie sont les Ksour de la vallée du M'zab (Ghardaïa, Melika, Béni Isguen, Bounoura et El Atteuf), le Ksar de Ouargla, les Ksour de Djanet (El Mihan, Azelouaz et Adjahil) situés dans le Tassili N'Ajjer et le Ksar de Knadsa dans le Bécharois (Bouchair & Dupagne, 2003). Plusieurs pratiques traditionnelles et des méthodes de construction passives ont été faites dans ces Ksour pour réduire la transmission de la chaleur excessive et pour améliorer le confort thermique à l'intérieur des habitations de ces régions chaudes (Bouchair and Dupagne, 2003). Y compris ; la compacité des tissus urbains, des rues sinueuses, des matériaux locaux, des introversions, taille réduite des ouvertures, etc. Ainsi que, l'utilisation des systèmes de rafraîchissement passif : les tours à vent, les cours, végétation, eau, etc., (Bouchair, Tebbouche, Hammouni, Lehtihet, & Blibli, 2013 ; Ravéreau, Roche, & Fathy, 1981). La vallée du M'Zab, dans le Sud algérien, est

## Introduction Générale

---

l'illustration de la faculté de l'homme à s'adapter à l'extrême dureté de son environnement (Adad & Mazouz, 2013b), qui a introduit ces pratiques d'adaptation à travers le savoir-faire local avec une synergie homme-culture-climat. Le Ksar de Béni Isguen est l'un des cinq ksour de la vallée, qui a un principe d'organisation urbain avec un plan compact aux ruelles étroites (Baudoui & Potié, 2003). *Les maisons sont imbriquées les unes dans les autres ou elles créent de grands volumes habitables par rapport à la surface de mur exposé au soleil* (Didillon & Donnadiou, 1977) pour réduire au maximum la transmission de la chaleur excessive à l'intérieur des maisons. Malgré l'application de toutes ces pratiques et ces techniques d'adaptation, il reste toujours des imperfections. Par sa position, sa forme et ses composantes, la toiture reste un élément problématique. La toiture joue un rôle très important dans l'amélioration de la performance thermique et le bilan énergétique du bâtiment, surtout en été (Costanzo, Evola, & Marletta, 2013). Aussi, elle a un impact sur le confort thermique des usagers. Néanmoins, la toiture est la surface la plus exposée au rayonnement solaire intense et surtout en saison estivale en particulier dans les régions chaudes et arides (Fantucci & Serra, 2019). Elle reçoit une quantité importante de rayonnement solaire durant la journée et transmet une partie non négligeable de cette chaleur vers l'intérieur de l'habitation (Zingre, Wan, Wong, Toh, & Lee, 2015), ce qui détermine une surchauffe importante de la pièce. Pour cela, plusieurs méthodes et techniques ont été exercées pour maîtriser la chaleur excessive entrant par la toiture dans ces Ksour ; à savoir : la toiture-terrasse, la toiture en voûte, etc., (Ravéreau et al., 1981). Dans les habitations du Ksar de Béni Isguen, la toiture-terrasse est le type le plus utilisé. D'un autre côté, après une visite faite dans les Ksour de la vallée du M'zab et spécialement dans le Ksar de Béni Isguen pendant le mois de juillet de l'année de 2018, on a remarqué que les habitants utilisent les terrasses pour y dormir. Ils n'utilisent jamais les chambres de l'étage dans la nuit. Donc, afin de quantifier et qualifier le confort thermique à l'intérieur des habitations ksouriennes, un travail de mesure in situ a été élaboré pendant l'été de l'année de 2018 sur quelques maisons dans le Ksar de Béni Isguen.

De nombreuses études ont été menées sur ce sujet pour caractériser le confort thermique intérieur des maisons dans les climats chauds et secs. Une étude a été effectuée par (Leylian. M.R et al, 2010) à Kashan ; qui est une ville située dans la zone chaude et aride de la partie centrale de l'Iran ; montrant les différences et les similitudes des principes du bâtiment traditionnel avec le climat. L'étude sur les maisons traditionnelles a été évaluée en termes de critères de conception en comparant avec des maisons contemporaines, en utilisant des données dérivées des mesures réels. Cette évaluation a été effectuée à la fois par des mesures

## Introduction Générale

---

in situ de température de l'air ambiant sur deux pièces sélectionnées afin d'évaluer les performances thermiques de l'enveloppe du bâtiment et le niveau de confort intérieur.

Donc, le travail de mesure des facteurs du confort thermique intérieur et l'étude de l'impact des toitures sur la performance thermique des habitations nécessitent un choix particulier des cas d'études sous des conditions bien précises. Pour cela, nous avons choisi des habitations qui se situent dans le tissu compact du Ksar de Béni Isguen et qui sont presque isolées. Ces habitations se caractérisent par l'existence d'une seule façade exposée à l'extérieur et les autres façades sont mitoyennes ; pour réduire au maximum l'exposition des façades aux rayons solaires. Et par conséquent, la toiture reste la surface la plus exposée aux conditions extérieures. Le travail de mesure des paramètres microclimatiques dans ces habitations ksouriennes, nous aide à former une idée sur le niveau du confort thermique et comprendre l'effet des toitures sur la performance thermique et le confort intérieur et si les toitures ont la capacité de réguler les ambiances thermiques intérieures. Les mesures sont faites pendant la période du mois de juillet et août 2018. Les paramètres climatiques mesurés à travers cette étude sont : la température de l'air ambiant ( $T_a$ ) à 1.20 m au niveau du sol (à l'intérieur des habitations), la température de l'air ( $T_a$ ) à l'extérieur prise à l'ombre à 1.20 m au niveau du sol, l'humidité relative intérieure et extérieure (%) à 1.20 au niveau du sol, la vitesse du vent. Aussi, la température moyenne radiante ( $T_{mr}$ ) des surfaces des murs, prises au milieu des surfaces des murs et les températures de surface du sol ( $T_{sol}$ ) et de toiture ( $T_{toit}$ ), prises au milieu des surfaces.

D'autre part, l'étude s'intéresse principalement à optimiser la performance thermique de la toiture dans ces habitations. Il existe plusieurs techniques passives dans la toiture pour améliorer le confort thermique intérieur et réduisent la consommation d'énergie (Mat Santamouris, Pavlou, Synnefa, Niachou, & Kolokotsa, 2007). Les méthodes de refroidissement passif dans les toitures présentent une solution importante pour optimiser le rendement énergétique des bâtiments et le confort thermique intérieur (Chua & Chou, 2011). La toiture double peau est une solution prometteuse à entreprendre, utilisé dans plusieurs régions du monde comme un système de refroidissement passif efficace. Mais elle n'est applicable et testé en Algérie. D'autre part, l'utilisation d'une isolation dans les bâtiments et surtout dans les toits dans les climats chauds réduise fortement les besoins en refroidissement (Costanzo, Evola, & Marletta, 2016). La transmission de chaleur à travers le toit peut être réduite en appliquant un revêtement d'isolation thermique sur ou sous le toit (Yew et al., 2013). De plus, les solutions passives de l'architecture traditionnelle comme l'utilisation des couleurs blanches aident à minimiser le rayonnement solaire incident pour assurer le confort

thermique (Romeo & Zinzi, 2013). En fait, la couleur des surfaces extérieures comme celle du toit a un effet remarquable sur la température intérieure des bâtiments sans système de climatisation (Al-Obaidi, Ismail, & Rahman, 2014). Ces dernières années, la construction de surfaces de toiture avec une réflectance solaire élevée et une émittance thermique élevée est considérée comme méthode de refroidissement passif efficace pour réduire le gain de chaleur dans les édifices à travers la toiture (Hashem et al., 2006; Zinzi & Agnoli, 2012). Contrairement aux toits sombres ou chauds qui absorbent des quantités de chaleur, le toit réfléchissant fonctionne comme réflecteur de rayonnement solaire et émetteur de la chaleur (Roslan, Ibrahim, Affandi, Nawi, & Baharun, 2016). L'utilisation de matériaux froids hautement réfléchissant sur la toiture peut abaisser la température de surface extérieure (V. Costanzo et al, 2013). Par conséquent, elle contribue à un confort thermique intérieur accru pendant la saison chaude, ce qui réduit les besoins en énergie (Uemoto, Sato, & John, 2010). Cette technique d'amélioration est à faible cout, efficace, économe en énergie et facile à appliquer (Mat Santamouris et al., 2007).

Donc, la recherche suivante s'intéresse principalement à évaluer les situations de confort thermique à l'intérieur des maisons ksouriennes et à optimiser la performance thermique et énergétique des toitures dans ce type des habitations.

### **2. Problématique :**

Le désir d'atteindre des conditions de vie confortable à l'intérieur du bâtiment est un objectif majeur de l'être humain depuis la nuit des temps. Il a utilisé diverses stratégies passives pour atteindre cet objectif éternel. Dans les régions chaudes et arides, la chaleur excessive et la température élevée surtout dans la période estivale sont les problèmes majeurs de l'inconfort thermique dont souffrent les habitants de ces régions.

Le recours aux systèmes actifs d'air conditionné comme solution entraîne des surcoûts de consommation électrique qui nécessite des entretiens périodiques et provoque des problèmes de pollution environnementale. De plus, la consommation énergétique est plus élevée dans ces régions à cause des conditions thermiques extérieures rudes sévères en été. Sachant bien que la demande annuelle de consommation d'électricité a augmenté de 8 % dans les bâtiments des secteurs résidentiels (Bélaïd & Youssef, 2017). Également, la demande d'énergie augmente de manière significative dans le monde entier pour créer un confort thermique dans les bâtiments. Il est connu que 2/3 de la surface de l'Algérie est un désert d'où les conditions climatiques sont très rudes et agressives surtout durant la saison estivale. De plus, la forte utilisation de la climatisation contribue largement à la consommation d'énergie à grande

## Introduction Générale

---

échelle dans les secteurs résidentiels de ces régions. L'exigence de confort thermique est un besoin primordial dans les bâtiments résidentiels situés dans des climats arides et semi-aride principalement. Pour cela, l'application de solutions passives est beaucoup plus demandée dernièrement pour réduire la consommation énergétique.

En revanche, l'homme a toujours cherché des solutions à moindre coût, avec des pratiques respectueuses de l'environnement et de la santé de l'homme. Plusieurs pratiques traditionnelles et des méthodes de construction passives pour réduire la transmission de la chaleur excessive, améliorer le confort thermique à l'intérieur des habitations des régions chaudes et assurer le bien-être de l'occupant ont été trouvées dans l'architecture traditionnelle à savoir : des villes compactes, des rues canyons, l'évaporation, des tours à vent et des toitures terrasses, etc. Les solutions traditionnelles attirent, ces dernières années, l'attention de plusieurs chercheurs. Ceci est dû aux solutions ingénieuses et techniques d'adaptation qu'offre cette architecture au niveau urbain et architectural, en particulier dans les zones chaudes et arides de l'Algérie qui se caractérisent par des conditions climatiques hostiles.

Pour cela, plusieurs méthodes et techniques ont été exercées pour maîtriser la chaleur excessive entrant par la toiture surtout dans les villes traditionnelles des zones chaudes ; à savoir : la toiture-terrasse, le toit en voûte, la voûte nubienne, etc. Certains de ces techniques demandent beaucoup de temps avec un coût élevé pour leur réalisation, et parfois inefficaces.

Dans le Ksar de Béni Isguen, les maisons sont compactes et les rues sont sinueuses pour réduire au maximum la transmission de la chaleur excessive à l'intérieur des maisons. A cet effet, la toiture reste un élément critiquable lorsqu'elle est l'élément le plus exposé au rayonnement solaire intense, surtout en été. Elle reçoit une quantité importante de rayonnement solaire durant la journée et transmet une partie non négligeable de cette chaleur vers l'intérieur de la maison.

La toiture est l'un des composants les plus critiques des enveloppes du bâtiment, qui atteint un gain de chaleur maximal en été, et elle couvrait de grandes surfaces globales.

Par sa position, sa forme et ses composantes, la toiture reste un élément problématique. La toiture, comme une partie fondamentale de la construction ; est considérée comme la cinquième façade. Elle peut jouer un rôle important dans l'amélioration de la performance énergétique du bâtiment. Aussi, elle a un impact sur le confort thermique des usagers.

A cet égard, le développement de nouveaux procédés architecturaux et une nouvelle conception de toiture pour maîtriser la chaleur transmise par la surface de la toiture et améliorer la performance thermique et énergétique des habitations dans le cadre du Ksar de

## Introduction Générale

---

Béni Isguen est une nécessité primordiale pour améliorer les conditions de vies des mozabites à l'intérieur de leurs habitations ksouriennes.

Dans l'environnement extérieur des Ksour de la vallée du M'Zab et plus précisément dans le Ksar de Béni Isguen, le rayonnement solaire et le vent sont deux paramètres importants qui jouent un rôle important sur la performance énergétique des toitures. L'examen de ces éléments climatiques dans le développement de la simulation numérique ou la modélisation thermique est l'une de nos préoccupations. La mise au point d'une méthodologie afin d'évaluer les transferts thermiques (radiatif, conductif et convectif) est nécessaire. Réduire le rayonnement solaire direct pendant la journée par un dispositif architectural et encourager le mouvement de l'air durant la nuit peut améliorer la performance thermique de la toiture.

À partir de ce qui a été mentionné auparavant, une question centrale de recherche peut être dressée :

**- Comment obtenir des améliorations quantifiables et significatives de la performance thermique et énergétique des toitures des habitations du Ksar de Béni Isguen ?**

### **3. Hypothèses :**

Dans le contexte des villes traditionnelles des régions à climat chaud et sec ; à l'exemple du Ksar de Béni Isguen ; ou le tissu urbain est compact, les ruelles sont étroites, l'ombre baigne les rues et les ruelles, et la réduction des surfaces des murs exposés au soleil ; la toiture reste la partie la plus exposée aux rayons solaires excessifs. Donc, la toiture est l'élément le plus conducteur de la chaleur vers l'intérieur. Pour cela, quelques hypothèses sont proposées à notre recherche pour répondre à la problématique mise en perspective :

-L'utilisation des matériaux **réfléchissants** sur la face extérieure de la toiture, combinée à une nouvelle conception basée sur une toiture à **double peau** peut entraîner une réduction des températures ambiantes intérieures, et par conséquent avoir un impact déterminant sur la performance énergétique des habitations ksouriennes du climat chaud et aride et garantir le confort thermique aux résidents.

-L'optimisation de la performance thermique et énergétique de la toiture dans les habitations Ksouriennes par l'atténuation du rayonnement direct diurne à travers la **réflectivité** de la surface du toit avec l'amélioration de la masse thermique de la toiture par une forte **isolation** peut entraîner la sobriété énergétique et le confort thermique dans les bâtiments.

### 4. Objectifs de la recherche :

De nombreuses études ont traité les Ksour de la vallée du M'Zab du point de vue historique, littérature, etc. Aussi, plusieurs recherches urbaines et architecturales ont été faites sur les Ksour de la vallée du M'Zab à savoir : le mode de vie des mozabites, le patrimoine matériel et immatériel, l'architecture mozabite et ses réponses et adaptations aux conditions locales climatiques, sociales, etc. Notre recherche est venue pour étudier en profondeur l'état du bien-être thermique dans les habitations ksouriennes et s'intéresse principalement à lever le voile sur la problématique de la toiture dans ce type d'habitat.

L'objectif principal de cette étude est d'améliorer le comportement thermique des toitures des habitations ksouriennes du climat chaud et aride pour maîtriser la chaleur excessive venant par cette voie à travers l'optimisation de la performance de la toiture par le développement d'une conception efficace sur le plan thermique et énergétique, rentable, facile à réaliser et localement adéquate à moindre coût tout en respectant les exigences de la vie moderne.

Aussi, cette recherche vise sans doute à mettre la lumière sur les objectifs suivants :

- Mettre en valeur des solutions de l'architecture vernaculaire et ses réponses envers son environnement naturel et humain, les diverses solutions traditionnelles d'adaptation aux conditions climatiques sévères, pour améliorer les conditions de vie des usagers dans les régions à climat chaud et aride. C'est-à-dire la mise en valeur des stratégies adaptées par l'architecture traditionnelle et ses conséquences positives vis-à-vis la question climatique, dont l'objectif est d'améliorer le confort et la qualité de vie des usagers dans les régions chaudes et arides.
- Lever le voile sur la problématique de la toiture, comme une partie essentielle de la construction qui réagit sur le confort thermique des habitations des villes traditionnelles ; qui se caractérise par la compacité du tissu urbain et la réduction des surfaces des murs exposées au soleil.
- Étudier les différentes techniques et le savoir-faire local de réalisation des toitures dans les zones chaudes, et en particulier dans le Ksar de Béni Isguen.
- Étudier l'impact de la toiture sur l'état du confort thermique intérieur et caractériser les ambiances thermiques.
- Trouver des procédés architecturaux passifs pour améliorer la performance thermique et énergétique des toitures des édifices dans le cadre du Ksar de Béni Isguen.
- Trier des recommandations pour les futurs bâtiments.

### **5. Méthode de la recherche :**

Notre méthode de recherche, qui suit une démarche inductive et déductive, s'est basée sur deux parties principales à savoir :

**L'exploration du cadre théorique et l'état de l'art :** concerne le corpus théorique. Il s'agit d'une recherche bibliographique et documentaire, avec un état de l'art relatif à notre thème pour dresser les fondements théoriques se rapportant à notre problématique à savoir : les caractéristiques de l'architecture vernaculaire et ses réponses envers son environnement, les diverses solutions traditionnelles d'adaptation aux conditions climatiques sévères, l'économie d'énergie et le confort thermique dans les habitations des régions à climat chaud et aride. Ensuite, la mise en valeur de la problématique de la toiture dans le Ksar de Béni Isguen. De plus, un état de l'art sur les recherches développées dans le monde et en Algérie sur l'amélioration de la performance énergétique et thermique des toitures.

#### **Une partie pratique basant sur :**

**Des observations et mesure in situ :** Des mesures in situ en période estivale à l'aide des instruments de mesures adéquates pour mesurer les différents paramètres de confort thermique (la température de l'air et la température surfacique, l'humidité relative, la vitesse de l'air) à l'intérieur des habitations du Ksar de Béni Isguen, dont l'objectif est de caractériser les ambiances thermiques, et étudier l'impact de la toiture sur l'état de confort thermique intérieur.

**Des simulations numériques :** la simulation numérique des transferts thermiques par le logiciel de la simulation thermique dynamique TRNSYS basée sur les données climatiques du Ksar de Béni Isguen pour évaluer la performance énergétique et thermique de la nouvelle conception de la toiture proposée et développée dans notre recherche.

### **6. Structure de la thèse :**

Pour atteindre nos objectifs bien ciblés, cette recherche est divisée en deux parties réparties en six chapitres constituant cette thèse avec une introduction générale et une conclusion générale.

La première partie est théorique constituée de trois chapitres consacrés à la recherche bibliographique et l'état de l'art relatif à notre thème pour dresser les fondements théoriques se rapportant à notre problématique à savoir : les caractéristiques de l'architecture traditionnelle et ses réponses envers son environnement naturel et humain, les diverses solutions traditionnelles d'adaptation aux conditions climatiques sévères, la problématique de la toiture, l'économie d'énergie et le confort dans l'habitat ksourien des zones arides.

## Introduction Générale

---

La deuxième partie constituée de trois chapitres s'articule sur l'étude opérationnelle à la base d'une investigation sur terrain des travaux in situ et une simulation thermique par des systèmes experts. Cette partie est pratique et analytique. Elle décrit le contexte d'étude, la partie expérimentale et le protocole de prise de mesure, ensuite la simulation numérique et enfin l'analyse, l'explication et l'interprétation des résultats obtenus à fin de répondre à la problématique étudiée et confirmer ou infirmer les hypothèses qui la fondent.

Donc, les chapitres de cette thèse s'organisent comme suit :

**L'introduction générale** : commençant par l'introduction générale qui présente le corpus d'étude. Cette phase formera une base pour la formulation précise de la problématique générale et spécifique et la construction des hypothèses. Ce chapitre expose les objectifs de la recherche, définit la méthode utilisée et expose la structure de la thèse.

**Le premier chapitre** : se focalise sur une recherche détaillant les pratiques d'adaptation urbaines et architecturales utilisées dans l'architecture traditionnelle pour assurer le confort thermique dans les bâtiments des zones chaudes et arides à travers le monde et en Algérie. Ce chapitre vise à mettre la lumière sur les stratégies passives utilisées depuis des siècles sur la terre, qui sont des réponses pour s'adapter au milieu de construction, en citant quelques exemples concrétisés.

**Le deuxième chapitre** : aborde une étude détaillée sur l'utilisation de la toiture, sa forme, ses composantes, sa mise en œuvre, etc., dans l'architecture traditionnelle des zones à climat chaud et aride du sud algérien en général. Ensuite, l'étude de différents types de toitures dans l'habitat ksourien de la vallée du M'Zab et plus précisément dans le Ksar de Béni Isguen. Il traite aussi des connaissances sur le comportement thermique et les phénomènes radiatifs des toitures.

**Le troisième chapitre** : correspond à une revue de littérature sur les recherches et les travaux faits par des chercheurs dans le monde sur l'optimisation de la performance thermique de la toiture pour optimiser la sobriété énergétique des toitures afin d'assurer un confort optimal à l'intérieur des habitations, comme une démarche prometteuse vers une construction bioclimatique. Ce chapitre sert à bien positionner notre étude par rapport aux recherches récentes et d'actualités dans le domaine traité.

**Le quatrième chapitre** : correspond à la présentation de l'environnement d'étude et les caractéristiques climatiques des cas d'étude. Une description des cas d'étude avec une justification des choix. Ensuite, ce chapitre expose une étude climatique détaillée avec des outils adéquats pour faire ressortir la période d'investigation en été et aussi en hiver.

## Introduction Générale

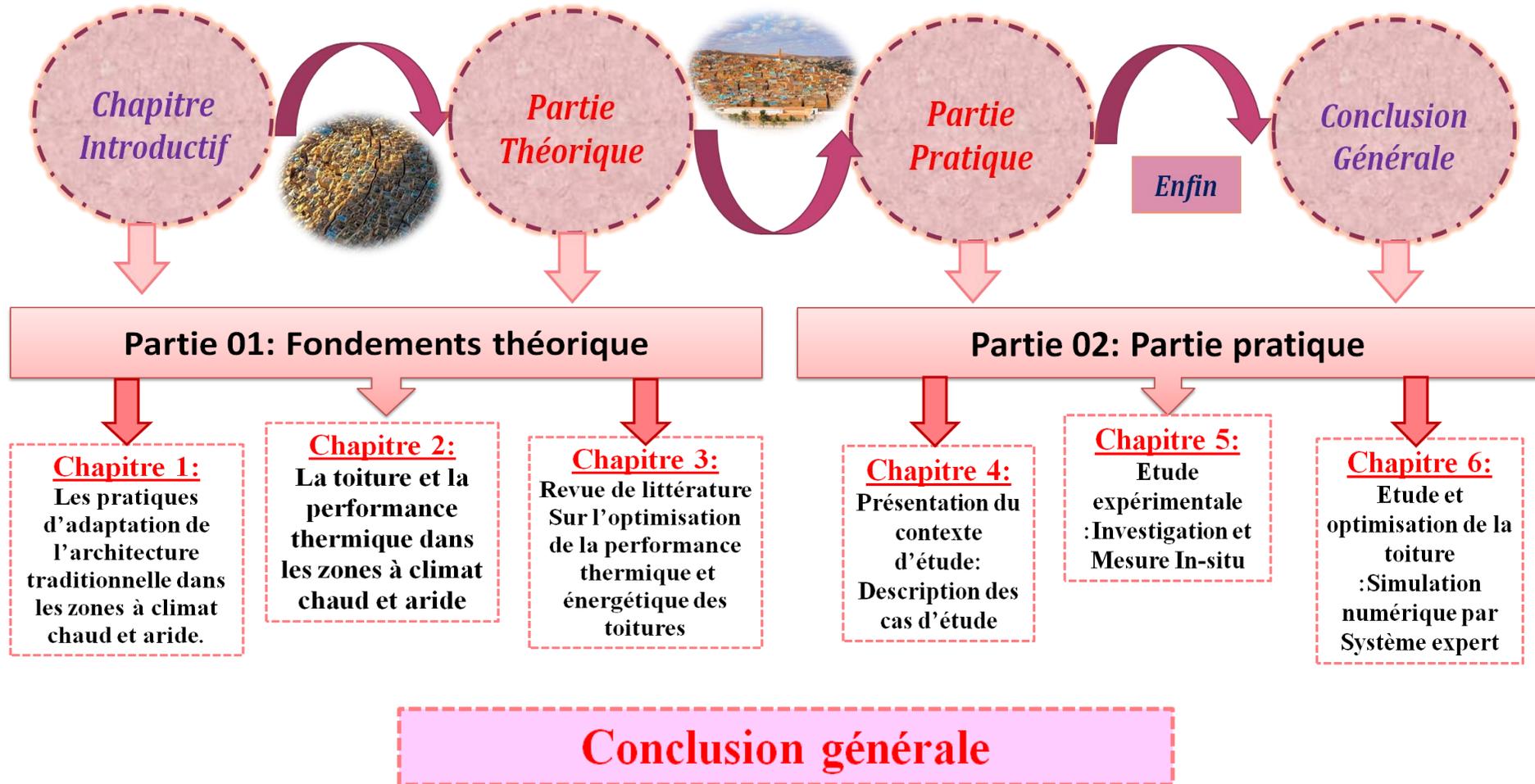
---

**Le cinquième chapitre :** consacré à l'exposition de la méthode et les outils d'investigation à savoir la description des instruments utilisés. Ensuite, il expose les campagnes et le protocole de mesure. Des mesures in situ en période estivale et hivernale à l'aide des appareils adéquats pour mesurer les différents paramètres de confort (la température, l'humidité relative, etc.) à l'intérieur des habitations du Ksar de Béni Isguen, dont l'objectif est de caractériser les ambiances thermiques.

**Le sixième chapitre :** est dédié à l'explication de l'approche expérimentale utilisée par la simulation thermique. Alors, définir le programme de la simulation thermique dynamique utilisé (TRNSYS) avec une description du modèle développé et simulé dans cette étude avec les détails de l'optimisation des propriétés thermique de la toiture entrées (Inputs). Un travail de simulation numérique des transferts thermiques basée sur les données climatiques du Ksar pour évaluer la performance énergétique et thermique du modèle proposé et développé dans cette étude. Ensuite, exposer les résultats obtenus à travers cette étude (tableaux, graphes...). Une analyse détaillée avec une explication des résultats obtenus afin de démontrer l'efficacité de l'optimisation de la performance thermique de la toiture et son impact déterminant sur le confort thermique et la consommation d'énergie globale.

**Conclusion générale :** Conclure le travail en résumant l'étude traitée et les étapes effectuées pour achever cette recherche. Aussi, exposer les limites de la recherche avec des recommandations pour des recherches futures. Aussi, des recommandations pour optimiser la performance thermique et énergétique des toitures de ce type d'habitation sous un climat chaud et aride pour assurer une ambiance thermique agréable et avoir une consommation énergétique légère et rationnelle.

# Structure de la thèse



**Chapitre 01:**  
**Les pratiques d'adaptation**  
**traditionnelle**  
**dans les zones chaudes et arides**

## Introduction :

Le processus de mondialisation et l'évolution technologique ont apporté la complexité et l'ambiguïté aux identités locales qui ont influencé la relation de l'homme avec la nature. De plus, le climat a grandement influencé les formes de construction ; ce qui nécessite d'entraîner des besoins d'atténuation de confort. Dans les climats chaud et aride, avec l'émergence de nouvelles méthodes de construction non adéquates, Il y'a une demande croissante de mécanismes de haute technologie consommateurs d'énergie pour soutenir un certain confort thermique perverti et non durable. Aujourd'hui, puisque les ressources énergétiques sont limitées et à cause de l'augmentation de l'effet de serre dans les villes, l'architecture traditionnelle apparaît comme une source importante à redécouvrir pour aborder des solutions à la situation alarmante actuelle en réponse au climat sans dépendre de l'énergie consommant des systèmes actifs. L'architecture traditionnelle est une référence essentielle du patrimoine culturel matériel et immatériel et incarne les connaissances sur la façon de concevoir en harmonie avec la nature, de manière saine et durable. Des études récentes sont indiquées que les connaissances issues de l'architecture traditionnelle sont au cœur d'une conception véritablement durable. Les stratégies de conception locales émergent de siècles de rationalité empirique, aboutissant à des environnements confortables qui ont passé l'épreuve du temps. D'autre part, puisque les conditions climatiques dans les régions chaudes et arides sont très particulières, des solutions alternatives sont nécessaires pour réduire la consommation d'énergie pendant la saison estivale sans sacrifier une bonne qualité de confort thermique. L'étude des archétypes traditionnels montre que les solutions existantes sont liées à l'inclusion de techniques de refroidissement passif pour garantir un confort thermique viable. L'architecture traditionnelle a apporté plusieurs stratégies et solutions qui se différencient d'un lieu à un autre, d'une culture à une autre et d'un climat à un autre. A ce stade, le présent chapitre va mettre la lumière sur l'architecture traditionnelle et ses pratiques urbaines et architecturales. L'objectif est de faire une recherche approfondie sur les pratiques d'adaptation utilisées dans l'architecture traditionnelle pour assurer le confort thermique dans les bâtiments, particulièrement dans les zones chaudes et arides à travers le monde et en Algérie. Ce chapitre passera en revue les tentatives d'interprétation de la valeur du traditionnel avec sa durabilité reconnue basée sur les stratégies passives utilisées depuis des siècles sur la terre, qui sont des réponses pour s'adapter au milieu de construction, en citant quelques exemples concrétisés.

## I.1. L'architecture traditionnelle :

Au fil du temps, plusieurs agglomérations vécues sur la terre sont construites selon des moyens disponibles localement. Néanmoins, l'exploitation des ressources fossiles à travers l'histoire a affecté gravement la terre et elle est devenue malade. Dans ce sens, l'architecture traditionnelle connue dans diverses régions du monde possède dans ses pratiques de leçons très utiles que l'homme d'aujourd'hui peut s'inspirer pour trouver des solutions adéquates à la situation actuelle vécue. Selon le Professeur Luca Finocchiaro, l'architecture traditionnelle et vernaculaire représentent le résultat d'un processus évolutif dans lequel la construction des bâtiments a été continuellement affinée dans le but de s'adapter au climat local et de fournir des conditions de vie optimales pour l'habitat humain selon les ressources disponibles sur place (Finocchiaro, 2019). Donc, la partie suivante met en valeur les pratiques découvertes dans ce type d'architecture par excellence.

### I.1.1. Présentation et Définition de l'architecture traditionnelle :

Selon Foster : « L'architecture traditionnelle peut être généralement comprise comme étant les coutumes locales de construction, la matérialité et le milieu dans lequel elle surgit. Elle représente un style architectural conçu en fonction des besoins locaux, de la disponibilité des matériaux de construction et du reflet des traditions locales. Au moins à l'origine, cette architecture n'utilisait pas d'architectes formellement scolarisés, mais reposait sur les compétences de conception et la tradition des constructeurs locaux ». Également, Virginia Fernandez a expliqué ce que Herzog et de Meuron ont parlés sur la beauté de l'architecture traditionnelle : « Le discours architectural valorise la langue traditionnelle et vernaculaire pour sa beauté, ses performances environnementales, sa connexion transparente au paysage, l'utilisation de matériaux locaux et l'artisanat de sa fabrication. Le regain d'intérêt de cette langue traditionnelle peut être considéré comme une réponse des conditions de vie insalubres et de tendances malséantes des dernières décennies, et la nécessité d'aller vers la construction écologiquement durable (Sayigh, 2019). Donc, l'architecture traditionnelle présente une architecture conçue sur la base des besoins locaux, avec des matériaux locaux, selon les traditions locales et généralement sans conception planifiée et formelle. Elle est célèbre par l'expression de : « Architecture sans architecte ». L'architecture traditionnelle n'est pas conçue par des architectes scolarisés, mais s'appuyait sur le savoir-faire local appris et transmis d'une génération à l'autre. La tradition de ce type d'architecture a développé des stratégies qui se différencient d'un pays à un autre, d'une culture à une autre et d'un climat à un autre selon les identités, les ressources et les compétences des communautés locales.

Néanmoins, malgré la différenciation de ces stratégies appliquées d'une région à une autre, elles partagent un seul objectif de créer des conditions de vie confortable et satisfaisante pour l'être humain.

### I.1.2. Facteurs influençant l'architecture traditionnelle :

L'architecture traditionnelle s'articule autour plusieurs facteurs qui se différent d'une zone à une autre. Néanmoins, de nombreux facteurs entrelacés que cette architecture a en commun. Quelques facteurs principaux qui affectent l'architecture traditionnelle sont montrés dans la figure I.1.



Figure I.1 : les facteurs affectant l'architecture traditionnelle (Auteur, 2021)

### I.1.3. Les caractéristiques et identité de l'architecture traditionnelle :

L'architecture traditionnelle est la redécouverte de solutions et pratiques simples peu coûteuses appliquées par les résidents locaux, qui servent à mieux s'adapter aux exigences imposées par l'environnement local. Elle fait référence aux méthodes de constructions fondées sur la base des valeurs collectives de la communauté, à la religion, aux matériaux de construction disponible sur place, aux traditions locales, et aux années d'essais et d'erreurs (Weber & Yannas, 2013). La caractéristique principale de ce type d'architecture est que la création de bâtiment traditionnel n'est pas faite par des architectes individuels éduqués et selon des plans planifiés qui reflètent l'aspect du mode de vie autochtone. Dans ce cas, les résidents locaux construisent leurs maisons sans conception pré planifiées parce qu'ils savent exactement ce qu'ils veulent en fonction de leur expérience. Donc, les propriétaires sont les concepteurs et les constructeurs de leurs maisons, ce qui représente le concept de « habitant

en tant que concepteur » (Fathy, 2010; Pallasmaa, 2005). Le fait d'un habitant local construit son propre maison avec les moyens disponibles dans son milieu, s'appuyant sur les expériences acquises de ces ancêtres donne une beauté naturelle qui brille au sein de cette architecture, et concrétise une identité particulière de ce type d'architecture qui se différent d'un lieu à un autre, mais partage un seul objectif de satisfaction des besoins du peuple sans aucune trace d'architectes professionnels.

#### I.1.4. Aperçu historique sur l'architecture traditionnelle :

Historiquement, l'architecture traditionnelle est née lorsque l'humanité a été besoin de fournir un abri confortable ou elle était obligée d'utiliser les ressources naturelles qui l'entourent. Une telle architecture est une simple réaction aux besoins de l'individu et de la société. Elle apparait comme une nécessité qui répond aux attentes des habitants et au microclimat, avant même que les architectes ne commencent à tenter de le faire (Abounaga & Mostafa, 2019). Elle a été toujours présente dès l'apparition de l'homme sur terre. Le monde a témoigné la création de villes traditionnelles très anciennes dans tous les continents de la terre, quel que soit le type de climat. La ville de Shibam au Yémen connu sous le nom de « Manhattan du désert » est l'une des plus anciennes villes traditionnelles apparues sur la terre depuis des siècles et qui est considéré comme la première ville des grattes ciels au monde (Figure I.2).



Figure I.2 : Vue générale de l'ancienne ville traditionnelle de Shibam (Hadramaut, 2016)

I.1.4.1. Universalité de l'architecture traditionnelle : Quelques exemples des pratiques traditionnelles dans le monde :

L'architecture traditionnelle s'est répandue dans le monde entier ; de l'Amérique à l'Europe, l'Asie et l'Afrique (Côte, 2021). Dans chaque région du monde, il se trouve des traces et des témoignages de pratiques traditionnelles selon les exigences et les ressources disponibles localement. À titre d'exemple, le Yémen ; pays asiatique caractérisé par son architecture traditionnelle unique ; contient plusieurs villes traditionnelles qui possèdent un riche patrimoine architectural précieux inscrit au patrimoine de l'UNESCO. Chaque région du pays a son caractère architectural, influencé par le contexte local. La ville de Sanaa a un tissu urbain cohérent comme toutes les villes traditionnelles organiques, composées de maisons tours, marchés et de mosquée. Les maisons de Sanaa, s'élèvent du centre de vastes jardins et vergers, mais ne se voient pas depuis les rues et se composent de deux à sept étages se faisant face offrant un ombrage. Cette ville contient plusieurs pratiques traditionnelles d'adaptation à l'environnement local (Attia, 2020). Également, semblable à d'autres villes islamiques traditionnelles et historiques, la vieille ville de Salt en Jordanie est un autre exemple qui montre la capacité de l'homme à s'adapter à son environnement. La zone climatique de Salt est méditerranéenne ; d'où la principale caractéristique du climat est le contraste entre des étés chauds, secs et des hivers frais et variables. Les gens n'avaient d'autre choix que de vivre en harmonie avec la nature. Cette ville est très connue avec son relief géographique très escarpé. Elle s'est développée autour d'une vallée d'Akrad, sur trois collines étroitement construites en grappes de splendides maisons et bâtiments dorés, qui ont été construits dans le calcaire jaune de la région. Le Salt est composé d'un réseau de sentiers étroits et sinueux et d'escaliers en pierre traversant les pentes et d'un nombre limité de routes suivant les pentes. Les rues sont étroites offrant des solutions climatiques, car elles limitent la pénétration des rayons solaires d'été et garantissent l'ombre pendant plusieurs heures de la journée pour protéger les piétons de la chaleur torride de l'été (Almatarneh, 2013). La figure I.3 montre une vue générale des maisons tours traditionnelles de la ville de Sanaa (a) et une vue générale de la ville de Salt en Jordanie (b).

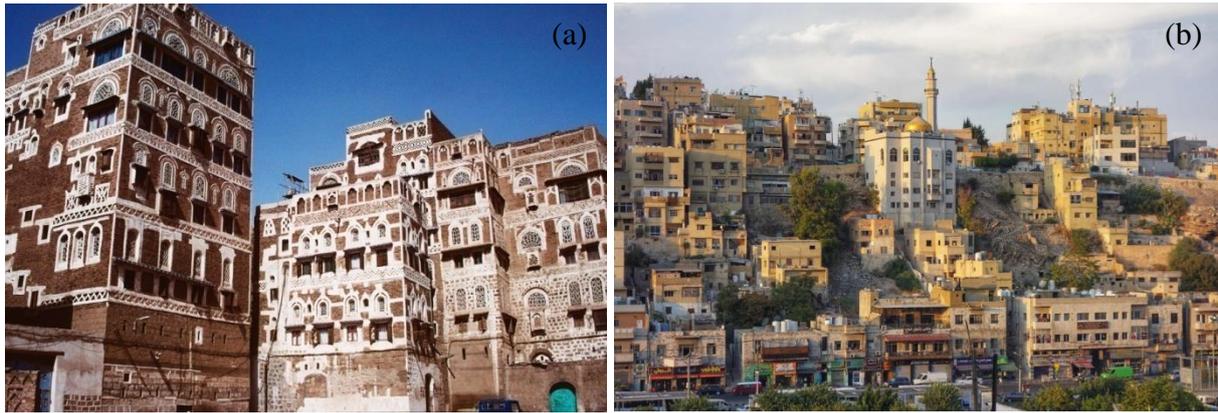


Figure I.3 : Villes traditionnelles : (a) vue générale des maisons tours traditionnelle de la ville de Sanaa (Attia, 2020) ; (b) vue générale de la ville de Salt en Jordanie (Almatarneh, 2013)

D'autres exemples dans le monde qui montrent l'existence de l'architecture traditionnelle dans diverses zones et différent climat. Dans la vallée d'Itria qui se situe dans la zone centrale de la région italienne des Pouilles (Apulia), se trouvent les Trulli (singulier, trullo) qui sont de typologie traditionnelle de construction en pierre sèche (Todisco, Sanitate, & Lacorte, 2017). Ces Trulli représentent un exemple unique d'architecture traditionnelle. La construction des Trulli avec les pierres locales de masse thermique élevée a été conçue pour protéger les habitants contre l'environnement extérieur défavorable. En été, les valeurs sensiblement constantes de la température intérieure estivale indiquent que ces bâtiments ne nécessitent pas de climatisation (Stefanizzi, Fato, & Di Turi, 2016).

Dans le pôle Nord de la planète d'où le climat est très froid, les Esquimaux utilisent leur brillant cerveau pour construire des igloos (des Inuits) pour s'adapter aux conditions météorologiques extrêmes très particulières du climat froid nordique. Ces Igloos possèdent de hautes capacités thermiques qui aident à protéger contre les neiges, de bonne robustesse et un gain de temps lors de la construction. La construction des igloos est simple puisque tous les matériaux nécessaires proviennent du site. Les Esquimaux utilisent de blocs de neige et de glace pour construire leurs maisons et ça ne créent aucun déchet de construction, l'igloo est donc respectueux de l'environnement (Rachmat Rhamdhani Fauzi 2015). Puisque la glace est un mauvais conducteur de chaleur, l'Igloo peut empêcher le transfert de chaleur vers l'extérieur. Cela sert à préserver la chaleur générée par le corps humain et de réduire perte de chaleur par convection éolienne (Tatartchenko, Smirnov, & Jin, 2014). Donc, L'igloo offrait un environnement thermique plus confortable par rapport aux conditions extérieures (Zhen et al., 2021). La figure I.4 montre les Trulli italiens (a) et les Igloos nordiques (b) respectivement.

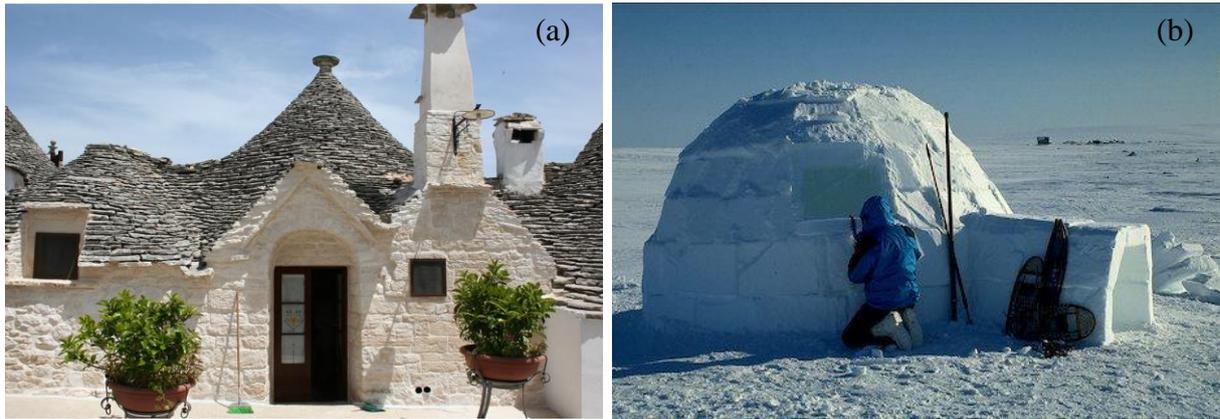


Figure I.4 : (a) photo d'un trullo typique situé dans le centre historique d'Alberobello (Pouilles) (Todisco et al., 2017) ; (b) photo d'un Igloo dans le pôle Nord (Rachmat Rhamdhani Fauzi 2015)

#### I.1.4.2. L'architecture traditionnelle en Afrique :

L'Afrique contient des milliers d'exemples de traces de l'architecture traditionnelle. Elle a été caractérisée par des formes et des matériaux locaux utilisés pour développer une architecture unique. Ces matériaux dépendent des ressources naturelles, comme la terre, la pierre, le bambou, le bois et les résidus d'arbres. L'Égypte est riche d'exemples d'architecture traditionnelle à savoir : la vieille Nubie d'Assouan, le vieux Gournà de Louxor et le désert occidental qui contient des oasis (Bahariya, Kharga et Siwa)(Sayigh, 2019) ...etc. Le village nubien traditionnel fournit un excellent exemple pour en apprendre davantage sur les principes de durabilité tant à l'échelle du bâtiment qu'à l'échelle urbaine, en raison de son intégration avec l'environnement créant une harmonie avec la nature (Momtaz, Feisal, & El, 2012). Également, le village du vieux Gournà dans la région de Louxor constitue un excellent exemple d'architecture traditionnelle. Elle a été entièrement conçue et construite par les résidents locaux. L'organisation urbaine du village est organique qui suit la nature du site et la distribution des maisons suit un schéma irrégulier, suivant la topographie montagneuse de la région (Mahmoud, 2016). En addition, La ville de Ghadamès, perle du désert en Libye, est une autre ville désertique qui concrétise l'architecture traditionnelle par excellence. Elle se caractérise par un tissu urbain compact, des rues couvertes, des passages étroits et des maisons au design unique et des matériaux de construction performants pour bien s'adapter au climat désertique rude (Al-Zubaidi, 2002). La figure I.5 illustre des vues sur le village nubien à Assouan (a), le Vieux Gournà à Louxor (b) et la ville de Ghadamès (c) respectivement. Ces exemples d'architecture traditionnelle présentent tout simplement l'essence des bâtiments

respectueux de l'environnement et la création des caractéristiques architecturales distinctes qui sont écologiquement, socialement et culturellement durables (Bayoumi, 2018).



Figure I.5 : (a) vue du village nubien et la rivière Nil sur l'île d'Éléphantine, Assouan, Haute-Égypte ; (b) le village « Vieux Gournà », à Louxor (Fathy, 2010) ; (c) vue sur la ville de Ghadamès en Libye (<https://www.flickr.com/photos/mikegadd/289734187>)

#### I.1.4.3. L'architecture traditionnelle en Algérie :

En Algérie, il existe de bons exemples de villes et quartiers traditionnels qui illustrent des stratégies d'adaptation de l'architecture traditionnelle. Le désert algérien contient plusieurs villes traditionnelles connues sous le nom des Ksour qui contiennent de méthodes de construction offrant des réponses envers le climat chaud et aride. Généralement, ces ksour sont construits suivant des formes urbaines regroupées pour aboutir des avantages thermiques et satisfaire les besoins socioculturels des habitants. Dans le pays du Souf en Algérie, toutes les constructions ont des coupoles ce qui donne une identité spécifique de la culture de cette région. L'utilisation des coupoles dans cette région est apparue depuis la fondation de trois noyaux historiques à savoir Guemar, Z'goum et El-Oued vers la fin du XVI<sup>e</sup> siècle. Ces coupoles sont construites avec du matériau local de rose du désert qui ont donné une architecture traditionnelle particulière à cette région (Azil, Djebri, & Rovero, 2018). La figure I.6 montre le Ksar de Timimoune à Gourara (a), une vue sur la ville de mille coupoles de Souf (b) et une vue sur le Ksar de Taghit au Bécharois (c).

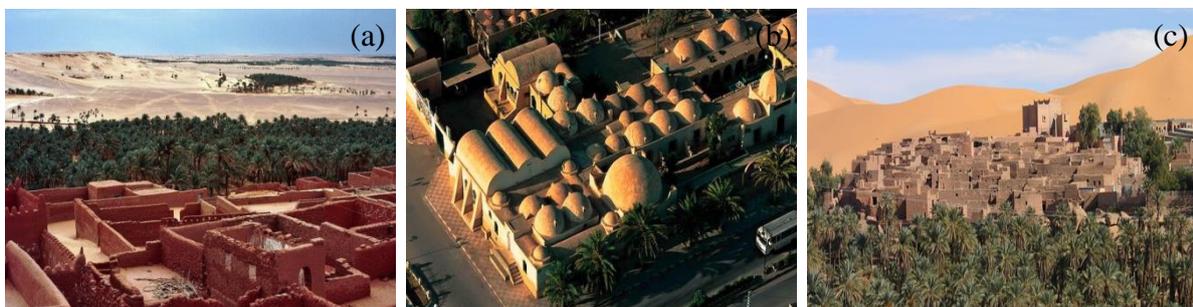


Figure I.6 : Architecture traditionnelle en Algérie : (a) vue sur le ksar de Timimoune, (b) vue aérienne de la ville de mille coupoles (<https://www.pinterest.com>); (c) vue panoramique sur la splendeur du Ksar de Taghit au Bécharois, (Biara & Belmili, 2017)

## I.2. Les pratiques d'adaptation traditionnelle urbaine :

L'architecture traditionnelle dans les zones chaudes et sèches reconnaît le développement des établissements humains selon des morphologies urbaines et architecturales adaptées à l'environnement sévère. Les résidents autochtones ciblent les stratégies adaptatives dans leur région suivant la structure culturelle et sociale et des pratiques de construction issues du savoir-faire local indigène transmis (Hyde, 2012). Suite aux conditions spécifiques du climat chaud et aride, les habitants locaux conservent des méthodes d'adaptabilité spécifiques au changement climatique. De plus, ces méthodes jouent un rôle prépondérant d'assurer des conditions de confort plaisant aux résidents et contribuent à maintenir un mode de vie durable (Daoudi et al., 2019). Dans cette partie, on va mettre la lumière sur les pratiques d'adaptation urbaine de l'architecture traditionnelle, spécialement dans les régions à climat chaud et aride.

### I.2.1. La compacité :

Les interactions entre la structure d'une ville et le climat ont des effets sur la qualité de l'air, le confort thermique, et la consommation énergétique pour le chauffage et le refroidissement des constructions (Martilli, 2014). Une part importante de l'impact environnemental des activités urbaines est liée à la consommation d'énergie (P. Wang, Liu, & Zhang, 2021). Dans les villes traditionnelles des régions à climat chaud et aride, le tissu urbain généralement est compact (De Schiller & Evans, 2002; Jenks et al., 2000). La compacité du tissu urbain avec des rues étroites est considérée comme la meilleure stratégie pour garantir des performances thermiques agréables, fournir une haute qualité de confort thermique, améliorer la ventilation naturelle et réduire l'impact environnemental en ville (Salkini, Greco, & Lucente, 2017).

Les études sur la ville compacte montrent que ses caractéristiques contribuent à soutenir la durabilité et la fonctionnalité des services éco systémiques (Russo & Cirella, 2018). Les villes compactes constituant des édifices de faibles rapports surface/volume minimisent la consommation d'énergie nécessaire pour le chauffage et le refroidissement (Martilli, 2014). Les maisons sont compressées les unes aux autres. Cela peut minimiser le contact des surfaces murales avec l'extérieur, de sorte qu'il y aurait moins d'échange thermique entre l'intérieur et l'extérieur des locaux (Karimi & Hosseini, 2012). La géométrie urbaine compacte d'une région traditionnelle dont les températures atteignant les 48°C est une solution efficace aux étés rigoureux puisque les niveaux de stress thermique sont diminués tout en réduisant les surfaces exposées (Abaas, 2020). La forme urbaine concentrée réduit la pénétration du vent poussiéreux et l'influence du rayonnement solaire chaud sur la surface (Monshizade, 2008). Plusieurs villes traditionnelles des régions à climat chaud et aride sont structurées suivant un

tissu urbain compact. La figure I.7 illustre quelques exemples des villes compactes comme les villes de l'Iran : Yazd (a), (b) et Bouchehr (c) ; au Yémen comme Sanaa (e) et Shibam (f) ; en Libye comme Ghadamès (g) et l'Algérie comme la vallée du M'zab (j), (k) respectivement.

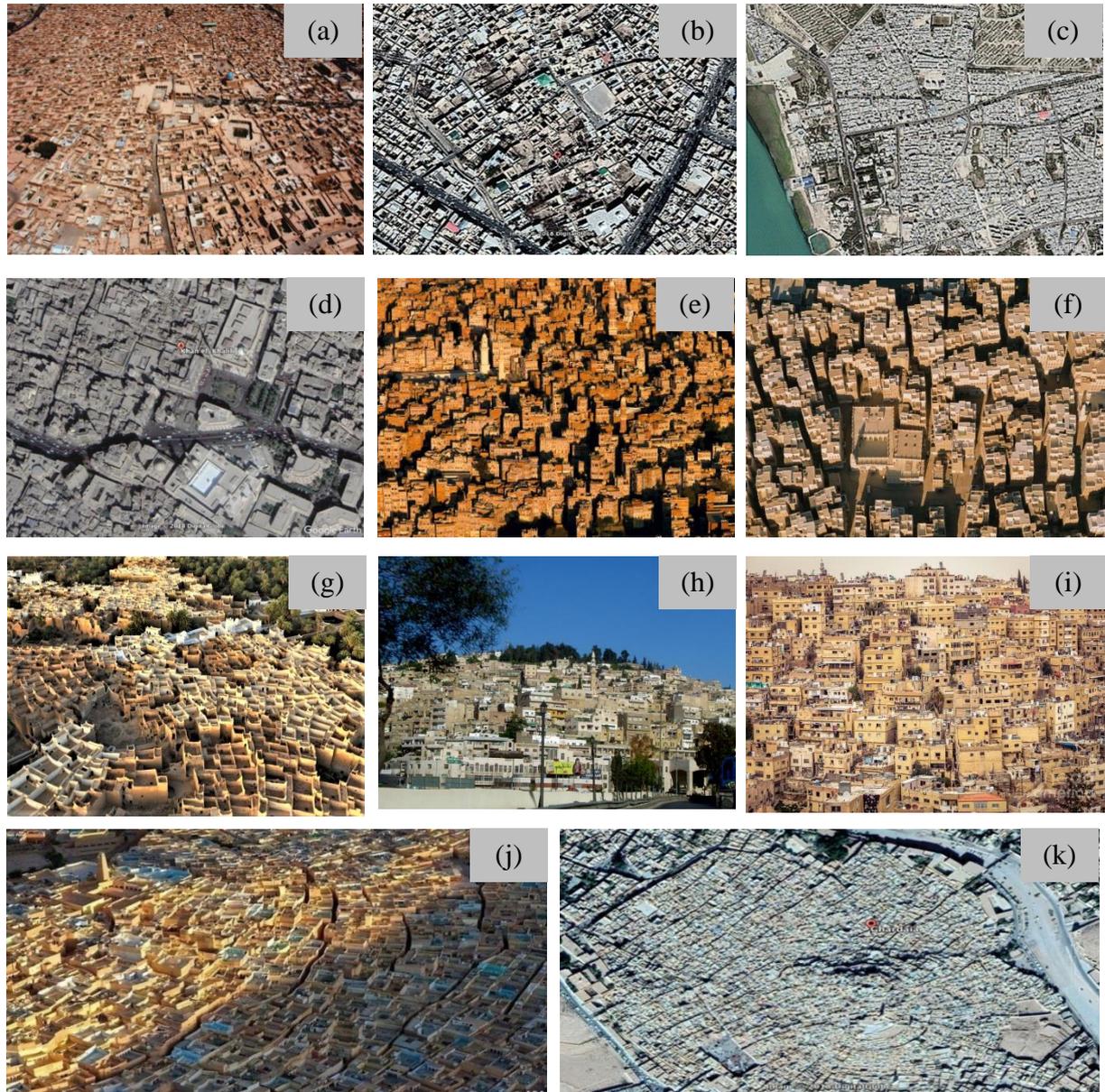


Figure I.7 : Villes compactes : (a) vue aérienne du centre historique de Yazd ; (b) la grande compacité urbaine de Yazd ; (c) l'ancienne ville Bouchehr, Iran ; (d) la forte compacité urbaine de l'ancien Khan Al Khalili, Le Caire, Égypte (Google Earth, 2018), (Al-Sallal & Rahmani, 2019) ; (e) vue sur la ville de Sanaa ; (f) la ville de Shibam (Hadhramaut, 2016) ; (g) l'ancienne ville compacte de Ghadamès (Al-Zubaidi, 2002) ; (h) la vieille ville d'Asalt (Almatarneh, 2013) ; (i) la vieille ville d'Amman, photo prise par Gualtiero Boffi ; (j) une vue sur le tissu urbain compact de la partie haute de la vieille ville de Béni Isguen ; (k) le Ksar de Ghardaia (OPVM, 2018)

### I.2.2. L'implantation et tracé des rues :

En addition du tissu urbain compact des villes traditionnelles du climat chaud et aride, elles sont constituées des réseaux des rues étroites, d'impasses et de passages résultant de la juxtaposition aléatoire des maisons. Cela sert à atténuer les gains et les pertes de chaleur et créer d'ombres, générant d'un système complexe des espaces privés, semi-privés et publics (Sayigh, 2019). Les allées méandreuses et étroites avec de hauts murs sur les côtés peuvent réduire la vitesse des vents et fournir une zone ombragée dans les passages (Figure I.8, I.9) (Karimi & Hosseini, 2012). Le tracé des rues étroites aide à empêcher le mouvement de l'air chaud et de la poussière à l'intérieur des passages et provoque un effet de refroidissement pendant les journées d'été chaudes (Omar, 2015). Généralement, dans les villes arabes traditionnelles, de plus de leurs fonctions climatiques, ces rues étroites sont pour objet de répondre aux normes culturelles d'intimité visuelle de l'intérieur vers l'extérieur. Les études menées sur le microclimat et le confort humain des zones urbaines dans les climats chauds et arides indiquent que la conception urbaine avec des canyons très profonds est préférable (Johansson, 2006). Les rues étroites fonctionnent mieux en termes de refroidissement passif (Al-Sallal & AbouElhamd, 2018). Elles favorisent la circulation de la vitesse du vent qui les traverse, ce qui aide le vent à atteindre les parties plus profondes et améliore l'état de confort extérieur (Al-Sallal & Al-Rais, 2012; Al-Sallal & Rahmani, 2019).

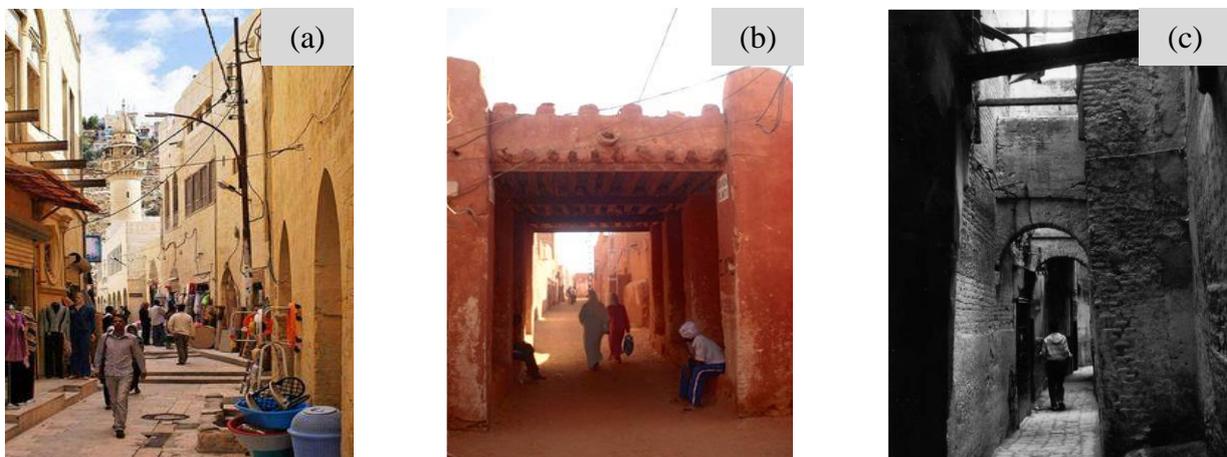


Figure I.8: Rues des villes traditionnelles : (a) rue dans la vieille ville d'Al Salt, Jordanie (Almatarneh, 2013) ; (b) motif de rue adaptée à l'environnement désertique à Timimoun (Daoudi et al., 2019) ; (c) ruelle étroite dans la partie résidentielle du vieux quartier, Fès Maroc (Johansson, 2006)



Figure I.9 : Photos montrant les ruelles à l'intérieur du Ksar de Béni Isguen (Auteur, 2018)

#### I.2.2.1. Orientation de la rue :

Le réseau des rues est la structure de chaque ville. L'orientation de la rue est importante pour la ventilation et pour contrôler le rayonnement solaire. Dans les villes chaudes et arides, en raison de la basse altitude, un axe de rue nord-sud assure une protection solaire contre les bâtiments (Sayigh, 2019). L'orientation des rues dans les zones chaudes est de préférence être vers la direction des vents pour permettre d'offrir des sites avec de grandes opportunités pour capter le rayonnement solaire nécessaire au chauffage hivernal tout en améliorant l'ombrage et le refroidissement passif en été.

#### I.2.2.2. Rapport hauteur / largeur de la rue :

La forme urbaine compacte est composée de canyons urbains définis par le rapport « hauteur/largeur » du bâtiment (rapport H/L) et l'orientation de leur grand axe (Bakarman & Chang, 2015) (Figure I.10). La géométrie des rues urbaines affecte le microclimat dans les canyons des rues, ce qui affecte la consommation d'énergie et le refroidissement des bâtiments environnants des rues (Huang & Li, 2017). Le rapport hauteur / largeur de la rue, ou la hauteur des bâtiments entourant la rue (H) par rapport à la largeur de la rue (L) (H supérieur et L inférieur), est un facteur important qui affecte le microclimat urbain, le confort thermique extérieur (Deng & Wong, 2020) et le transfert d'énergie dans ces rues et vers les bâtiments. Ce rapport contrôle l'absorption, la réflexion et l'émission du rayonnement thermique du soleil qui influencent la température de l'air ambiant extérieur (Bakarman & Chang, 2015). Puisque les rues dans les villes traditionnelles à climat chaud et aride sont étroites, cela signifie que le rapport « hauteur / largeur » est plus élevé. Ces dimensions sont utiles, préférables et bénéfiques pour obtenir un confort urbain (Sayigh, 2019).

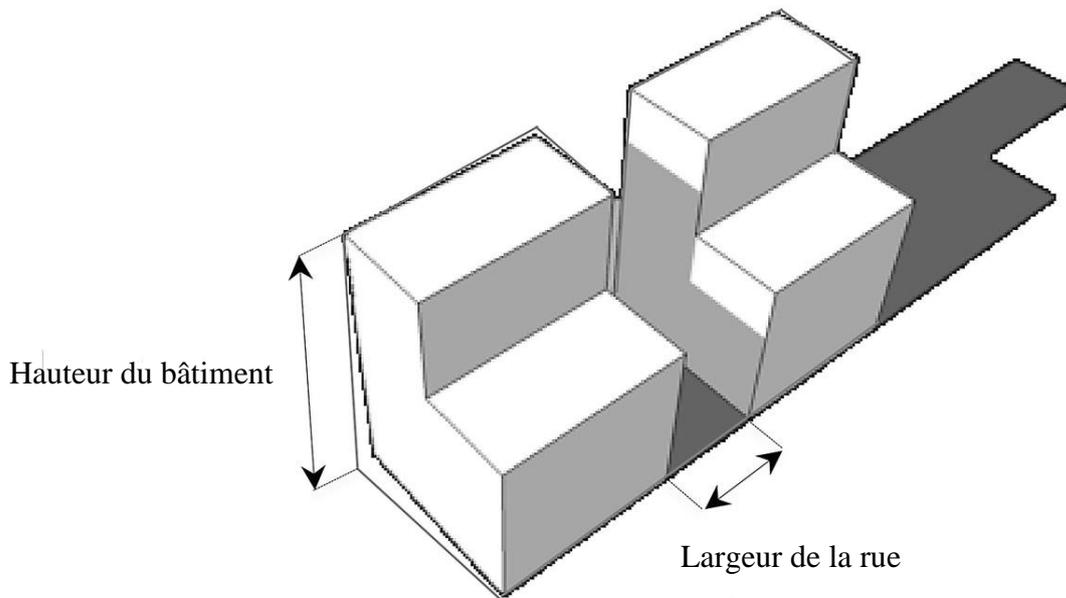


Figure I.10 : Croquis montrant l'impact des immeubles de grande hauteur avec des rues étroites sur l'ombrage (Al-Sallal & Rahmani, 2019)

#### I.2.2.3. Éléments d'ombrage dans la rue :

Le maintien du confort thermique humain est essentiel pour les piétons, car les personnes à l'extérieur sont sensibles à la chaleur du stress thermique. La modification des microclimats des rues par l'introduction d'un couvert arboré pour l'ombrage peut apporter des avantages importants aux piétons et réduit encore les températures extérieures dans les rues (Sanusi, Johnstone, May, & Livesley, 2016). L'ombrage a un grand impact sur le confort thermique extérieur puisqu'il sert à réduire le facteur de vue du ciel et créer des zones sans concentration des rayons solaires intenses (Sayigh, 2019). Couvrir les rues et les ruelles est une stratégie efficace pour réduire la lumière du soleil projetée sur les allées. Les rues et les ruelles ombragées par des couvertures aident à fournir un ombrage supplémentaire, minimiser la température de l'air ambiant et améliorent le refroidissement naturel dans les saisons chaudes (Daoudi et al., 2019) . Ces rues étroites et courbées des villes des régions chaudes et sèches couvertes sont appelées « **Sabat** » (en persan). Ces stratégies visent à empêcher l'accès de l'air chaud aux rues et donc aux bâtiments (Keshtkaran, 2011). Les figures I.11 et I.12 montrent quelques exemples des rues et ruelles ombragées. La figure I.11 (a), (b) et (c) illustre le Sabat dans la ville de Yazd. La figure I.12 (a) montre une rue ombragée en Sicile, Italie ; (b) un passage étroit à Dubaï et (c) illustre une photo de ruelle ombragée à Béni Isguen.

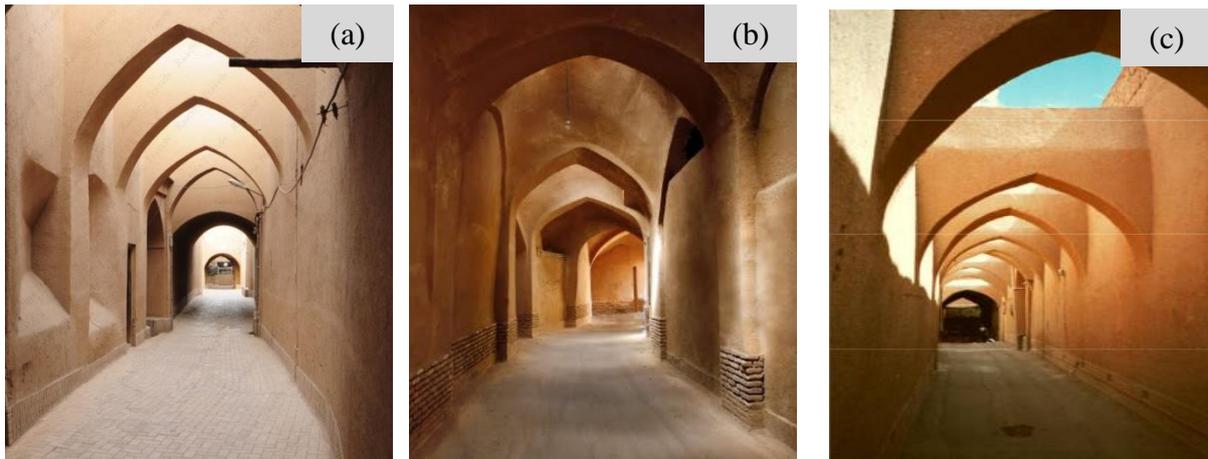


Figure I.11 : Sabat dans la ville de Yazd , (a) (Maleki, 2011), (b) (Shemirani & Moztarzadeh, 2013), (c) (Monshizade, 2008)



Figure I.12 : Ruelles ombragées : (a) Rue ombragée en Sicile, Italie (Sayigh, 2019) ; (b) passage étroit à Dubaï (Hobbs, 2017) ; (c) photo de ruelle ombragée à Béni Isguen (Auteur, 2018)

### I.2.3. La hiérarchisation des espaces extérieurs :

Dans les villes traditionnelles des climats chauds et arides, les rues partent d'une place centrale qui peut être la mosquée, le marché ou un espace central de regroupement dans la ville, après devenir des ruelles étroites qui servent seulement du passage des résidents et finalement aboutir à une impasse (F Ragette, 2003). Cette hiérarchisation à plusieurs objectifs : climatique : pour minimiser les effets négatifs, des conditions extérieures, culturelles qui servent à diviser la ville en plusieurs parties pour les contrôler et organiser les différentes fonctions. La figure I.13 présente un schéma qui résume la hiérarchisation des espaces dans les villes traditionnelles.

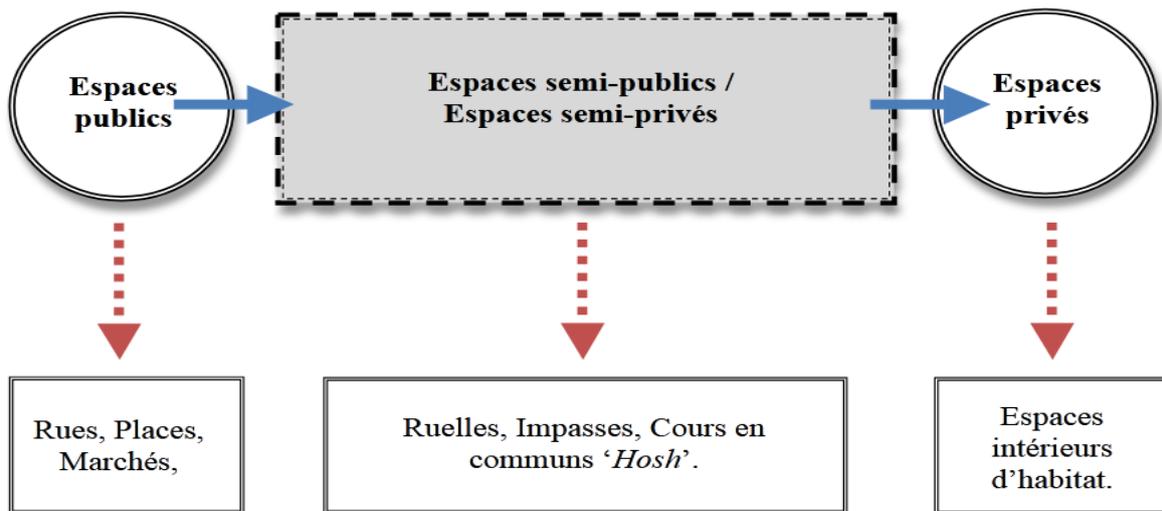


Figure I.13 : Schéma conceptuel de la hiérarchisation spatiale tripartite des tissus traditionnels (Hussein, 2012)

À titre d'exemple dans la vallée du M'Zab, Il y'a une hiérarchisation dans les espaces extérieurs comme les rues qui se différent selon les dimensions et la situation dans le Ksar. Il existe trois types de rues hiérarchies selon la fonction et la situation :

1. Les rues : qui sont à proximité du souk et de la mosquée dont les étrangers de la ville ne pénètre jamais (Figure I.14.a).
2. Les ruelles : A l'intérieur des villes, la circulation s'effectue par des ruelles par fois partiellement couverte, accessibles aux piétons et aux ânes. Architecturalement la ruelle n'est animée que par la forme et la couleur des murs des façades (Figure I.14. b).
3. Les impasses : d'une largeur très réduite (1.5m) et qui ne permettent que l'accès à sa maison (Figure I.14.c).



Figure I.14 : Photos montrant différents types des rues et ruelles dans le Ksar de Béni Isguen, (Auteur, 2018)

#### I.2.4. Le troglodytisme :

Le troglodytisme signifie des établissements humains encastrés dans la terre comme techniques constructives traditionnelles plus économes en énergie et en matériaux de construction adoptées par nos ancêtres (Golany, 1988) . Dans les sites plats ou de petites collines, les habitations sont creusées de haut en bas selon un sens vertical puis horizontal. L'habitat troglodyte latéral se caractérise par des grottes creusées horizontalement dans la montagne comme la région de Tataouine en Tunisie (figure I.15.a). Tandis que, les grottes creusées verticalement dans le sol déterminent l'habitat troglodyte en profondeur comme la région de Matmata (Znidi, 2018) (figure I.15.b).

Ces habitations troglodytiques ne se remarquent qu'à travers leurs entrées et patios qui assurent l'éclairage et la ventilation des espaces souterrains. Ces maisons troglodytes protègent les habitants des chaleurs excessives d'été. les habitations enterrées dans la terre présentent des avantages indéniables : simplicité de conception, rapidité de creusement de la terre, moindre coût, efficacité énergétique, et enfin protection (ennemis, animaux dangereux, insectes piqueurs, etc.) (Ashrafi, 2008). Donc, les habitations troglodytiques traditionnelles présentent des réponses favorables à des conditions climatiques difficiles et des contextes conflictuels.

Les maisons souterraines se camouflent dans le paysage naturel de telle façon qu'elles offrent un confort thermique sans grande consommation d'énergie pour le chauffage et le refroidissement. D'une part, puisque la terre est un isolant thermique, elle réduit les transferts de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur. Elle a une forte inertie thermique dont elle est capable de retenir la chaleur pendant le jour et la restituer pendant la nuit (Houda, 2017). À titre d'exemple, les coûts énergétiques pour le chauffage et le refroidissement des habitations troglodytiques traditionnelles à Matmata (sud de la Tunisie) sont très faibles à cause de la stabilité des températures souterraines (Golany, 1988). La figure I.15 (c) et (d) présente des exemples de troglodytisme en Iran et en Turquie.



Figure I.15: Habitat troglodyte : (a) village troglodytique de Chenini - Tataouine ; (b) village de Matmata en Tunisie ; (c) village troglodyte « Kandovan » en Iran ; (d) maisons troglodytes, de Cappadoce, Turquie (Driss, 2017)

### I.2.5. L'utilisation de la végétation :

Les espaces verts urbains jouent un rôle essentiel sur le rendement thermique et énergétique des villes compactes. La perception, l'utilisation, la qualité et l'accessibilité des espaces verts et bleus assurent le bien-être et la santé de l'homme (Russo & Cirella, 2018). La présence de la végétation sur et autour des bâtiments peut influencer le confort thermique des personnes, ainsi que réduire la charge d'énergie de chauffage ou de refroidissement (Daoudi et al., 2019). L'implantation des arbres est une stratégie efficace pour améliorer le confort urbain des piétons et sert à créer des espaces de détente confortable (Figure I.16). L'espace vert présente plusieurs avantages pour l'espace urbain à savoir : fournir l'ombre, créer l'effet de refroidissement via l'évapotranspiration (Xu et al., 2019), la protection contre l'air, l'infiltration et la création de microclimats autosuffisants plus frais autour du bâtiment, réduisant la vitesse du vent, régulant l'humidité relative et la température de l'air ambiant s'abaisse (Cantuaria, 2019). Maximiser l'ombre et créer des microclimats tolérables dans les climats chauds et arides sont l'intention la plus importante. Les espaces verts urbains peuvent contribuer également à modérer l'effet d'îlot de chaleur urbain et donc le confort thermique par l'impact des paramètres d'aménagement paysager (Sun et al., 2017).

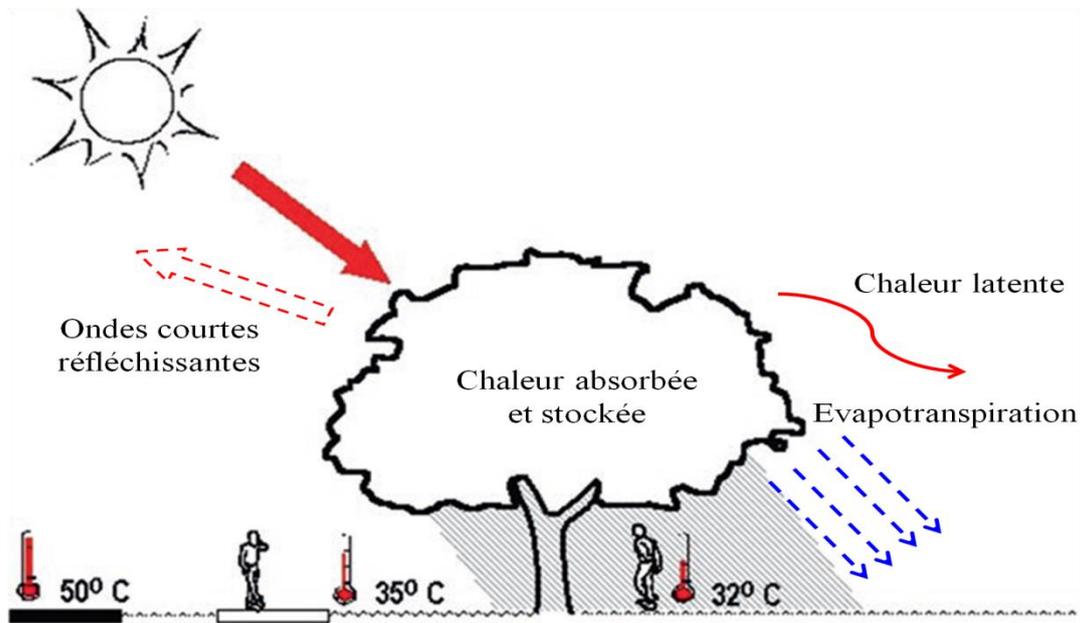


Figure I.16 : Différences microclimatiques introduites par la présence de l'arbre (Robinette, 1983)

À titre d'exemple, dans la vieille ville de Sanaa au Yémen, les jardins occupent 20% de la superficie de la ville et 42% de chaque quartier résidentiel ; et presque chaque maison a la possibilité d'avoir accès à des vues sur de ces vastes jardins (Figure I.17.a). Ces jardins aident à protéger les immeubles du rayonnement solaire intense et créer l'ombrage avec des brises fraîches en été (Al-Sallal & Rahmani, 2019).

#### I.2.6. L'introduction de l'eau :

La conception de l'environnement extérieur demeure un élément essentiel pour l'activité urbaine à fin d'assurer des conditions de vie confortable (Fahed, 2018). De plus de la végétation, les bassins d'eau, les fontaines ou même les cascades artificielles présentent des stratégies de climatisation passive en extérieur (Chiesa, 2019) . Ils peuvent aider à réduire la température de l'air et augmentent l'humidification des microclimats. Les plans d'eau fonctionnent comme un dissipateur de chaleur, par évaporation. Puisque la chaleur latente de la vaporisation de l'eau est relativement élevée, il absorbe une grande quantité de chaleur à partir de l'air ambiant pour l'évaporation, qui soulève également le niveau d'humidité (El Hozayen, 2013). Cela aide les espaces urbains dans les climats chauds et arides à minimiser les degrés de températures de l'air extérieurs et réguler l'humidité relative et à refroidir le microclimat. La présence d'eau avec la végétation affecte la quantité de rayonnement solaire, la température ambiante et la vitesse du vent, ce qui se traduit par un meilleur confort urbain (Sayigh, 2019). L'utilisation de la végétation et l'eau a été toujours impliquée dans les villes traditionnelles comme pratique d'adaptation dans les climats rudes (Figure I.17.b).



Figure I.17 : Utilisation de la végétation et l'eau : (a) vue sur les jardins de la vieille ville de Sanaa au Yémen (Lamprakos, 2016) ; (b) jardin de Dowlat Abad Yazd en Iran (Jomehzadeh et al., 2017)

### I.3. Les pratiques d'adaptation traditionnelle architecturale :

Le climat influe considérablement sur l'architecture traditionnelle des climats chauds et secs, ce qui oblige les peuples autochtones à appliquer des stratégies d'adaptation architecturales pour équilibrer les facteurs environnementaux nécessaires pour aboutir un confort autosuffisant (Al-Sallal & Rahmani, 2019). Les anciens bâtisseurs des régions à climat chaud et aride avaient fait un gros effort pour créer des habitats bioclimatiques qui correspondent aux effets négatifs du climat rude (Almusaed, 2011). L'amélioration du microclimat autour les édifices contribue à équilibrer les gains/pertes de la chaleur et par conséquent améliorer l'état de confort intérieur tout en réduisant les besoins en énergie. Les études et les investigations antérieures révèlent l'existence de nombreuses méthodes d'adaptation appliquées par les habitants des villes anciennes à travers leur histoire pour avoir un équilibre entre les facteurs climatiques et environnementaux selon la disponibilité des ressources locales avec respect des besoins socioculturels de la culture et la société. La géométrie et la forme du bâtiment, l'orientation, les cours, les capteurs à vent, les caves, les protections solaires, les matériaux locaux sont des pratiques d'adaptation qui visent à créer des conditions de vie confortables à l'intérieur de la maison. Dans cette partie, on va lever le voile sur les pratiques d'adaptation de l'architecture traditionnelle au niveau architecturale qui sont des sources d'inspiration portant des solutions de confort humain.

#### I.3.1. La forme et la géométrie :

La forme géométrique et la disposition des édifices ont une grande influence sur le climat intérieur (Bekkouche et al., 2015). La relation entre la surface et le volume d'un bâtiment est

généralement appelée coefficient de forme ou indice de compacité. Ce dernier défini comme le rapport entre la surface de l'enveloppe du bâtiment (c'est-à-dire les surfaces extérieures de peau) et le volume intérieur du bâtiment (Bekkouche et al., 2013). Ce coefficient est responsable de la caractérisation du mode de contact du bâtiment avec l'extérieur (Amarilla, 1992). Dans les régions à climat chaud et sec, il est recommandé d'adopter des formes architecturales compactes. Ces dernières ont de petites surfaces exposées aux conditions extérieures (températures ambiantes et rayonnement solaire élevés), ce qui contribue à minimiser les gains de chaleur (Al-Sallal, 2016). La forme compacte d'un bâtiment sert à limiter la surface totale exposée au rayonnement solaire, réduisant l'absorption de la chaleur globale et la pénétration des vents poussiéreux (Maleki, 2011). Les maisons compactes des villes traditionnelles sont reliées les uns aux autres par des murs mitoyens. Cette forme de configuration contribue à éviter le surchauffe par rayonnement direct et créent des zones d'ombre avec de température de l'air basse assurant de bonnes conditions de confort thermique pendant les étés chauds (Mattocchia, Bevilacqua, Leccese, Rocca, & Rubio, 2016). La forme introvertie avec la cour ombragée a pour effet que les pièces ne communiquent pas directement avec l'air surchauffé extérieur, mais par des espaces tampons intermédiaires (Almusaed, 2011). En conséquence, la compacité de la forme architecturale est la meilleure lorsque l'indice de compacité est plus faible (Bekkouche et al., 2015). La configuration de forme introvertie avec une cour centrale est la plus efficace et la plus appropriée dans ce type de climat (Al-Sallal, 2016), c'est pour ça les maisons des villes traditionnelles sont compactes (figure I.18). La figure I.18 (a) montre une vue de Ghadamès et (b) Balat en Égypte.

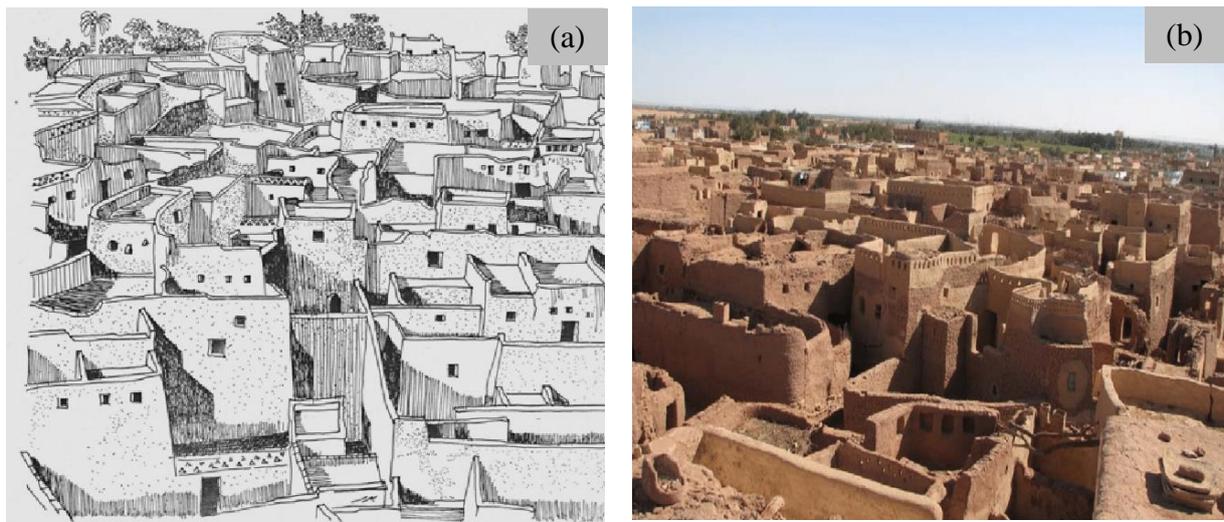


Figure I.18 : Forme compacte des maisons : (a) vue perspective de dessus pour la ville de Ghadamès- Libye montrant la compacité de la forme (Ahmed, 1985), (Al-Zubaidi, 2002) ; (b) habitations compactes à Balat en Égypte (Omar, 2015)

### I.3.2. L'orientation :

Lorsque les maisons des villes traditionnelles sont souvent de type maison à patio, l'ouverture principale est le patio avec quelques pénétrations sur la façade d'entrée. La face de la maison la plus ouverte est orientée au sud du fait que l'été, le soleil est trop haut pour y pénétrer et en hiver il devient agréable. Alors, en hiver puisque les rayons solaires sont bas, leur angle est important à l'inverse de l'été d'où l'inclinaison des rayons solaires est petite puisque le soleil est haut (Sayigh, 2019) (figure I.19). Donc, en été la pénétration des rayons solaires se diminue à l'étage et dans les chambres du rez-de-chaussée et le temps d'ensoleillement est long. En hiver la pénétration des rayons solaires par le patio atteint le point le plus profond possible malgré le temps d'ensoleillement est court (Ravéreau et al., 1981). À titre d'exemple, la maison mozabite se divise en zones de lumière et zones d'ombre selon la pénétration des rayons solaires. L'orientation est la même pour toutes les maisons (OPVM, 2018). Selon la saison et la position du soleil, l'orientation du sud-est au sud-ouest du patio avec les galeries d'étage (Ikomar au mozabite) contribue à réduire l'ensoleillement en été et le favorise en hiver (Bensayah, Bencheikh, & Abdessemed, 2019). Durant la saison chaude, la pénétration des rayons solaires se limite uniquement au patio (West Eddar). Ce dernier qui est entouré par de hauts murs aide à protéger les autres espaces. Cette orientation privilégie ainsi une protection contre les vents de sable. Comme dans les Ksour de la vallée du M'Zab, le chebek permet de laisser les rayons solaires soit pénétrer toute la journée en hiver vers le patio et les autres espaces qui l'entoure (Figure I.20).

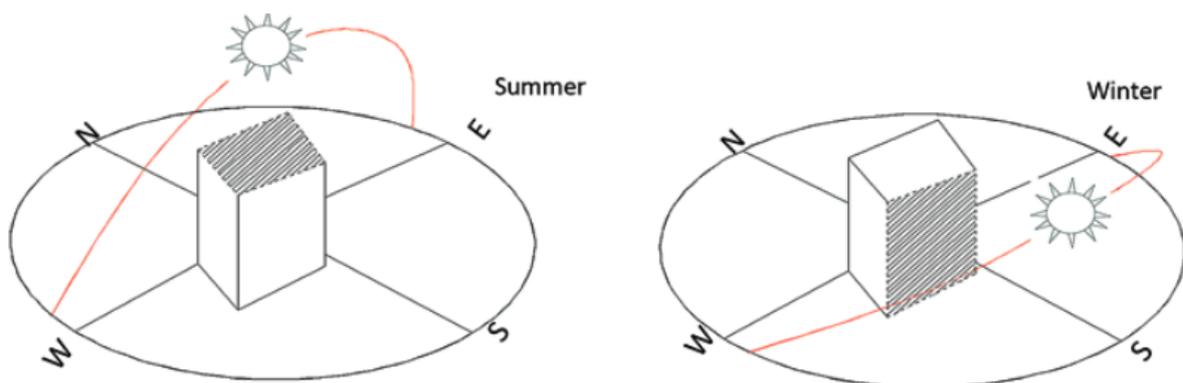


Figure I.19 : Trajectoire du soleil en été et en hiver et son impact sur les surfaces exposées des bâtiments verticaux (Sayigh, 2019)

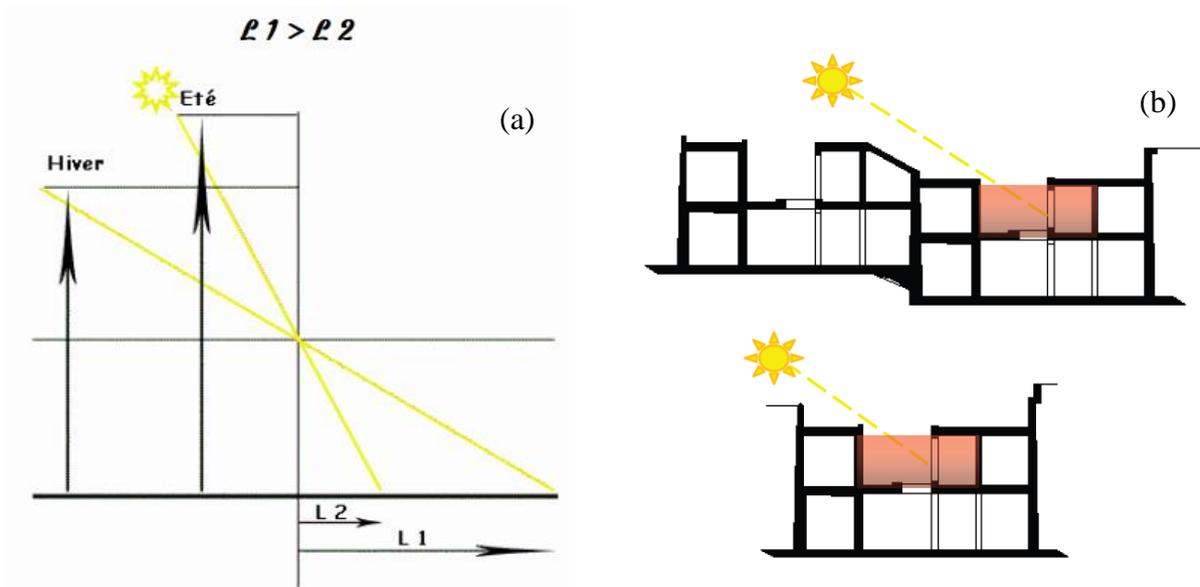


Figure I.20 : (a) pénétration des rayons solaires dans la maison (OPVM, 2018) ; (b) bâtiments attenants et pénétration du soleil dans l'espace (Bensayah et al., 2019)

La terrasse est souvent orientée au sud, parce que la galerie sert à créer un espace d'ombre, et la pénétration de la lumière vers l'intérieur est assurée (Figure I.21). L'orientation vers le nord n'est pas utile lorsqu'elle minimise le tirage thermique nocturne et n'assure pas l'éclairage naturel au rez-de-chaussée et ainsi cette orientation ne protège pas plus de la chaleur. Aussi, dans les climats les plus chauds de l'hémisphère nord, l'ouverture au sud est la meilleure protection contre la surchauffe estivale (Ravéreau et al., 1981).

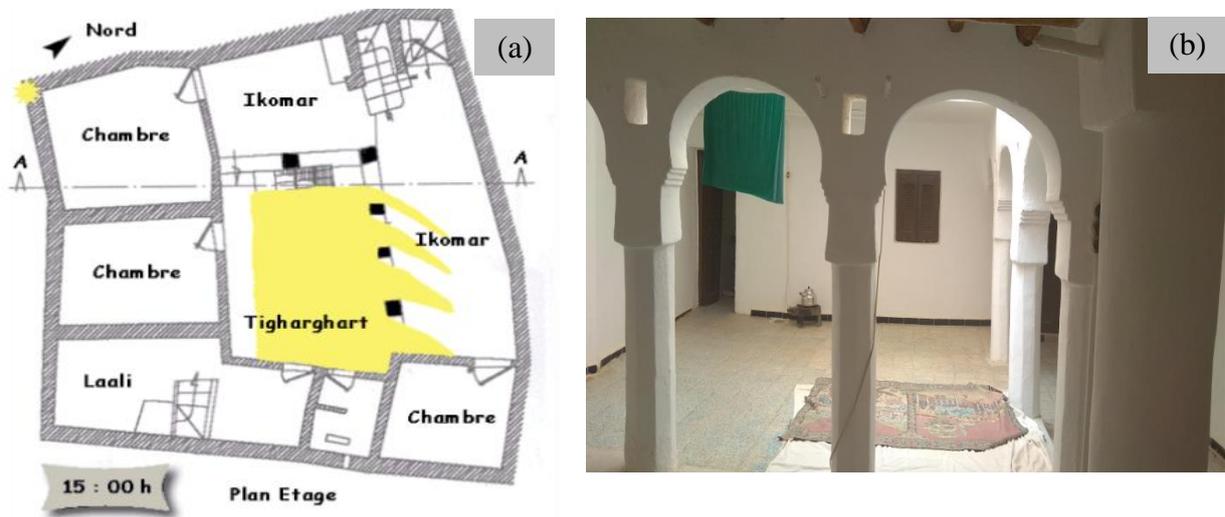


Figure I.21 : (a) l'enseiement de la maison traditionnelle (<https://b-nour.jimdofree.com/la-maison-traditionnelle-mozabite/>) ; (b) photo montrant la pénétration du soleil dans le patio (Auteur, 2018)

On note que dans la vallée du M'ab, à cause de la situation géographique et topographique des Ksour sur les collines et l'orientation des maisons ksouriennes, les maisons qui se situent en haut du Ksar par rapport aux autres coupent les rayons solaires aux maisons qui en bas celles du voisin mitoyen. Cela a laissé les habitants des maisons du côté est de profiter des rayons solaires puisque le plancher du premier étage de la maison plus haut possède une inclinaison de façon qu'elle permet des rayons solaires vers l'étage du voisin (OPVM, 2018) tout en créant un ombre dans les côtés surtout dans la saison plus chaude (Figure I.22.a et b).

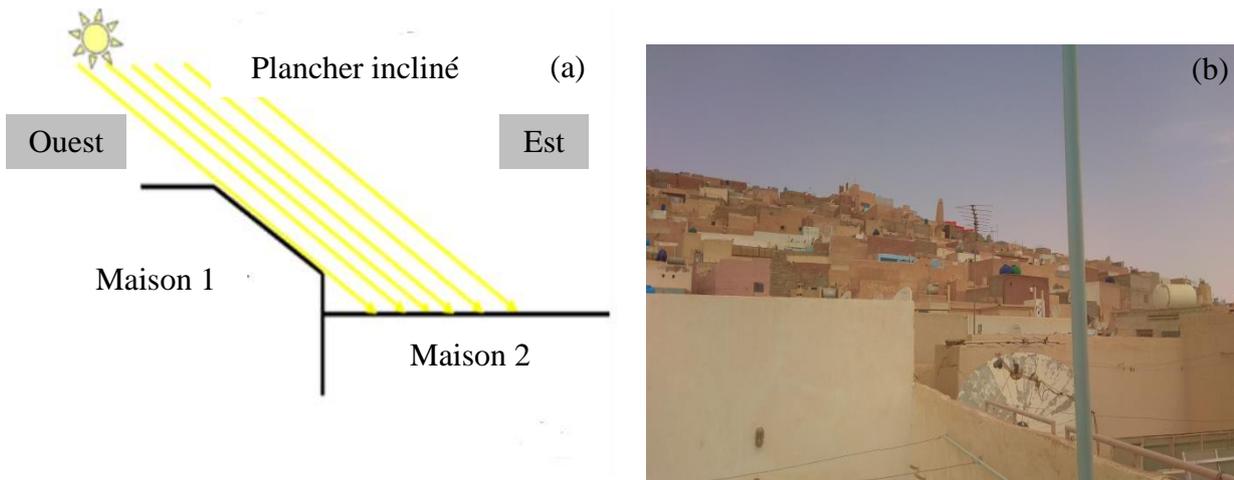


Figure I.22 : (a) Ensoleillement des maisons mozabites (OPVM, 2018), (b) photo montre l'inclinaison des maisons (Auteur, 2018)

### I.3.3. Le nomadisme saisonnier et journalier :

Dans les villes traditionnelles des climats chauds et arides, les maisons permettent aux résidents de migrer saisonnièrement ou quotidiennement dont l'objectif est d'assurer le confort pour les habitants. Le nomadisme présente une solution efficace dans les climats à forte variation de température journalière et saisonnière (Benslimane & Biara, 2017) pour se protéger des radiations solaires intenses. La mobilité quotidienne s'inverse d'une saison à l'autre dont les résidents peuvent déplacer entre les saisons et même pendant le jour et la nuit de la même journée. Dans le cas d'un nomadisme saisonnier, à titre d'exemple, on cite la vallée du M'Zab d'où il existe deux types de maisons, l'une d'été et l'autre d'hiver (Figure I.23) comme la décrit Andrée Ravéreau. La maison d'été qui se situe dans la palmerais sert aux habitants de se déplacer pendant la saison la plus chaude pour profiter de l'air frais des palmiers et de l'eau. Tandis que, en hiver les habitants occupent les maisons compactes qui se situent à l'intérieur du rempart (Ravéreau et al., 1981). Dans le cas d'un nomadisme journalier, au niveau de la maison, les pièces sont utilisées de façon saisonnière. Le nomadisme sert à créer des pièces fraîches et des pièces ensoleillées appelées nomades. Ces pièces laissent les occupants se déplacent vers l'intérieur du bâtiment, soit vers les parties les

plus chaudes, soit vers les parties les plus froides selon la saison et selon l'heure (jour/nuit). Ainsi, la fonction d'un même espace se diffère selon la saison et l'heure de la journée, en été ou en hiver, pendant la nuit ou le jour. Pendant la saison chaude, les habitants occupent la cave pendant les heures hautes de pointe (l'après-midi), ainsi pour les activités diurnes, les habitants utilisent le rez-de-chaussée, plongé dans l'ombre comme espace de jour, et le patio entouré des hauts murs ombragés par les galeries sert à protéger les pièces et assure la lumière. Pendant la nuit, les occupants utilisent la terrasse protégée des voisins par de hauts murs pour dormir, comme une solution thermique (Bouchair & Dupagne, 2003) puisque les chambres sont très chaudes à cause de l'effet de déphasage thermique. L'utilisation des terrasses la nuit pour profiter du rayonnement infrarouge vers le ciel clair et par les émissions terrestres et les brises du vent (Figure I.24). Pendant la saison fraîche, les espaces d'étage sont utilisables puisque le patio sert à laisser le soleil pénétrer (Benslimane & Biara, 2017), donc les chambres jouent son rôle.

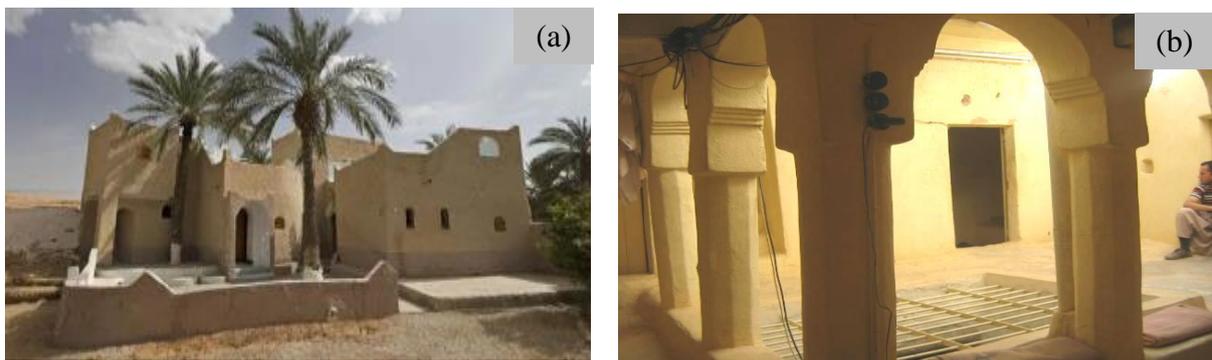


Figure I.23 : Types des maisons mozabites : (a) maison d'été, (b) vue dans la maison du Ksar (d'hiver) (OPVM, 2018)

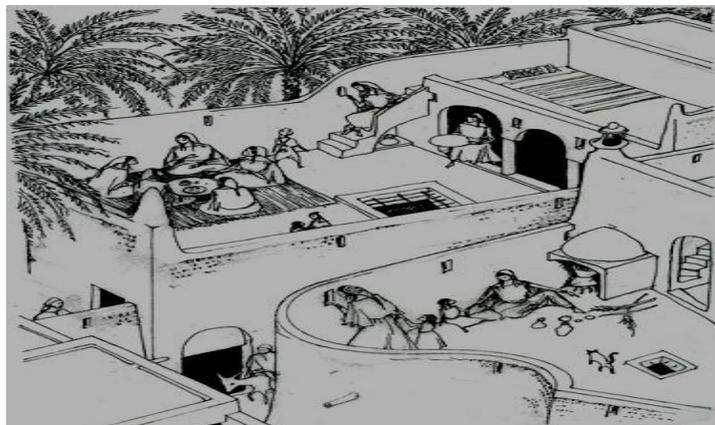


Figure I.24 : Perspective montrant l'utilisation de la terrasse par les habitants (Ravéreau et al., 1981)

### I.3.4. L'utilisation des systèmes de ventilation (refroidissement) passive :

#### I.3.4.1. Les tours à vents (Malkaf) :

La tour à vent (également appelé Badguir en persan) est un dispositif de refroidissement passif et de ventilation naturelle, développée dans l'architecture traditionnelle de l'Iran et à certains pays arabes (Saadatian, Haw, Sopian, & Sulaiman, 2012). Elle se compose d'un puits (colonne) élevé s'élevant au-dessus de l'édifice et ouvert du côté du vent dominant. Généralement, elle est construite sur le côté nord du bâtiment pour capter l'air frais et le canaliser vers l'intérieur (Salkini et al., 2017). La tour à vent crée également une architecture charismatique avec sa belle forme verticale qui crée un joli contraste avec les lignes horizontales basses des bâtiments (Keshtkaran, 2011). Les tours à vent plus hautes sont plus efficaces que les basses, car elles peuvent capter les vents plus froids et propres (Bouchair, 1989). Les tours à vents plus basses sont moins efficaces en raison de la résistance au vent causée par le sol et les masses de bâtiment qui entraînent un ralentissement de la vitesse du vent (Sayigh, 2019).

La tour à vent est une stratégie efficace pour le refroidissement passif dans les régions à climat chaud, en particulier lorsqu'elle est couplée à la cour, car cet agencement combiné peut augmenter considérablement son efficacité (Keshtkaran, 2011). La tour à vent a une orientation quadri directionnelle afin d'utiliser tous les vents souhaitables du nord au sud et d'est en ouest (Maleki, 2011). Les orientations des éoliennes sont différentes selon le coup de vent principal souhaité. Elle est déterminée en fonction, de la direction souhaitée dans laquelle le vent souffle comme la direction nord-ouest comme la ville chaude et sèche de Yazd en Iran (Ghaemmaghmi & Mahmoudi, 2005). La figure I.25 (a) montre des exemples des tours à vent en Iran et (b) illustre le capteur de vent dans le jardin de Dolat Abad, à Yazd en Iran.



Figure I.25 : (a) tours à vent à Yazd ; (b) le capteur de vent dans le jardin de Dolat Abad, Yazd, Iran (Maleki, 2011)

I.3.4.1.1. Le principe de fonctionnement :

La tour à vent fonctionne lorsqu'un changement de densité de l'air est créé dans et autour d'elle (Matheos Santamouris & Asimakopoulos, 1996). Cela contribue à créer un courant d'air qui tire l'air vers le haut ou vers le bas à travers la tour selon la saison et selon le temps (jour/ nuit). On peut résumer son fonctionnement comme suit :

**Pendant la journée :**

En été durant la journée, la tour à vent fonctionne comme une cheminée inversée quand le vent est absent (Saadatian et al., 2012). Lorsque la partie supérieure de la tour est refroidie la nuit, elle reste fraîche pendant les premières heures de la journée et par conséquent, les couches d'air à côté des murs sont ainsi refroidies. Cela contribue à créer une convection naturelle dont la différence de température de l'air pousse l'air frais à descendre vers le bas et le distribue dans les pièces internes de la maison (Zarandi, 2009). Ensuite, quand la température de la tour atteint celle de l'air ambiant, la tour fonctionne comme une cheminée.

**Pendant la nuit :**

En été durant la nuit, la tour à vent fonctionne comme un capteur de vent quand le vent existe. Elle sert à capter le vent dominant frais à travers l'ouverture supérieure. Quand le vent passe à travers le sommet du capteur de vent, la différence de pression entre la base et le sommet de la colonne aide à remonter l'air chaud vers le sommet et à amener l'air frais vers le bas de la colonne (Maleki, 2011). Généralement, la tour à vent est couplée avec un autre dispositif de rafraîchissement pour refroidir encore plus l'air capté et descendra par la tour (Figure I.26). D'habitude, il s'agit d'une jarre d'eau, un bassin situé sous la colonne de la tour, puisque l'air chaud en contact avec l'eau provoque une évaporation (Sayigh, 2019).

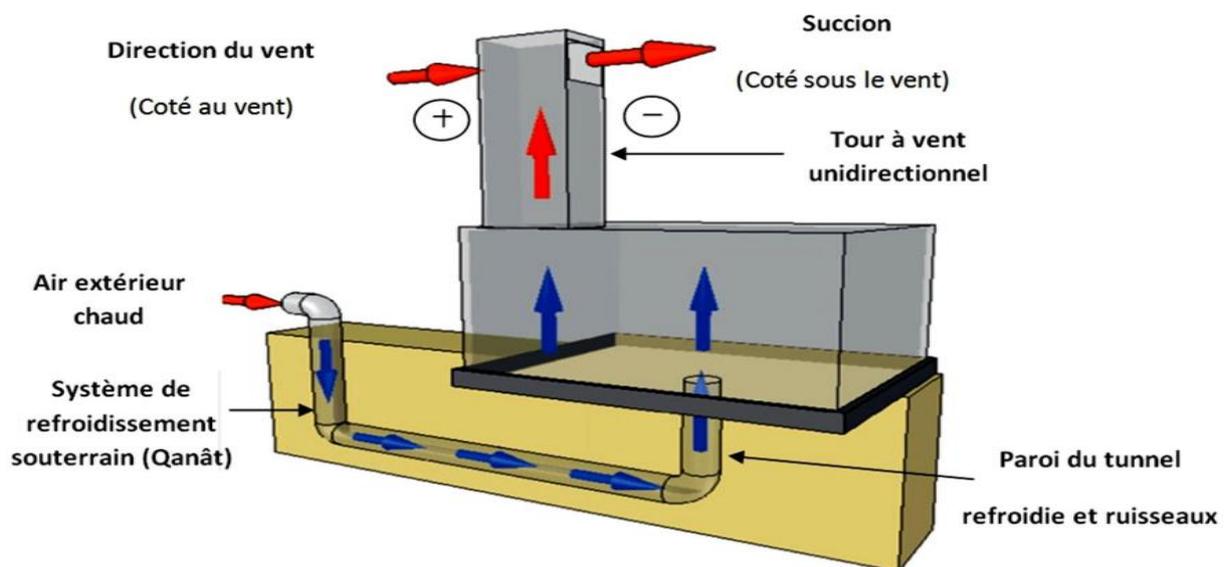


Figure I.26 : Tour à vent intégrée avec refroidissement souterrain (Hughes, Calautit, & Ghani, 2012)

#### I.3.4.2. L'utilisation des espaces tampons : Le patio

Le patio (ou la cour) est un élément essentiel de l'architecture traditionnelle des régions chaudes et arides du monde. La cour appartient à un type d'espace spécifique, appelé « espace de transition » ou « espace intermédiaire » où le climat intérieur et extérieur est modéré sans système de contrôle mécanique (Taleghani, Tenpierik, & van den Dobbelsteen, 2012). Le patio a été considéré toujours comme une stratégie de conception bioclimatique qui peut achever différentes exigences fonctionnelles, climatiques et culturelles (Soflaei, Shokouhian, & Soflaei, 2017). West Dar ou Al-Hawsh (qui signifie cour en arabe) se trouve dans les maisons traditionnelles des villes arabes comme les maisons mozabites en Algérie, en Iran, en Égypte et dans les pays du golfe.

##### I.3.4.2.1. Le rôle d'un patio :

Par sa position centrale, stratégique et fonctionnelle, la cour possède plusieurs fonctions.

###### 1. Fonction climatique :

Le patio joue un rôle climatique essentiel dans la maison traditionnelle en tant que dispositif de rafraîchissement passif. Il a le potentiel de protéger les pièces donnant sur la cour de la chaleur due à des rayons solaires excessifs des régions arides, ainsi les tempêtes de vent et du sable (Keshtkaran, 2011). Aussi, l'air plus frais des pièces environnantes remplace l'air chaud ascendant pendant les heures de surchauffe. Ainsi, il fonctionne comme un accumulateur de l'air refroidi par rayonnement pendant la nuit. La cour peut également fournir des niveaux d'éclairage naturel supplémentaires et ainsi réduire la dépendance à l'éclairage artificiel (St Clair, 2009) puisqu'elle constitue l'ouverture principale vers l'extérieur dans ce type de maisons. Ce processus contribue à créer un microclimat agréable pour les résidents de la maison et fournir un ombrage supplémentaire et des espaces de transition.

###### 2. Fonction socioculturelle :

La cour est une forme commune qui caractérise l'architecture traditionnelle des villes arabes qui représente le noyau central d'où les familles peuvent se réunir pour profiter d'activités sociales et culturelles de tissage, de cuisine et de séchage des produits de saison et même un espace de rencontre (Ravéreau et al., 1981). Également, elle offre un degré élevé d'intimité, conformément aux préceptes et aux valeurs de la tradition islamique. De plus, la forme de la maison introvertie avec cour utilise généralement des fenêtres très limitées sur les rues ce qui contribue à réduire le gain de chaleur. Elle permet ainsi de réduire les niveaux de bruit venant de l'extérieur, et donc de créer une atmosphère plus calme (Bouchair et al., 2013).

I.3.4.2.2. Le principe de fonctionnement d'un patio :

La performance thermique des patios dépend de deux stratégies qui sont ; la protection contre les rayons solaires journaliers et la ventilation naturelle nocturne (Edwards, Sibley, Land, & Hakmi, 2006). Les murs des pièces autour de la cour et la galerie servent à fournir l'ombrage et aident à limiter les gains de chaleur et ainsi favorise une différence de pression entre les zones ensoleillées et ombragées, ce qui aide à créer un mouvement d'air. La différence de température entre l'air frais accumulé dans les pièces environnantes et les surfaces de la maison qui absorbe la chaleur permet de créer des courants d'air par convection, ce qui assure le confort pendant la journée. Pendant la nuit, la chaleur accumulée dans la masse thermique est émise dans le ciel nocturne provoquant un refroidissement par rayonnement. La fraîcheur stockée par la masse thermique la nuit sert à garder la maison plus fraîche les premières heures du lendemain (Al-Sallal, 2016) (Figure I.27). La cour fonctionne comme un modificateur et régulateur thermique pour remplacer l'air chaud par l'air frais en raison de leur capacité à réduire les températures maximales, à canaliser les brises et à ajuster le degré d'humidité (Edwards et al., 2006). Parfois dans quelques régions du monde comme à Iran, il existe des cours couplées avec des pelles à vent pour augmenter le rafraîchissement passif.

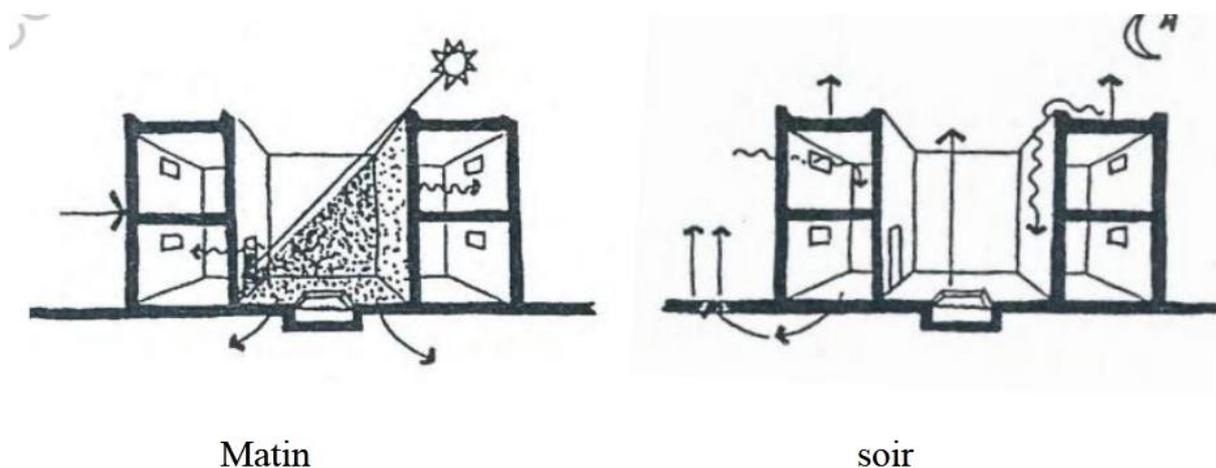


Figure I.27 : Coupe schématique du principe de fonctionnement d'un patio en été (Tiraoui L, 1996)

De plus, il est préférable de protéger la cour du rayonnement solaire par des couvertures pendant la journée parce que les surfaces découvertes de la cour dans les heures de pointe aident à augmenter la température intérieure (Abdulkareem, 2016), comme le « Chebek » chez les mozabites qui aident à protéger le patio pendant la journée puisque l'ombre est un facteur important à réduire la chaleur excessive des zones chaudes. Dans la vallée du M'Zab, puisque le type de maison adopté par les mozabites est une « maison à patio », il contribue

fortement à la régulation thermique intérieure. En été, pendant la nuit, les mozabites ouvrent le « Chebek » pour rafraîchir l'intérieur de la maison puisque la température ambiante intérieure est plus élevée à celle de l'extérieur pour évacuer la chaleur due au solaire du jour ou des gains internes. Les espaces de rez-de-chaussée sont refroidis aussi durant la nuit (Figure I.28.a). Pendant la journée, le Chebek est fermé par des tissus ou des tapis pour minimiser la pénétration des rayons solaires à l'intérieur (Bensayah et al., 2019) (Figure I.28.b). La figure I.28. (c) montre photo de Chebek fermé pendant la journée.

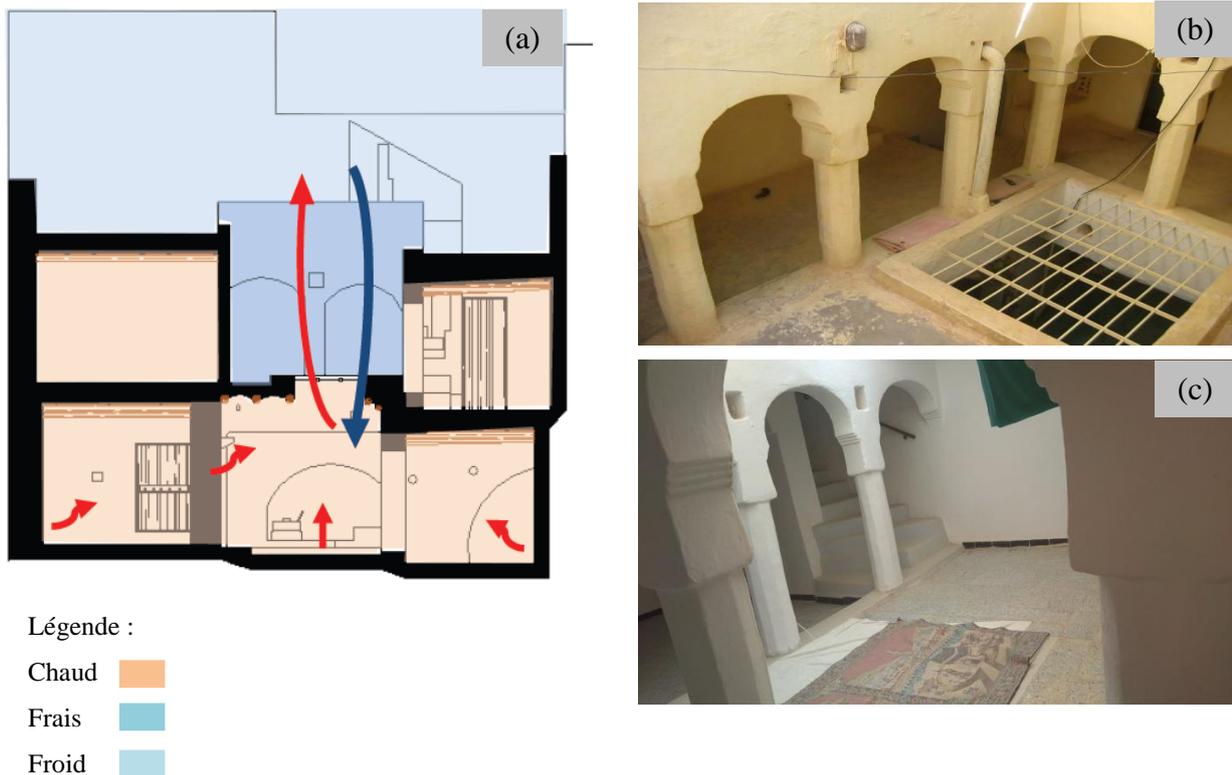


Figure I.28: Le patio chez les mozabites : (a) le rôle de la cour dans la régulation de l'environnement thermique à l'intérieur de la maison en été, pendant la nuit (Bensayah et al., 2019) ; (b) photos de chebek ouvert, (c) photo de Chebek fermé pendant la journée (Auteur, 2018)

De plus, pour augmenter les performances thermiques de la cour, il est recommandé d'ajouter des dispositifs de rafraîchissement passif par évaporation comme les bassins d'eau, et de la végétation. L'utilisation de plantes dans le patio sert à réduire les températures intérieures en raison de sa capacité à absorber la chaleur et elle crée ainsi l'ombrage et assure le refroidissement par évaporation. En raison de cette évaporation et évapotranspiration, l'humidité dans la cour est également augmentée (Raydan, Ratti, & Steemers, 2004; Taleghani et al., 2012), ce qui contribue à créer un microclimat tolérable dans le patio. Également, lorsque l'air de la cour entre en contact avec l'eau du bassin existant dans la

cour, cela aide à hydrater l'air et cause le refroidissement par évaporation. Ainsi, l'air chaud et sec absorbe mieux l'eau et il perd ses caractéristiques de liquide et se transforme en gaz quand il est en contact à l'air sec. Ensuite, la température de l'air diminue jusqu'à ce qu'elle atteigne le même niveau de température de l'eau (Givoni, 1998a). Donc, l'utilisation de la végétation et l'introduction de l'eau dans le patio peuvent modérer la température ambiante pendant le jour et la nuit puisqu'elles peuvent réduire les fluctuations de températures et augmentent l'humidité relative à l'intérieur dans les climats chauds et secs. En conséquence, la cour centrale équipée par un espace vert et une fontaine assure des conditions du microclimat autosuffisant souhaité et frais dans les espaces environnants (Khalili & Amindeldar, 2014). La figure I.29 montre la large utilisation de végétation et eau dans le patio des maisons. La figure I.29. (a), (b), (c) et (d) montre l'utilisation de l'eau et végétation en Iran et (e) et (f) illustrent des patios avec plantes et eau en Égypte et Syria respectivement.



Figure I.29: Intégration de la végétation et l'eau dans le patio : (a) cour de "Godal Baghche" dans la maison de Bafande à Kashan (Karimi & Hosseini, 2012) ; (b), (c), (d) utilisation de plantes et de l'eau dans les maisons à Yazd en Iran (Maleki, 2011) ; (e), (f) patio avec plantes et eau en Égypte et à Damas, Syria (<https://www.pinterest.com>)

En addition, la combinaison des tours à vent avec la cour permettent à minimiser encore plus les gains de chaleur et fournir un refroidissement passif (Figure I.30). La cour collecte l'air chaud déporté des pièces par les tours à vent (ou pelles du vent qui sont de dimensions

réduites) et ensuite écoule la chaleur vers le ciel par rayonnement et vers l'air ambiant par convection, surtout pendant la nuit (Al-Sallal, 2016).

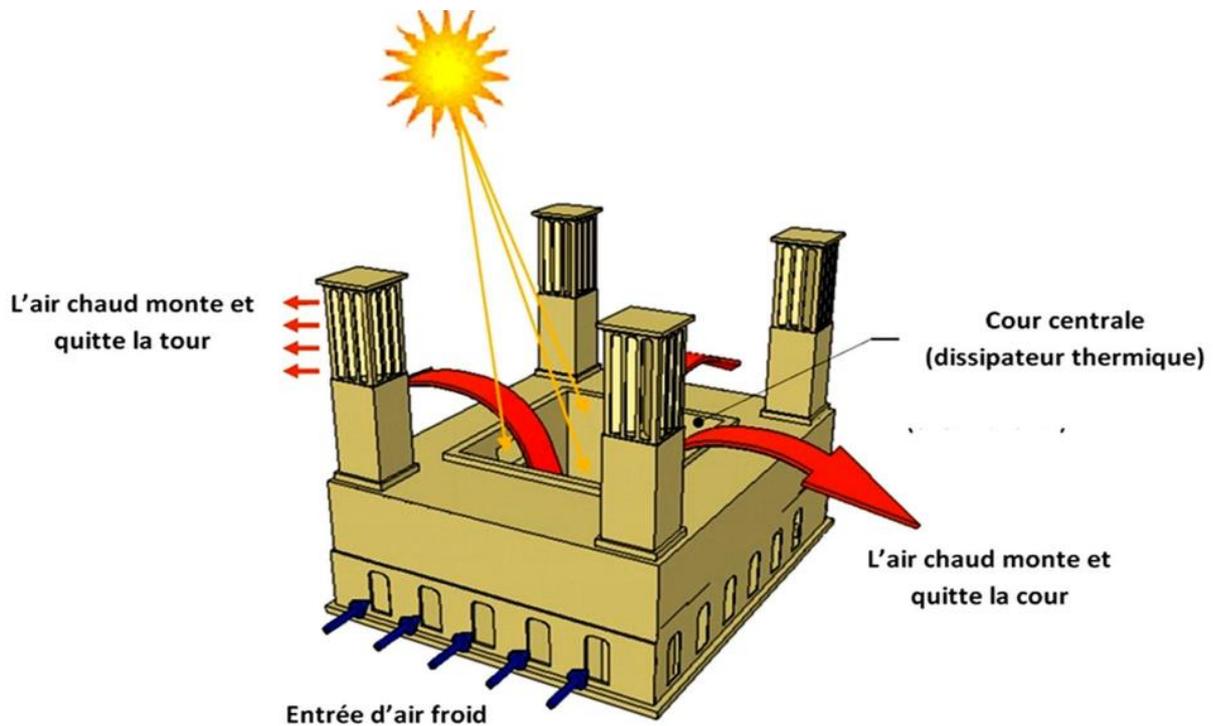


Figure I.30 : Maison traditionnelle qui combine la cour ouverte avec les tours à vent (Hughes et al., 2012)

### I.3.5. L'utilisation des matériaux locaux :

Les matériaux de construction ont joué un rôle important dans l'architecture traditionnelle pour assurer le confort thermique des usagers. Généralement, ces matériaux sont disponibles localement utilisés pour construire des murs épais de forte masse thermique (Alkhalidi, 2013). La masse thermique est un terme utilisé pour décrire les matériaux à haute capacité thermique, c'est-à-dire les matériaux qui peuvent absorber et stocker de grandes quantités de chaleur. La masse thermique peut se traduire sous forme de murs de maçonnerie, de toits et de planchers constitués de matériaux locaux (Almatarneh, 2013). En été, les températures ambiantes extérieures sont plus fraîches pendant la nuit et l'intérieur peut être refroidi par une ventilation naturelle pour évacuer la chaleur émise. De plus, l'isolation de la surface externe des murs et des toitures peut augmenter le rendement énergétique des bâtiments (St Clair, 2009). La brique de boue, l'adobe, la pierre, la terre crue et cuite, les palmiers, etc., sont des matériaux locaux de forte capacité thermique, couramment utilisés pour construire les murs extérieurs et les toits des maisons qui peuvent ralentir le transfert de chaleur à travers l'enveloppe et par conséquent réduire les besoins de refroidissement. Les matériaux lourds comme l'adobe peuvent aider à retarder le transfert de

la chaleur à travers le mur de 8 heures, par conséquent, la chaleur emmagasinée le jour atteindra l'intérieur pendant la nuit à cause de l'effet de déphasage thermique (Keshtkaran, 2011). Les murs en briques d'adobe, sont constitués de blocs de terre à base d'argile mélangés avec le sable, moulés et compactés dans des caisses en bois et séchés au soleil (Figure I.31.a) (Daoudi et al., 2019). La chaux, la boue et le gypse étaient les liants traditionnels utilisés par les maçons pour isoler les bâtiments (Almatarneh, 2013). Par exemple, dans l'oasis de Siwa en Égypte, les résidents ont utilisé des briques de boue salée appelées « kershef » comme matériau de construction locale (Figure I.31.b) utilisé pour le remplissage des murs (Shaheen, 1975). La technique de construction, se base sur l'utilisation du sel qui se laisse déshydrater au soleil, ensuite la boue humide fermentée du sol salé "Tlakht", et laissé à sécher pendant une ou deux semaines (Ahmed, 2014). Les troncs de palmier ont été utilisés dans plusieurs régions chaudes pour construire les charpentes des toitures et les branches pour tisser les nattes solides des murs des maisons après enlever les feuilles. Les nattes tissées ont pour objet de laisser la brise fraîche pénétrer en été (Kansara, 2016). Également, dans les régions chaudes et sèches de l'Algérie, en particulier dans les Ksour des mozabites, les habitants ont utilisé des matériaux locaux tels que les pierres, la terre, la chaux, le Timchemt (plâtre local) pour construire des murs et des toitures épais (Figure I.32). Ces derniers fonctionnent comme un isolant du rayonnement solaire le matin et un réservoir qui libère la chaleur pendant la nuit (Bouchair et al., 2013). D'autre part, l'utilisation de matériaux réfléchissants, qui reflètent le rayonnement solaire, est une approche efficace du confort thermique. La réflectance plus élevée se traduit par une température de surface plus basse et une réduction de la température de l'air avec 5 °C dans des conditions de vent faible (Sayigh, 2019). Donc, la construction des maisons avec des matériaux locaux à base naturelle est un paradigme de durabilité, car ces matériaux sont à base naturelle importés du site, la main d'œuvre est locale et n'utilisent pas de sources d'énergie polluantes, économiques et respectent la culture, les coutumes et les traditions locales (Daoudi et al., 2019). Ainsi, l'importance de l'utilisation de matériaux locaux dans l'architecture traditionnelle est liée à l'énergie incorporée dans ses propriétés, la fabrication, le transport sur terrain et même ses longues durées de vie (Chandel, Sharma, & Marwah, 2016; Sayigh, 2019). L'utilisation appropriée du bon matériau au bon endroit de l'architecture traditionnelle rendent les édifices des zones chaudes et sèches éco énergétiques et durable (Biradar & Mama, 2017).

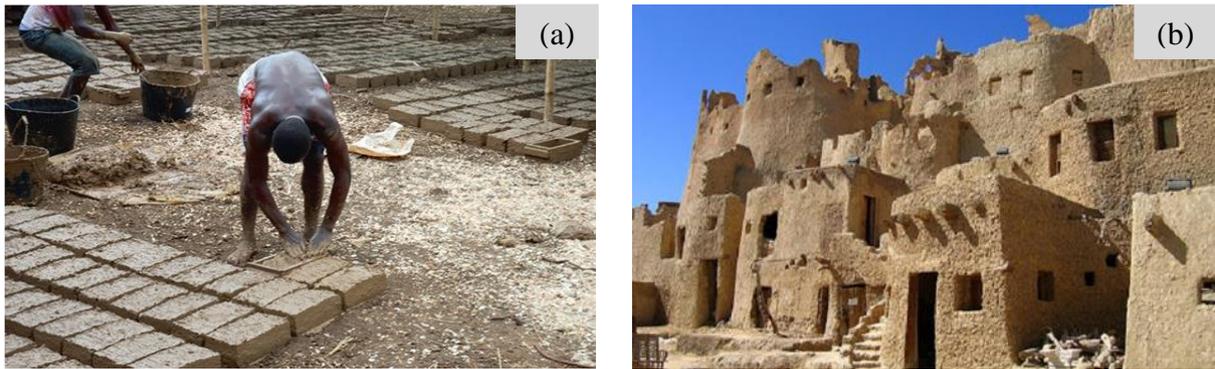


Figure I.31 : Technique de terre crue : (a) la fabrication des briques d'adobe sur l'île de S. Tomé (Daoudi et al., 2019) ; (b) construction avec la technique de « Kershef » en Égypte (Moustafa, 2014)



Figure I.32 : Matériaux locaux dans la vallée du M'Zab : (a), (b) l'utilisation de la pierre dans les murs des maisons mozabites ; (c) mur en terre crue dans la palmeraie de Béni Isguen (Auteur, 2018)

### I.3.6. Protection solaire par les ouvertures :

La majeure partie de la chaleur développée à l'intérieur de l'édifice provient du gain solaire des ouvertures. Par conséquent, dans les climats chauds et arides, il est recommandé d'éviter les grandes ouvertures sur les façades notamment pour les orientations ouest et est en raison de la faible altitude solaire. Également, il est utile d'utiliser des dispositifs d'ombrage qui aident à empêcher le rayonnement solaire (Sayigh, 2019). Dans les régions arides, les ouvertures vers les rues sont réduites et elles sont placées dans le patio (Figure I.33) et parfois de petits trous placés en haut du mur afin d'assurer une protection contre les rayons solaires et la poussière (Khan, 2015). Également, il existe de petites ouvertures placées aux niveaux inférieurs et supérieurs dont celles au niveau supérieur sert à évacuer l'air chaud de l'intérieur, et les ouvertures du niveau inférieur introduisent l'air frais à l'intérieur (Bekleyen & Dalkiliccedil, 2011). De plus des exigences climatiques impliquées par la rudesse des zones arides et sèches, l'utilisation des fenêtres dans l'architecture traditionnelle a été également influencée par des exigences socioculturelles. Ces dernières ne

favorisent pas l'utilisation des ouvertures vers l'extérieur en raison d'intimité et d'introvertie. Pour cela, les résidents des régions chaudes ont utilisé des dispositifs traditionnels qui permettent l'évacuation de l'air chaud des pièces et entre l'air froid avec l'assurance de l'intimité de la vie privée des gens. Pour cela, l'usage des moucharabiehs, des Qamariya (ouverture avec vitrail coloré utilisé au Yémen) dans les étages contribuent à promouvoir un éclairage naturel adéquat et une ventilation transversale, sans avoir besoin d'utiliser de systèmes mécaniques ou artificiels (Attia, 2020) (Figure I.34). L'ajout des dispositifs d'eau avec ces ouvertures favorisent le refroidissement par évaporation lorsqu'ils contribuent à hydrater l'air et réduire sa température (Abdulkareem, 2016).

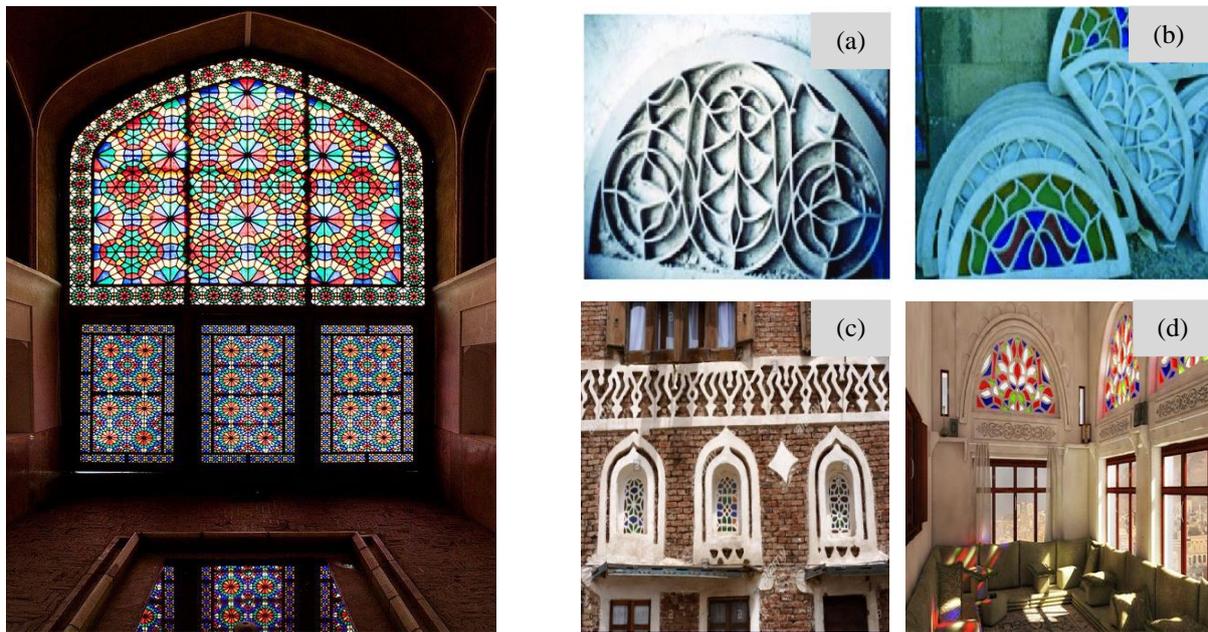


Figure I.33: Ouvertures donnant sur le patio (Yazd) (Maleki, 2011) ; Figure I.34 : Le Qamariya : (a), (b) Qamariya construite de gypse et d'albâtres colorés ; (c) Vue de Qamariya de l'extérieur ; (d) Vue de Qamariya de l'intérieur (Attia, 2020)

#### I.3.6.1. Les Moucharabiehs :

Le moucharabieh est une sorte d'ouverture ; utilisée dans l'architecture traditionnelle des constructions des villes arabes des régions chaudes du Moyen-Orient ; construit dans les murs extérieurs dans lequel est fixé un paravent en treillis du bois tourné sous forme de petits pores (Bagasi & Calautit, 2020). Il a pour fonction de fournir une ventilation naturelle des édifices lorsque la surface réduite du maillage sert à filtrer les rayons solaires tout en assurant l'accélération du passage du vent et contribue à augmenter le flux d'air ce qui garantit la climatisation, l'aération et le refroidissement à l'intérieur (Figure I.35.a). En revanche, il assure un éclairage naturel de bonne qualité sans augmenter la température à

l'intérieur puisqu'il empêche la pénétration de la lumière projetée directement sur la pièce accompagnée de la chaleur excessive (Khan, 2015). De plus de cette fonction climatique, le moucharabieh assure l'intimité de la vie privée suivant le mode de vie de ces régions puisqu'elle permet aux habitants de voir l'extérieur sans être vus confortablement (Fathy, 2010). Également, le Rowshan est une autre structure architecturale traditionnelle qui est une déclinaison du moucharabieh et il a les mêmes fonctions climatiques et sociales (Figure I.35.b). Donc le moucharabieh et le Rowshan présentent des dispositifs de filtrage bien élaboré permet d'offrir une ventilation, un éclairage naturelle et l'intimité avec une visibilité confortable sur l'extérieur. Ainsi, ces dispositifs architecturaux possèdent un aspect esthétique d'embellissement des façades des édifices (Khan, 2015). La figure I.36 montre le principe de fonctionnement du Moucharabieh.



Figure I.35 : (a) vue de Rowshan dans la vieille ville de Djedda (Khan, 2015) ; (b) vue de Moucharabieh de l'extérieur en Égypte (De Xuan & Zhe, 2016)

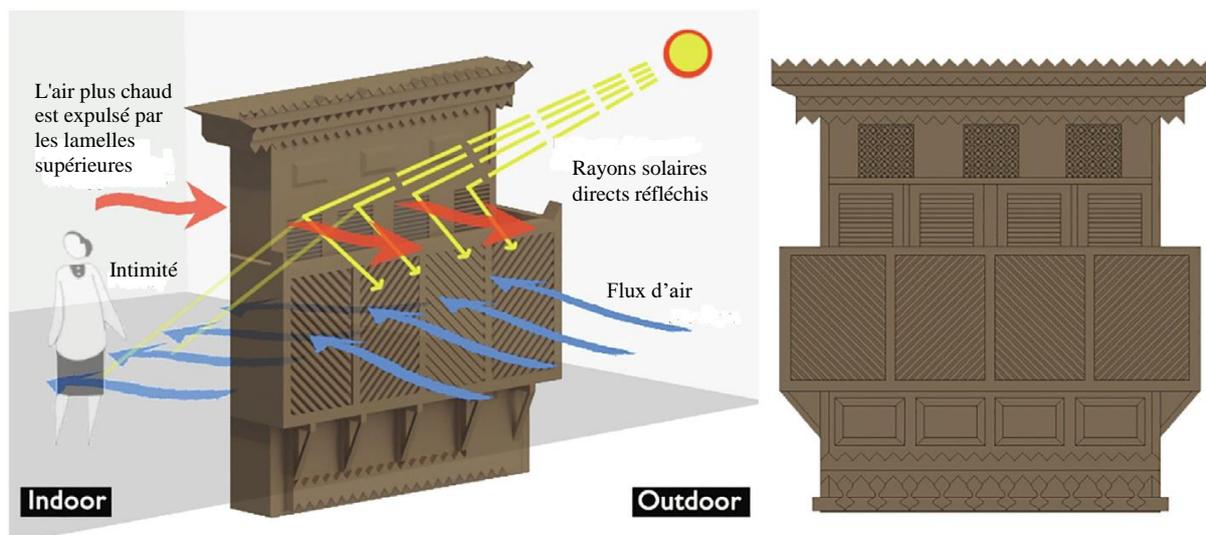


Figure I.36 : Schéma d'un Moucharabieh montrant ses caractéristiques et ses principales fonctions (Bagasi & Calautit, 2020)

### I.3.6.2. Les claustras et percements :

De plus de l'utilisation des moucharabiehs, dans les régions chaudes, il existe les claustras qui sont de petits percements et trous hauts dans les murs des façades qui sert aérer les espaces et laisser pénétrer la lumière. De même façon, en Algérie, les habitations des régions arides ont été construites avec petites ouvertures qui donnent sur la rue ou sur la cour pour garantir l'ombrage et la lumière tout en réduisant le gain de chaleur (Bouchair et al., 2013). Par exemple, dans le Ksar de Tafilelt dans la vallée du M'zab, des claustras et des trous sont prévus sur les murs des façades et munis de protection solaire peinte en blanc afin de réfléchir les rayons solaires intenses et limiter le flux de chaleur, tout en assurant l'éclairage naturel et l'intimité. La figure I.37 illustre les claustras et trous d'aération dans la vallée.

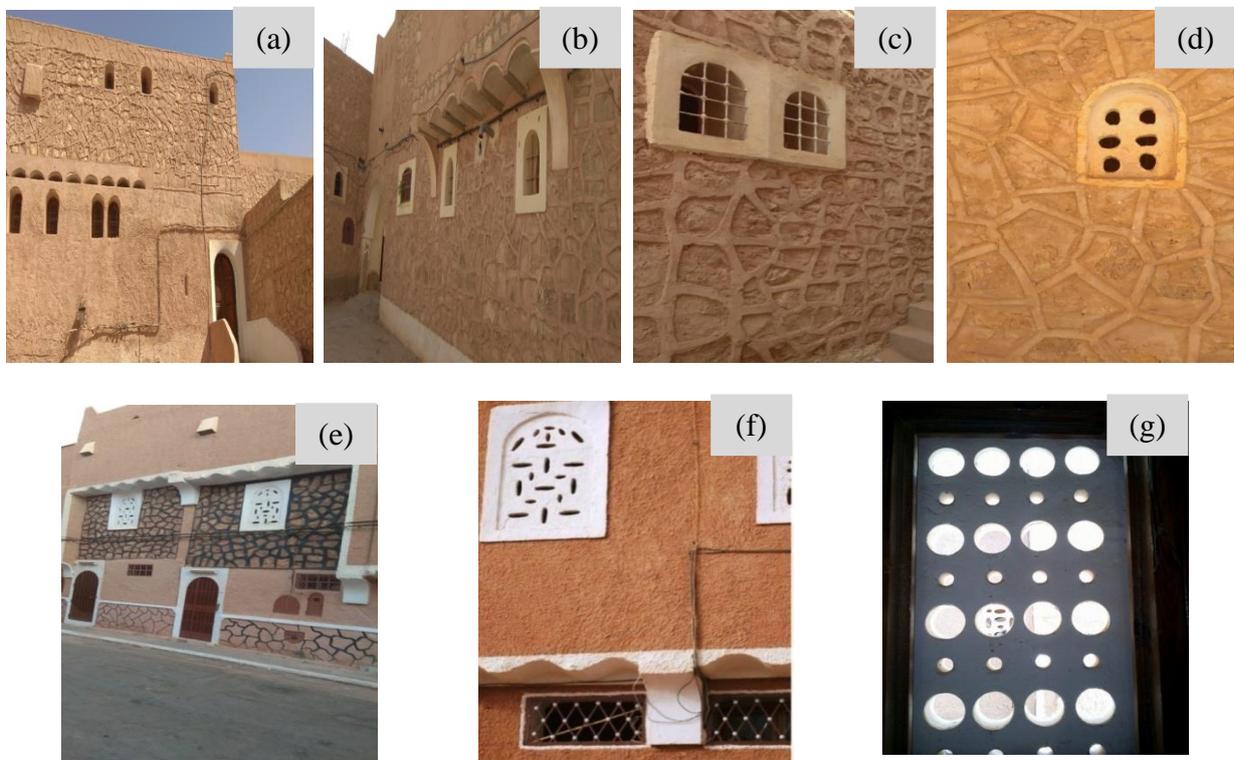


Figure I.37 : (a), (b), (c), (d) percement de ventilation dans le Ksar de Tinemmirine ; (e), (f) vue des claustras de l'extérieur dans le Ksar de Tafilelt ; (g) vue de l'intérieur (Auteur, 2018)

### I.3.7. Couleur de l'enveloppe :

La couleur de l'enveloppe d'un bâtiment a un effet remarquable sur les performances thermiques, le gain de chaleur et la température ambiante intérieure. L'utilisation des couleurs claires dans les édifices des régions chaudes et arides contribue à réduire les températures intérieures ; ce qui influe positivement sur les besoins en climatisation (Sayigh, 2019; St Clair, 2009). Plusieurs recherches dans le monde ont démontré que l'utilisation des couleurs

claires sur l'enveloppe a un effet significatif sur le rendement énergétique (Givoni, 1998b). Dans le cas des surfaces blanches, la quantité du rayonnement solaire réfléchi est de 80% par rapport aux surfaces noires qui sont de 20%. Les surfaces blanches ont la capacité de réfléchir une grande partie du rayonnement solaire ce qui réduire la quantité absorbée que les surfaces sombres. Ces caractéristiques servent à minimiser le transfert de chaleur vers l'intérieur des bâtiments par conduction et à l'air intérieur par convection (St Clair, 2009). Cette technique a montré son efficacité surtout dans les conditions des climats chauds lorsqu'elle est rentable sur le plan énergétique pour réduire considérablement la consommation d'énergie (Cheng, Ng, & Givoni, 2005; Givoni, 1994, 1998a). Parfois, l'utilisation des couleurs moyennement claires sur quelques surfaces des murs sélectionnés de l'enveloppe et des éléments saillants peuvent être finis par des couleurs plus foncées, pour éviter l'éblouissement tout en assurant l'ombre sur les surfaces de couleur claire (St Clair, 2009). Plusieurs exemples des constructions dans les climats chauds apparaissent avec des couleurs blanches ou autres couleurs claires démontrent son efficacité à réduire les gains de chaleur internes et par conséquent assure le confort aux usagers (Figure I.38.a, b). Dans les Ksour de la vallée du M'Zab, on remarque l'utilisation des couleurs claires comme le marron qui est la couleur de la terre utilisée pour construire leurs établissements dont l'objet est de conserver l'état naturel de la couleur des matériaux locaux (Figure I.38.c).

Notre travail s'intéresse à développer par la suite l'utilité de cette stratégie pour assurer une haute performance thermique.

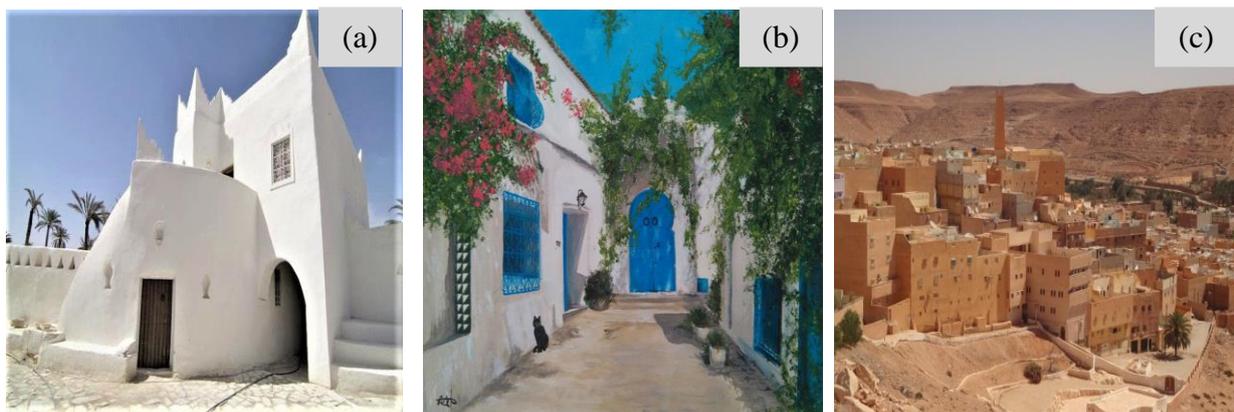


Figure I.38 : Couleur claire de l'enveloppe : (a) Couleur blanche de l'enveloppe d'une maison traditionnelle à Ghadamès en Libye (Shibub, 2016) ; (b) Photo de maison peinte en blanc et bleu dans le village de Sidi Bou Saïd sur la Méditerranée à Tunis (<https://guide-voyage-tunisie.com/sidi-bou-said>) ; (c) Couleur brute de terre des maisons mozabites (Auteur, 2018)

### I.3.8. Les toitures :

La conception de la toiture est un facteur primordial qui peut influe significativement sur le confort thermique et le rendement énergétique des bâtiments. Dans les villes compactes des régions à climat chaud et aride, lorsque la toiture est la surface qui reçoit le plus irradiations solaires, elle doit être bien conçue pour protéger l'intérieur. En été, la durée d'exposition aux rayons solaires agressifs sur la toiture est importante et s'étale sur plusieurs heures de la journée. Une part des apports thermiques sont provient des conditions extérieures en été et des déperditions thermiques en hiver, ce qui rend les pièces des niveaux supérieurs des maisons plus inconfortables que les pièces des autres niveaux. Pour cela, l'amélioration des propriétés thermiques de la toiture est prédominante pour assurer le confort thermique. Plusieurs techniques ont été faites pour résoudre ces problèmes : toiture-terrasse (Figure I.39.a), voûtes, coupoles, etc. (Figure I.39. b). L'objet principal de notre travail s'articule autour ce sujet. Dans les parties suivantes, on va détailler les toitures et ses effets sur le confort thermique intérieur.

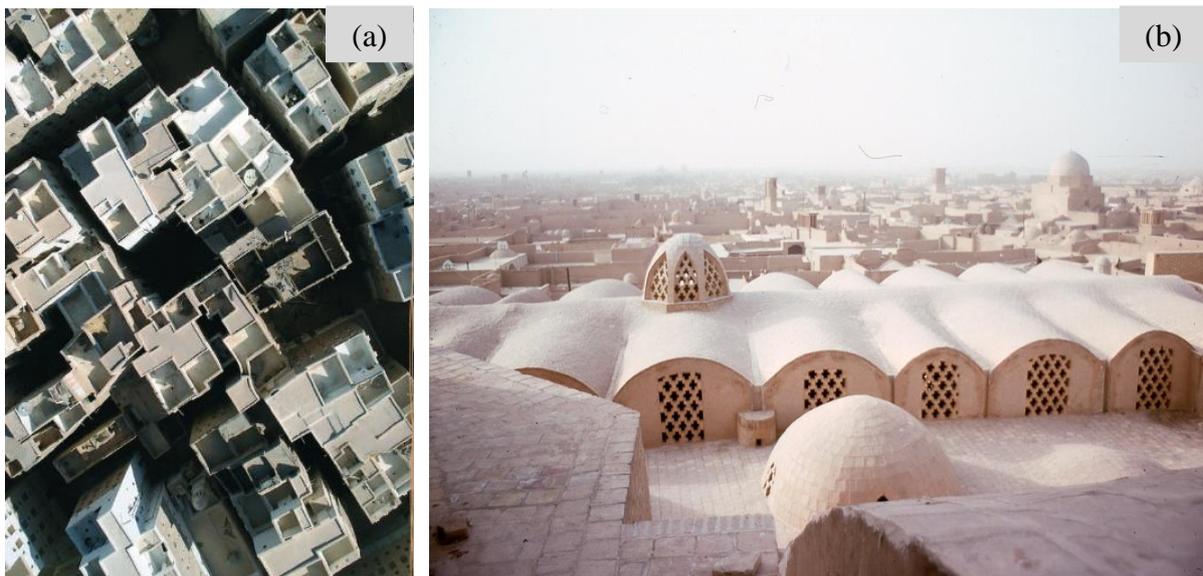


Figure I.39 : (a) Terrasse des maisons de la ville de Shibam (Hadhramaut, 2016) ; (b) Toit voûté avec fenêtres croisées dans la ville de Yazd (<https://dwarchive.com/archive/vaulted-roof-cross-windows-yazd-city>)

#### I.4. L'architecture traditionnelle, entre hier et aujourd'hui : la valorisation des pratiques d'adaptation traditionnelle vers une architecture bioclimatique :

Les techniques découvertes dans l'architecture traditionnelle peuvent jouer un rôle prépondérant dans le développement d'une architecture bioclimatique, en raison de plusieurs tentatives développées récemment pour adopter un modèle de construction passive selon des critères bioclimatiques dans les régions à climat chaud et aride. Selon les bases de l'architecture bioclimatique, la relation entre le bâtiment, le site et le climat vise à réduire l'impact environnemental (Salkini et al., 2017) et améliore la performance thermique des bâtiments avec réduction des effets de gaz à effet de serre sur la nature. D'autre part, l'analyse des méthodes traditionnelles montre l'efficacité de ses stratégies pour assurer le confort thermique et réduire les besoins en énergies. Donc, l'étude, l'analyse et l'inspiration des stratégies de l'architecture traditionnelle présentent des solutions efficaces à adopter pour développer une architecture bioclimatique qui respecte l'environnement. Dans ce sens, plusieurs tentatives sont développées dans le monde pour créer des villes contemporaines sur la base des pratiques d'adaptation traditionnelle qui assurent un mode de vie moderne respectant l'environnement tout en assurant le confort aux usagers. La ville de Masdar, à Abu Dhabi en Émirats arabes unis, est considérée comme un projet écologique, bioclimatique important des villes arabes. Cette ville a développé plusieurs stratégies passives pour améliorer les conditions de vie dont l'objet est de réaliser une ville à zéro carbone suivant l'inspiration et le développement des solutions traditionnelles. Une technologie universelle a été conçue dans la ville de Masdar pour soutenir une architecture locale qui s'appuie sur les approches traditionnelles (Abuorfi & Wafi, 2020). Par exemple, des panneaux photovoltaïques passifs sont adoptés au-dessus des toitures comme des éléments d'ombrage, et de stratégie de production d'électricité par l'énergie solaire (Figure I.40.a). Ainsi, la conception de l'enveloppe extérieure correspond à des façades et des toitures ventilées pour que les masses aillent refroidir la nuit (Figure I.40.b). Ces doubles toits jouent un rôle essentiel pour minimiser les rayonnements solaires absorbés par les bâtiments. L'intégration de toiture végétale avec double toit pour fournir le passage d'air au-dessus du toit final (Salkini et al., 2017). Aussi, l'utilisation des Moucharabiehs modernes sur les façades pour assurer l'éclairage, la ventilation naturelle et l'ombrage (Figure I.40.c). Également, en Algérie la ville de Tafilelt conçue début des années 1994 par l'association Amidoul se base sur l'inspiration des méthodes d'adaptations traditionnelles des anciens ksour pour achever une ville écologique contemporaine (Figure I.41). Donc, la valorisation

des méthodes traditionnelles présente une solution efficace et prometteuse vers la création d'une architecture bioclimatique respectueuse de l'environnement.

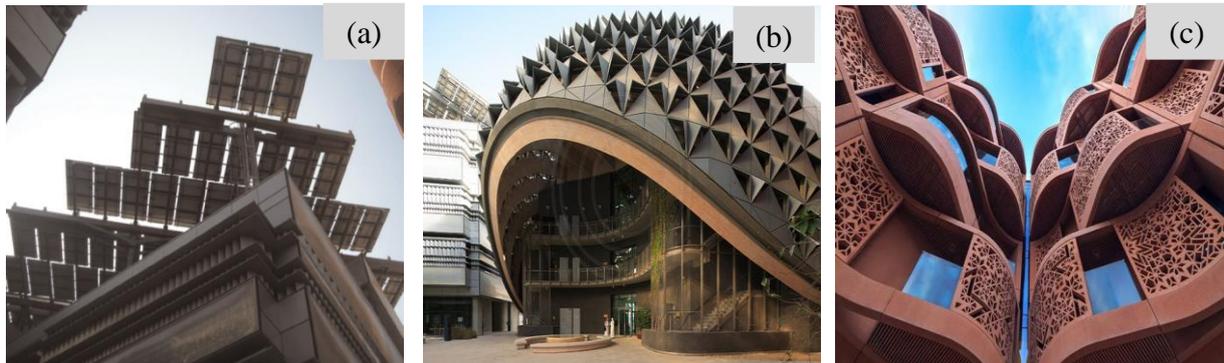


Figure I.40 : La ville de Masdar : (a) Panneaux solaires sur toiture des bâtiments (Gul, Hafiz, & El-Basel, 2021) ; (b) des toits ventilés de l'institut des sciences et technologies, (c) Vue des façades ventilées avec des moucharabihs moderne pour créer l'ombre sur les façades (Bagasi, Calautit, & Karban, 2021)

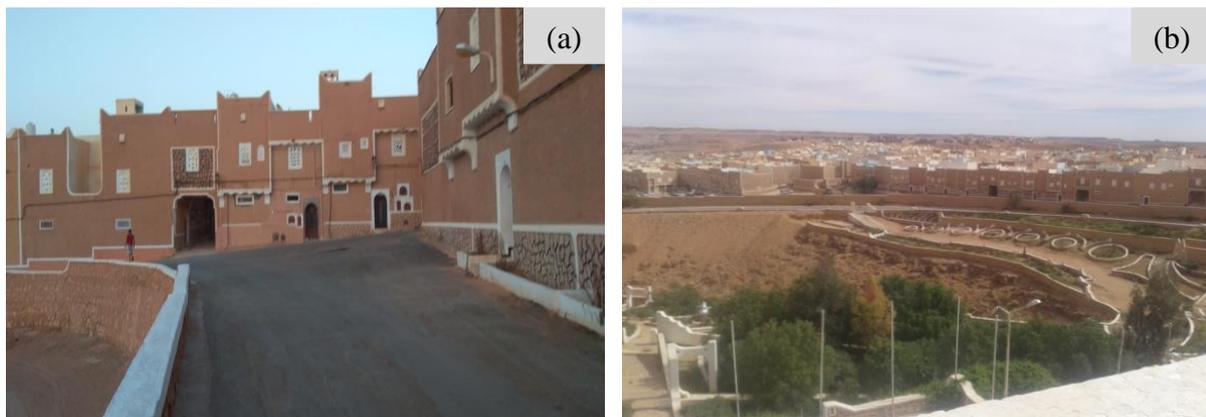


Figure I.41 : Ksar de Tafilelt : (a) vue à l'intérieur du Ksar ; (b) vue panoramique (Auteur, 2018)

## I.5. L'architecture traditionnelle et la durabilité :

L'analyse des méthodes d'adaptation de l'architecture traditionnelle nous rappelle de l'architecture durable lorsqu'elles partagent les mêmes principes, caractéristiques et objectifs. L'architecture durable s'inspire ses principes de développement durable qui s'appuie sur trois piliers : social, économique et environnemental pour assurer un développement qui répond aux besoins des générations actuelles sans compromettre les capacités des générations futures (rapport Brundtland, 1987) tout en respectant de l'environnement. Également, l'architecture traditionnelle représente une architecture qui utilise les ressources disponibles localement pour répondre aux besoins locaux sans les épuiser. L'objet est d'assurer un confort humain

sans grande consommation énergétique. Puisque l'architecture traditionnelle est faite pour les peuples autochtones, elle respecte les traditions et les coutumes locales vues dans les formes architecturales et le mode de vie quotidienne, et cela représente le pilier social que l'architecture durable veut, l'achever. Ensuite, puisque l'architecture traditionnelle se base essentiellement sur l'utilisation des matériaux locaux, cela réduit les charges de fabrication et de transport, et elle augmente la performance thermique des bâtiments et ses rendements énergétiques lorsque ces matériaux locaux (pierre, terre) ont démontré ses hautes performances thermiques à atteindre un confort thermique agréable. Cela reflète le pilier économique de l'architecture durable qui vise à minimiser les couts de constructions par l'encouragement de l'utilisation des matériaux locaux à haute performance thermique. Enfin, l'aspect environnemental traduit par l'architecture traditionnelle reflète sa capacité indigène à respecter la nature par les formes compactes des bâtiments, les matériaux de construction, les stratégies passives de refroidissement qui affirment sa durabilité à travers le temps. De même- façon, l'architecture durable s'articule sur le pilier environnemental qui est primordial lorsqu'il garantit un environnement sain pour le bien-être et la survie de la planète (Figure I.42).

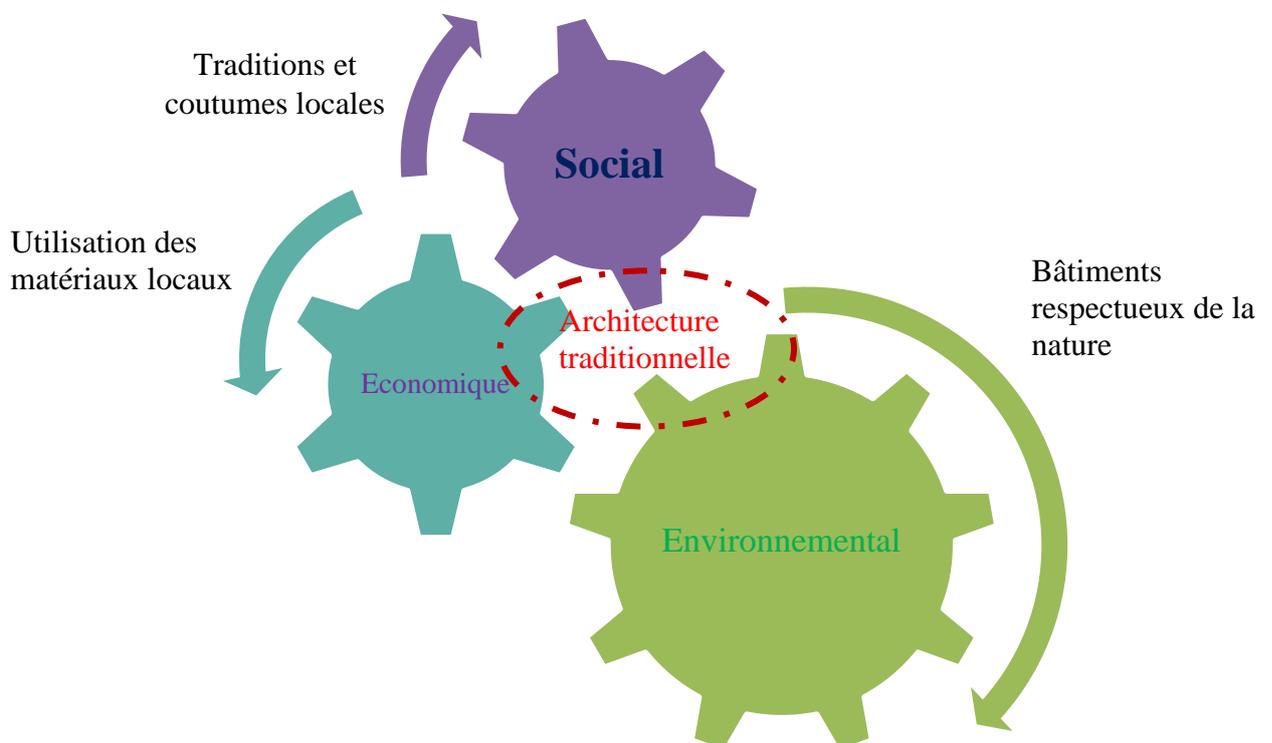
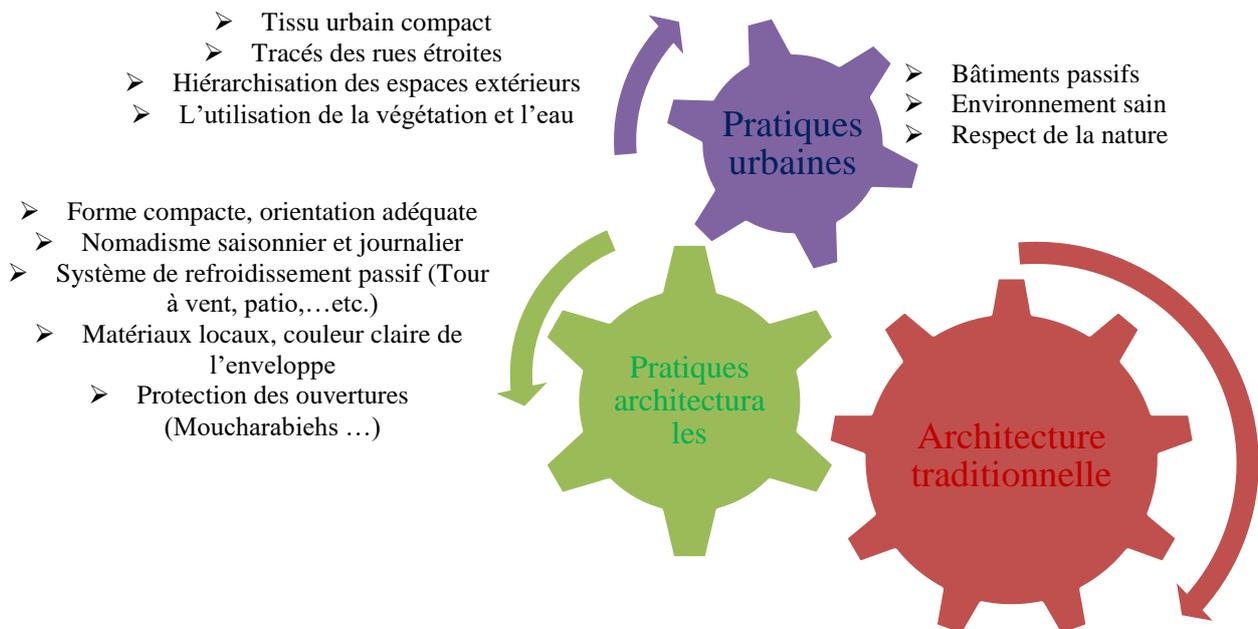


Figure I.42 : Schéma montrant la relation entre l'architecture traditionnelle et durable (Auteur, 2021)

## Conclusion :

Ce chapitre a traité l'architecture traditionnelle et ses pratiques d'adaptation urbaines et architecturales pour assurer le confort thermique, particulièrement dans les régions à climat chaud et aride. Les stratégies découvertes dans cette architecture ont montré ses performances à soutenir une architecture respectueuse de l'environnement qui répond aux attentes locales des peuples. Les références culturelles, les normes sociales et les traditions locales avec l'utilisation des ressources disponibles sur site et les pratiques vulnérables liées au climat local sont des fondements essentiels de l'architecture traditionnelle. L'analyse des stratégies utilisées dans cette architecture dans diverses régions du monde a montré ses performances environnementales qui sont la base de l'architecture durable.

Les pratiques traditionnelles traitées dans ce chapitre présentent des sources d'inspiration pour développer une architecture durable. L'architecture traditionnelle constitue un système intégré qui relie les conditions climatiques, sociales et économiques entre les structures urbaines et les environnements intérieurs. Les exemples mentionnés dans ce chapitre montrent les fortes adéquations des stratégies appliquées dans l'architecture traditionnelle à créer des environnements confortables aux peuples autochtones. Donc, cette architecture restera un modèle unique qui nous donne des leçons à maintenir un équilibre entre les fonctions humaines, les valeurs sociales, économiques et environnementales avec garantie du confort humain.



**Chapitre 02 :**  
**La toiture et la performance thermique**  
**dans les régions**  
**à climat chaud et aride**

## Introduction :

Les toitures des édifices ont été évoluées dans le temps suivant l'évolution de l'être humain et de son environnement. La toiture est l'élément qui reçoit le plus d'irradiations solaires surtout en été dans les zones à climat chaud et aride. La protection de la toiture est donc une nécessité primordiale pour assurer le confort thermique intérieur. Aussi, la toiture joue un rôle fort en matière d'identité locale. Elle donne une esthétique aux bâtiments, puisque selon la matière, la forme et la couleur de revêtement, la toiture peut apporter la touche d'originalité et de personnalisation aux édifices.

La réalisation des toitures exige le bon choix de types et de modèles adaptés aux besoins locaux. Ainsi, le choix dépend à la spécificité du lieu de bâtiment respectant les exigences autochtones et les propriétés architecturales nécessaires. Les caractéristiques des toitures peuvent être définies à partir de base climatique. Comme il est mentionné dans le premier chapitre que l'architecture traditionnelle reflète les caractéristiques du climat, comme la réalisation des toitures. Le développement des méthodes de construction avec l'apparition de nouveaux matériaux de construction a conduit à l'apparition de plusieurs types de toitures avec différentes formes de différents composants. En pierre, en terre, en palmier, en bois, en béton ou autre matière, la toiture reste une composante importante pour nos constructions. Plus de leur aspect esthétique, ces couvertures ont traversé l'histoire humaine lorsqu'elles agissent considérablement sur l'état de confort thermique suivant les conditions locales en termes du climat et d'habitat. On distingue deux grandes familles : les toitures conventionnelles et les toitures traditionnelles. Les toitures conventionnelles ou traditionnelles présentent un véritable modulateur qui peut contrôler l'état de confort humain à l'échelle du bâtiment et même à l'échelle urbaine. Aussi, la performance thermique de la toiture peut influencer considérablement la consommation énergétique des bâtiments et la volonté de minimiser les températures intérieures.

Dans ce sens, le chapitre suivant s'intéresse à faire une étude approfondie sur l'importance de la toiture dans les édifices, ses fonctions, les différents types de toitures conventionnelles (normalisées) et non conventionnelles (traditionnelles) des régions chaudes et arides dans le monde et en Algérie, spécialement dans la vallée du M'Zab : le Ksar de Béni Isguen, le cas d'étude de cette recherche. Également, ce chapitre va exposer la performance thermique de la toiture, et son intérêt à garantir le confort thermique des édifices.

## II.1. Définition et description :

La toiture ; comme certains l'appelle la cinquième façade ; est la surface qui couvre la partie supérieure d'un bâtiment. Principalement, elle permet de protéger l'intérieur contre les facteurs extérieurs et les conditions climatiques comme les intempéries, pluies, neige, vent, vent de sable, etc. La stabilité, la sécurité, l'étanchéité, la résistance mécanique et physique, la légèreté, l'écoulement des eaux pluviales et l'esthétique sont les propriétés essentielles recherchées dans la réalisation d'une toiture.

## II.2. Fonctions de la toiture : Une toiture, pourquoi ?

Lorsque la toiture est une couche entre le sol et le ciel, elle peut modifier les caractéristiques du lieu au-dessous. Elle possède plusieurs fonctions distinctives tant d'un point de vue thermique, physique, environnemental et psychologique qui assurent son importance dans l'édifice.

### II.2.1. Fonction physique :

Principalement, la toiture présente un abri qui protège les habitants face aux contraintes climatiques telles que les tempêtes, pluies, vent et le rayonnement solaire qui vient du ciel. La toiture doit protéger l'intérieur des précipitations ou elle évacue la pluie et la neige vers l'extérieur grâce à une pente qui aide à accélérer l'évacuation de l'eau tout en évitant les infiltrations vers l'intérieur. Cela sert à créer un environnement physique sain qui augmente la durée de vie de l'édifice. À titre d'exemple, dans les climats humides et froids, lorsque les précipitations sont de fortes quantités sur longue période de l'année, la forme de la toiture est construite selon ces conditions. Généralement, elle prend la forme inclinée dont elle sert à évacuer les pluies et la neige accumulée sur la surface de la toiture pour la protéger et assurer la stabilité structurelle. De plus des précipitations, les rayons solaires aussi constituent un danger sur la toiture puisqu'elle est exposée et soumise à des échanges radiatifs entre l'intérieur et l'extérieur. Pour cela, l'état physique de la toiture doit être protégé des agressions solaires. La forme, les composants de la toiture doivent être développés selon le type du climat, les ressources et les matériaux disponibles localement. La stabilité structurelle, la résistance mécanique et thermique de la toiture doit être accomplie pour assurer la protection de l'intérieur et la sécurité des résidents.

### II.2.2. Fonction thermique :

Lorsque la toiture est la surface la plus exposée aux conditions extérieures climatiques, la bonne conception de celle-ci influe directement sur l'état de confort thermique intérieur et le rendement énergétique. Dans les climats chauds et arides, la fonction thermique principale

de la toiture est de minimiser le stress thermique externe projeté sur la surface et par conséquent réduire la chaleur transmise vers l'intérieur. Le contrôle thermique intérieur nécessite une bonne performance thermique de la toiture par rapport aux paramètres météorologiques pertinents. Les propriétés thermiques de la toiture sont déterminées par la combinaison entre la masse et l'inertie thermique des matériaux, l'emplacement de l'isolant, la texture et la couleur de la surface externe (Hwaish, 2015), etc. Ces propriétés influent sur l'échange de la chaleur, la conservation de l'énergie qui permettent à atténuer les températures ambiantes et opératives intérieures dans les édifices non climatisés et réduire les charges de refroidissement en été et de chauffage en hiver et maintenir le confort thermique. Par exemple, l'isolation de la toiture par un bon isolant minérale ou organique est un facteur essentiel, puisque de grands pourcentages des pertes de chaleur se font par la toiture. Le bon choix de l'isolant sert à optimiser la consommation d'énergie et assurer des économies importantes de facture de refroidissement et de chauffage (Sadineni, Madala, & Boehm, 2011). La forme de la toiture influe également sur l'état de confort intérieur, par exemple quand la toiture est une coupole ou une voûte, plus de son rôle thermique à repousser les rayons solaires et optimiser les espaces de vie intérieure, elle sert à gagner une surface habitable et une hauteur supplémentaire. Donc, la toiture fonctionne comme un parapluie protégeant et fournissant l'ombre au bâtiment.

### II.2.3. Fonction environnementale :

Les changements climatiques récents a conduit à de nouvelles actions et méthodes de constructions plus rationnelles envers le secteur du bâtiment pour atteindre des environnements respectueuses de la nature. Le confort thermique extérieur et intérieur et la consommation d'énergie de l'environnement bâti influent considérablement sur les phénomènes de l'îlot de chaleur urbain et l'augmentation de l'effet de serre. La surchauffe élevée concentrée sur les surfaces des toitures peut affecter négativement sur ces phénomènes lorsque ces surfaces horizontales sont les plus sensibles aux conditions climatiques agressifs surtout dans les climats rudes. Pour cela, la fonction environnementale de la toiture est très importante lorsqu'elle permet à protéger l'environnement intérieur de l'édifice de l'impact des phénomènes climatiques et les variations extérieures (Hwaish, 2015). Les propriétés thermiques des toitures des bâtiments dépendent des conditions intérieures des gains de chaleur requise, des changements climatiques extérieurs dominants et du choix de matériaux de construction, de l'isolation et de la technique constructive (Al-Sanea, 2002). La bonne conception de la toiture conduit à contrôler les émissions de gaz à effet de serre et réduire les émissions de Carbone néfastes sur la nature. Aussi, le bon choix de type de toiture conduit à

une réduction majeure de l'amplitude et du pic maximum de la température sur la surface externe et sur la surface interne (Mazzeo & Kontoleon, 2020). Les toits verts, les toits froids, les voûtes, les coupoles, les systèmes de refroidissement par évaporation des toits sont des exemples de toits éco énergétique qui mieux assure le confort thermique et des économies d'énergie chacun selon le type du climat sur le plan architectural et urbain (Sadineni et al., 2011) pour répondre aux objectifs environnementaux. Cependant, une démarche de conception durable précise les toitures traditionnelles est nécessaire pour limiter l'utilisation de ces technologies techniquement complexes et coûteuses (Mazzeo & Kontoleon, 2020) tout en améliorant les performances thermiques de ces toitures.

#### II.2.4. Fonction psychologique :

Plus de sa fonction de protection, la toiture a une âme qui peut agir sur l'état psychique des résidents. Construire une toiture sert à définir les limites d'un espace. Au-dessous de cette toiture, les fonctions intimes des propriétaires se déroulent. La toiture présente la tête de la maison qui symbolise la pensée, la tradition avec coutume et l'aspiration du propriétaire. La toiture donne la sensation de sécurité puisque les peuples se couvrent son lieu de vie et sa tête quand ils sentent de menaces autour d'eux. Aussi, une couverture en haut de l'abri augmente le sentiment de sécurité face à n'importe quel danger venant d'en haut. Cela signifie que la toiture joue le rôle d'un casque qui protège la tête de l'extérieur avec une psyché détendue (Lopez-Besora, Coch, & Pardal, 2019). Certainement, la forme, les composants et la couleur de la toiture influent sur l'état de l'habitant et reflètent la façon de construire. La couleur de la face intérieure et extérieure ou même de l'enveloppe en général traduit l'état des émotions des résidents. Par exemple, la couleur blanche plus de son rôle thermique, elle a l'effet de créer un sentiment de joie, de satisfaction et de repos, ce qui revient positivement sur la psychologie du propriétaire. Par exemple, la toiture verte a des avantages psychologiques comme le plaisir esthétique et la concentration améliorée de la vision de sa beauté végétale de la couleur verte (Williams et al., 2019). Elle offre le bien-être humain avec la réduction du stress et de l'humeur négative, un bon contrôle de l'attention et un renouvellement de sensation de vitalité (Hartig, Mitchell, De Vries, & Frumkin, 2014). Regarder ou vivre sous une toiture verte favorise un bon contrôle de l'attention (Lee, Williams, Sargent, Williams, & Johnson, 2015). La figure II.1 présente un schéma résumant les fonctions d'une toiture.

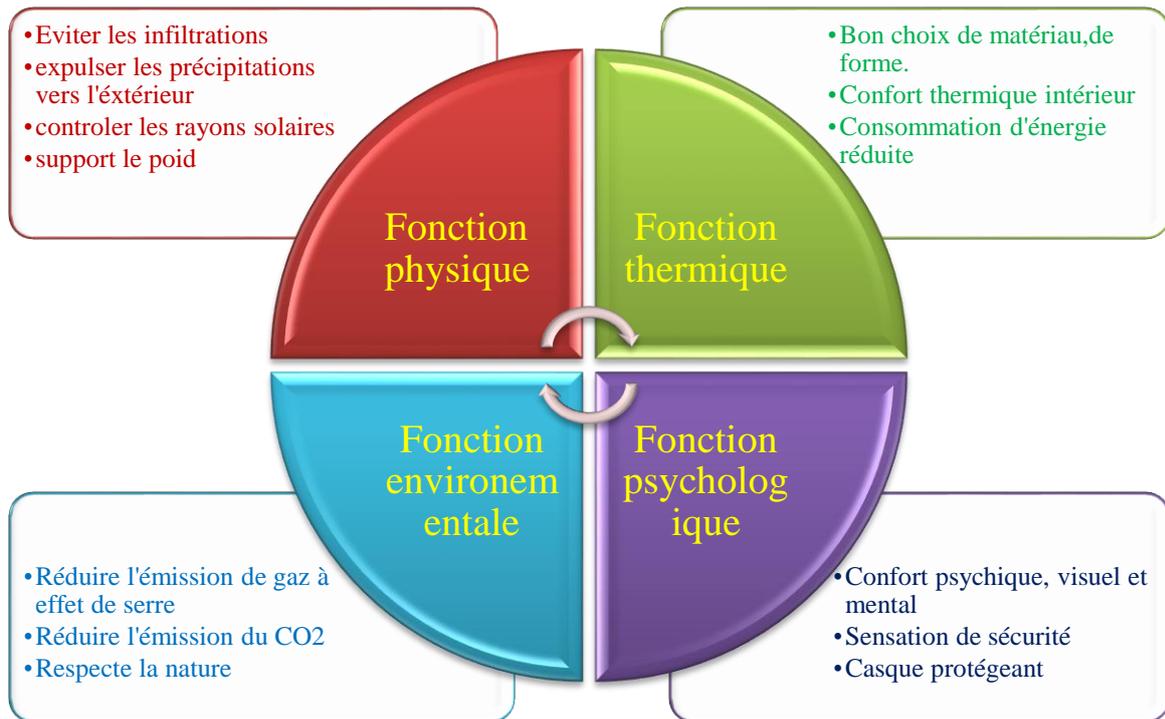


Figure II.1 : Schéma résumant les fonctions d'une toiture (Auteur, 2021)

### II.3. Types de toitures :

La toiture peut prendre plusieurs types avec différentes formes et composants, et peut être constituée de matériaux variés avec différents degrés de complexité. La réalisation des toitures nécessite la prise en compte de plusieurs facteurs à savoir ; le choix de modèles et de types adéquats aux besoins et aux spécificités régionales et locales. Le choix dépend aussi, du lieu d'habitation ainsi que des caractéristiques architecturales désirées. Il existe plusieurs types de toitures qui se différencient d'une région à l'autre et d'un climat à l'autre. Plusieurs classifications qui peuvent être étudiées, dont on distingue deux grandes familles : conventionnelles (normalisées) et non conventionnelles (traditionnelles). La classification se fait selon le type de climat, selon la forme, les matériaux de construction, etc.

#### II.3.1. Les toitures conventionnelles :

Au fur et à mesure des dernières décennies, l'évolution de l'architecture a ramené de nouvelles méthodes de constructions et de nouvelles tendances et approches architecturales. Aussi, l'émergence de nouveaux matériaux et de nouvelles techniques de construction ont conduit à l'apparition de constructions contemporaines techniquement modernes et culturellement ambiguë qui se différencient de celle de l'architecture traditionnelle. Ces derniers ont importés de nouvelles formes, composants et techniques de mise en œuvre des toitures.

### II.3.1.1. La toiture plate ou toiture-terrasse :

Comme le nom indique ; la toiture-terrasse constitue une toiture de forme plate. La toiture-terrasse a été l'un des cinq principes de l'architecture moderne développée par Le Corbusier dans le dernier siècle (Rüegg, 2016; Santo, 2016). La toiture plate contient un seul pan sous forme de terrasse et elle n'a pas besoin de charpente. Comme élément porteur, il suffit d'un simple support (Ching, Onouye, & Zuberbuhler, 2013). La toiture plate comporte un revêtement étanche pour éviter les infiltrations d'eau des précipitations, un écran-vapeur qui sert à protéger contre la pénétration de l'humidité, un écran d'indépendance et d'un isolant thermique (Santo, 2016). La toiture plate doit comporter une faible pente de 1 à 2 % qui aide à faciliter l'évacuation des eaux pluviales (DeNardo, Jarrett, Manbeck, Beattie, & Berghage, 2005). La toiture plate peut être accessible (Figure II.2.a) ou inaccessible (Figure II.2.b). Dans le cas d'une toiture plate accessible, elle se transforme en terrasse comme espace de vie. La toiture-terrasse peut être aménagée en Jardin comme toiture verte. En bois, en béton, en tôle d'acier ou autre matériau, la toiture-terrasse est le type le plus utilisé à cause de sa simplicité et sa mise en œuvre. Pour la toiture plate, il existe trois types.



Figure II.2 : Toiture plate : (a) toiture-terrasse accessible ; (b) toiture plate non accessible  
(Encyclopédie libre, 2016)

II.3.1.1.1. Toiture chaude :

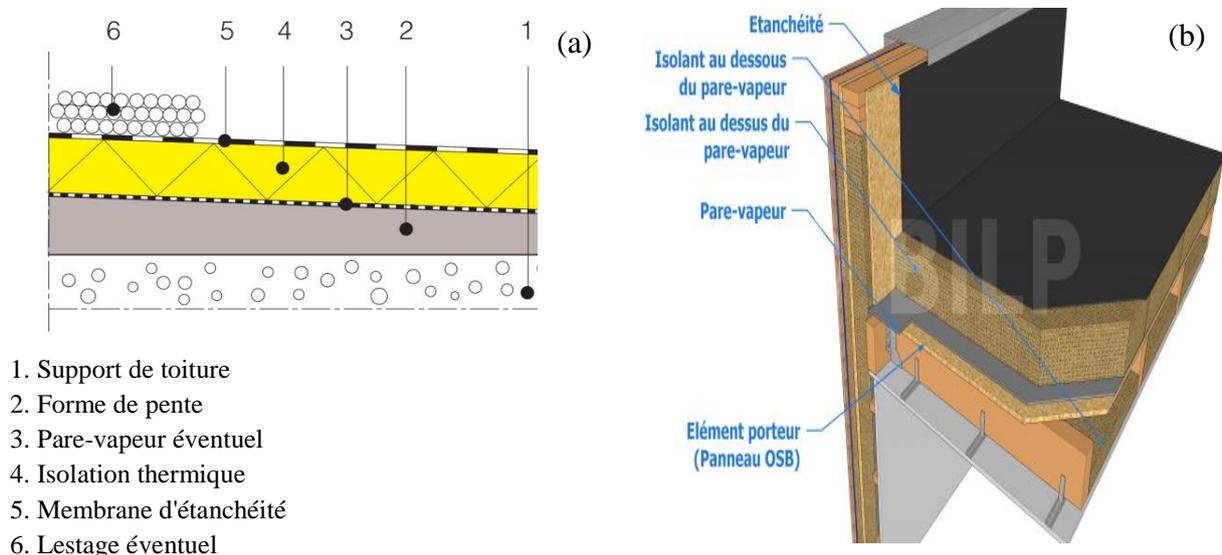
La toiture chaude est une toiture plate dont l'isolant est placé sur le support sans lame d'air entre les différentes couches. Au-dessus de l'isolant se trouve une membrane d'étanchéité qui le protège pour garder ses propriétés thermiques et un écran pare-vapeur doit souvent être placé entre l'isolant et le support (Guide pratique pour les architectes, 2013) pour protéger le support (Figure II.3). Lorsque l'isolation se fait par l'extérieur, cet isolant protège le support de fortes températures. Elle permet aussi de réduire les risques de fissures et mouvements de support. Cette technique de toiture chaude est la plus utilisée, car elle augmente l'inertie thermique du local chauffé (Mazouz, 2013) et par conséquent donne de bons résultats. Il existe deux types de toitures chaudes : toiture compacte et toiture inversée.

➤ Toiture compacte :

Dans ce cas, l'isolant thermique est placé directement sur le support dans un bain de bitume chaud. Ensuite, l'étanchéité est placée sur l'isolant en adhérence au bitume chaud (Figure II.4.a).

➤ La toiture inversée :

Dans ce cas, l'isolant thermique se trouve au-dessus de l'étanchéité et cette dernière est placée sur le support. L'isolant est lesté et mouillé par les eaux pluviales (Figure II.4.b). L'isolant protège l'étanchéité des rayons excessifs (Guide pratique pour les architectes, 2013).



1. Support de toiture
2. Forme de pente
3. Pare-vapeur éventuel
4. Isolation thermique
5. Membrane d'étanchéité
6. Lestage éventuel

Figure II.3 : Toiture chaude : (a) Schéma d'une toiture chaude (Guide, 2015), (b) coupe sur une toiture chaude (<https://toiture.bilp.fr/toiture-terrasse-12/mise-en-oeuvre/structure-bois/toiture-chaude-froide>)

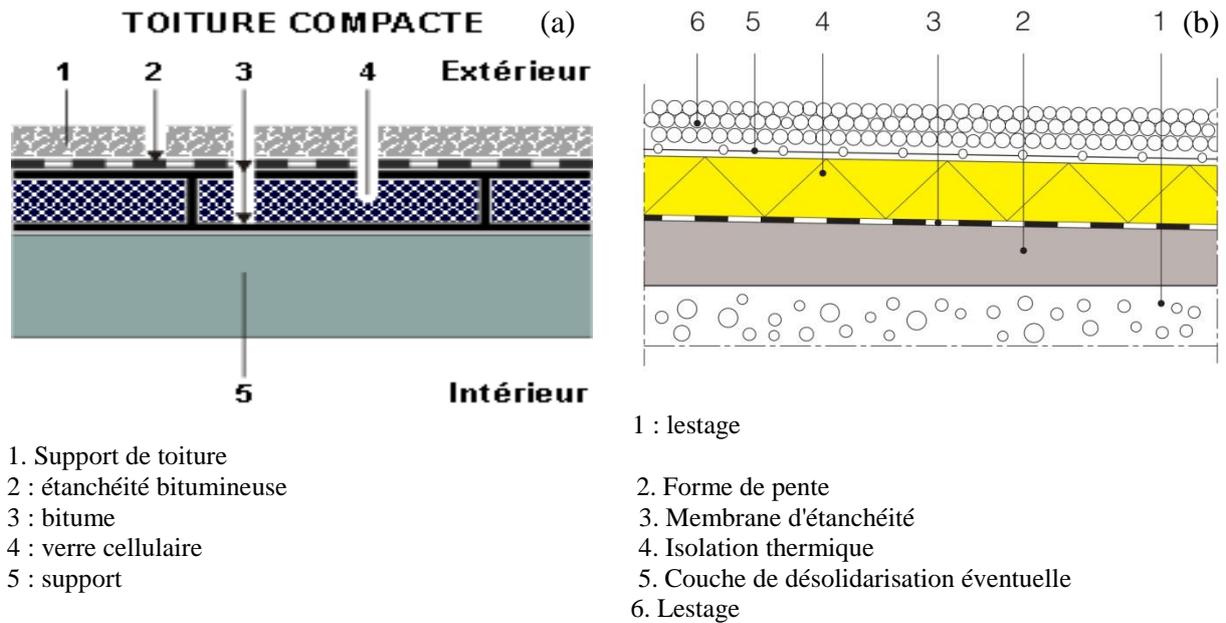


Figure II.4 : (a) schéma d'une toiture compacte (<https://energieplus-lesite.be/techniques/enveloppe7/techniques-d-isolation/toiture-plate4/toiture-chaude/>) ; (b) schéma d'une toiture inversée (Guide, 2015)

#### II.3.1.1.2. Toiture froide :

Une toiture froide correspond à une toiture plate dont l'isolant thermique est posé sous le support de l'étanchéité avec une lame d'air ventilée d'où il existe un vide entre l'isolation et le colmatage (Figure II.5). Cette technique de toiture froide est déconseillée et n'est pas utilisée actuellement, car elle peut créer des températures des matériaux plus basses à celle de l'air. Aussi, elle provoque des problèmes de condensation interne causés par les fuites d'air. Cette condensation peut gâcher les propriétés de l'isolant thermique et de réduire son efficacité et la croissance de moisissures (Guide pratique pour les architectes, 2013).

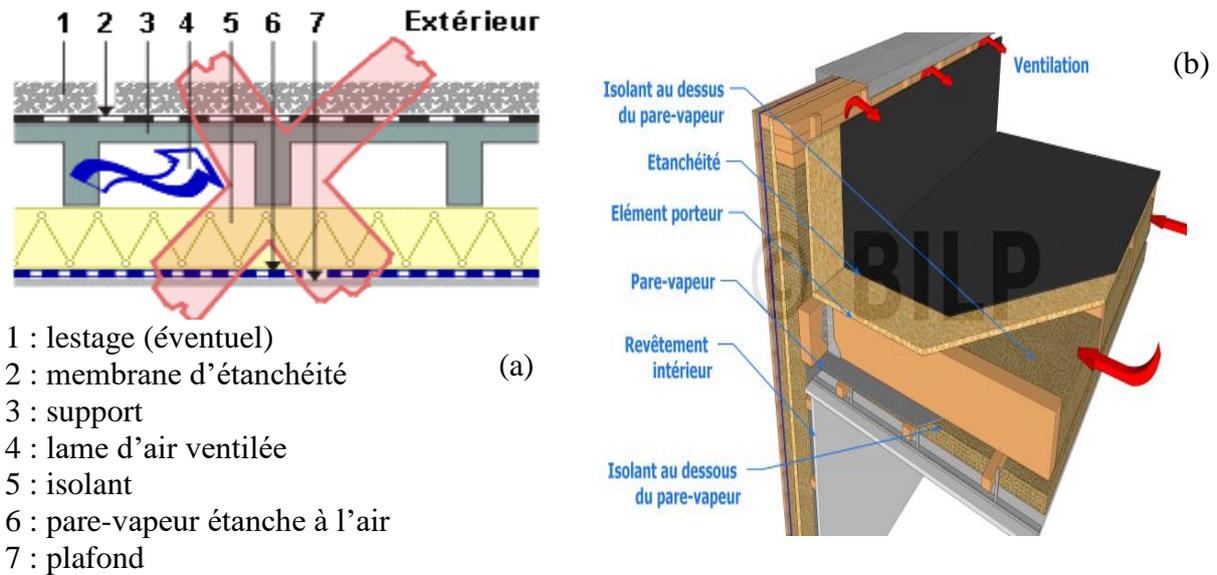
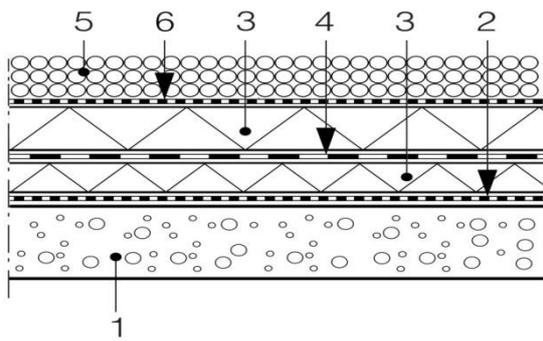


Figure II.5 : (a) schéma d'une toiture froide (<https://mobic-autoconstruction.fr/2017/05/02/isoler-sa-toiture-plate/>) ; (b) coupe sur une toiture froide (<https://toiture.bilp.fr/toiture-terrasse-12/mise-en-oeuvre/structure-bois/toiture-chaude-froide>)

### II.3.1.1.3. Toiture combinée (Toiture « DUO ») :

Elle correspond à une combinaison entre la technique de la « toiture chaude » et la « toiture inversée ». Dans cette technique, l'isolation thermique se fait en deux parties, dont l'une est sous l'étanchéité et l'autre sur elle (Guide pratique pour les architectes, 2013) (Figure II.6). Donc, cette technique se base sur la pose d'une couche d'isolation thermique sur l'étanchéité suivant la méthode de la toiture inversée combinée à une couche d'isolation thermique recouverte par l'étanchéité selon la méthode de toiture chaude (Simonsson, 2001). Généralement, cette technique est appliquée pour renforcer la performance thermique d'une toiture chaude. Aussi, elle permet de protéger la toiture des températures élevées et des condensations.

La figure II.6. (a) montre un schéma d'une toiture combinée ou DUO, (b) le collage de l'isolant avec la mise en place de la membrane d'étanchéité et (c) un lestage en gravier dans la technique de toiture inversée ou combinée respectivement.



1. Support et pente
2. Pare-vapeur
3. Isolation
4. Étanchéité
5. Couche de protection et/ou lestage
6. Protection

(a)



Figure II.6 : (a) schéma d'une toiture combinée ou DUO

(<https://www.guidebatimentdurable.brussels/fr/isolation-d-une-toiture-plate.html?IDC=2214>) ; (b) collage de l'isolant & mise en place de la membrane d'étanchéité ; (c) lestage en gravier dans la technique de toiture inversée ou combinée (Guide, 2015)

### II.3.1.2. Toiture inclinée ou en pente :

Dans les régions à climat humide à froid, la toiture inclinée est la forme la plus utilisée. Les climats humides se caractérisent par des fortes précipitations annuelles, ce que nécessite l'adoption de types de toitures adéquats qui sert à évacuer les grandes quantités accumulées (Figure II.7). La forme inclinée avec une pente supérieure à 15% est la plus populaire. Elle sert à évacuer les eaux tombant sur le toit directement pour protéger des éléments de la toiture des condensations et des problèmes de stabilité structurelle. La présence des eaux longtemps sur les surfaces de la toiture peut provoquer la dégradation des propriétés thermiques et physiques des composants de la toiture, pour cela la toiture plate est déconseillée dans les régions humides. La toiture en pente sert aussi à assurer une ventilation naturelle au bâtiment grâce à de petites ouvertures placées en haut pour minimiser les condensations.

Généralement, la toiture inclinée a un pan, deux ou plusieurs pans. Elle se compose de plusieurs éléments qui assurent l'étanchéité de la toiture.

- Les éléments d'étanchéité : qui sont des jonctions entre les différents composants de la toiture à savoir la rive (partie entre un pan et le mur), la cheminée, lucarne et petite fenêtre de toit.
- Le rempart : l'élément le plus grand de l'ouvrage, qui est la partie inclinée de la toiture

- Les éléments d'évacuation de pluies comme l'égout, descente et chenaux (Sellami-Kaaniche, 2014).

En bois, pierre, bambou ou autre matériau résistant à l'humidité ; sont utilisées pour réaliser ce type de toiture. Le bois se caractérise par sa dureté, résistant à l'humidité et aux changements de températures et chaleur. La pierre sert à relier le bâtiment en matière organique au sol naturel dans les zones qui a une humidité élevée (Engin, Vural, Vural, & Sumerkan, 2007).



Figure II.7: Toiture inclinée : (a) maison familiale danoise avec une toiture inclinée en ardoise (<https://www.cupapizarras.com/fr/actualite/10-maisons-contemporaines-toits-en-pente/>) ; (b) toit incliné de maison des Minka au Japan (Singh, 2019) ; (c) Toiture inclinée d'une maison à Canterbury, Royaume-Uni (Auteur, 2020)

### II.3.1.3. Toiture courbée (arrondie) :

La forme la plus ancienne de la toiture arrondie est la coupole, voûte, ou d'autres formes coniques. Récemment avec le développement des méthodes de construction et l'émergence de nouveaux matériaux de construction, plusieurs formes de toitures ont apparues à savoir, la forme courbée et arrondie contemporaine vue dans l'architecture contemporaine. Généralement, ce type de toiture est utilisé beaucoup plus dans les bâtiments publics que résidentielles. Néanmoins, il témoigne une large utilisation dans les habitats. La réalisation de toiture arrondie est difficile et nécessite de budgets financiers élevés à cause de la complexité de sa réalisation. La toiture arrondie se caractérise par son effet esthétique et sert à créer plus d'espace habitable. L'évolution de matériaux de construction offre l'apparition de plusieurs types de toits courbés et arrondis tels que dômes en bulbe, dôme à pans, tourelle, etc., (Szalabaj, 2014). Ces toitures peuvent être réalisées en bois lamellé collé, métal, en voile de béton, tuiles, zinc ou tôles. Ensuite, il est préférable d'isoler les toitures arrondies pour assurer le confort thermique et éviter le gaspillage d'énergie. Aussi, il faut assurer une ventilation naturelle par l'installation de petites ouvertures en haut et en bas de toit pour assurer l'entrée et la sortie d'air frais afin d'éviter l'humidité et les moisissures. Aussi, il faut évacuer les eaux

pluviales grâce à la forme de pente inclinée et ces eaux peuvent être récupérées par des gouttières sous autres systèmes pour les réutiliser. La tendance de l'architecture de déconstructivisme applique des formes de toitures arrondies et courbées largement (Figure II.8).

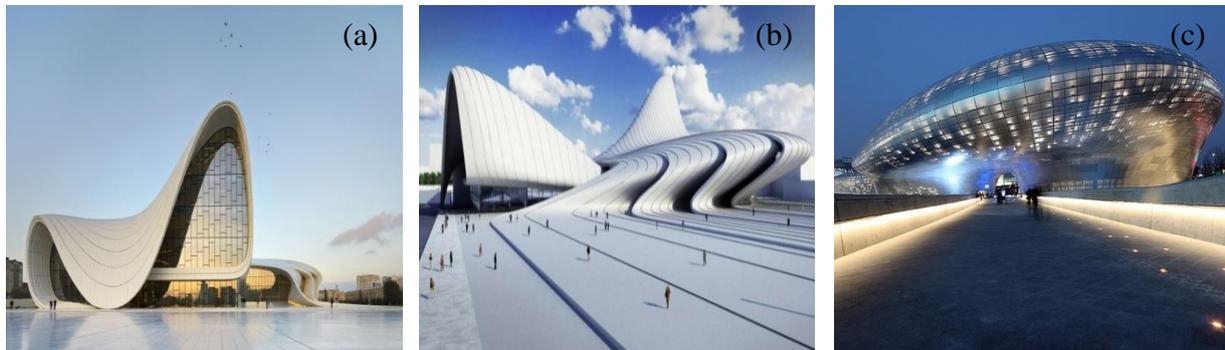


Figure II.8 : Des projets architecturaux avec des toitures courbées ; (a) (b) Le centre culturel Heydar-Aliyev à Bakou, Azerbaïdjan (Goldin, Jongeward, Scammell, Wise, & Assessment, 2009) ; (c) Le Dongdaemun Design Plaza à Séoul, Corée du Sud (Yun, 2014)

#### II.3.1.4. Toiture végétale:

*"If a roof is created to take people, which most are, it can easily take a roof garden,"*

*Takaharu Yoshioka, Japanese environmental director of a landscape design company.*

Toiture végétale, également appelée « toiture verte », « éco toits », « toits vivants » ou « jardins sur les toits » (La Roche & Berardi, 2014) ou plus scientifiquement PCV<sub>H</sub> (Paroi Complexe Végétalisée Horizontale) est une toiture-terrasse recouverte de végétation comportant une couche de substrat de plantes variées (Sellami-Kaaniche, 2014).

#### **Composition de la toiture végétale :**

La toiture végétale se compose de plusieurs couches superposées en partie courante qui peuvent être résumées comme suit :

- Élément porteur (support) : qui peut être classé en quatre catégories : maçonnerie, béton cellulaire, tôles d'acier nervurées ou en bois massifs ou en panneaux de bois.
- Complexe « isolation-étanchéité » comporte : le pare-vapeur, couche isolante, le revêtement d'étanchéité.
- Complexe de végétalisation comportant : une couche drainante, une couche filtrante, une couche de substrat et une couche végétale (Houssin et al., 2012) (Sellami-Kaaniche, 2014).

Plus du rôle classique de l'étanchéité, cette dernière doit résister à la pénétration des racines, ce qui nécessite l'ajout des adjuvants anti-racines. Les figures II.9 et II.10 montrent les composants d'une toiture végétale et un schéma des étapes pour végétaliser une toiture-terrasse respectivement.

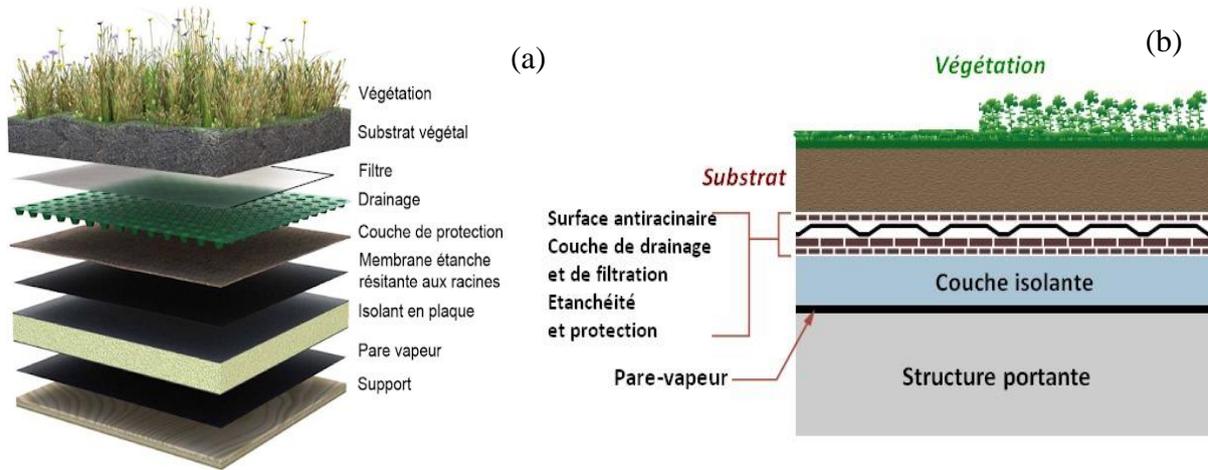


Figure II.9 : Représentation schématique des composants d'une toiture végétalisée ; (a) (Vijayaraghavan, 2016), (b) (Dusza, 2017)

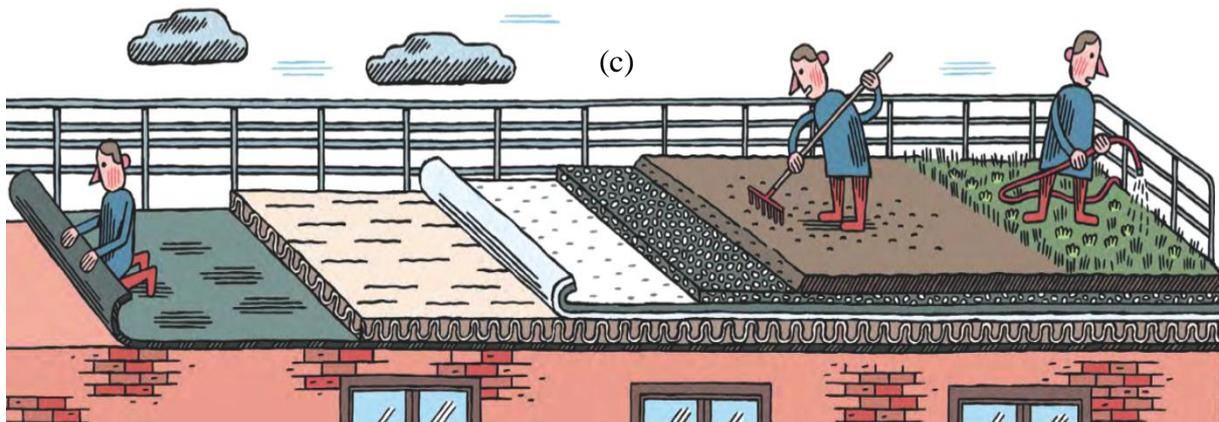


Figure II.10 : Schéma des étapes pour végétaliser une toiture-terrasse (Turenne, 2013)

On distingue trois types de toitures vertes (Sellami-Kaaniche, 2014) dont la figure II.11 montre une comparaison entre les trois types.

- **La toiture-jardin** : est une toiture végétale recouverte de végétation intensive, dont la végétation nécessite un entretien régulier. Elle exige une conception spéciale pour supporter une couche de terre épaisse et assure la stabilité de sa structure portante (Hopkins & Goodwin, 2011). L'épaisseur élevée de la couche de substrat dans la toiture intensive apporte des surcharges permanentes importantes qui dépassent 400 kg/m<sup>2</sup>. Il faut vérifier que la mise en œuvre de ce type de toiture avec ses surcharges est acceptée sans risque de la structure de la toiture (Cascone, 2019 ; Hauglustaine et al., 2018 ; Vijayaraghavan, 2016).
- **La toiture-jardin légère** : ou également appelée toiture végétale semi-extensive. L'épaisseur de substrat dans ce type est réduite pour limiter le poids qui varie entre

100 et 400 kg/m<sup>2</sup>. Elle correspond au cas intermédiaire entre les toitures extensives et intensives (Hauglustaine et al., 2018; Wilkinson & Dixon, 2016).

- **La toiture végétalisée** ou autrement appelée **la toiture verte extensive**, c'est-à-dire qu'elle correspond à une toiture recouverte de végétation extensive (M. Lehtihet & Bouchair, 2018). Le substrat dans ce type est développé à partir de cette végétation, ce qui réduit l'épaisseur de cette couche qui est de quelques dizaines de mm de substrat et ne nécessite pas aucun apport d'eau ou d'engrais. Aussi, cette couche atteint une surcharge maximale de 90 kg/m<sup>2</sup> (poids lorsqu'elle est humide) (Hauglustaine et al., 2018).

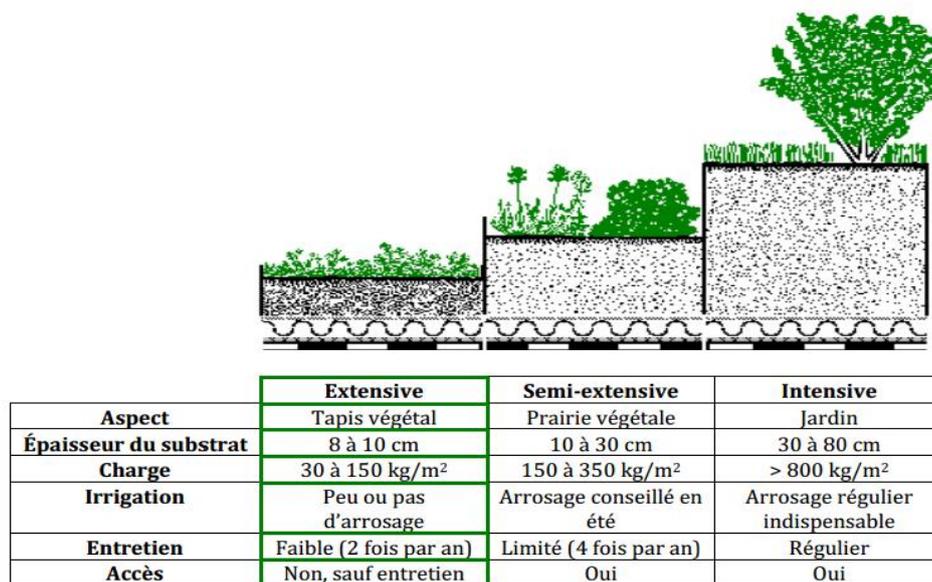


Figure II.11 : Les principales caractéristiques de trois types de toiture verte (Houssin et al, 2012)

### Une toiture verte : Pourquoi ? Impact sur le confort thermique :

Les toits verts ont été utilisés dans diverses régions du monde avec des conditions climatiques différentes (Figure II.12). Néanmoins, ses potentiels de refroidissement et de chauffage se varient selon le type du climat (La Roche & Berardi, 2014). Récemment, la demande de l'application de toiture verte dans les édifices augmente partout dans le monde. Plusieurs recherches récentes ont montré que les environnements verts influent positivement sur le bien-être des citoyens dont ils sentent moins stressés et plus productifs (Cooper, 2008). L'adoption d'une toiture verte montre son efficacité d'absorber le carbone dioxyde, libérer de l'oxygène et isoler les bâtiments. Elle sert à lutter contre les effets du changement climatique, réduire la pollution et augmenter la biodiversité dans les villes (Kafafy, 2009).

Généralement, les toitures vertes sont construites pour améliorer les économies d'énergie des édifices (Alexandri & Jones, 2008; Parizotto & Lamberts, 2011). Elles présentent une technologie efficace pour réduire la variation de température intérieure et la consommation d'énergie des constructions dans les climats chauds et froids (Castleton, Stovin, Beck, & Davison, 2010; Jaffal, Ouldboukhite, & Belarbi, 2012). Simmons et al. (Simmons, Gardiner, Windhager, & Tinsley, 2008) ont déclaré que les toits verts extensifs possèdent un grand potentiel pour les climats des régions subtropicales avec des températures élevées et de fortes précipitations (La Roche & Berardi, 2014). Dans les régions à climat chaud et aride, les toitures végétalisées ont été utilisées légèrement dans des endroits très rares. À cause de l'appréciation des ressources d'eau dans ces régions arides, les systèmes d'irrigations utilisées pour ces toitures vertes sont économes en eau. Aussi, l'utilisation de plantes qui peuvent s'adapter à des températures élevées qui ne demandent pas de grandes quantités d'eau. L'eau gaspillée pour refroidir les surfaces planes en été constitue un problème, dont les toits verts peuvent contribuer à minimiser la perte d'eau dans le processus de refroidissement (Kafafy, 2009). Les toits verts dans ce type de climat aride réduisent la température intérieure en ombrageant la couche de toit et en réduisant l'influence directe du rayonnement (Ouldboukhite, Belarbi, Jaffal, & Trabelsi, 2011).

De même façon, les toitures vertes contribuent à modifier le microclimat urbain et l'effet de l'îlot de chaleur urbain (M. Lehtihet & Bouchair, 2018). Elles réduisent l'impact environnemental négatif des villes (La Roche & Berardi, 2014). Dans les villes urbaines, les surfaces de toitures retiennent la chaleur produite par les fortes irradiances solaires pendant la journée et créent des îlots de chaleur urbains (Ouldboukhite, Belarbi, & Djedjig, 2012). Ensuite, la chaleur accumulée le jour par les surfaces dures, les toits, les murs, les rues, sera libérée lentement la nuit, ce qui entraîne de températures nocturnes élevées (à cause de l'effet de déphasage thermique) surtout dans les étés chauds. Cela influe négativement sur le confort humain et augmente le stress thermique (Kafafy, 2009). Donc, recouvrir les toits des édifices de végétation, sert à réduire les besoins en climatisation, réduire les dépenses de refroidissement et de chauffage (M. C. Lehtihet, 2018), ce qui économise l'argent et par conséquent économiser l'énergie considérablement pendant les étés chauds (W. C. Li & Yeung, 2014). La figure II.12.a montre un toit vert traditionnel incliné avec végétation indigène en Norvège et la figure II.12.b et c illustre un toit végétal plat et un toit végétal arrondi respectivement.



Figure II.12 : Bâtiments avec toiture végétale : (a) Toit vert traditionnel incliné avec végétation indigène en Norvège (Ayata, Tabares-Velasco, & Srebric, 2011) ; (b), (c) toit végétal plat et toit végétal arrondi respectivement (Google image, 2021)

### **Le transfert thermique et principe de fonctionnement de la toiture verte :**

Au niveau d'une toiture verte, de divers phénomènes d'échange de chaleur se produisent. Le rayonnement solaire est équilibré par le flux de chaleur sensible et latente ; c'est-à-dire par l'effet de convection et l'effet d'évaporation du sol et des surfaces végétales, de plus de la conduction de chaleur dans le substrat du sol (Sailor, Elley, & Gibson, 2012; Theodosiou, 2012). Les principaux phénomènes qui se produisent dans les toitures vertes sont :

- Le sol réagit comme une masse à haute capacité thermique et à faible transmittance thermique
- La couche de végétation et le sol produit un refroidissement par évaporation évapotranspiration.
- Le feuillage agit comme un élément d'ombrage d'où la convection provoque l'échange thermique de chaleur. Aussi, le feuillage absorbe une partie du rayonnement solaire pour produire le phénomène de la photosynthèse (La Roche & Berardi, 2014).

En effet, la couche végétale de toit produit des processus de photosynthèse et la couche de sol permettent l'absorption des précipitations, ce qui améliore la qualité des eaux de ruissellement (Bates, Sadler, & Mackay, 2013). De nombreuses recherches ont indiqué que les toitures vertes sont capables à réfléchir entre 20% à 30% du rayonnement solaire, et elles absorbent jusqu'à 60 % par photosynthèse. Donc, une partie réduite de chaleur inférieure à 20% est transmis au substrat (La Roche & Berardi, 2014). La figure II.13 illustre le principe de fonctionnement (a), le bilan énergétique des toits verts (b), et une structure schématique du mécanisme de refroidissement d'un toit vert extensif et d'un toit vert intensif pendant la journée (c) respectivement.

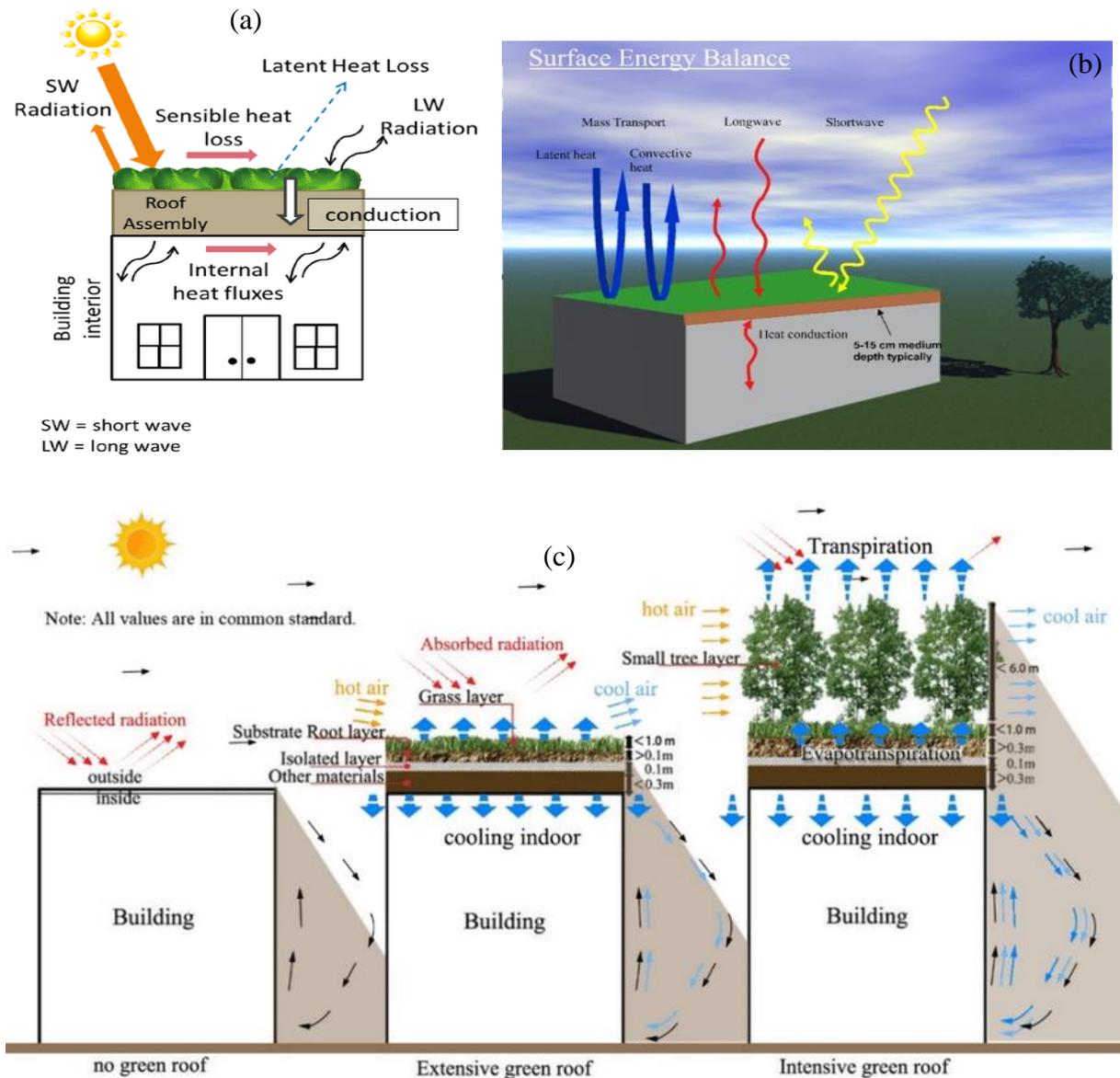


Figure II.13 : (a) Bilan énergétique schématique du toit vert (Osma, Ordóñez, Hernández, Quintero, & Torres, 2016) ; (b) La figure illustre de manière conceptuelle un bilan énergétique de surface simplifié pour un système générique de toiture verte (Gaffin, Khanbilvardi, & Rosenzweig, 2009) ; (c) Une structure schématique d'un toit vert extensif et d'un toit vert intensif, et le mécanisme de refroidissement pendant la journée (Zhang, He, Zhu, & Dewancker, 2019)

### II.3.2. Toitures traditionnelles (non conventionnelles) :

Dans les communautés traditionnelles, l'image architecturale de l'habitat se concrétise généralement par la forme de la toiture, qui est l'élément le plus régulier d'un édifice. Généralement dans les villes, l'uniformité des toitures est appréciée par des vues aériennes (Sayigh, 2019) au contraire des façades qui peuvent comprendre plusieurs éléments (fenêtres, portes, ornements, etc.). Alors que, les formes de toitures sont plus uniforme et par conséquent, elles deviennent les éléments les plus fonctionnels. Dans les villes traditionnelles, la conception des toitures exprime l'hétérogénéité de la ville grâce à une vue par ciel. Ce qui donne un aperçu d'une vue de mosaïque dont l'uniformité et la similitude des toitures (Lopez-Besora et al., 2019) sont apparues clairement. Anciennement, les constructeurs ont adopté plusieurs formes de toitures selon le climat local et la disponibilité des matériaux de construction comme les coupoles et les voûtes. Il existe de nombreux exemples dans le monde qui se différencient d'une région à une autre et qui traduisent l'image de la communauté autochtone. Dans cette partie on va traiter quelques types et exemples de toitures traditionnelles.

#### II.3.2.1. Toitures traditionnelles plates :

Les toitures plates traditionnelles sont adoptées largement dans les vieilles villes des régions à climat chaud et aride (Friedrich Ragette, 2003). Elles présentent souvent l'extension de l'espace de vie lorsqu'elles sont généralement accessibles et utilisables. Dans les régions à climat chaud et aride, elles sont occupées souvent dans les nuits en été pour dormir en dehors. Également, elles peuvent être utilisées comme un espace de séchage de linge, de céréales, de dattes, de fruits ou d'autres fonctions ménagères tout en assurant l'intimité des regards des voisins par de hauts murs (Lopez-Besora et al., 2019). En addition, les variations de température entre le jour et la nuit dans les régions à climat chaud et aride sont détendues avec une toiture à haute masse thermique. Généralement, ces toits plats sont épais constitués de matériaux locaux disponibles sur terrain à savoir : la pierre, la terre, la boue et la chaux. Ces derniers ont une origine minérale lorsque les faibles précipitations entravent l'existence de végétation. La forte masse thermique des toits plats permet d'augmenter l'inertie thermique de la maison et protéger l'intérieur des rayons solaires intenses des étés chauds lorsqu'ils se caractérisent par la capacité de stocker la chaleur le jour et la restituer la nuit (Olgyay, 2015). Le type utilisé largement pour une habitation avec une toiture plate se compose d'une seule cellule avec des murs épais constitués aussi des matériaux locaux, et d'ouverture qui est le Chebek (trou au milieu de terrasse pour aération et éclairage naturel) et

une petite porte basse (Bab). De même, dans certaines régions du climat chaud et aride comme la vallée du M'Zab, on trouve dans la terrasse un espace de transition qui est souvent une colonnade ou arcade (Ravéreau et al., 1981). Ce dernier a aussi une fonction thermique dont la colonnade sert à atténuer l'effet d'irradiations solaires brûlantes et crée l'ombre (Sayigh, 2019). Ils existent plusieurs exemples de toitures terrasses plates dans les régions chaudes à savoir : les toits-terrasses de Ghadamès à la Libye (Figure II.14.a) ou les femmes pratiquent leurs travaux quotidiens (Shibub, 2017), Ksour du Maroc et de Mauritanie (Figure II.14.b. c. d. e), Sanaa au Yémen, etc. (Figure II.14. f. g et h).

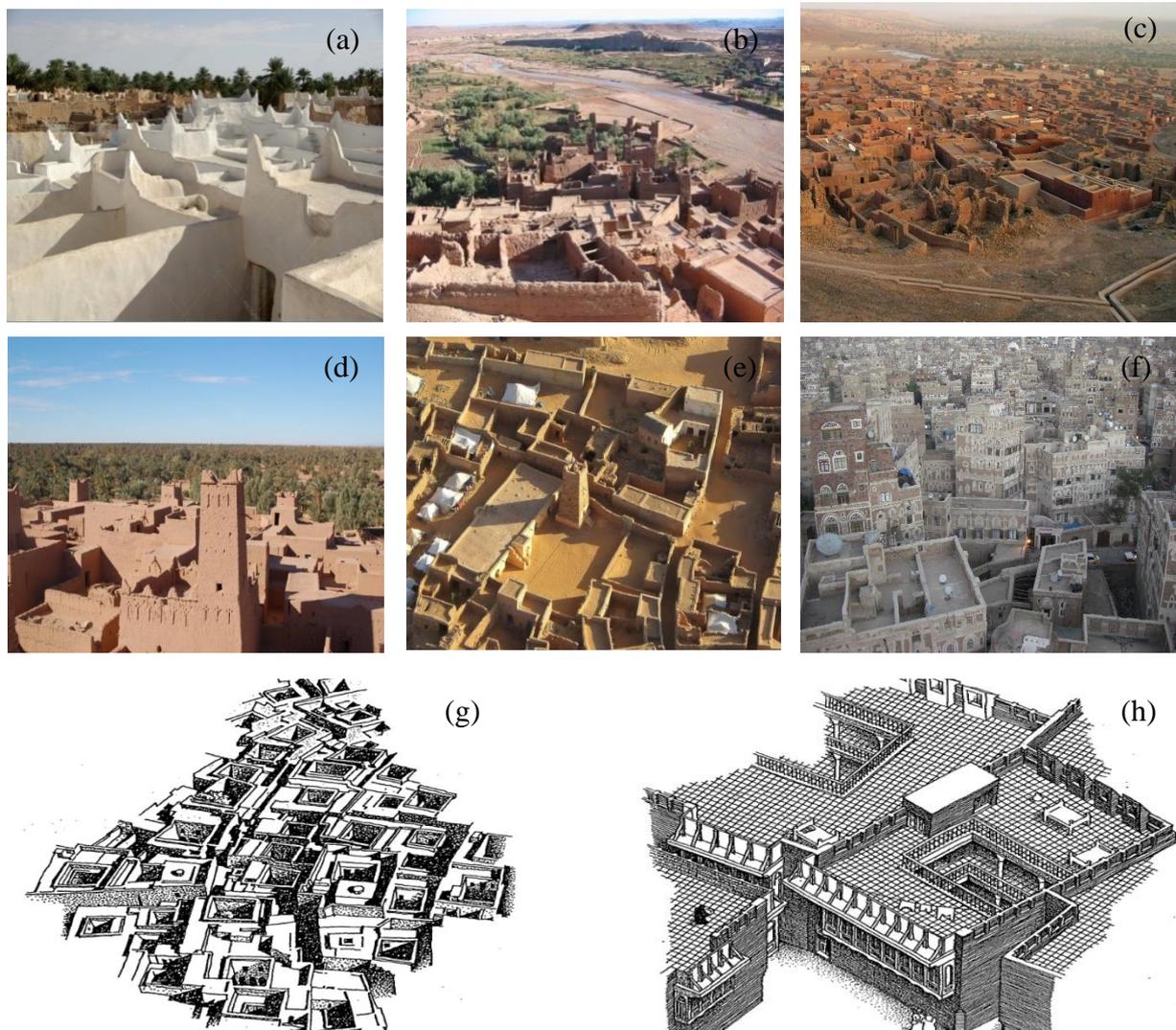


Figure II.14 : Vue des toitures terrasses traditionnelles : (a) toits plats dans la ville de Ghadamès (Shibub, 2017) ; (b) Ksar Aït-Ben-Haddou au Maroc (Nagay & Prieto, 2019) ; (c) Ksar Rgabi N'Ayt Hassou au Maroc (Wikipédia, 2021b) ; (d), (e) Vue aérienne du Ksar de Chinguetti et Ksar de Oualata au Mauritanie respectivement (Wikipédia, 2021a) ; (f) Vue aérienne des toits de la ville de Sanaa au Yémen (Google image, 2021) ; (g) Vue des toits à Marrakech ; (h) les toits-terrasses à Baghdâd (Friedrich Ragette, 2003)

### II.3.2.2. Les dômes et les voûtes :

La toiture courbée ou ronde semble être quelque chose de très récent, mais, il y a des siècles, cette forme apparaissait également en forme de voûtes et de coupoles. Dans les régions à climat chaud et aride, les faibles précipitations et le manque du bois ont conduit à façonner des toits en forme d'arc, de dôme ou de voûte avec l'utilisation de l'adobe et de la boue (Keshtkaran, 2011; Saljoughinejad & Sharifabad, 2015).

#### **Présentation et définition :**

Les dômes et les voûtes ont été utilisés largement dans les villes traditionnelles des régions chaudes et arides (Faghih & Bahadori, 2009) des pays arabes au Maghreb et au Moyen-Orient comme l'Égypte, la Tunisie, la Jordanie et l'Algérie (Figure II.15.a et b). Ils sont surtout observés à El-oued en Algérie (la ville de 1000 coupoles) (Figure II.15.c et d). Ils peuvent être utilisés dans les bâtiments résidentiels ou autre type de bâtiment, en villes ou en dehors (Azil et al., 2018). De même, la forme de voûte peut être utilisée au rez-de-chaussée ou en étage, recouvrant une partie de la maison ou la totalité. Les coupoles sont généralement pleines sans ouverture. Mais parfois, des percements sont intégrés dans les pans de la coupole ou au sommet de celle-ci. Ces petites ouvertures assurent l'éclairage et la ventilation du bâtiment (Bencheikh, 2007).

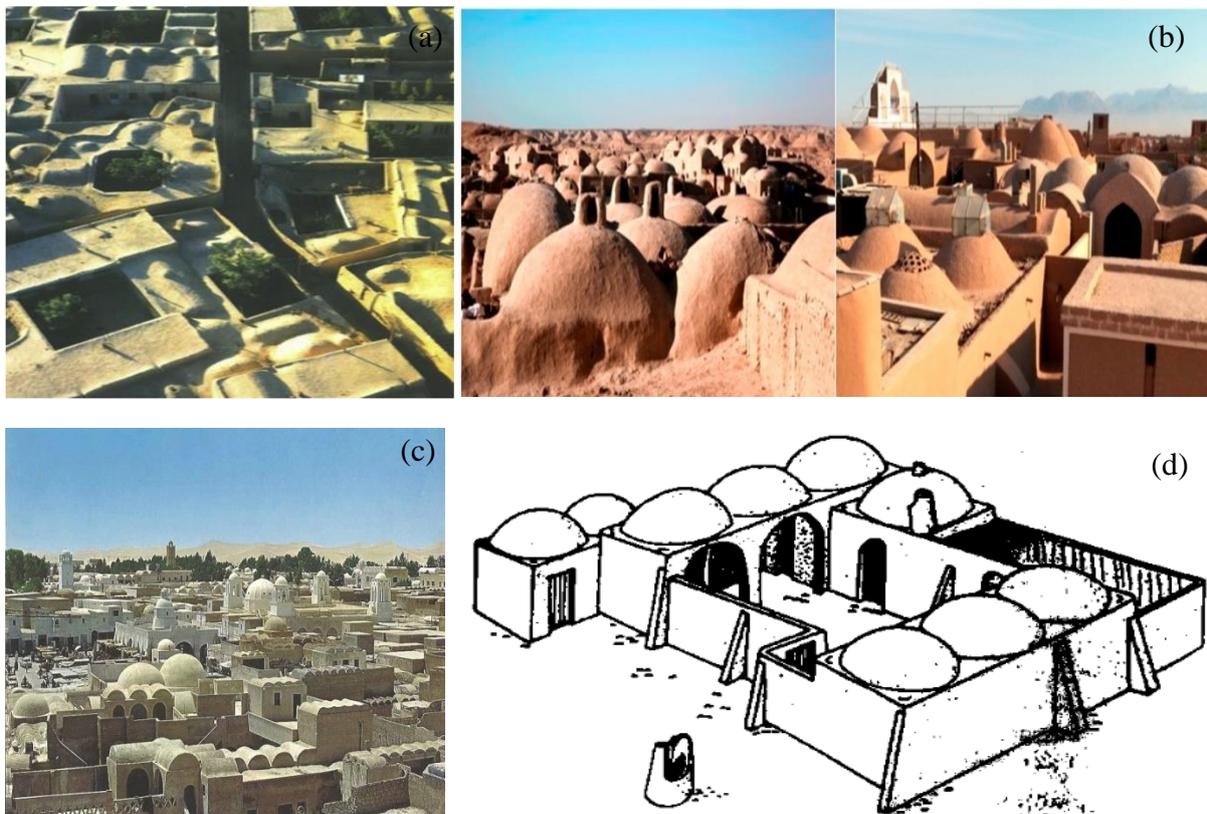


Figure II.15: Villes traditionnelles utilisant des toits en dômes et voûtes : (a) vue aérienne de résidences vernaculaires avec toits incurvés à « Birjand » (villes chaude et sèche) en Iran (Saljoughinejad & Sharifabad, 2015) ; (b) Typologie des toits à : Sistan (à gauche) et Yazd (à droite) (Sahebzadeh, Heidari, Kamelnia, & Baghbani, 2017) ; (c) Vue aérienne de la ville de Oued Souf (Google image, 2021) ; (d) maison de Souf (Côte, 2006)

La forme de toit en dôme est exposée au flux d'air causé par le vent constamment, ce qui aide à réduire la chaleur due au rayonnement solaire intense (Moradi, 2005) et refroidir aussi le toit plus rapidement pendant la nuit (Figure II.16.a et b). Dans le cas d'un toit bombé ou cylindrique, la projection des rayons solaires n'est pas la même sur tous les côtés ; dont la partie 3 reçoit moins de chaleur que la partie 1 (Figure II.16.c). Cela conduit à réduire la température sous le toit (Keshtkaran, 2011).

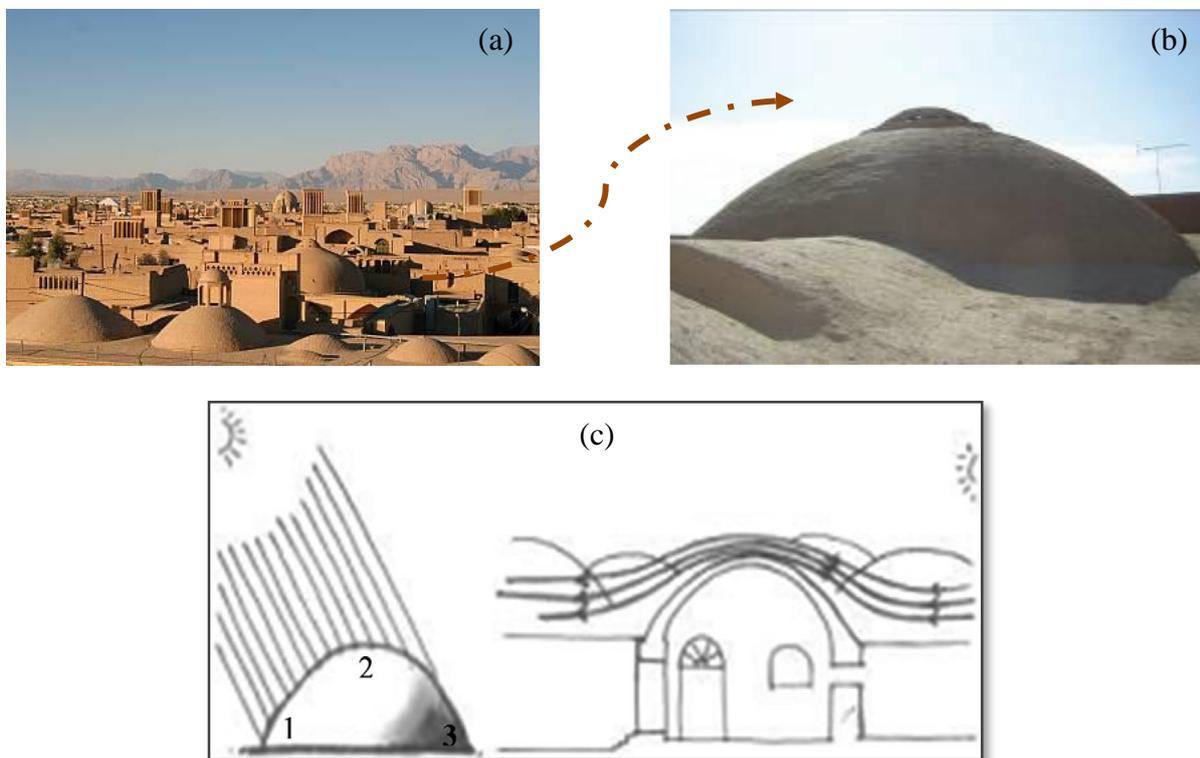


Figure II.16 : Les toits traditionnels en Iran : (a) Vue générale des toits à Yazd en Iran, (b) Le toit du bâtiment traditionnel à Yazd, (c) Diagramme de la fonction du toit (Keshtkaran, 2011 ; Saljoughinejad & Sharifabad, 2015)

### Principe de fonctionnement :

- Pendant la journée en été, quand le sommet du dôme est chaud, l'air intérieur qui est en contact avec les surfaces du dôme s'échauffe (Faghih & Bahadori, 2009). D'autre part, si les portes et les fenêtres de l'édifice, ainsi que la (les) fenêtr(e)s du dôme sont ouvertes, l'air intérieur monte vers le haut. Cet effet est favorisé par l'air frais plus

dense autour de l'édifice qui pénètre à l'intérieur. Donc, l'air chaud est évacué par effet de cheminée vers l'extérieur grâce à la (les) fenêtr(e) du dôme (Bencheikh, 2007) (c'est-à-dire la circulation de l'air, se fait grâce à la différenciation de pression entre le bas et le haut), (Figure II.17.a).

- Pendant la nuit, la chaleur emmagasinée par le dôme pendant les heures de surchauffe du jour va échanger par convection avec l'air et par radiation avec la voûte céleste (Faghih & Bahadori, 2011). Quand la fenêtr(e) du dôme est fermée, l'air intérieur monte vers la partie centrale et se refroidit par contact du dôme ; et par conséquent l'air devient plus dense et redescend vers la partie latérale du dôme (Figure II.17.b).
- Dans les nuits douces sans vents, quand les fenêtres sont ouvertes, l'air intérieur est plus chaud, tandis que l'air extérieur plus froid va pénétrer à l'intérieur du bâtiment par le sommet du dôme et va descendre, ce qui provoque une forte pression et conduit à évacuer l'air plus chaud de l'intérieur par les ouvertures de l'édifice (Bencheikh, 2007), (Figure II.17.c).

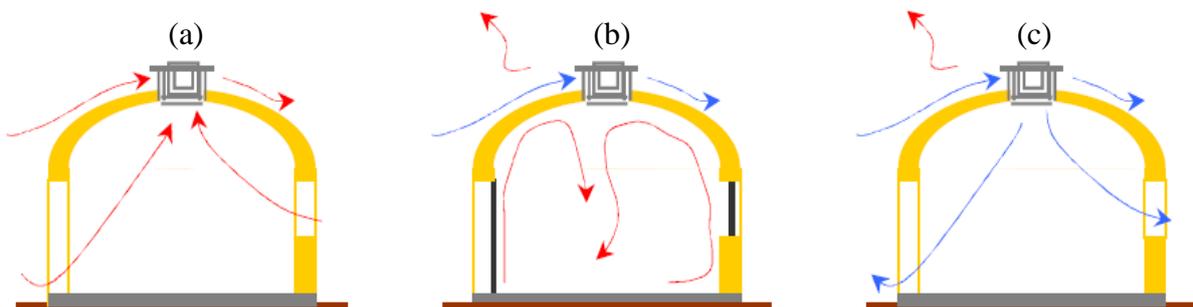


Figure II.17 : Les différents cas de fonctionnement des dômes : (a) le jour : les portes et les fenêtres sont ouvertes ; (b) la nuit toutes les ouvertures sont fermées ; (c) la nuit : les portes et les fenêtres sont ouvertes (Bahadori & Haghghat, 1985)

Les dômes ont joué un rôle prépondérant dans l'architecture traditionnelle des régions chaudes et arides. Ils réduisent le gain de chaleur total d'un toit par fournir un effet de refroidissement passif aux édifices (Faghih & Bahadori, 2009). La géométrie des formes des toits en dômes et en voûtes augmente généralement la vitesse du vent au-dessus d'eux, ce qui augmente le coefficient de transfert de chaleur par convection (Faghih & Bahadori, 2011). C'est-à-dire qu'un toit incurvé a une surface de transfert de chaleur par convection importante (Alp, 1991). Également, l'augmentation de transfert de chaleur par les dômes est due au fait que leurs surfaces sont supérieures à celles des toits plats (Faghih & Bahadori, 2009) (Figure II.18).

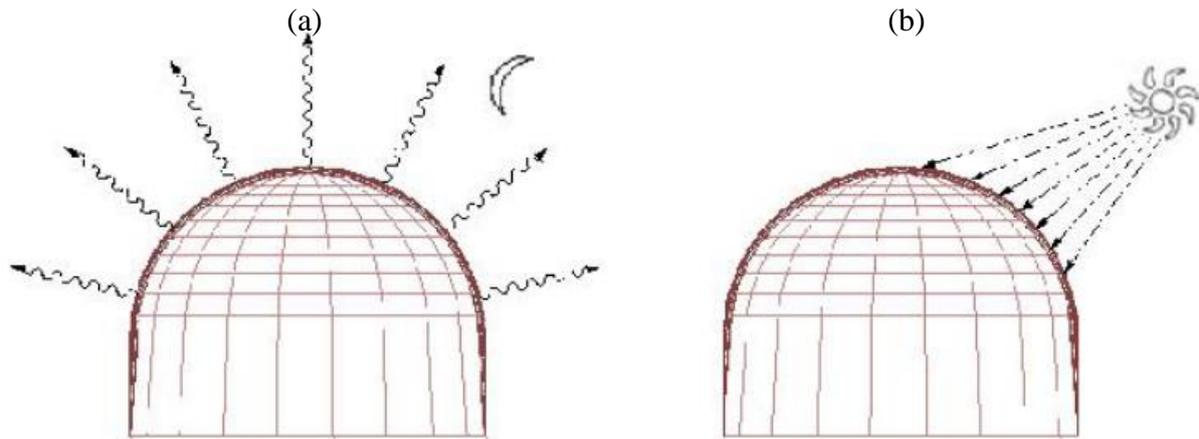


Figure II.18 : Phénomènes radiatifs des dômes : refroidissement radiant élevé la nuit et chauffage radiant faible pendant la journée (Lavaf Pour & Surat, 2012)

L'ajout d'une bouche d'aération au sommet d'un toit incurvé est plus efficace. Lorsque l'air circule sur un élément sphérique ou cylindrique, la vitesse de l'air au sommet s'augmente et donc, la pression au sommet se diminue. La différence de pression sert à évacuer l'air intérieur plus chaud par la bouche d'aération (Alp, 1991).

De plus, des sources d'eau (fontaine ou piscine) sont placées parfois à l'intérieur sous le dôme, pour refroidir l'air intérieur qui circule dans la pièce (Alp, 1991) (Figure II.19).

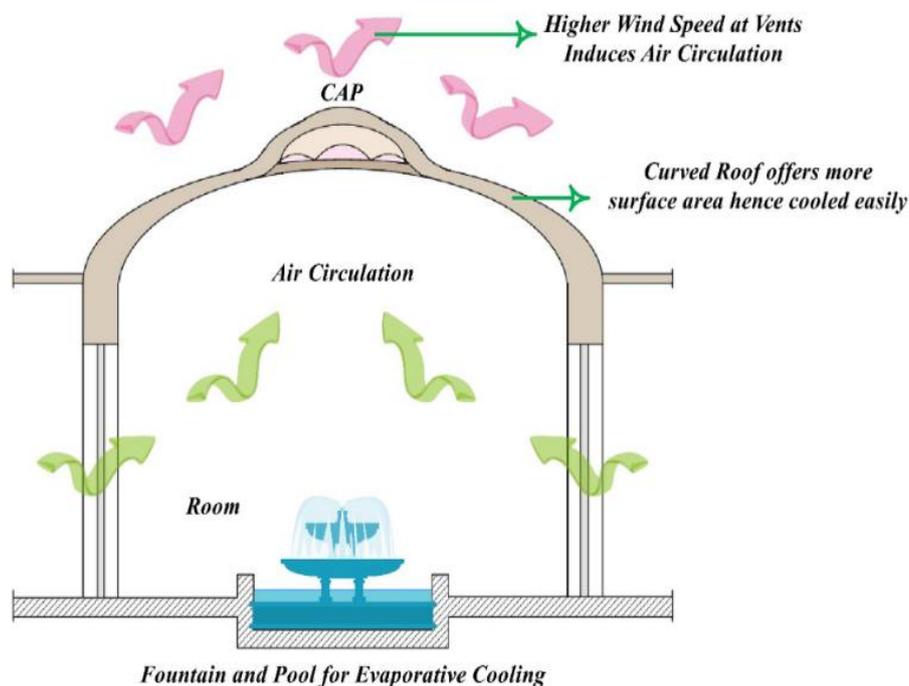


Figure II.19 : Performance des toits en dôme (Kamal, 2012) : coupe transversale sur une pièce incurvée avec bouche d'aération au-dessus de la fontaine pour favoriser la ventilation et le refroidissement, avec circulation d'air à l'intérieur et au-dessus

Le toit en forme de dôme a un impact sur la quantité du rayonnement solaire reçu, car il peut contrôler la lumière du jour et fournir l'ombre (Haghighi Poshtiri, Bahar, & Jafari, 2016). Aussi, la diminution de la quantité de la chaleur absorbée par le toit contribue à réduire les besoins en refroidissement (Ayoub & Elseragy, 2018). En fait, l'exposition d'un toit en forme de dôme au rayonnement solaire est de 30% inférieure par rapport à des toits cubiques. Alors que, le transfert de chaleur se diminue et par conséquent la charge de refroidissement baisse de 30% (Song, Darani, Khdaïr, Abu-Rumman, & Kalbasi, 2021).

En raison de forte inertie thermique des matériaux qui les composent, les dômes et les voûtes agissent comme des entraves thermiques. Elles permettent à retarder le flux de chaleur dans leur masse thermique et réduire la fluctuation de la température entre le jour et la nuit (Sahebzadeh et al., 2017).

Il existe plusieurs formes de toits incurvés. Les dômes peuvent avoir des formes coniques, semi-sphériques, cylindriques, etc. (Figure II.20.a. b et c) selon la fonction nécessaire, le climat local, les matériaux disponibles et même les traditions et le savoir-faire local. Généralement, les toits semi-sphériques sont plus adaptés dans les régions où le vent dominant est multidirectionnel. Néanmoins, quand la direction du vent est stable, l'adoption d'un toit voûté avec son axe perpendiculaire au souffle du vent est plus appropriée (Alp, 1991).



Figure II.20 : Formes des toits incurvés : (a) forme conique des toits des maisons dans l'architecture syrienne « Beehive-Shaped » (<http://izreal.eu/2014/11/20/syrias-beehive-shaped-architecture/>) ; (b) Vue de proche des toits en dôme et voûte courbés de l'adobe et de la boue en Iran (Hashemi, 2018) ; (c) architecture palestinienne avec toit incurvé de matériaux locaux (<https://www.pinterest.com/pin/86553624063937774/>)

#### II.3.2.2.1. La voûte nubienne :

La voûte nubienne correspond à un procédé architectural ancien, dont la surface est incurvée formant une structure voûtée. Elle est venue du haut Nil, offrant une technique construite des matériaux locaux comme la terre crue séchée au soleil (Sadeghi, 2018). Cette

technique constructive ne nécessite pas l'utilisation du bois et permet de former une main-d'œuvre locale et précaire un métier d'avenir.

La technique de voûte nubienne a été relancée par l'architecte égyptien Hassan Fathy avec l'émergence et la construction du village de Gournah, près de Louxor dans les années 1940 (Fathy, 2010) (Figure II.21.a). Il a utilisé les toits en voûte pour repousser les radiations solaires à fin d'assurer un confort optimal surtout que le village se situe dans un climat chaud et aride ou il est chaud dans le jour et froid pendant la nuit (Shaheen, 1975).

La voûte nubienne peut être construite sans aucun support ou coffrage (Wendland, 2007). Les briques de terre sont posées inclinées en légère pente contre les murs en pignon dans une voûte en longueur (Friedrich Ragette, 2003) (Figure II.21.b). En partie centrale on aperçoit les lits de briques plates inclinées d'environ 45°.

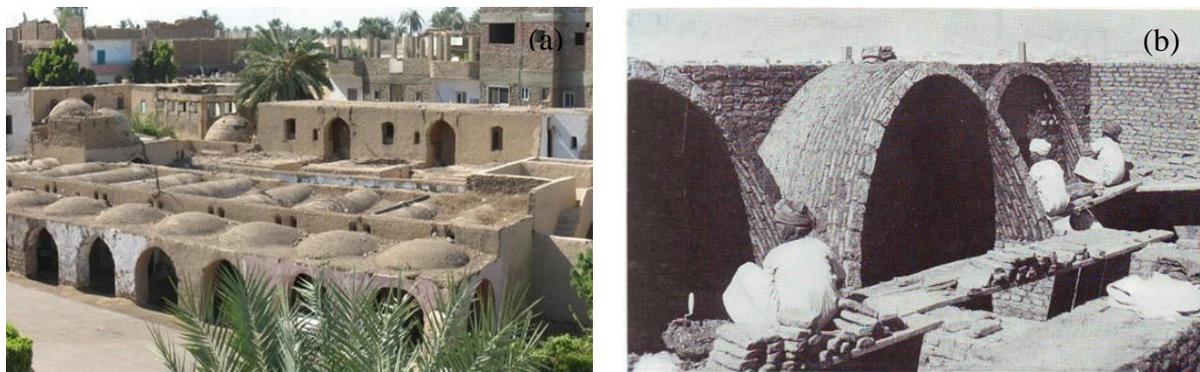


Figure II.21 : Voûte du village de Gournah : (a) vue des voûtes du village, (b) application du savoir-faire antique, méthode sans coffrage (Shaheen, 1975)

Cette méthode de construction peut être aussi utilisée pour construire les dômes à l'exemple de « Case obus » (du peuple Mousgoum) au Cameroun (Dzou-Tsanga, 2016) (Figure II.22). Les cases obus représentent une architecture locale par excellence lorsqu'elles sont adaptées aux conditions extérieures telles que les précipitations, la ventilation et les changements climatiques (Hamadou, 2021).



Figure II.22 : Habitation « Case Obus » au Cameroun : (a), (b) vues des Cases obus (<https://maison-monde.com/la-case-obus-du-peuple-mousgoum/>)

**Avantages de la voûte nubienne :**

- La voûte nubienne offre plusieurs avantages à savoir : utilisation des matériaux locaux, adaptation au climat, méthode de construction plus simple, coûts de construction plus faibles et rentable, confort thermique, durée de vie longue (Lepik, 2010).
- La technique sans coffrage économise largement l'utilisation du bois (Oliver, 2003) surtout dans les régions chaudes et même dans les régions sahéliennes africaines déboisées.
- Elle est préconisée par les écologistes comme respectueuse de l'environnement lorsqu'elle utilise dans leur structure la terre pure sans besoin du bois.
- La simplicité de la technique de voûte nubienne permet un apprentissage et une formation rapide des constructeurs (Fathy, 2010), ce qui assure une main-d'œuvre locale et offre des postes de travail.
- Les constructions en voûtes nubiennes sont confortables et adaptables aux influences des changements climatiques (Zoma, Toguyeni, Kiemtoré, & Ouedraogo). La voûte nubienne s'intègre dans l'approche d'une construction adaptée avec une économie verte.

La technique de voûte nubienne a été élargie récemment, dont depuis les années 2000, une association ONG franco-burkinabé a codifié la technique VN (Voûte Nubienne). Plusieurs constructions en voûte nubienne ont été réalisées au Mali, Sénégal et Burkina Faso, et d'autres régions en Afrique (Granier, Kaye, Ravier, & Sillou, 2006) (Figure II.23.a et b).



Figure II.23: Construction en voûte nubienne dans l'architecture sahélienne : (a) vue de construction en voûte nubienne au cours de la réalisation (Granier et al., 2006) ; (b) Vue extérieure d'une maison voûtée (<https://maison-monde.com/technique-voûte-nubienne/>)

Plusieurs recherches ont été développées pour évaluer la performance thermique des toits. La recherche menée par (Mahdavinejad & Javanroodi, 2014) porte sur l'étude de formes de toits efficaces pour les édifices en Iran. Un travail de modélisation et simulation informatique sont appliqués pour évaluer le débit d'air et la température intérieure. Les résultats indiquent qu'une pièce avec un toit en dôme est plus fraîche qu'un toit plat sur la même pièce avec 8°K. Aussi, les résultats de vitesse de l'air et de pression montrent que la forme de toit influe considérablement sur la réduction du transfert de chaleur de la température de l'air.

## II.4. Les toitures des constructions traditionnelles dans la vallée du M'Zab :

Il existe de nombreux types de toitures des constructions traditionnelles dans les Ksour de la vallée du M'Zab. Elles se différencient selon le type de construction, suivant la période de fondation des Ksour et la période de chaque construction. Toitures plates, planchers inclinés, coupoles et voûtes sont des types de toitures existantes dans les Ksour mozabites et précisément dans le Ksar de Béni Isguen.

### II.4.1. Les toitures terrasses plates :

La toiture-terrasse accessible est le type le plus utilisé dans les habitations ksouriennes mozabites. Généralement, les toitures terrasses traditionnelles sont faites d'un mélange d'argile et de paille, de pierre ou de la chaux et du plâtre local, dont l'épaisseur varie entre 20 et 40 cm. Ces toitures épaisses assurent une forte inertie thermique à l'édifice pendant la journée, ce qui augmente l'isolation de la maison pendant la période de surchauffe.

Aussi, la terrasse présente un espace féminin où se déroulent les activités quotidiennes, et elle se transforme à la nuit pour dormir pendant l'été. Les terrasses dans les maisons mozabites sont accolées les unes aux autres, offrant le passage entre un espace à l'autre sans passer par la rue (Figure II.24).

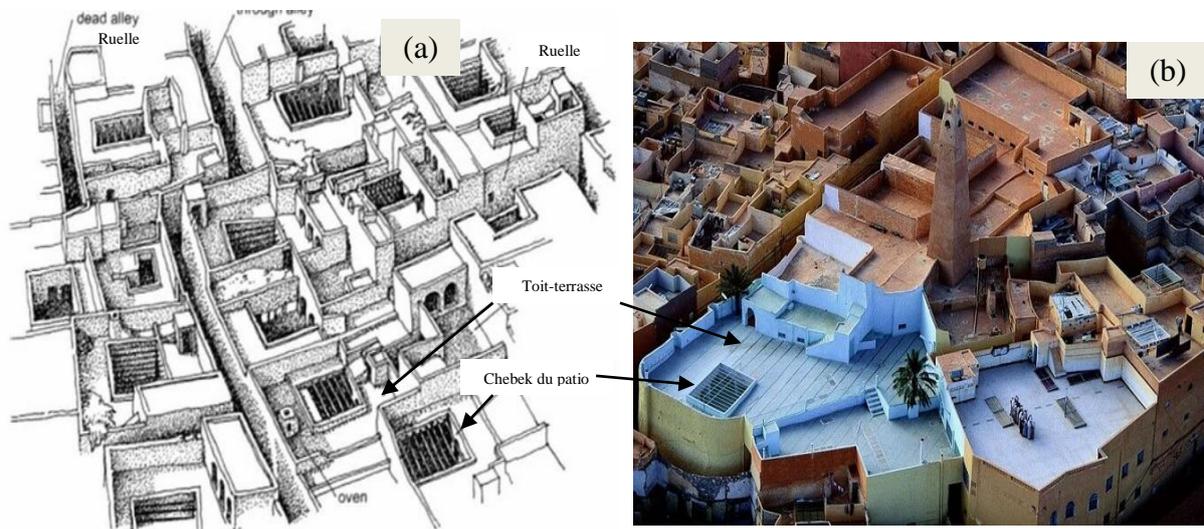


Figure II.24 : La forme des toitures dans la vallée du M'Zab, en Algérie (Framework) : (a) vue schématique de la forme de toit-terrasse du Ksar (Trombadore & Visone, 2019) ; (b) photo montrant vue du ciel de la forme des toits dans le Ksar (OPVM, 2018)

Ensuite, la figure II.25 montre une coupe sur une maison traditionnelle mozabite montrant les différents planchers.

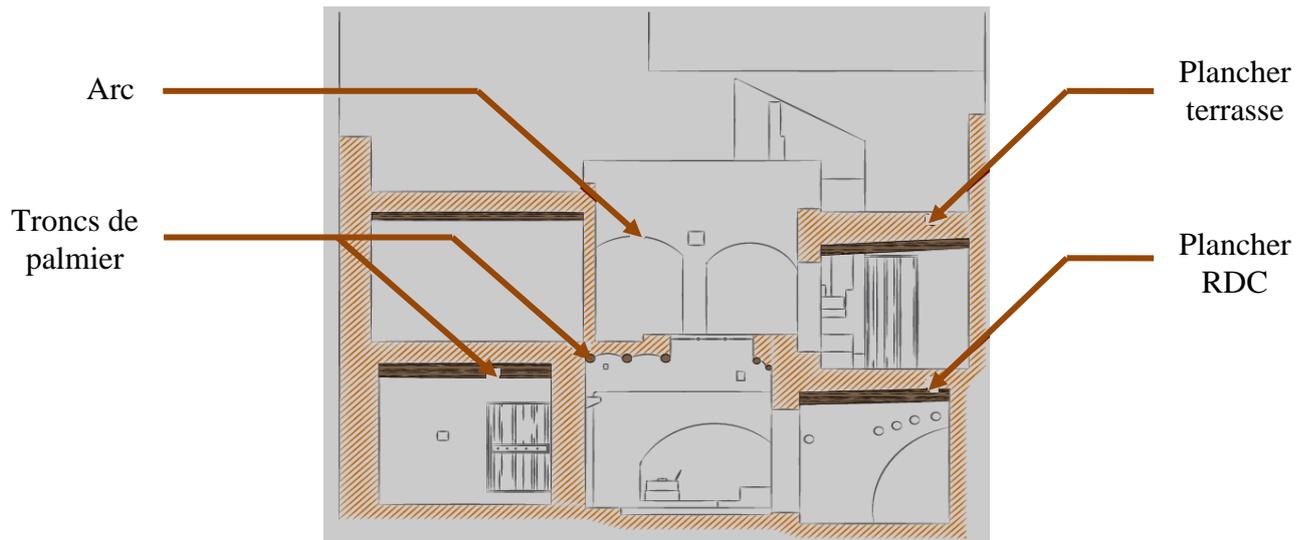


Figure II.25 : Coupe sur une maison traditionnelle mozabite montrant les différents planchers (OPVM, 2013)

Le plafond est constitué soit de pierres plates, soit par des voûtains formés de pierres liées au Timchemt (plâtre local) entre les solives, soit par un lattis serré de nervures de palmes (Didillon & Donnadiou, 1977). Ensuite, cette base est recouverte d'une couche de terre damée, dont l'épaisseur de cette dernière peut atteindre 30 cm sur les terrasses exposées aux rayons solaires agressifs. De plus, cette dernière est protégée par une chape de mortier de chaux, fouettée à l'aide d'un balai (formé de régimes de dattes dépouillées de ses fruits) à fin de remplir les interstices apparaissant lors de l'exécution et enfin réaliser une bonne étanchéité.

Enfin, la chape est badigeonnée par le lait de chaux. D'autre part, la construction des voûtes se fait par la même technique des arcs, à savoir des pierres montées au Timchemt sur coffrage exempt de nervures de palmes (Chabi M, 2011).

NB : Le Timchemt est un plâtre traditionnel de couleur blanche produit à partir de gypse naturel fabriqué par les anciens habitants de la vallée.

#### II.4.1.1. Toitures (planchers) plates en troncs et branches de palmiers :

Les toits ou planchers plats en troncs et branches de palmiers est le type utilisé souvent dans les constructions mozabites et plus précisément dans les habitations ksouriennes, dès la fondation des Ksour jusqu'au XXe siècle. La réalisation de ce toit se fait avec des matériaux locaux dont la matière première est disponible sur terrain à savoir les troncs et branches de palmier, la pierre naturelle, le Timchemt, la chaux et l'argile (OPVM, 2013). Ce type sert à réaliser des espaces plus larges et donne une grande stabilité au bâtiment (Figure II.26). La figure II.27 montre des photos de planchers en troncs et branches

de palmiers dont (a) illustre un plancher dans un passage du Ksar Al-Atteuf ; (b), (c) et (d) illustrent des planchers dans un passage du Ksar de Béni Isguen.

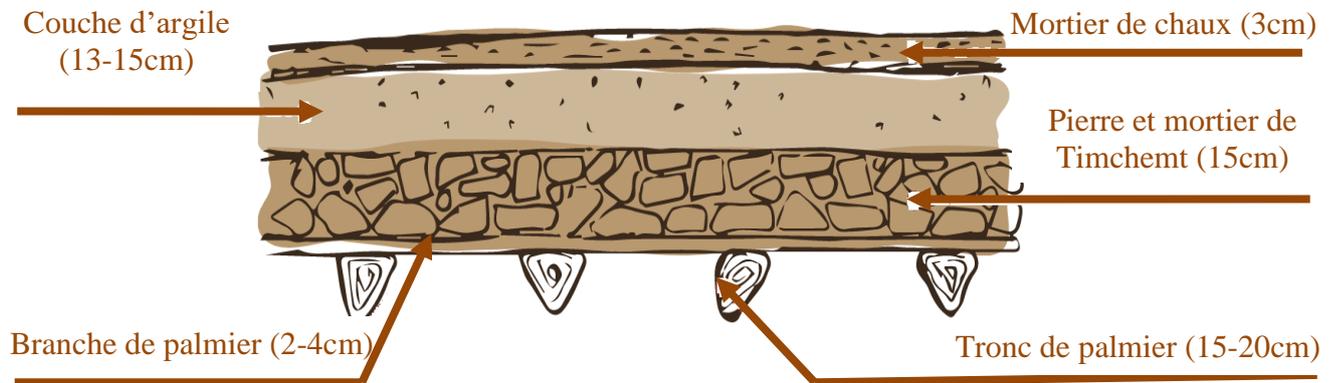


Figure II.26: Coupe sur un toit en tronc et branches de palmiers (le cas d'étude)(OPVM, 2013)



Figure II.27 : Photos d'un plancher en troncs et branches de palmiers d'un passage couvert du Ksar : (a) plancher dans un passage du Ksar Al-Atteuf ; (b), (c) et (d) plancher dans un passage du Ksar de Béni Isguen (Auteur, 2018)

➤ Mise en œuvre (exécution) des toits en troncs et de branches de palmier :

L'exécution de ce type de toit (ou planchers des étages) se fait par le placement des troncs de palmiers sur les murs porteurs (ou les poutres). Ensuite, au-dessus de ces derniers, les branches de palmiers sont disposées et alignées les unes à côté des autres (dont les branches de palmier sont utilisées quelques fois avec les feuilles). Au-dessus des branches de palmiers, une couche de pierre naturelle et taillée avec le mortier de Timchemt (utilisé comme un liant et se caractérise par leur forte isolation thermique) est placée ; dont au-dessus d'elle une autre couche d'argile est posée. Enfin, une couche d'étanchéité de mortier de chaux est façonnée sur la face extérieure pour protéger les différentes couches. L'épaisseur de chaque couche dépend de la position du plancher soit plancher étage ou terrasse (Figure II.26). Généralement, l'épaisseur des différentes couches de toit-terrasse est

plus grande à celle de plancher étage. Les planchers étages se varient entre 20 à 40 cm tandis que les planchers-terrasses peuvent dépasser les 40 cm.

Parfois, dans certains cas on trouve seulement une grande couche d'argile toute seule placée directement sur les troncs et les branches de palmier (Figure II.28). La figure II.29 représente une photo montrant les différentes couches de toit en palmes et argile.

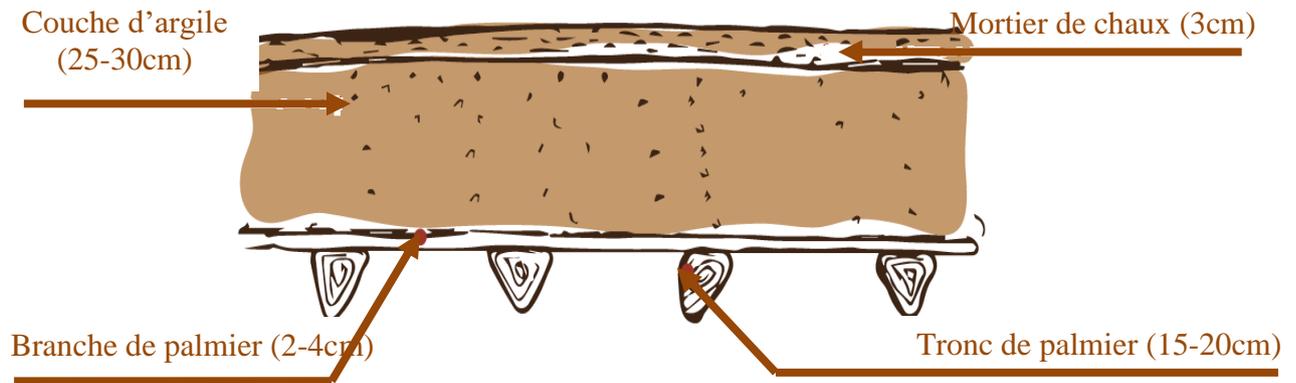


Figure II.28 : Coupe sur un toit en palmes et argile (OPVM, 2013)



Figure II.29 : Photo réelle montrant les différentes couches de toit en palmes et argile

(OPVM, 2013)

Les branches de palmiers sont remplacées parfois par des roseaux ou des cannes dont ces derniers fonctionnent du même principe (Figure II.30).



Figure II.30 : Plancher d'un passage couvert en roseaux dans le Ksar d'Al Atteuf (A, 2018)

#### II.4.1.2. Toitures (planchers) composées de troncs de palmiers et de voûtain : :

Les toitures constituées de troncs de palmier et de voutains en pierre est le type utilisé fréquemment dans les chambres des maisons ksouriennes. Également, ce type est remarqué parfois dans les galeries et les passages couverts à l'intérieur des Ksour. Alors, des petits voûtain de pierre et de mortier de Timchemt sont utilisés parfois pour réaliser des toitures/planchers à la place des branches de palmiers. Ces voûtain sont positionnés sur les troncs de palmiers. De plus, une couche d'argile est placée au-dessus de ces voutains, où sur laquelle un mortier de chaux badigeonné est appliqué (Figure II.31). Les figures II.32, II.33 montrent des photos de planchers en troncs de palmiers et de voûtain.

L'exécution de voûtain de pierre se fait grâce à un coffrage des planches de bois fixées sur les deux bouts dont ces derniers sont enlevés par la suite quand les voûtain sont stabilisés (Figure II.34) (OPVM, 2013).

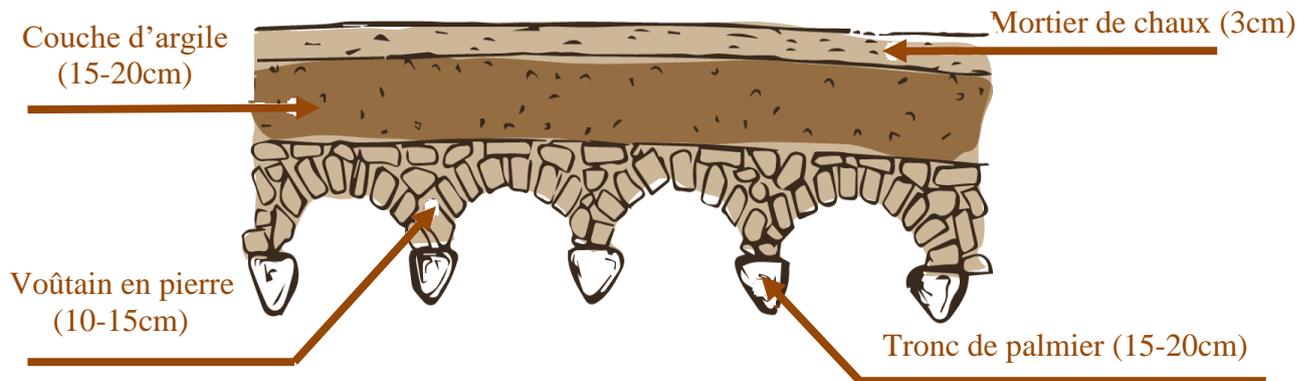


Figure II.31: Coupe sur une toiture de troncs de palmiers et voûtain (OPVM, 2013)



Figure II.32 : Photos montrant le toit en troncs de palmiers et voûtain dans un cas d'étude traité : (a) vue de l'intérieur du toit de la chambre de l'étage, (b) plancher de la galerie (Ikomar) autour du patio (Auteur, 2018)



Figure II.33 : Plancher en troncs de palmiers et voûtains dans un passage couvert : (a), (b), (c), (d) planchers d'un passage couvert dans le Ksar de Béni Isguen (Auteur, 2018)



Figure II.34 : Photo montrant le coffrage d'un toit en troncs de palmier au cours de réalisation : (a) le coffrage de plancher en palmes ; (b) le coffrage de voûtain (Auteur, 2018)

#### II.4.1.3. Toitures (Planchers) composés de troncs d'arbres/palmier et de pierres plates :

Ce type de toit est constitué de troncs d'arbres où de tronc de palmier posé sur les murs, et au-dessus ces troncs, des pierres plates sont disposées et alignées les unes à côté les autres. Ensuite, une couche de pierre et de mortier de Timchemt et sur d'elle une couche d'argile pour l'isolation sont placés sur les pierres plates (OPVM, 2013). Enfin, l'étanchéité avec un mortier de chaux est mise (Figure II.35). Les pierres plates taillées sont utilisées parfois à la place de branches de palmiers et de roseaux. Ce type de toit/plancher est utilisé rarement dans les constructions mozabites lorsqu'il nécessite l'utilisation des quantités importantes de pierres taillées et une large main d'œuvre.

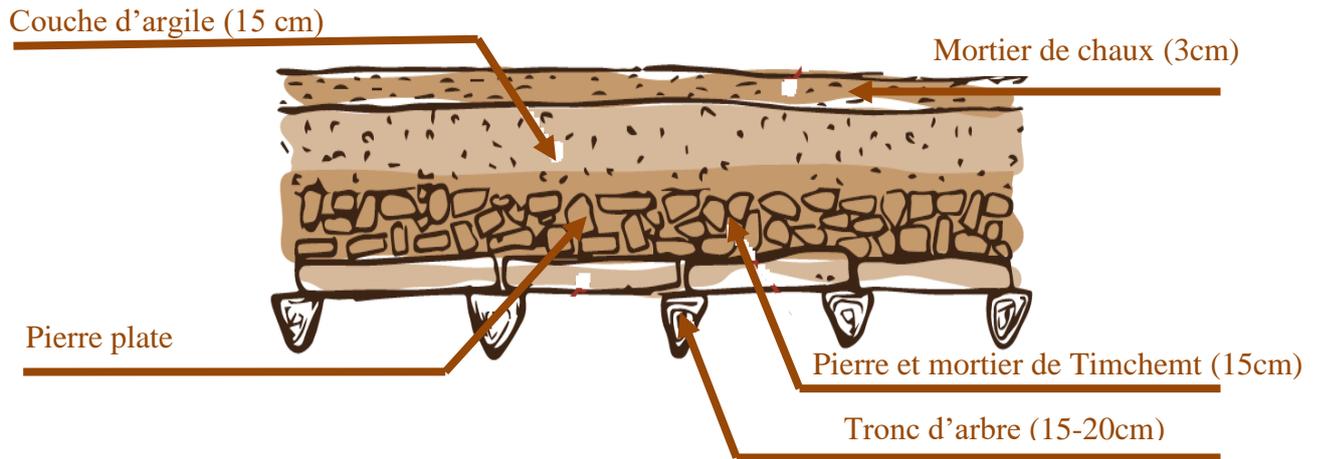


Figure II.35 : Coupe sur un toit en troncs d'arbre et de pierre plate (OPVM, 2013)

#### II.4.2. Les coupoles dans les constructions mozabites :

La construction des couvertures des édifices en « coupoles » dans les Ksour du M'Zab a été toujours présente dès la fondation des Ksour millénaires. Anciennement, l'utilisation des coupoles est due à des raisons climatiques et constructives. Dans les premiers temps qui suivent l'apparition des Ksour, le manque des matériaux de construction comme le bois a conduit à la réalisation des coupoles vu que les palmeraies étaient artificielles dans la vallée du M'Zab. Au contraire à la période de l'apparition et l'implantation des palmeraies réelles, d'où l'existence des matériaux en abondance comme les troncs et les branches de palmiers utilisés dans les constructions. Plus des raisons de manque des matières premières, l'utilisation des coupoles se considère comme une solution très répondante dans les climats chauds et arides à savoir les Ksour du M'Zab (Figure II.36). Les coupoles repoussent les rayons solaires agressifs considérablement et minimisent les températures à l'intérieur des constructions, ce qui réagit positivement sur l'état de confort thermique intérieur.

Les coupoles sont construites en pierre naturelle avec mortier de Timchemt (OPVM, 2013) dont ce dernier se caractérise par la solidité, la rapidité de prise et la facilité d'exécution (Figure II.37.a et b). Parfois, des branches de palmiers sont utilisées comme coffrage à fin de faciliter la pose des pierres. Généralement, les coupoles sont aplaties du haut (Figure II.37.c) ou noyées dans le plancher (OPVM, 2013), et elles sont percées parfois par de petites ouvertures étroites au sommet dans certains cas pour assurer l'aération de l'espace intérieur.

Dans les Ksour de la vallée du M'Zab, il existe de nombreux types de coupoles de formes carrées et circulaires. Les toitures en coupoles sont observées fréquemment et habituellement dans les mausolées, les tombeaux funéraires et les mosquées et elles ne sont pas utilisées dans les maisons ksouriennes vu que la nécessité de l'exploitation des toits-terrasses largement.

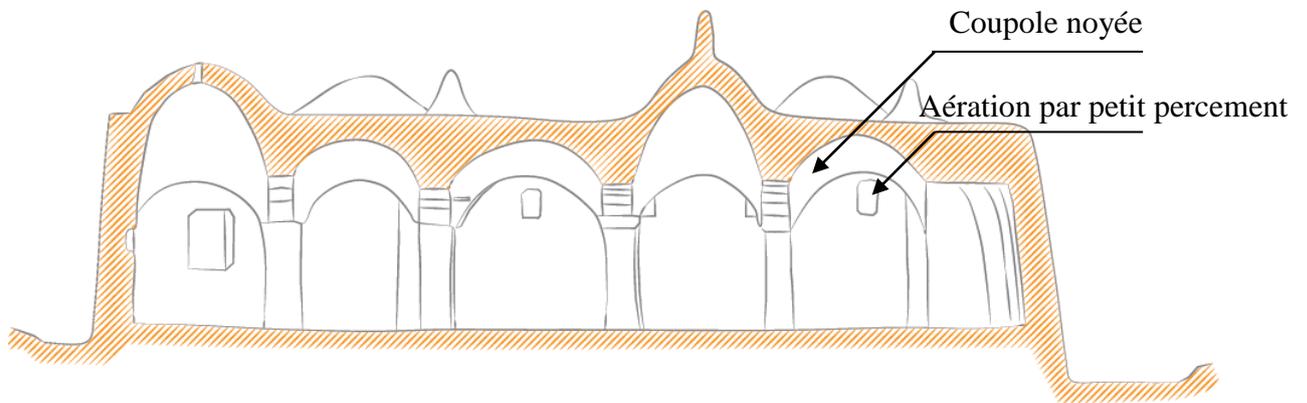


Figure II.36 : Coupe Transversale Mosquée Baba-Oueldjemma, Ghardaïa (OPVM, 2013)



Figure II.37 : Photos des constructions en coupoles dans la vallée du M'Zab : (a) Mosquée Ba-Aissa Oualouane à Ghardaïa ; (b) **Mausolé Chikh Baba-Ouljemma** ; (c) Photos de coupoles aplatées du mosquée Agherme Ouaday- Mélika (OPVM, 2013)

#### II.4.3. Les voûtes dans les constructions mozabites :

L'utilisation des voûtes dans les constructions de la vallée du M'Zab est une ancienne technique appliquée largement par les mozabites dans différents édifices à savoir : les mausolées et tombeaux funéraires, les mosquées, les tours, les couvertures des rues et ruelles, les passages couverts, les portes des Ksour (Figure II.38.a. b. c et d), et même la voûte est utilisée comme plancher de la cave (sous-sol) dans les habitations ksouriennes (Figure II.39.a. b et c). La réalisation des voûtes se caractérise par sa facilité et sa rapidité d'exécution et assure la stabilité de l'édifice. Aussi, la réalisation des voûtes permet de répartir le transfert des charges sur les murs d'une manière équilibrée. Les troncs de palmiers sont utilisés pour construire les voûtes à fin de supporter les charges et stabiliser le bâtiment.



Figure II.38 : Utilisation des voûtes : (a), (b), (c), (d) utilisation des voûtes dans les passages couverts du Ksar de Béni Isguen (Auteur, 2018)



Figure II.39 : Forme de plancher sous-sol (la cave) en voûte d'une habitation dans le Ksar de Béni Isguen (cas d'étude traité) : (a), (b), (c) différente prise de vues (Auteur, 2018)

De plus de l'utilisation des coupoles et des voûtes, il existe aussi des arcs et des planchers inclinés dans les constructions mozabites comme des techniques de construction locales très répandues. Les arcs sont utilisés largement dans les habitations mozabites, les passages couverts, les rues et les ruelles et dans diverses constructions traditionnelles (Figures II.40, II.41 et II.42) à cause de leurs fortes capacités de supporter et répartir les charges et la facilité de leurs réalisations.

La réalisation des arcs se fait par le cintrage des branches de palmiers de façon d'avoir la forme de courbure voulue. Ensuite, le remplissage de l'arc se fait par la pierre et le mortier de Timchemt après leur fixation dans la place voulue et enfin, le crépissage du tous pour avoir des arcs cintrés ou des parties circulaires de différentes formes et tailles (OPVM, 2013). Parfois, les planchers inclinés sont construits en troncs et branches de palmiers/d'arbres pour

supporter la cage d'escalier, aussi la galerie autour West-Dar (Tigharghart) qui se trouve dans l'étage de la maison mozabite ; appelée localement Ikomar.



Figure II.40 : Photos des arcs dans le Ksar : (a), (b) photos des arcs dans le mausolée dans le Ksar d'Al Atteuf (Auteur, 2018)



Figure II.41 : Utilisation des arcs dans les portes d'entrée : (a) porte d'entrée du Ksar Tahamrayat, (b) entrée du Ksar Al-Atteuf (Auteur, 2018)



Figure II.42 : Photos montrant l'utilisation des arcs à l'intérieur des maisons à Béni Isguen : (a) (Auteur, 2018) ; (b) (OPVM, 2018)

## II.5. Le comportement thermique d'une toiture (les phénomènes thermiques et radiatifs) :

La position horizontale (ou quasi horizontale) rend la toiture plus sensible aux influences extérieures de l'environnement. Les interactions entre la toiture et les conditions climatiques extérieures provoquent des échanges radiatifs et thermiques entre la toiture, l'environnement extérieur et l'intérieur du bâtiment (Chen & Lu, 2021). La toiture reçoit le rayonnement solaire provient du ciel, durant la journée. Une partie de ce rayonnement se reflète vers l'extérieur, et une partie est absorbée par la surface de la toiture ; ce qu'augmente sa température. Le rayonnement solaire absorbé par la toiture se transforme en chaleur conduite vers l'intérieur (Bencheikh, 2007). Cette chaleur se traduit par des degrés de températures ambiantes qui se différent selon le type de toiture, sa forme, ses matériaux avec ses conductivités thermiques et l'épaisseur de la toiture ; ce qui entraîne une température de l'air ambiant intérieure plus élevée (Figure II.43). Pendant la nuit, l'échange radiatif se fait entre la surface externe de la toiture et le ciel. Ce dernier a une température moindre que celle de la toiture, ce que produit un flux de chaleur émis vers le ciel. D'autre part, la chaleur emmagasinée dans la toiture le jour est rayonnée et transmise vers l'intérieur du bâtiment, pendant la nuit (Lopez-Besora et al., 2019).

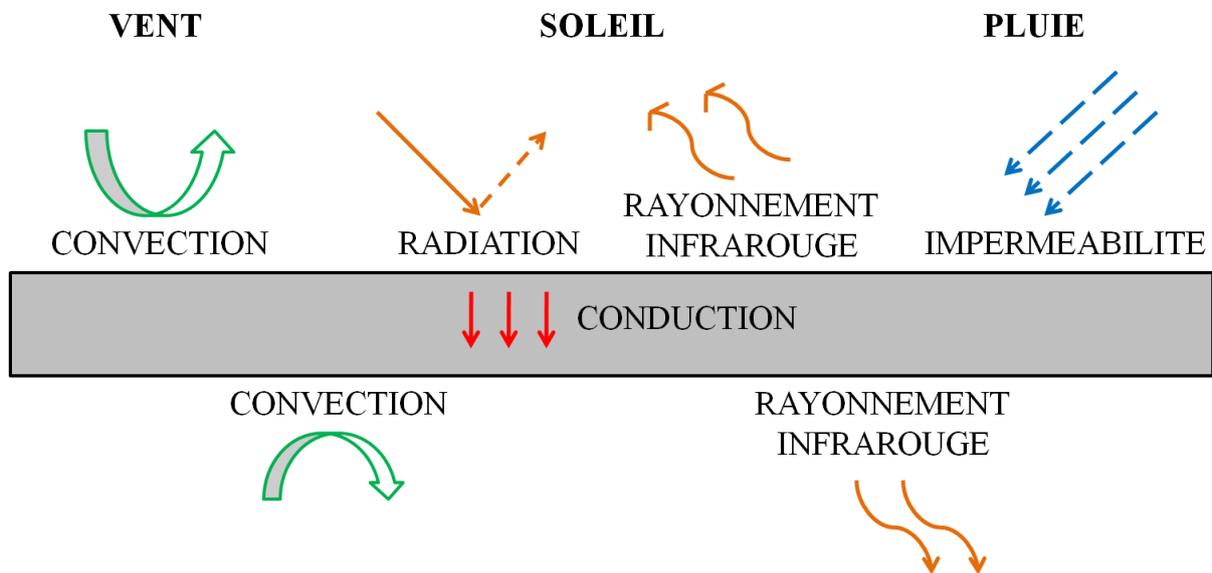


Figure II.43 : Comportement radiatif de la toiture (Sayigh, 2019)

Alors, lorsque la toiture est soumise à fortes irradiations solaires surtout en été dans les régions à climat chaud et aride, cela implique une haute température intérieure. Donc, la toiture doit être bien conçue et bien protégée face à ces influences agressives. Le rayonnement infrarouge produit entre la toiture et le ciel doit être maîtrisé; soit par la conservation de la

chaleur produite et la transformer vers l'intérieur en saison froide; soit le contraire par la réduction de la chaleur et la dissipée vers l'extérieur (Lopez-Besora et al., 2019; Sayigh, 2019). De plus, la toiture contrôle les vents dominants qui assurent la stabilité du bâtiment; ce qui nécessite le bon choix de matériaux adéquats et une bonne exécution. La figure II.44 illustre un modèle de « Kechao Tang et al », utilisé pour le calcul de l'absorption et émission de chaleur.

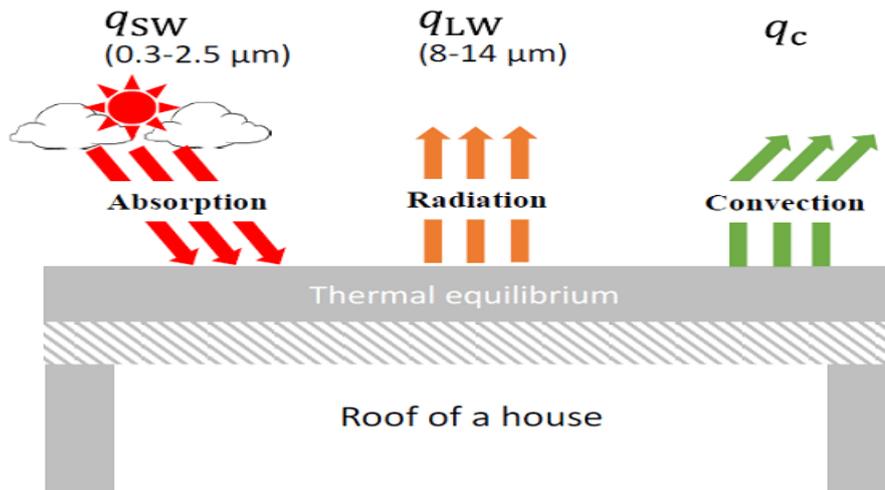


Figure II.44 : Modèle utilisé pour le calcul de l'absorption et émission de chaleur : Kechao Tang et al. /Berkeley University (<https://trustmyscience.com/revetement-toit-capable-reguler-temperature-maisons-toute-annee/>)

Dans les climats chauds et secs, le cas du Ksar de Béni Isguen, la longue durée d'exposition de la toiture aux conditions climatiques extérieures sévères est à l'origine d'une grande part des apports thermiques extérieurs en été et des déperditions thermiques en hiver. Les gains thermiques entrant par la toiture peuvent représenter 30 à 50% des apports totaux (dans le cas d'un bâtiment d'un seul niveau). Alors, les pièces situées sous la toiture sont plus exposées aux gains thermiques plus importants et elles sont inconfortables que les pièces des autres niveaux à cause des apports supplémentaires venant de toiture (marseillaise). La figure II.45 montre les mécanismes de transfert de chaleur dans les toits des bâtiments.

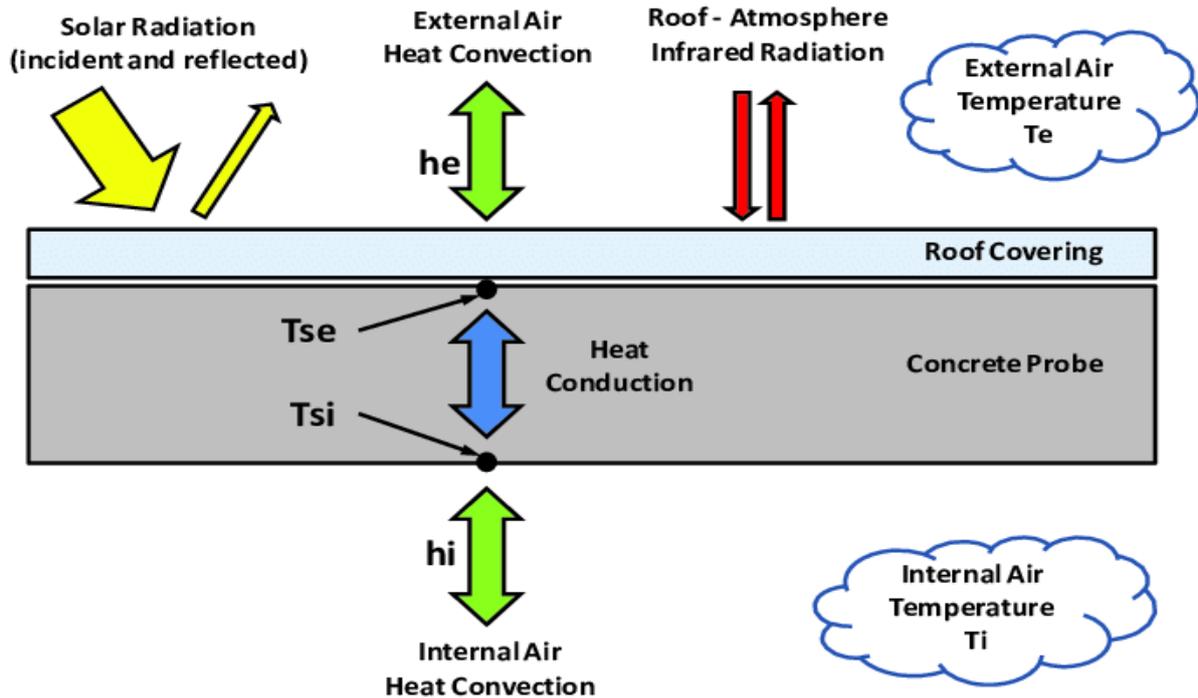


Figure II.45 : Mécanismes de transfert de chaleur dans les toits des bâtiments (Lucero-Álvarez, Martín-Dominguez, Rubín-Zacarías, Ledezma-Gallegos, & Alarcón-Herrera, 2011)

## II.6. La performance thermique de la toiture :

Lorsque dans les villes traditionnelles compactes des régions chaudes et sèches du Sud algérien, la toiture est la surface plus exposée aux rayons solaires agressifs, la protection de la toiture et la réduction des apports solaires sont devenues primordiales et plus en plus de grande importance pour mieux gérer l'état de confort thermique intérieur. Pour cela, la forme et la composition de la toiture jouent un rôle essentiel pour assurer un certain confort thermique. Plusieurs solutions ont été appliquées pour réduire les gains solaires importants en été et garantir une protection souhaitable à savoir : des couvertures mobiles sur le toit (movable cover), des toits parasols, toits avec combles ventilés et même les toitures chaudes, etc. (Figure II.46, II.47).

Ces solutions assurent une protection aux toitures grâce à l'isolation thermique en été et réduire les déperditions thermiques en hiver. Elles permettent à réduire les déperditions et les gains thermiques intérieurs. La couverture mobile sur le toit peut réduire le chauffage /augmenter le refroidissement par rayonnement. Dans le cas de comble ventilé, l'isolant permet de conserver l'inertie thermique intérieure. Pour la toiture chaude, comme on l'a déjà expliqué ou l'isolant thermique est placé à l'extérieur, elle protège le toit de fortes irradiations solaires.

Alors, la protection de la toiture a un grand intérêt sur le plan énergétique dont l'isolation d'un toit sert à diminuer la consommation énergétique d'un édifice, améliore le confort thermique pour faire satisfaire les usagers, et garantir la stabilité du toit.

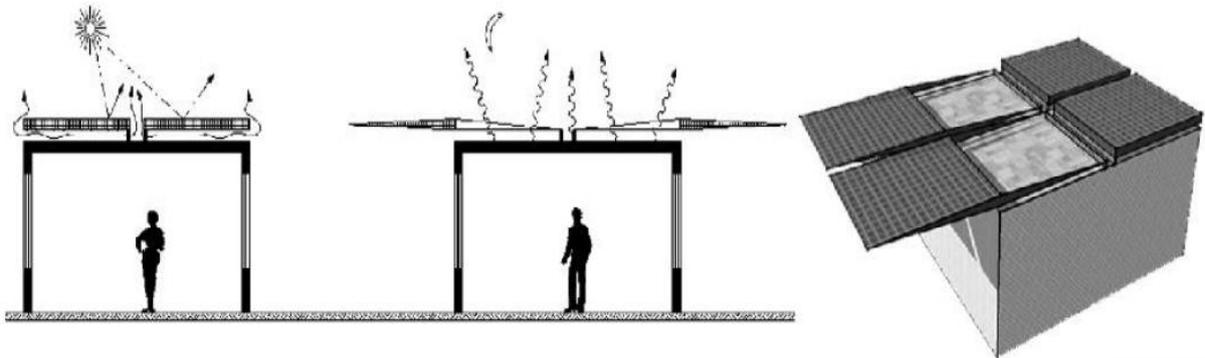


Figure II.46 : La couverture mobile sur le toit (Movable Cover) (Lavaf Pour & Surat, 2012)

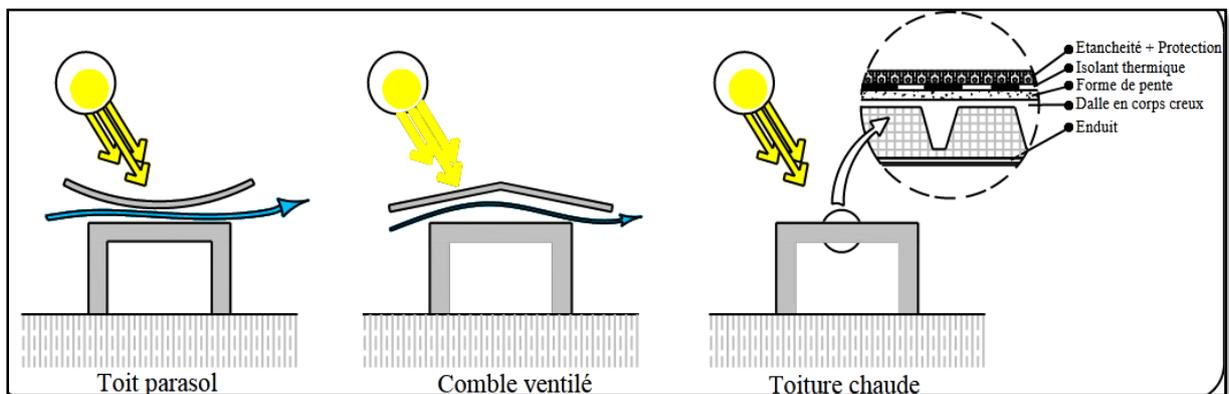


Figure II.47: Les différentes méthodes de protection de la toiture (Lavigne, 1998)

## II.7. Comment la toiture réagit-elle sur le confort thermique ?

Le confort de l'être humain est l'objet fondamental de toute opération ou intervention humaine. Le confort thermique est l'un des types de confort le plus important pour garantir un mode de vie satisfaisant. La bonne conception de la toiture peut devenir un élément prépondérant d'une construction durable respectueuse de l'environnement. Lorsque le toit représente jusqu'au 50 % de déperditions thermiques, la bonne isolation de ce dernier est indispensable pour assurer un certain confort (Gagliano, Detommaso, Nocera, & Evola, 2015). L'importance de la toiture exige l'utilisation de techniques adéquates pour assurer la bonne fonction de la toiture. Aussi, la réduction de température entrant à travers la toiture permet de réaliser une économie d'énergie aussi bien en chauffage qu'en climatisation. Plusieurs solutions et techniques de refroidissement sont développées et appliquées sur la toiture pour assurer un confort thermique agréable, ce qui rend la vie à l'intérieur tolérable. La toiture végétalisée utilisée dans quelques régions du monde a montré son efficacité de réduire la consommation énergétique. Les toits de forme inclinée (en pente) offrent moins de

contact avec les conditions extérieures par rapport à la toiture plate, ce qui permet de réduire les déperditions thermiques. Alors en termes de confort, il est recommandé d'utiliser les isolants thermiques par l'extérieur (la toiture chaude) de la toiture, qui aura un impact positif sur le confort en été, précisément dans les espaces situés sous la toiture. La bonne performance thermique de la toiture sert à limiter les gains de chaleur en été et les pertes vers l'extérieur en hiver. La protection de la toiture contre les rayons agressifs estivaux, la bonne gestion des gains solaires externes et internes, et l'assurance d'une ventilation nocturne pour refroidir la masse de l'édifice sont des stratégies primordiales doit être prise en compte à fin d'assurer un confort thermique. Donc, utiliser une toiture de façon écologique assure un confort thermique aux usagers.

Aussi, le toit peut être utilisé pour s'éclairer grâce à des ouvertures ou des percements sur le toit comme le « Chebek » chez les mozabites qui est la source de lumière principale dans les maisons traditionnelles des Ksour (maison à patio). Il est possible, aussi d'équiper la toiture avec des panneaux solaires ou des éoliennes pour fabriquer l'électricité. De même, le toit peut être équipé par un système de récupération des eaux pluviales pour les réutiliser par exemple dans l'arrosage des plantes.

### Conclusion :

La toiture constitue un champ d'intervention très important qui peut contribuer à fournir une économie d'énergie significative et des avantages environnementaux. À cause de sa forme, son orientation, sa composition, sa surface et sa forte exposition aux rayonnements solaires intenses, la toiture est une source majeure de gain de chaleur. Alors, la protection de cette dernière et l'assurance de sa bonne performance thermique sont devenues une exigence primordiale pour garantir un confort thermique attendu.

Ce chapitre a traité plusieurs types de toitures utilisées dans le monde et dans les régions à climat chaud et aride pour s'adapter aux conditions climatiques sévères à fin d'offrir une bonne résistance aux flux de chaleur venant de l'extérieur vers l'intérieur. Des toits-terrasses, des coupoles, des voûtes sont des types de toitures utilisés dans les régions sèches et arides. En terre, en pierre, ou autre matière locale, la toiture représente un modulateur thermique qui peut, influe considérablement sur l'état de confort thermique dans les villes traditionnelles des climats chauds et arides. La toiture-terrasse est le type utilisé fréquemment dans les Ksour mozabites pour dormir dans les nuits de l'été chaud lorsqu'elle représente l'espace de soulagement après de longues heures de surchauffe.

Les conditions climatiques du climat chaud et sec exigent l'application des stratégies adéquates face à la rudesse du climat consistant une forte isolation de l'extérieur d'où le toit offre une masse thermique élevée et une bonne isolation thermique contre les rayons solaires agressifs et les vents chauds de la saison estivale. Lorsque les précipitations sont très faibles dans les Ksour, la fonction principale de la toiture est la fonction thermique. Dans les Ksour mozabites, les principaux échanges radiatifs ont lieu au niveau de la toiture, soit le jour avec les apports solaires, soit la nuit avec le rayonnement du toit vers la voûte céleste.

La forme de la toiture dans ce type de climat est assez importante, dont la surface en contact avec l'extérieur doit être minimale et basse que possible pour réduire l'exposition directe aux rayons solaires. Dans ce sens, plusieurs solutions ont été développées dans le monde par des experts pour maîtriser la chaleur excessive entrant par la toiture. Dans le chapitre suivant, une revue de littérature et une analyse des recherches traitées et prouvées dans le monde vont être exposées pour mieux comprendre les différentes solutions passives développées dans ce domaine.

# Chapitre III: Revue de littérature sur l'optimisation de la performance thermique des toitures

#### Introduction :

Le rôle premier de la toiture est de protéger l'être humain des conditions extérieures, tout en assurant la stabilité et l'isolation des espaces de vie. Désignant les éléments composant la couverture de l'édifice, elle assure non seulement votre sécurité, mais aussi votre confort et votre bien-être. Sans elle, vous serez exposé à la pluie, au vent, et toutes sortes d'intempéries ou effets extérieurs agressifs. Voilà pourquoi, il est très important que vous deviez avoir une toiture de haute qualité qui s'adapte à vos besoins, c'est-à-dire une toiture construite de la meilleure des manières possibles.

L'étude des pratiques et méthodes d'adaptation de l'architecture traditionnelle a montré l'ingéniosité des ancêtres à exploiter les ressources disponibles localement pour s'adapter aux conditions climatiques sévères. Les pratiques traditionnelles possèdent plusieurs méthodes et techniques de conception et de construction des toitures basées sur les ressources et les matériaux disponibles pour construire des toitures adéquates et qui répondent aux besoins locaux. De plus des méthodes traditionnelles et le savoir-faire préconisé par nos ancêtres, plusieurs chercheurs dans le monde ont développé des systèmes de toitures comme des solutions pour optimiser la performance des toitures, et par conséquent améliorer l'état de confort avec une consommation énergétique rationnelle. De nombreuses recherches ont été effectuées pour améliorer le refroidissement des espaces et évaluer l'effet de la performance thermique et énergétique des toitures sur l'amélioration du confort thermique et la réduction des consommations d'énergie surtout celles dédiées à la climatisation. Plusieurs systèmes et techniques de refroidissement passif en toitures ont été élaborés, tester et développer pour économiser l'énergie. Ces techniques sont prouvées par plusieurs méthodes. Des cellules test réelles, des mesures in situ, des modèles mathématiques numériques ou des simulations thermiques sont différentes méthodes développées par plusieurs chercheurs à fin d'évaluer les systèmes de refroidissement passif. Dans la partie suivante, on va citer quelques solutions intermédiaires en indiquant les valeurs économiques d'énergie.

Donc, l'objectif de ce chapitre est de faire un état de l'art sur les recherches exécutées et développées dans le monde et en Algérie concernant l'impact des toitures sur la performance énergétique des édifices, surtout dans les zones chaudes. L'objet est de faire une recherche sur les travaux faits par des chercheurs pour optimiser la sobriété énergétique des toitures pour assurer un certain confort optimal à l'intérieur des édifices, afin d'améliorer les conditions de vie des usagers.

### III.1. L'optimisation de la performance thermique et énergétique des toitures et le refroidissement passif :

Par définition, le refroidissement passif est une technique permettant le transfert d'énergie d'un espace à un autre afin d'atteindre une température inférieure à celle du milieu environnant (Geetha & Velraj, 2012). Cette technique est la base de toute solution nécessaire pour contrôler et réduire la demande de refroidissement d'un espace (Song et al., 2021). Le principe de base de refroidissement passif dépend de deux conditions essentielles : « l'accessibilité à un dissipateur de chaleur qui a une température plus basse que l'air intérieur et l'amélioration du transfert de chaleur vers le dissipateur de chaleur » (Kamal, 2012; Song et al., 2021).

La relation entre l'optimisation de la performance thermique et énergétique des toitures et le refroidissement passif est complémentaire ; lorsque le but de l'optimisation de la performance des toitures est le refroidissement passif des espaces. L'optimisation des performances des toitures conduit à réduire les températures des surfaces externes et internes de toiture et par conséquent, les températures intérieures ambiantes des surfaces se minimisent et les besoins en énergie se réduisent surtout durant la période de surchauffe des étés chauds des régions des climats chauds et arides. Plusieurs techniques de refroidissement passif pour optimiser la performance thermique et énergétique des toitures ont été développées, mesurées, testées, simulées, calculées et réalisées pour évaluer leurs efficacité à améliorer le confort thermique des espaces et réduire les charges d'énergie (Figure III.1).

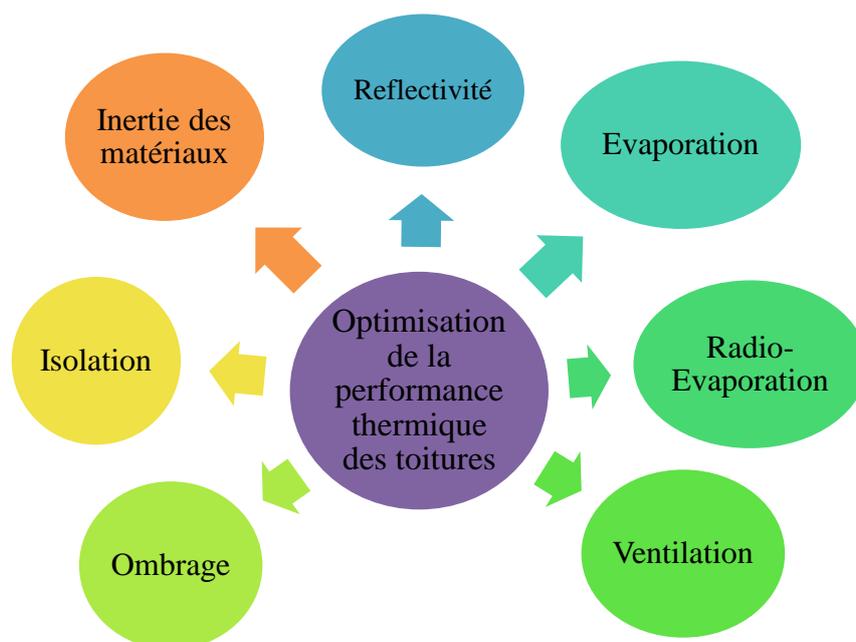


Figure III.1 : Techniques d'optimisation de la performance thermique et énergétique des toitures (Auteur, 2022)

### III.2. Optimisation de la performance thermique des toitures par « Évaporation » :

L'optimisation de la performance thermique des toitures par évaporation est une technique de refroidissement passif dans laquelle l'air extérieur est refroidi par l'évaporation d'eau dans la toiture avant d'être introduit dans l'édifice. Le principe physique de cette technique réside dans le fait que la chaleur de l'air est utilisée pour évaporer l'eau et refroidissant aussi l'air, qui à son tour refroidit l'espace intérieur de l'édifice par la suite. Néanmoins, le refroidissement passif par évaporation peut être aussi indirect. La toiture peut être refroidie avec des tampons mouillés, un étang ou un bassin d'eau, dont le plafond se transforme en un élément de rafraîchissement qui refroidit l'espace en dessous par convection entre l'air et l'eau et par rayonnement sans augmenter l'humidité relative intérieure (Kamal, 2012).

Le refroidissement par des systèmes évaporatif sur le toit s'est avéré être une technique passive efficace dans les climats chauds et arides.

- Le travail fait par Al-Hemiddi (Al-Hemiddi, 1995), correspond à l'évaluation d'un étang de toit avec circulation d'eau nocturne pour assurer un refroidissement passif dans les bâtiments de la ville de Riyad en Arabie Saoudite. L'étang d'eau est rempli de cailloux avec une couche isolante. Au-dessus de cette dernière, des tuiles minces sont placées sur l'isolant. Les résultats indiquent que l'utilisation d'un toit avec un sol humide ombragé (par 10 cm) de galets peut réduire la température moyenne intérieure avec 5°C par rapport à la température extérieure mesurée et testée pendant le mois d'août dans le climat chaud et aride de la ville de Riyad en Arabie Saoudite. Cette technique a montré leur efficacité de réduire la température intérieure avec quelques degrés, ce qui réduit les besoins de climatisation. Néanmoins, cette technique de refroidissement n'est pas trop conseillée dans le cas des Ksour du Sud algérien le cas de notre étude, parce que l'eau constitue un problème primordial lorsqu'il est très expansif. Donc, dans le cas de l'utilisation des systèmes de refroidissement par évaporation il est préférable de trouver d'autres solutions pour garantir les sources d'eau, lorsque l'eau douce coûte cher dans le Sud algérien. De plus, lorsque les toits des maisons mozabites du Ksar sont épais et lourds, il faut prendre en considération les charges d'eau et trouver des solutions pour supporter les charges supplémentaires des systèmes des étangs d'eau. De plus, cette technique nécessite un entretien régulier.

Également, plusieurs systèmes de refroidissement passif sur les toits se sont avérés efficaces pour réduire les températures intérieures et les besoins énergétiques. Une autre étude menée par Sabzi et al, en 2015 (Sabzi, Haseli, Jafarian, Karimi, & Taheri, 2015), s'est concentrée sur la réduction de la charge de refroidissement dans les bâtiments par des options de refroidissement passif appliquées sur le toit. Bassin d'eau sur le toit, chemise d'eau sur le toit, écran anti-rayonnement sur le toit (**Water pond on roof, water jacket on roof, radiation shield on roof**) sont trois systèmes de refroidissement passifs qui ont été évalués expérimentalement et numériquement (Figure III.2). Un modèle mathématique a été développé pour tester l'efficacité des systèmes tenant en compte les charges thermiques dynamiques de conduction, convection et rayonnement. Ensuite, les résultats numériques ont été validés par rapport aux données expérimentales du modèle construit et testé à Chiraz, en Iran. Les résultats expérimentaux et numériques montrent que ces systèmes de refroidissement appliqués sur le toit réduisent les charges de refroidissement en été. L'utilisation de l'équation  $X_{c,j} = Q_{c,j \text{ daytime}} / Q_{c,ord,roof \text{ daytime}}$  donne les valeurs de  $X_{c,water \text{ pond}}$ ,  $X_{c,water \text{ jacket}}$ ,  $X_{c,radiation \text{ shield}}$  égaux à: 0.81, 0.96 et 0.87 respectivement. Sachant bien que :  $X_{c,j}$  est la charge de refroidissement instantanée requise pour le bâtiment avec la méthode de refroidissement passif j (j : water pond, water jacket or radiation shield on roof ; c'est-à-dire : bassin d'eau, chemise d'eau ou écran anti-rayonnement sur le toit) et  $Q_{c,ord,roof}$  est la charge de refroidissement passive requise pour un bâtiment avec un toit ordinaire.  $X_c$  C'est le rapport de la charge thermique résultante. Ces valeurs indiquent que l'application de bassin d'eau sur le toit donne l'économie d'énergie maximale par rapport aux deux autres techniques. Donc, les résultats montrent que le bassin d'eau présente les meilleures performances par rapport aux deux autres systèmes.

Critique : L'application des étangs d'eau sur le toit nécessite l'eau qui coûte cher dans les régions à climat chaud et aride. Aussi, les charges structurelles additionnelles constituent un problème majeur à réaliser dans le cas de l'application des bassins d'eau sur les toits épais. L'écran anti-rayonnement sur le toit a montré leur efficacité à réduire les charges de refroidissement pendant l'été. L'analyse des résultats des températures de l'étude indique que le bassin d'eau et l'écran anti-rayonnement donnent les mêmes résultats pendant la matinée avant le midi et à 12 :00, les résultats montrent que les températures sont à 38.2°C, 39.3°C et 41.8°C pour l'écran anti-

rayonnement, le bassin d'eau et la chemise d'eau respectivement, par rapport à une température extérieure égale à 45.5°C (Figure III.3). Tandis que les valeurs de températures après 15 :00 sont favorables pour le cas d'un bassin d'eau. **On peut dire que la stratégie de l'application d'un moyen anti-rayonnement sur le toit peut améliorer les charges de refroidissement.**

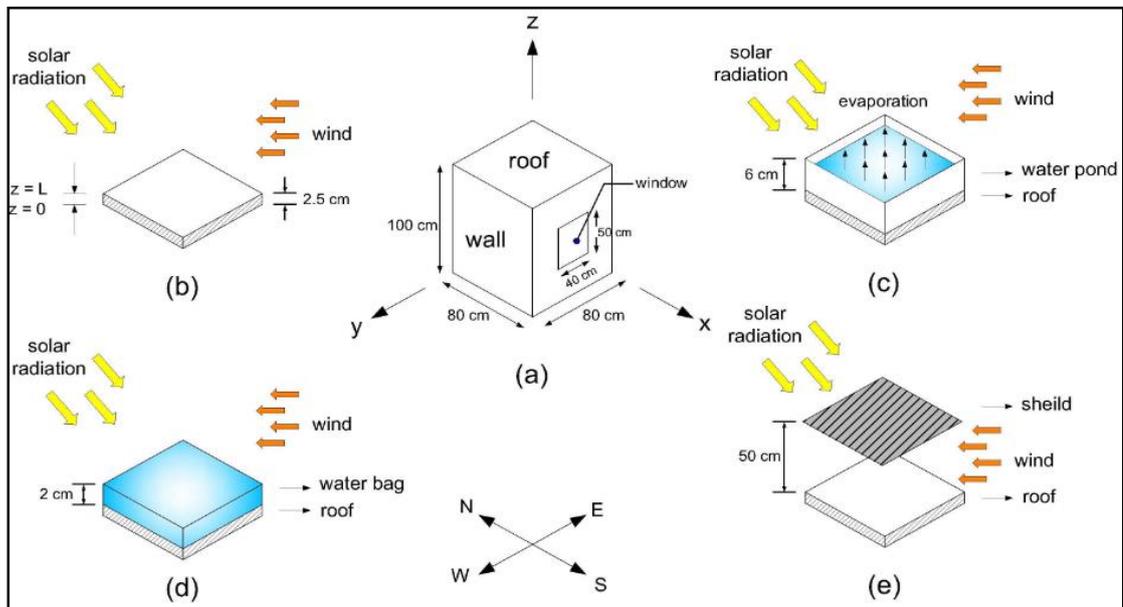


Figure III.2 : Les systèmes de refroidissement passifs sur les toits (Sabzi et al., 2015)

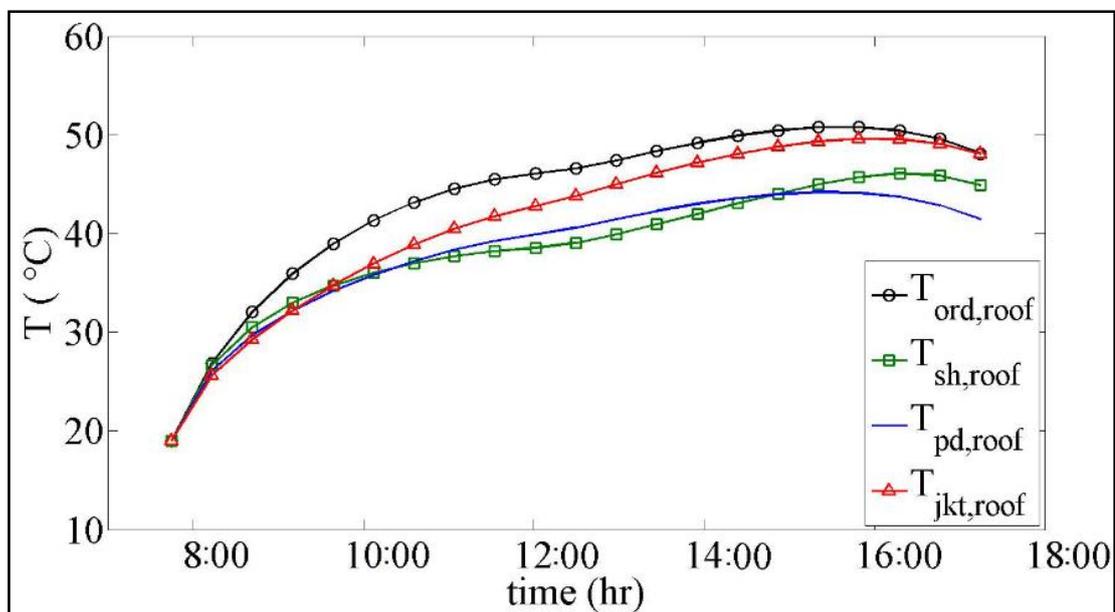


Figure III.3 : Variations dans le temps des températures calculées à l'intérieur du bâtiment avec toit ordinaire, chemise d'eau sur le toit, bassin d'eau sur le toit et écran anti-rayonnement sur le toit (Sabzi et al., 2015)

- Ensuite, “**water retaining bricks**” en tant que technique de refroidissement a montré leur efficacité pour réduire les températures intérieures et économiser l'énergie, en particulier pendant la saison chaude. La recherche menée par (Han, Xu, & Qing, 2017) présente une méthode de refroidissement passif par évaporation à travers une brique de toiture à rétention d'eau, permettant de réduire les charges de refroidissement pour assurer un confort thermique pendant la saison chaude. Un modèle expérimental est conçu à Mianyang, en Chine, pour évaluer le transfert de chaleur de cette technique (Figure III.4, III.5). Les résultats montrent que dans les bâtiments résidentiels, un toit plat avec une brique de rétention d'eau peut abaisser la température intérieure de 1,9°C en été par rapport à un toit plat classique conventionnel.

Les résultats de l'étude montrent également que cette technique de brique de rétention d'eau sur le toit ne peut pas donner la meilleure capacité d'isolation thermique dans les modèles testés (dortoirs) en hiver. Par conséquent, les techniques de refroidissement passif utilisant des bassins d'eau restent limitées, en particulier en saison froide.

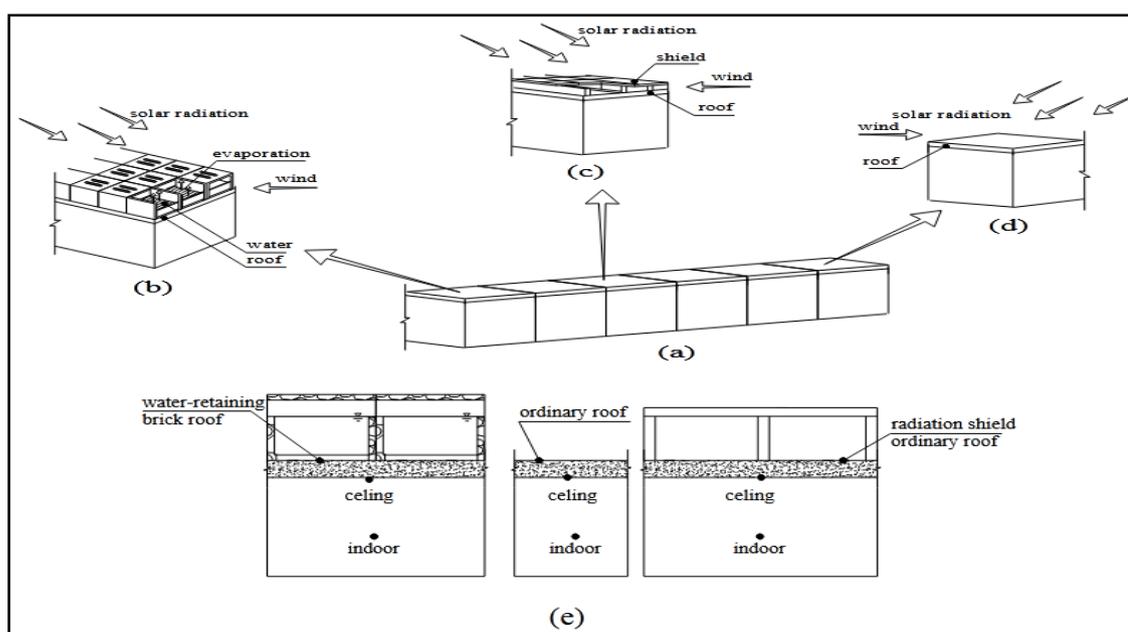


Figure III.4 : Représentation schématique de (a) la mise en page expérimentale, (b) un toit avec « la brique de rétention d'eau », (c) un toit avec un écran de rayonnement, (d) un toit ordinaire sans refroidissement passif, (e) expérience de mesure de la distribution des points (Han et al., 2017)

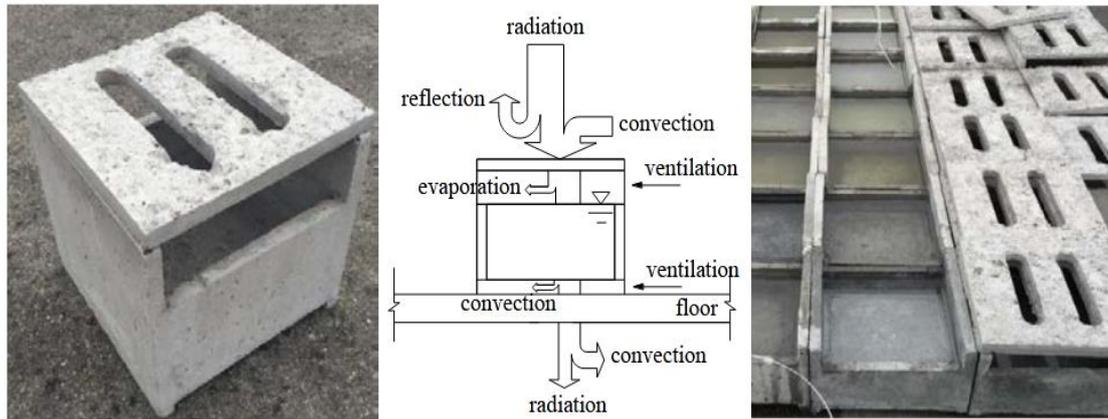


Figure III.5 : La structure en brique et le mécanisme de transfert de masse (Han et al., 2017)

Critique :

L'application de la technique de brique de rétention d'eau montre ses limites à donner de bons résultats de la meilleure capacité d'isolation thermique pendant la saison froide. De plus, il nécessite un entretien régulier. De plus, les fuites d'eau qui peuvent apparaître dans ces systèmes de rétention d'eau peuvent être un énorme problème car il est difficile de localiser les fissures dans un toit, ce qui présente également un point à considérer étant donné l'inefficacité de la fabrication dans le Sud algérien.

Alors les techniques de refroidissement passif par des étangs d'eau restent très limitées dans le contexte d'étude développé dans notre étude.

- Ensuite, la recherche menée par (Sharifi & Yamagata, 2015) porte sur l'étude et l'évaluation des étangs d'eau sur le toit (les bassins de toit) et leur effet sur le chauffage et le refroidissement passif des bâtiments. 19 systèmes de refroidissement et 4 systèmes de chauffage des étangs de toit ont été identifiés et examinés (Figure III.6). Une revue de littérature et une recherche documentaire avec une analyse détaillée ont été élaborées à travers cette étude. Les résultats indiquent que les étangs de toit avec des sacs de jute humides, des étangs de toit ombragés, des étangs de toit ventilés et des étangs de toit à isolation mobile sont plus efficaces que les autres variantes de systèmes de bassins de toit. Ces derniers peuvent réduire les besoins en chauffage et en climatisation pendant l'année et offrir un confort thermique. Aussi, ces techniques de refroidissement passif évaporatif peuvent être intégrées dans le but de conception neutre en carbone.

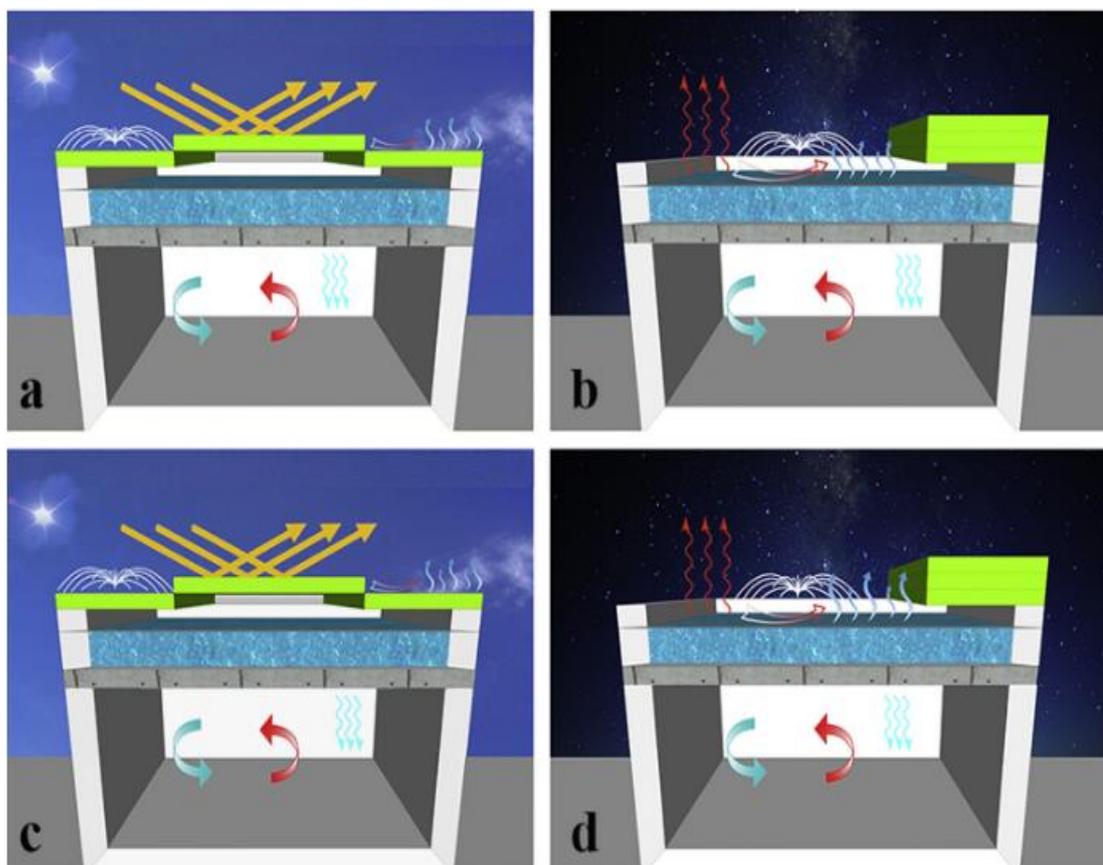


Figure III.6 : Quelques systèmes de refroidissement évaporatif examinés (a et b) Bassin de toit avec isolation mobile et jet d'eau continu ; (c et d) bassin sur le toit avec isolation mobile et arrosage nocturne (Sharifi & Yamagata, 2015)

Critique :

L'évaluation des systèmes de bassins d'eau sur le toit a montré de faibles améliorations de performances thermiques dans certains cas par rapport à d'autres techniques passives. Plusieurs facteurs importants qui réagissent sur l'efficacité des systèmes des étangs d'eau à savoir : la profondeur d'eau, le matériau du tablier, et même les conditions climatiques, etc. Ces derniers avec d'autres paramètres comme la ventilation nocturne équipée avec d'autres stratégies passives peuvent influencer sur la pertinence et la rentabilité thermique et énergétique des systèmes, ce qui rend l'adoption des bassins d'eau difficile à réaliser.

Néanmoins, nous pensons qu'il n'est pas idéal d'adopter des étangs d'eau dans le cas des habitations ksouriennes à bas prix en Algérie, car ils ont besoin d'une structure de toit spéciale pour supporter la charge morte de l'eau. Aussi, le Sud algérien souffre d'une pénurie d'eau, où dans le cas d'un bassin d'eau sur le toit est utilisé, nous recommandons d'utiliser l'eau grise au lieu de l'eau douce. De plus, les étangs d'eau nécessitent un entretien régulier.

- Ensuite, l'amélioration de la performance thermique des toitures par des techniques de refroidissement passif évaporatif peut être réalisée par différents dispositifs. La technique de refroidissement passif par évaporation à courant descendant (PDEC) est une technique évaporative à aspiration descendante qui se compose d'une tour à aspiration descendante avec des tampons de cellulose mouillés au sommet de la tour (Kamal, 2012). Elle correspond à une technique passive efficace à faible énergie utilisée pour refroidir et ventiler les espaces dans les climats chauds et secs (Bowman et al., 1997; Paanchal & Mehta, 2017).

Dans cette technique, l'eau est distribuée au-dessus des tampons, recueillie au fond d'un puisard et ensuite recirculée par une pompe. Parfois, la pression dans la conduite d'alimentation en eau est utilisée à la place de la pompe pour faire monter l'eau sur les coussins afin d'éliminer l'utilisation de l'énergie électrique.

Aussi, dans quelques modèles de ce système évaporatif, l'eau est pulvérisée par des microniseurs (buses) et les tours sont équipées de dispositif évaporatif au sommet pour fournir l'air frais par écoulement gravitaire. Le principe de fonctionnement de ces tours ressemble au principe de cheminée inversée où l'air chaud monte dans la colonne d'air chaud et l'air frais descend dans l'autre colonne. Aussi, le débit d'air dépend de plusieurs paramètres à savoir : la performance du dispositif évaporatif, la section transversale et la hauteur de la tour, structure de la tour, et la résistance aux flux d'air dans la tour, etc.

Un exemple de tour de refroidissement avec évaporation à courant descendant a montré son efficacité au Torrent Research Center à Ahmedabad (Figure III.7.a et b). L'évaluation de performance thermique de cette tour a indiqué que les valeurs de températures intérieures enregistrées étaient de 29 à 30 °C, tandis que les températures extérieures étaient de 43 à 44 °C, et les changements d'air étaient de six à neuf changements par heure dans les différents étages (Kamal, 2012).

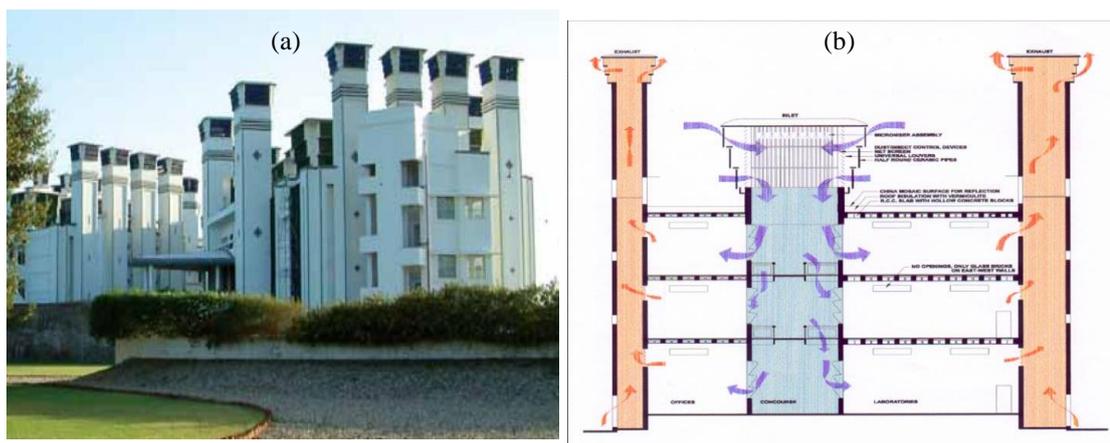


Figure III.7 : Refroidissement passif par évaporation à courant descendant dans le centre de recherche de Torrent, Ahmedabad : (a) vue de la tour (Kamal, 2012) ; (b) schéma représentatif du principe de fonctionnement (Thomas & Baird, 2006)

Critique :

La technique de refroidissement passif par évaporation à courant descendant (PDEC) s'appuie essentiellement sur l'utilisation d'une tour à tirage descendant dont le sommet est équipé avec un système évaporatif. Ce dernier est difficile à adopter, intégrer et développer dans le cas des habitations à faible coût en Algérie lorsque les habitations ksouriennes ont une hauteur limitée construite selon les besoins et les coutumes locales des peuples mozabites. La technique de PDEC est généralement appliquée dans les immeubles à grandes hauteurs.

### III.3. Optimisation de la performance thermique des toitures par « Radio-évaporation » :

La toiture d'un édifice peut être utilisée comme un radiateur nocturne et aussi comme une chambre froide dans les étés chauds. Cette technique est considérée comme une solution efficace et rentable sur le plan thermique et énergétique. Pendant la journée, la toiture isolée de l'extérieur par des dispositifs radiatifs permet de minimiser les gains de chaleur provenant des rayons solaires incidents et de l'air ambiant. Pendant la nuit, la toiture exposée au ciel perd la quantité de chaleur emmagasinée par convection et aussi par rayonnement à ondes longues (Kamal, 2012). Parfois, des études sur l'amélioration des performances thermiques des toitures et le refroidissement passif sur le toit combinent les systèmes par évaporation et par radiation pour développer un système de refroidissement passif efficace (Kamal, 2012). Donc, plusieurs recherches ont évalué les performances thermiques et énergétiques des toits radiatifs et évaporatifs pour améliorer le confort thermique et réduire les consommations d'énergie.

- L'étude menée par Benchikh et Bouchair en 2004 (Cheikh & Bouchair, 2004) correspond à la réalisation d'un prototype avec un système de toiture radio-évaporative pour améliorer le refroidissement de l'espace dans les climats chaud et aride selon les conditions climatiques de la ville de Laghouat dans le Sud d'Algérie (Figure III.8.a et b). Un modèle mathématique numérique a été développé pour valider les résultats. Le toit proposé est composé d'un lit de roches dans un bassin d'eau se trouve sur un plafond en béton. Une plaque d'aluminium est portée au-dessus de ce lit et un pigment à base de titane est peint la face extérieure de la plaque pour refléter les rayons solaires journalière (Figure III.8.c). Une ventilation naturelle nocturne est combinée à ce système. Les résultats montrent que le toit radio-évaporatif peut abaisser la température de l'air intérieure de la cellule construite par quelques degrés jusqu'à 8 °C pendant la journée.

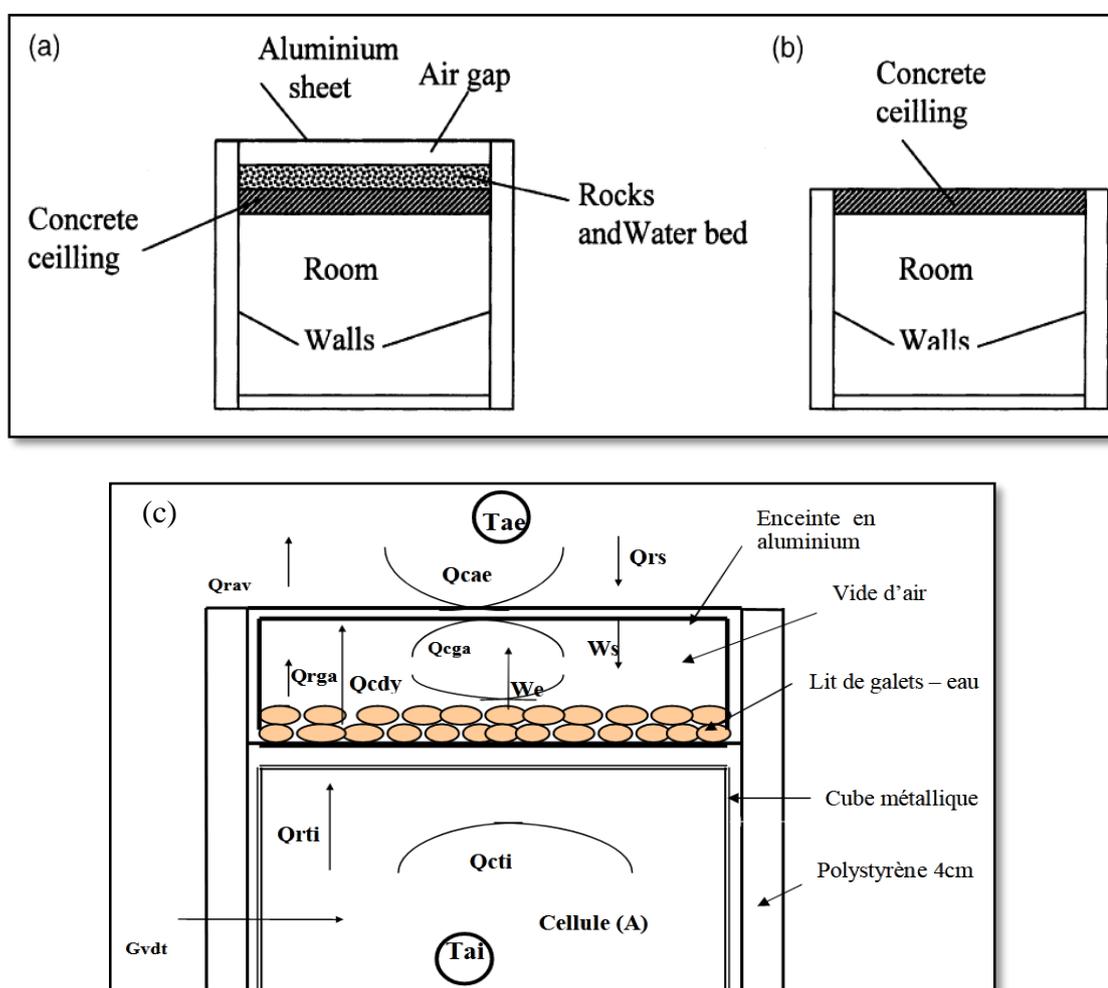


Figure III.8 : Description du modèle: (a) pièce avec système de toit de refroidissement ; (b) pièce sans système de toit de refroidissement ; (c) Cellule avec système de refroidissement passif détaillée (Cheikh & Bouchair, 2004)

Critique :

On peut par généraliser les résultats de cette étude et les considérés comme significatif lorsque la cellule réalisée correspond à une pièce cubique de 3 m de haut sur 3 m de large. De plus, l'eau présente un problème majeur dans les villes traditionnelles des climats chaud et aride du Sud algérien, lorsqu'il coute très cher et les systèmes des étangs d'eau nécessitent beaucoup d'eau pour qu'ils soient fonctionnels.

Les systèmes évaporatifs exigent une structure spéciale pour supporter les charges supplémentaires des bassins d'eau. Une réalisation stricte et performante doit être assurée pour éviter les fuites d'eau dans les systèmes de toiture évaporative, pour éviter les fissures dans le toit et l'infiltration de l'eau, ce qui rend le système inefficace et ne donne pas les meilleurs résultats attendus.

➤ Hydrodynamics Cool Roof System with Energy Recovery (SHETRE) :

SHETRE sont des systèmes de refroidissement innovants qui ont été développés pour évaluer leurs performances thermiques afin de réduire la température intérieure et les économies d'énergie.

Une évaluation de performance thermique d'un système de refroidissement passif de toit innovant appelé « Hydrodynamics Cool Roof System with Energy Recovery » (SHETRE) a été exécutée par Chávez et al., en 2016 (Chávez, del Pozo, Haro, & Rodríguez, 2016). L'objet est de réduire la température intérieure des toits plats en béton des bâtiments situés dans les climats tropicaux. SHETRE constitue de modules interconnectés couvrants le toit d'un bâtiment résidentiel et alimenté par l'eau douce (Figure III.9, III.10 et III.11). Ce système se base sur l'absorption des rayons solaires par les modules et le transfert de chaleur vers les particules d'eau se déplaçant vers l'intérieur (sachant que l'eau utilisée est renouvelée dans le système quand l'eau chaude est consommée pour les activités domestiques chaque fois). L'approche expérimentale appliquée dans ce travail correspond à la réalisation d'un prototype avec un toit SHETRE et un prototype avec un toit nu de référence pour évaluer leur potentiel de refroidissement réalisé à l'université de Colima en Mexique. De plus, un logiciel d'éléments finis CFD a été utilisé pour effectuer les simulations. Les résultats montrent que le système proposé SHETRE peut réduire la température intérieure avec 8°C pour les heures les plus chaudes quand la température extérieure atteint 35°C.

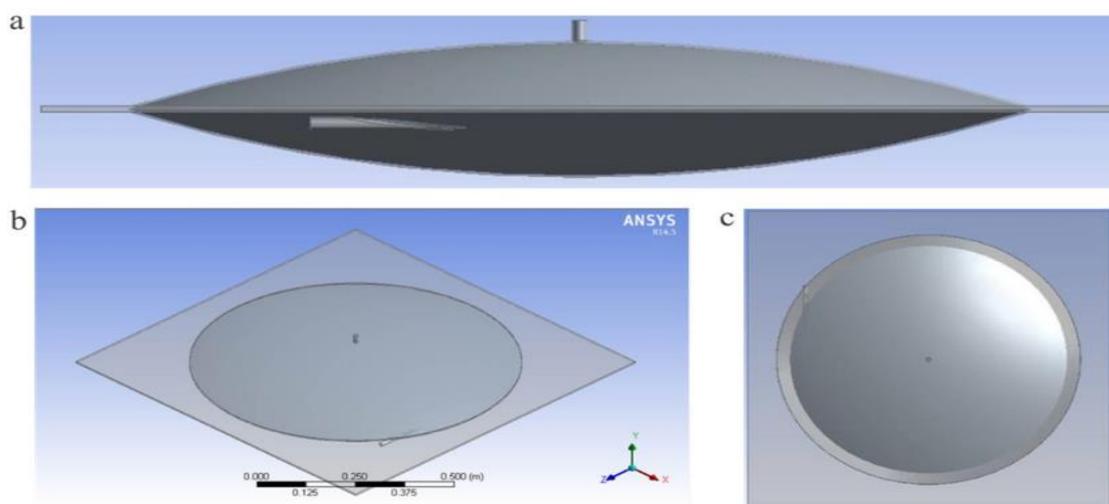


Figure III.9 : Conception et vues du SHETRE (a) Côté (b) Isométrique (c) Face (Chávez et al., 2016)



Figure III.10 : Vue du système (Approche expérimentale) (Chávez et al., 2016)

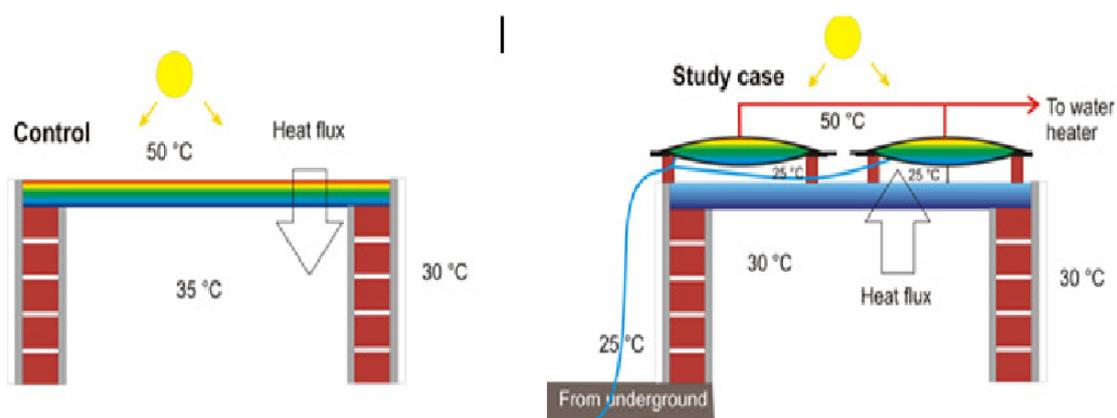


Figure III.11 : Schéma d'installation et d'exploitation de SHETRE dans la démarche expérimentale (Chávez et al., 2016)

Critique :

Ces résultats de SHETRE correspondent à un prototype de 1.5\*1.5\*1.5 m, et de 2.25 m<sup>2</sup> de surface « face au ciel » (sky facing surface), correspondant à 1.44 m<sup>2</sup> au toit dont il est recommandé d'effectuer ce système sur toute la surface d'un toit d'un bâtiment réel pour avoir des résultats à partir des bâtiments réels. De plus, ces résultats concernent un toit d'un prototype selon les conditions climatiques d'un climat tropical humide. Donc, on ne peut pas généraliser ces résultats sur les autres conditions climatiques comme le cas d'un climat chaud et sec le cas de notre étude. Ce système demande le temps, la technologie et de grands moyens financiers pour les réaliser et nécessite une consommation d'eau, ce qui les rend un peu inefficaces dans le cas des ksour du Sud algérien, dont la simplicité et le respect des coutumes locales avec de simples modifications sont demandés.

#### III.4. Optimisation de la performance thermique des toitures par « Inertie des matériaux » :

L'inertie des matériaux est un facteur très important à prendre en considération lors de la construction d'une toiture énergétiquement efficace. La capacité d'un matériau à stocker la chaleur pendant plusieurs heures de la journée et retarder cette dernière à les transmettre vers l'intérieur peut abaisser la température ambiante intérieure pendant les étés des régions à climat chaud et aride. L'inertie thermique d'un matériau est plus grande lorsque le matériau est plus dense. L'utilisation des matériaux de forte inertie thermique comme la pierre et la terre est une stratégie efficace dans les climats chauds et aride. La forte inertie thermique d'un matériau sert à restituer la fraîcheur accumulée la nuit pendant la journée en été, ce qui garantit un confort optimal avec une économie d'énergie. Le temps de déphasage important des matériaux locaux a la capacité de gérer les échanges thermiques et agit sur l'état de confort. De nombreuses études ont été développées pour améliorer la performance thermique des toitures en optimisant ses performances par des méthodes de construction récentes.

- Le travail effectué par (Moreno Santamaria et al., 2020) vise à étudier les paramètres thermiques dynamiques de l'enveloppe du vitrage à circulation d'eau (WFG) et ses performances pour le refroidissement des bâtiments, en s'appuyant sur l'application et la validation d'un outil de simulation énergétique dynamique. WFG correspond à une technologie de rupture, basant sur l'utilisation de vitrage dans le cadre d'un système de chauffage, ventilation et climatisation (HVAC). WFG est abordé lorsque les matériaux transparents utilisés dans l'enveloppe d'un bâtiment influent sur les charges de chauffage et de climatisation, ce qui oblige le traitement des problèmes de gain de

chaleur, de perte de chaleur et de lumière journalière. Donc, un prototype avec WFG en façade et en toitures reliées à des échangeurs de chaleur de forage géothermique a été construit et un deuxième prototype en double vitrage traditionnel (avec une cavité d'air) a été réalisé avec les mêmes dimensions (Figure III.12). Pour le premier prototype, une source d'énergie d'électricité est nécessaire pour faire fonctionner les pompes à eau de circulation. Aussi, le débit d'eau nécessite une pompe à eau de circulation qui consomme de l'énergie électrique.

- Également, cette étude se base sur le développement d'un modèle mathématique d'un outil de logiciel, pour calculer le bilan énergétique de ce système avec l'intégration des propriétés de WFG, et validé sa capacité à prédire les économies d'énergie dans les bâtiments. Les paramètres spectraux et thermiques de vitrage et les entrées des mesures de prototypes ont été pris en compte dans le modèle mathématique. L'outil de simulation basé sur le modèle mathématique pour prédire les performances de WFG a été validé à l'aide des données réelles (Donc, cette recherche vise aussi à valider un nouvel outil de simulation énergétique du bâtiment en comparant des résultats numériques et des données réelles obtenus dans les salles d'essai).
- Les résultats de cette étude ont montré que la solution de double vitrage avec chambre d'eau à circulation est une technique moins polluante et plus efficace que les systèmes utilisés, dont la plupart sont alimenté par des combustibles fossiles. Le potentiel de l'utilisation d'un système WFG peut réduire les charges de refroidissement en été. Aussi, l'adoption d'un système WFG dans les enveloppes des bâtiments basés sur l'énergie renouvelable est une démarche prometteuse qui peut s'adapter à l'environnement.
- ✓ Donc, Bref : Des chercheurs de l'université polytechnique de Madrid ont développé et évalué un logiciel pour calculer le bilan énergétique avec l'intégration des propriétés dynamiques du système WFG.
- ✓ La température de l'air intérieur et la température de sortie dans les panneaux de toit WFG sont les deux paramètres qui ont été simulés dans la cabine WFG.
- ✓ La consommation d'énergie finale non renouvelable (NRFE) nécessaire pour compenser le rayonnement solaire absorbé est de 11,39 kWh dans 3,5 m<sup>2</sup> de WFG horizontal avec une réduction de 70% des émissions de CO<sub>2</sub>.
- ✓ L'erreur moyenne (ME) et l'erreur moyenne en pourcentage (MPE) ont été mesurées.
- ✓ Le ME de la température de sortie était de 0,29 C et le MPE était de 2,1 %.
- ✓ L'ME de la température intérieure était de 0,7 et l'ME de 2,8 %.

- ✓ L'inertie thermique dérivée des forages géothermiques contribue considérablement à réguler la température du prototype avec un système WFG par rapport au prototype nu.



Figure III.12 : Vue réelle du prototype (Moreno Santamaria et al., 2020)

Critique : Dans cette étude, le modèle se base principalement sur WFG de vitrage avec un système géothermique, ce qui rend cette technique inadéquate dans les cas d'un climat chaud et aride. La rudesse du climat du Ksar de Béni Isguen oblige d'éviter des systèmes construits en vitrage lorsqu'il ne résiste pas à la chaleur excessive. De plus ce système de WFG besoin de l'énergie électrique pour faire fonctionner ce qui augmente la facture de l'électricité.

L'eau a un temps de déphasage important qui sert à retarder le transfert de chaleur considérablement. Néanmoins, l'utilisation de l'eau et du vitrage dans le cas des climats chauds et arides est très complexe et difficile. (Voir Annexe 04 : Paramètres climatiques)

Dans le cas des Ksour mozabites, les matériaux de construction utilisés possèdent une forte inertie thermique, ce qui minimise le transfert de chaleur excessive pendant la journée et la fraîcheur emmagasinée dans les parois durant la nuit va la restituer le jour. Néanmoins, la forte chaleur excessive accumulée le jour en été se restituera la nuit, dont les parois commencent à dégager la chaleur et par conséquent la température ambiante augmente. Donc, l'utilisation des matériaux de construction de forte inertie thermique dans la toiture est primordiale dans le contexte des Ksour. Cependant, la ventilation nocturne doit être équipée pendant la période estivale pour faire dissiper la chaleur à l'intérieur des espaces.

### III.5. Optimisation de la performance thermique des toitures par « Isolation » :

L'isolation des éléments du toit et de l'enveloppe d'un bâtiment des conditions extérieures contribue considérablement à réduire les besoins en climatisation surtout dans les régions à climat chaud et aride. L'enveloppe et le toit principalement doivent avoir des valeurs de résistance thermiques réduites pour minimiser le transfert de chaleur vers l'intérieur. L'isolation d'une toiture peut être réalisée par plusieurs méthodes, soit par l'ajout des isolants thermiques adéquats, soit l'isolation par l'enveloppe lui-même grâce aux matériaux de forte capacité thermique. A titre d'exemple, l'utilisation des systèmes d'isolation thermique peut réduire les besoins en électricité jusqu'à 40 % estimée par la compagnie d'électricité à Dubaï en Émirats Arabes Unis (St Clair, 2009). Plusieurs recherches ont évalué l'effet de l'isolation pour optimiser la performance thermique des toitures est par conséquent améliorer le refroidissement passif des espaces.

- Une étude effectuée par (Chang, Chiang, & Lai, 2008) correspond au développement et l'évaluation préliminaire de prototypes de double toit intégrant un système de barrière radiante (RBS). Cette étude a proposé une nouvelle structure de toit de bâtiment avec une bonne isolation thermique qui utilise une combinaison de double toit et de technologie RBS en Taiwan (climat chaud et humide) (Figure III.13). Les résultats montrent que la structure à double toit, formée par une plaque de toit et une dalle de panneau RC en aluminium-PP (polypropylène), peut réduire le gain de chaleur et obtenir de bonnes performances de barrière thermique.

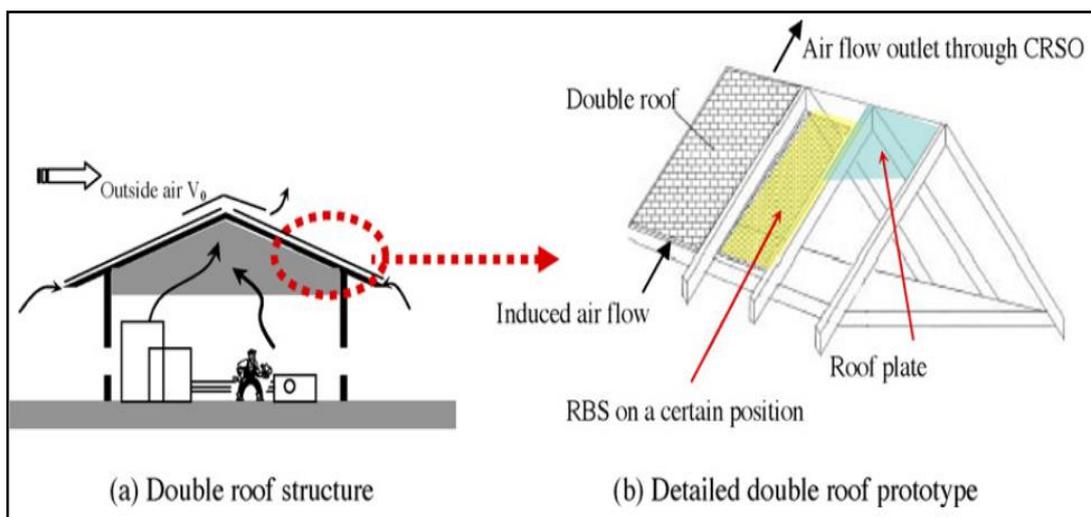


Figure III.13 : Conception de prototypes expérimentaux (Chang et al., 2008)

- La recherche menée par (Zingre, Wan, Wong, et al., 2015), porte sur la modélisation de la performance des « Cool Roof » pour les toits à double paroi en climat **tropical** pour tester l'efficacité de ce type de toitures. Un modèle CRHT (Cool Roof Heat

Transfer) a été proposé et validé pour un toit double paroi contre des expériences réalisées dans deux appartements à ventilation naturelle à **Singapour**. L'un des appartements avec un toit double paroi, tandis que pour la deuxième, un revêtement de Cool Roof sur un toit plat à double paroi, sont testés avec le modèle CRHT. L'objet est d'étudier l'impact du toit froid sur la réduction du gain de chaleur et le niveau de confort thermique intérieur.

Les résultats indiquent que, le toit qui est avec un revêtement de Cool Roof sur un toit double paroi réduit le gain de chaleur de  $0.21 \text{ kWh} / \text{m}^2$  (ou 51%), ce qui réduit de  $2,4 \text{ }^\circ \text{C}$  la température maximale de l'air intérieur par temps ensoleillé. Tandis que, l'appartement avec un toit plat simple, le toit froid avec une réflectance solaire de 0,74 réduit le gain de chaleur quotidien de  $0.66 \text{ kWh} / \text{m}^2$  (soit 54%) par rapport au toit nu sans toit frais.

De plus, une comparaison a été faite entre le toit double peau à celle de cool roof en utilisant le modèle CRHT. Le toit double paroi est environ 6% plus efficace que le toit avec la technique de Cool Roof dans l'appartement pendant la journée. Aussi, les résultats montrent que l'utilisation de la méthode CRHT peut être appliqué dans n'importe qu'elle climat à l'exemple du cas du climat méditerranéen d'Athènes en Grèce.

#### Critique :

L'isolation des toitures a montré leur efficacité à améliorer l'état de confort thermique à l'intérieur des espaces. L'isolation d'un toit avec la technique de double paroi est une technique efficace qui a offert de bons résultats. Plusieurs types d'isolants thermiques peuvent être utilisés pour améliorer la performance thermique des toitures. L'évaluation des toits double parois mérite d'être développée, analysée, et évaluée. La construction d'un toit secondaire qui protège le toit principal avec un isolant entre les deux parois se voit comme une technique efficace et adaptable à notre cas d'étude lorsque les toits épais des Ksour consomment beaucoup de matière première comme la terre. Alors, l'utilisation des isolants de faible conductivité thermique dans le toit avec une épaisseur réduite constitue une solution qui mérite d'être développée. Aussi, le vide d'air a de bonne conductivité thermique par rapport aux d'autres isolants.

### III.6. Optimisation de la performance thermique des toitures par « Ombrage » :

L'ombrage du toit constitue une méthode très importante pour réduire les gains de chaleur surtout dans les régions à climat chaud et aride. Des dispositifs d'ombrage sont utilisés parfois pour réduire l'absorption du rayonnement solaire par la surface du toit. Ces dispositifs peuvent être légers ou lourds ; fixes, réglable ou rétractable ; projetés sur la surface du toit ou fixés sur les surfaces des murs afin de fournir l'ombrage pour la toiture et même les surfaces des murs et des ouvertures. Il est à noter que l'ombrage fourni par des dispositifs externe ne doit pas interférer avec le refroidissement et la ventilation nocturne.

Plusieurs systèmes d'ombrage sont testés pour fournir une amélioration dans les bâtiments. Un système pratique composé de série de panneaux de roseaux sur les cadres en bambou a montré leur efficacité à garantir l'ombrage aux bâtiments. Bien que les panneaux nécessitent un entretien régulier (Konya, 2013). L'ajout d'une couche supérieure du toit par des carreaux de céramique ou autres matériaux réfléchissants peut être augmenté la réflexion du rayonnement incident. Aussi, les surfaces de toits peuvent être ombragées en fournissant une couverture de plantes, de pots en terre, de toile ou une couverture en béton, etc.

La couverture en tôles de fer galvanisé ou en béton permet d'assurer une protection contre les rayons solaires directs (Figure III.14), mais cette méthode ne permet pas l'évacuation de la chaleur excessive vers le ciel pendant la nuit (Kamal, 2012).

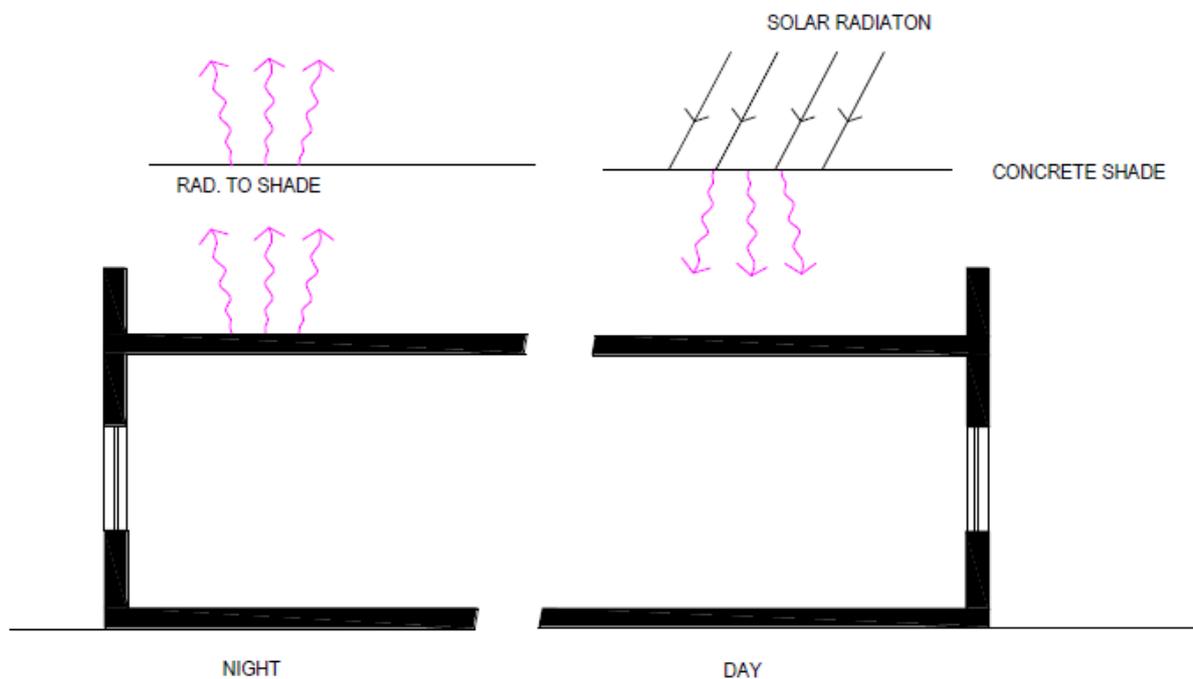


Figure III.14 : Ombrage de toit par couverture solide (Kamal, 2012)

La couverture de toit avec des plantes à feuilles caduques et de plantes grimpantes présente une méthode d'ombrage efficace (Figure III.15). Dans cette méthode, les plantes protègent le toit principal de forts rayons solaires journaliers par absorption et l'évaporation des surfaces foliaires permet d'abaisser la température du toit par rapport à la température de l'air pendant la journée. Pendant la nuit, les plantes permettent aussi de conserver la température de la surface de toit inférieure à la température extérieure.

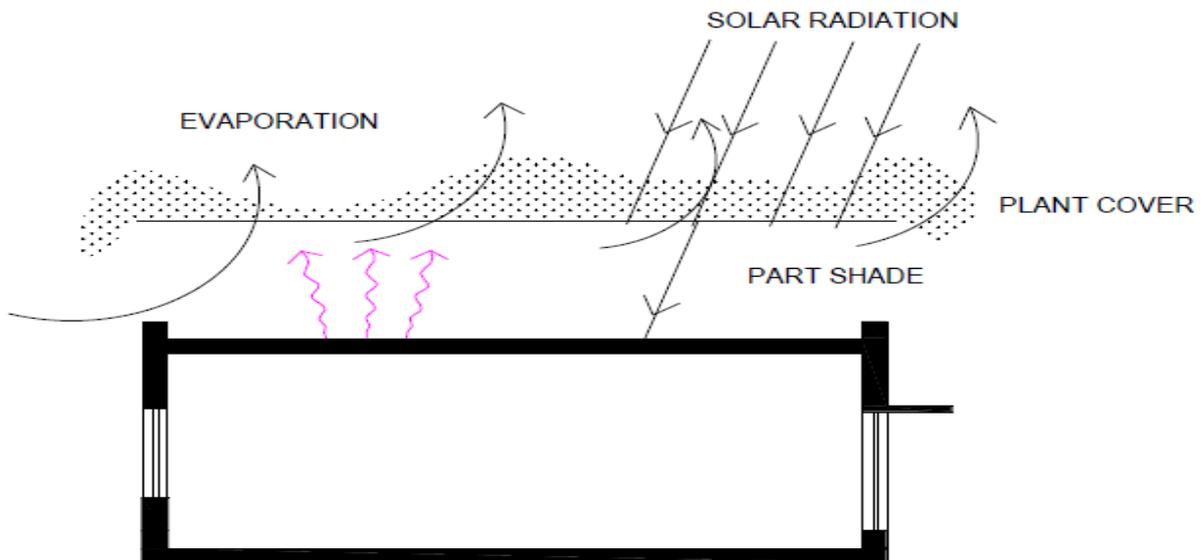


Figure III.15 : Ombrage du toit par couvert végétal (Kamal, 2012)

Aussi, la couverture de la surface de toit avec les pots en terre renversés serrés étroitement constitue une méthode prépondérante à ombrager la toiture, empêcher le flux de chaleur vers l'intérieur et augmenter l'émission radiative comme remarqué parfois dans les constructions traditionnelles (Figure III.16). Néanmoins, cette méthode nécessite l'entretien régulier et l'arrosage des pots de terre régulièrement et la toiture devient aussi inutilisable.

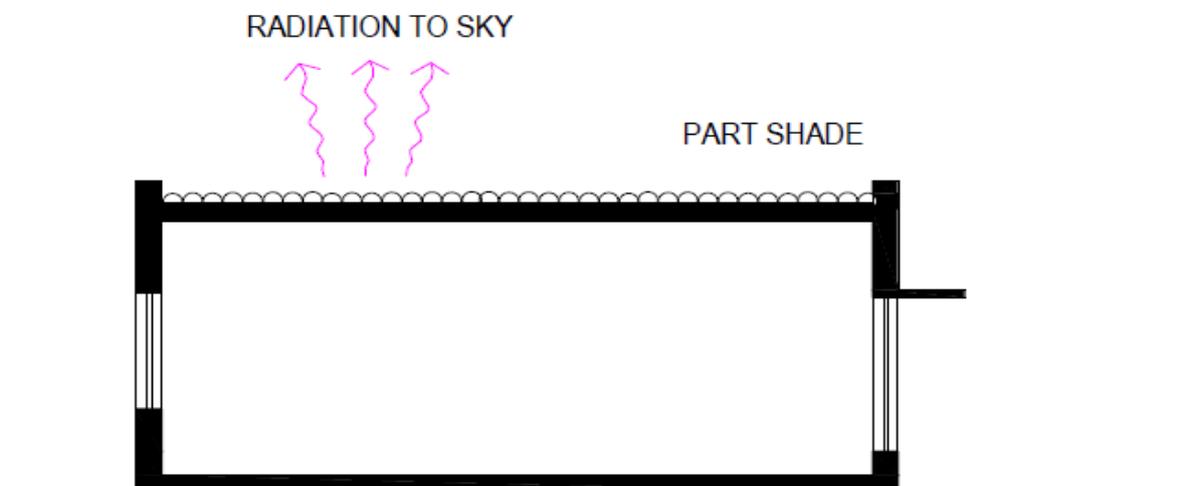


Figure III.16 : Ombrage du toit par des pots en terre (Kamal, 2012)

Parfois, des écrans anti-rayonnement ou une bâche amovible montée près du toit sont utilisés comme des réflecteurs et des moyens d'ombrage de la surface de toit. Pendant la journée, ces dispositifs empêchent l'entrée de la chaleur vers l'intérieur des espaces et cette dernière va s'évacuer pendant la nuit par principe de refroidissement radiatif. La peinture de la toile en blanc minimise le gain de chaleur radiatif et conducteur. Ces dispositifs sont peut coûteux et efficace à protéger la toiture des rayons solaires agressifs et réguler la température ambiante. Le principe de fonctionnement des stores amovibles intégrés sur le toit est montré dans la figure III.17.

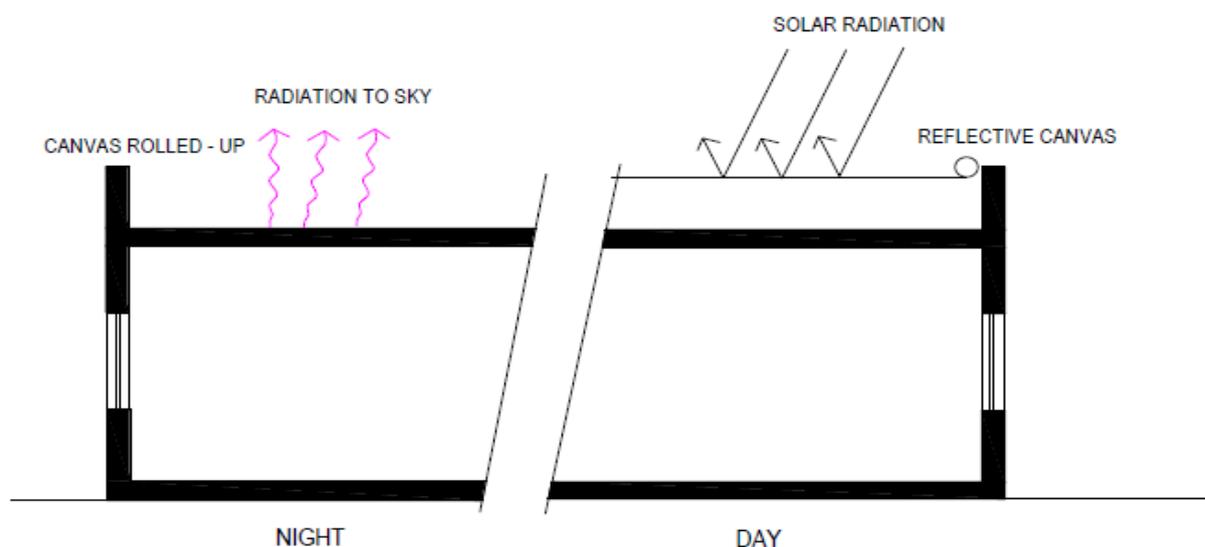


Figure III.17 : Stores de toit amovibles (Kamal, 2012)

De nombreuses études ont évaluées l'effet de l'ombrage sur les toits sur l'amélioration des conditions de vie.

- L'étude menée par (Nayak, Srivastava, Singh, & Sodha, 1982) correspond à l'évaluation de cinq méthodes de refroidissement passif par toit pour réduire le flux de chaleur. L'ombrage du toit par des plantes (pergola végétale) (Figure III.18.a), l'utilisation des pots en terre sur le toit (Figure III.18.b), un jardin sur le toit (Figure III.18.c), des toiles amovibles (Figure III.18.d) et un refroidissement par évaporation (Figure III.18.e) sont les cinq méthodes étudiées dans cette recherche.

La méthode utilisée correspond à des calculs numériques relatifs à une journée typique chaude (16 mai 1981) à New Delhi en Inde. Les résultats montrent qu'une toiture ombragée avec une pergola végétale avec un film d'eau réduit le flux de chaleur vers la pièce et un nivellement optimal de la charge thermique.

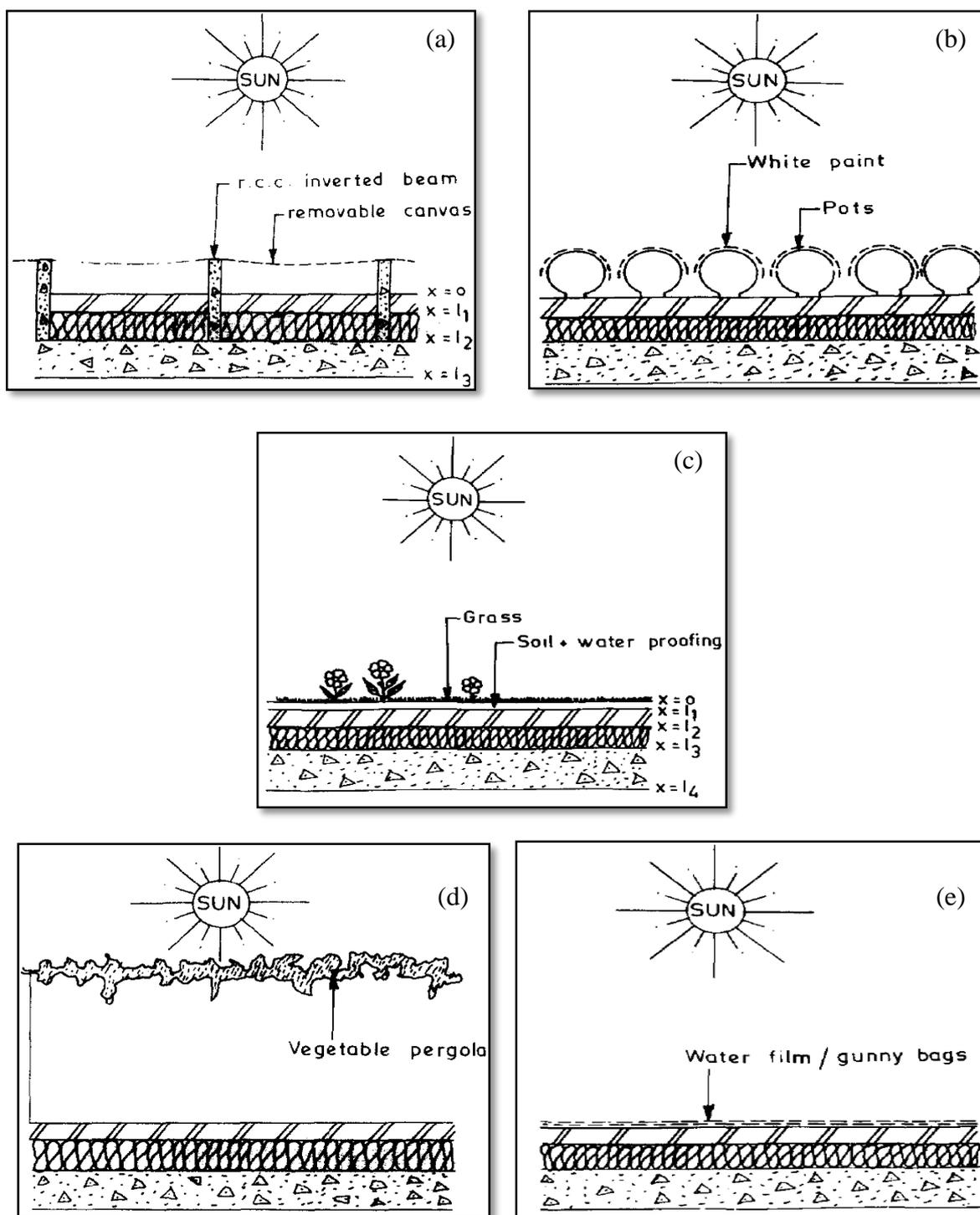


Figure III.18 : Les cinq méthodes de refroidissement étudiées :

(a) schéma du principe d'une toiture avec ombrage dû à une pergola végétale ; (b) croquis schématique d'un toit avec des pots dessus (la surface supérieure des pots est peinte en blanc) ; (c) croquis schématique d'un jardin sur le toit (herbe) ; (d) croquis schématique d'un toit avec toile amovible ; (e) croquis schématique d'un toit avec sac de jute/ système de refroidissement par film d'eau (Nayak et al., 1982)

- Parfois, des panneaux photovoltaïques sont utilisés pour double avantage, la production de l'énergie et l'ombrage des surfaces de toit. A l'exemple de l'étude effectuée par (Y. Wang, Wang, & Liu, 2017) concernant l'impact des modules PV intégrés sur la toiture sur la consommation d'énergie et l'ombrage du bâtiment (Figure III.19, III.20). Des modèles physiques et mathématiques simplifiés ont été établis dans cette étude comme méthode d'évaluation des modules PV. Pour analyser l'apport intégré de l'ombrage et l'efficacité de PV, un modèle énergétique du système PV a été proposé. Les résultats montrent que la charge quotidienne des toits avec PV a été réduite de 77,4 % et 69,4 % et l'efficacité énergétique intégrée était de 63,35 % et 62,73 % pour un toit plat et incliné respectivement. Alors, la charge de refroidissement a été diminuée et la charge de chauffage a été augmentée pour un toit avec système PV.

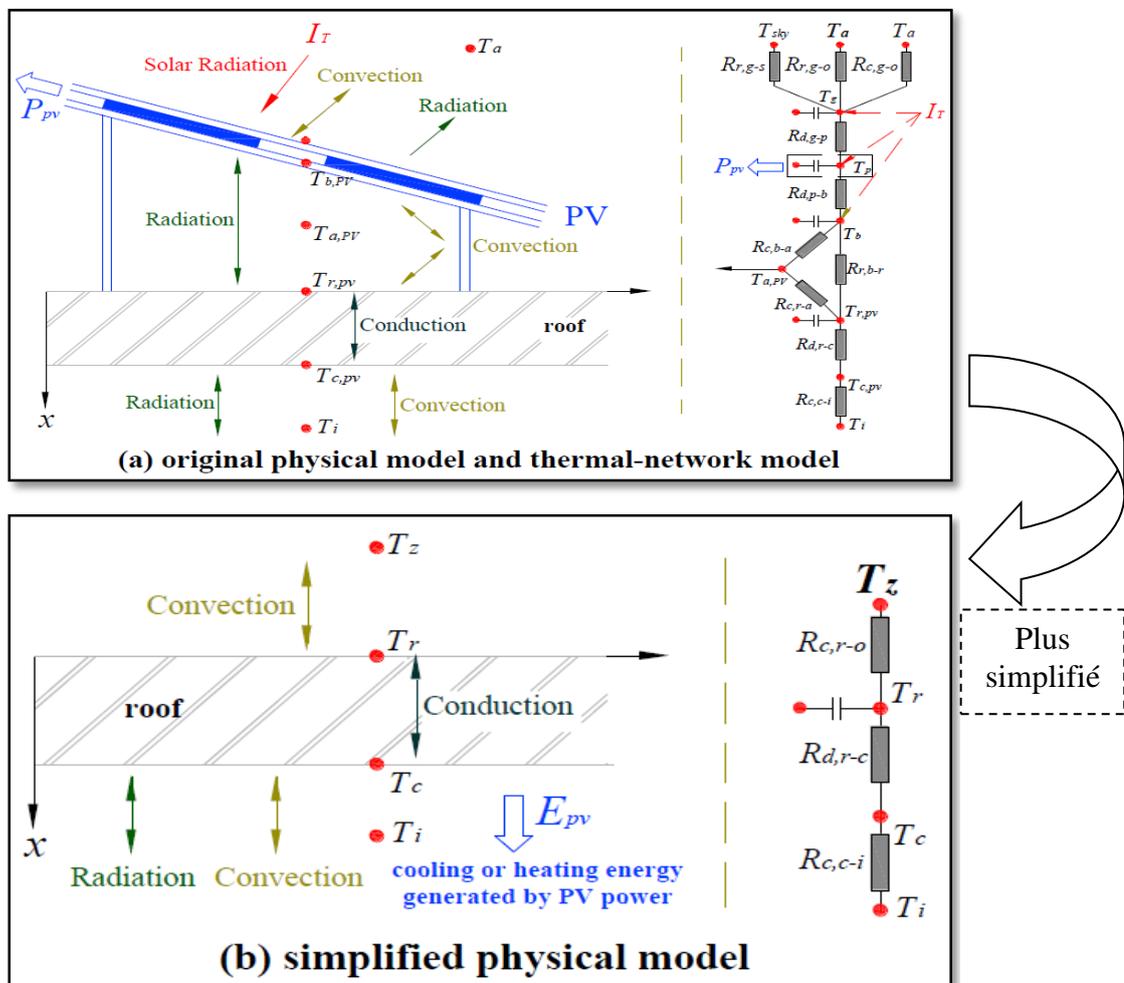


Figure III.19 : Processus thermique et modèle physique simplifié du photovoltaïque ajouté au toit (Y. Wang et al., 2017)

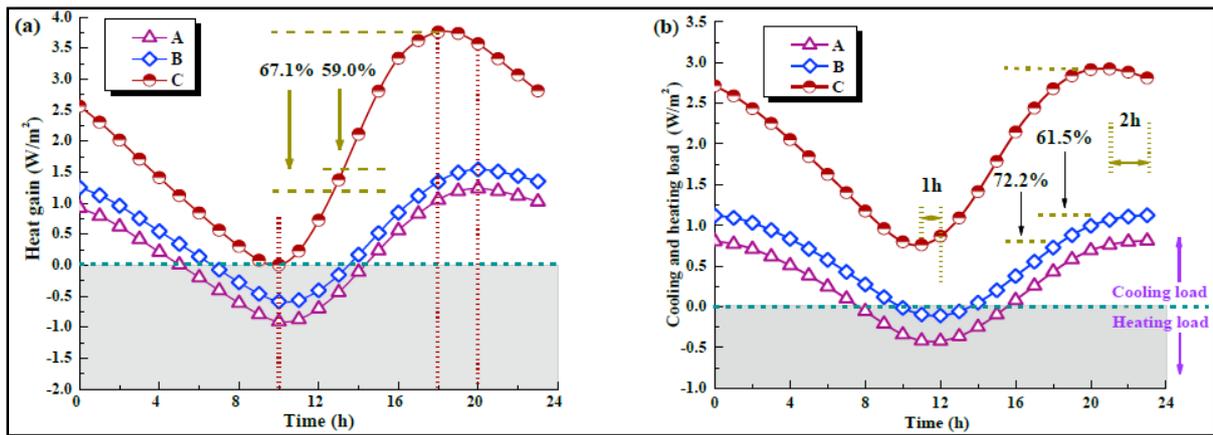


Figure III.20 : Comparaisons du gain de chaleur et de la charge de refroidissement et de chauffage à travers les toits (A - plafond plat, B - plafond incliné, C - toit conventionnel) (Y. Wang et al., 2017)

Critique : Les modules PV présentent une technique inadéquate dans le cas des Ksour du Sud algérien lorsque la terrasse est un espace utilisable. C'est l'espace où la femme fait ses activités quotidiennes. De plus, la terrasse est plate ce qui rend l'installation des panneaux linéaire n'est pas faisable et très complexe.

- L'étude développée par (Mardaljevic, 2004) correspond à l'évaluation de l'efficacité des dispositifs d'ombrage par une nouvelle méthode d'analyse basée sur l'image. Cette méthode est basée sur des prévisions d'irradiation solaire directe sur la période d'une année selon des données météorologiques horaires. Cette méthode permet de produire des images synoptiques qui exposent la variation spatio-temporelle de l'irradiation solaire. L'intérêt de cette méthode est de pouvoir évaluer un grand nombre de variantes de conception d'une manière rapide et évolutive. Alors, un modèle défini paramétriquement d'un système d'ombrage de toit complexe basé sur la conception du terminal 3 de l'aéroport de « Changi » en Chine a été évalué (Figure III.21). Un schéma paramétrique du système d'ombrage du toit composé de 3600 ailettes a été réalisé et 42 variantes de conception de ce système de toit ont été évaluées par la nouvelle méthode.

Les résultats montrent que l'irradiation solaire annuelle totale de l'une des variantes de conception sur toute la surface du toit était de 46 kWh/m². L'irradiation annuelle totale pour la variante "coolspot" A et "coolspot" B était respectivement 24 et 66 kWh/m² respectivement. L'application d'un système d'ombrage avec de grand nombre des ailettes peuvent contribuer à réduire l'irradiation solaire annuelle entrée par la toiture. Aussi, la méthode de « spatio-temporal irradiation mapping » (STIMAP) a montré leur

efficacité à traiter et évaluer les systèmes d'ombrage complexe facilement par des données des illustrations très claires à interpréter en fournissant des informations beaucoup plus importantes sur les performances d'ombrage globales que les méthodes traditionnelles.

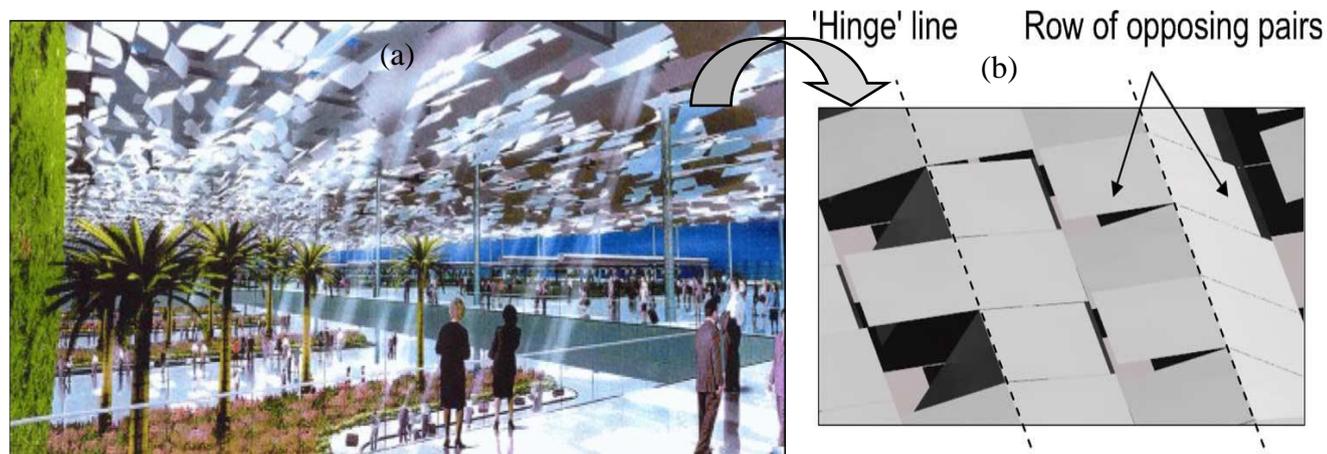


Figure III.21 : Le système d'ombrage : (a) rendu montrant l'impression visuelle du terminal 3 de Changi ; (b) Gros plan du toit pseudo-Changi (Mardaljevic, 2004)

### III.7. Optimisation de la performance thermique des toitures par « ventilation » :

Dans les régions à climat chaud et aride, l'aération, le rafraichissement et la ventilation présentent une nécessité pour garantir un certain confort. Plusieurs méthodes de ventilation naturelle sont appliquées pour aérer les espaces, soit tout simplement par ouvrir les ouvertures dans l'enveloppe, soit par des systèmes écologique comme le tirage thermique par une tour à vent ou la méthode du puits canadien qui permet de circuler l'air neuf à travers des conduits enterrés dans le sol et selon la saison, l'édifice va refroidi ou chauffé. La ventilation peut être linéaire à simple exposition, transversale, ou réalisée par capteurs à vent ou cours intérieures. Dans les Ksour, la cour avec le Chebek constitue la méthode principale pour aérer les espaces intérieurs. L'utilisation de la ventilation comme moyen pour optimiser la performance thermique des toitures présente une technique qui réagit positivement sur l'état de confort thermique intérieur. De nombreuses études ont évalué la performance d'un toit ventilé sur le confort thermique.

- Un travail d'analyse numérique de la performance thermique des toitures naturellement ventilées avec différents paramètres d'influence a été effectué par (D. Li, Zheng, Liu, Qi, & Liu, 2016) pour mettre la lumière sur l'importance des toits ventilés sur le refroidissement.

La performance thermique des toits naturellement ventilés des bâtiments résidentiels a été évaluée sous l'influence de différents paramètres dans le nord-est de la Chine

(Figure III.22). La méthode de dynamique des fluides computationnelle (CFD) a été utilisée pour faire l'étude. Plusieurs paramètres ont été testés à savoir : le coefficient d'absorption de la surface externe du toit, la pente, l'épaisseur du vide d'air dans le toit, etc.

Les résultats montrent qu'un toit ventilé réduit les charges de refroidissement par la diminution du flux thermique transmis par les parois de la construction exposée aux rayons solaires durant la période estivale. Les résultats indiquent ainsi, que la couche ventilée dans le toit permet de retarder la température mais l'effet sur le temps de retard est faible et long. Le flux d'air dans la couche d'air du toit peut être augmenté quand l'épaisseur de la couche est de 100 mm. Aussi, l'épaisseur du vide d'air, la pente du toit influent considérablement sur la performance thermique d'un toit ventilé.

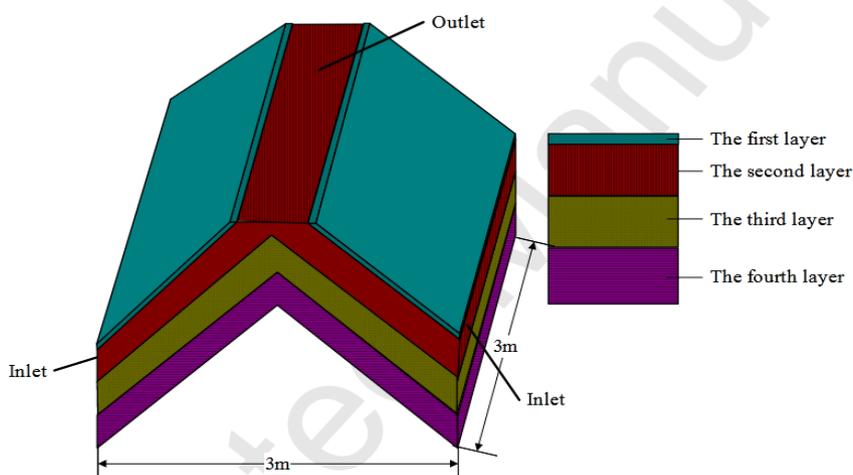


Figure III.22 : Construction de toit (Gauche : construction sceptique ; Droite : détails de construction) (D. Li et al., 2016)

La toiture ventilée présente une méthode efficace pour améliorer l'état de confort thermique et assurer un refroidissement des espaces. Néanmoins, de différents paramètres ont un effet primordial sur la performance de cette technique. Une couche d'air adéquate (dans ce cas de 100 mm), le coefficient d'absorption de la surface externe du toit, la pente du toit, ont un effet directe sur les résultats attendus. On peut dire que, quand la couche d'air est ouverte et l'air circule, la ventilation naturelle du toit est assurée et la température se diminue par la suite. Tandis que, la couche d'air quand elle est fermé et l'air stable, la fonction sa change dont la couche d'air se fonctionne comme un très bon isolant surtout dans les climats d'où les rayons solaires sont agressifs et les températures de l'air sont très élevés. La deuxième probabilité de la couche d'air se voit comme une méthode efficace qui mérite d'être développée et évaluée.

### III.8. Optimisation de la performance thermique des toitures par « Réflexion » :

La haute émissivité thermique et la haute réflectance solaire des surfaces externes des toitures sont considérées récemment comme une technique de refroidissement passif efficace pour réguler la température ambiante par la réduction du gain de chaleur transmis par les toits (Shi et al., 2019). Ces dernières années, le concept du « toit froid » attire l'attention des chercheurs dans le monde comme une solution aux problèmes de l'inconfort thermique. Contrairement aux toits chauds qui absorbent les rayons solaires largement, le toit froid fonctionne comme un émetteur des rayons solaires agressifs et de la chaleur excessive (Khare, Vajpai, & Gupta, 2021). Plusieurs études sont en cours de développement pour améliorer le confort thermique intérieur et la consommation d'énergie grâce à des systèmes de refroidissement passifs dans le toit par réflexion :

- La recherche développée par (Algarni, 2019) pour les bâtiments résidentiels distribués sur 13 sites principaux sélectionnés en Arabie Saoudite visait à estimer les impacts de l'installation d'un toit froid sur les charges de refroidissement et de chauffage. La méthode utilisée correspond à la simulation des comportements thermiques de plusieurs systèmes de toitures à l'aide du programme de simulation énergétique « eQuest 3.65 ». Les résultats indiquent que l'utilisation d'un toit frais réduit la consommation d'énergie annuelle nécessaire au refroidissement des bâtiments de **110,3 à 181,9 kWh/m<sup>2</sup>**, et l'augmentation maximale de la consommation d'énergie annuelle due au chauffage hivernal des bâtiments à toit frais dans les climats chauds et secs n'est que de **4,4 kWh/m<sup>2</sup>**.
- De plus, les travaux de (Shittu, Stojceska, Gratton, & Kolokotroni, 2020) présentent les résultats des économies d'énergie potentielles des toits froids pour les maisons existantes dans deux îles (Sicile et Jamaïque) sur la base de modèles thermiques validés. Les résultats de la simulation avec les modèles « EnergyPlus » montrent que les économies d'énergie potentielles sont de **21,7 kWh/m<sup>2</sup>/an** pour la maison en Sicile et de **188 kWh/m<sup>2</sup>/an** pour la Jamaïque. Cela montre les économies d'énergie potentielles du toit frais dans ce type de maisons.
- De plus, l'étude effectuée par (Dabaieh et al., 2015) porte sur la réduction des demandes de refroidissement dans un climat chaud et sec de l'Égypte avec l'utilisation de « toit froid » passif comme moyen pour réduire les charges de climatisation. L'étude se base sur une simulation des performances thermiques des toitures froides passives non isolées dans les bâtiments résidentiels. Les résultats indiquent que

l'utilisation d'un toit de forme de voûte avec un revêtement à albédo élevé réduit la consommation d'énergie de 826 kWh et abaisse de 53% des heures d'inconfort par rapport au cas de base d'un toit plat conventionnel non isolé dans un bâtiment résidentiel typique à faible cout et de faibles hauteurs au Caire pendant la période estivale.

Par ailleurs, le revêtement à réflectance solaire (cool roof) utilisé dans cette recherche est appliqué sur un toit en voûte avec des matériaux conventionnels. Tandis que, pour notre recherche la toiture est traditionnelle de type «toit-terrasse plat» constitué de matériaux locaux.

- Les recherches faites par Akbari et ses collègues en 2005, indiquent que l'augmentation de l'albédo dans les climats chauds (réflectance solaire) d'un toit de 0.2% à 0.6% contribue à réduire les charges de climatisation de 20% (Akbari, Levinson, Miller, & Berdahl, 2005).
- Une étude numérique avec l'utilisation du logiciel de simulation TRNSYS, réalisée par (Shariah, Shalabi, Rousan, & Tashtoush, 1998) dans le climat tempéré d'Amman et d'Aqaba, en Jordanie, a montré qu'en augmentant la réflectance externe d'un toit de 0 à 1, la charge énergétique était réduite de 32 % dans un bâtiment non isolé et 26% dans un bâtiment isolé.
- Dans le contexte des études sur le refroidissement passif avec des revêtements radiatifs à faible coût pour des économies d'énergie en climatisation :

La recherche effectuée par (Muselli, 2010), s'intéresse à l'étude et l'estimation de nouveaux matériaux radiatifs passif à faible coût (1 €/m<sup>2</sup>), pour limiter les gains de chaleur transmise par les surfaces des toitures des bâtiments durant la période chaude dans les pays industriels et en développement. Le calcul des spectres de transmission spéculaire des matériaux réfléchissants a donné des valeurs de réflectance solaire excellente ( $R_{vis} \sim 0.63$  diffus à 0.85 opaque blanc) et d'émittance (IR) égale à ( $\epsilon_i \sim 0.92$ ). Ensuite, un prototype de toiture expérimentale de 48m<sup>2</sup> en Ajaccio (Île de Corse, France), ayant différentes surfaces de : tôles d'acier plate (flat steel sheets : FSS), fibrociment (fiber cement : FC), tuiles en terre cuite (terra cotta tiles : TCT) et tôle ondulée (corrugated sheets : CS) a été évalué pour déterminer le rapport de température entre les matériaux revêtus et non revêtus (Figure III.23).

Les résultats montrent que les revêtements opaques blancs réduisent considérablement la température de surface des matériaux de toit : de 18% pour TCT et PSS, 25% pour FC et 34% pour le CS, respectivement. Aussi, les simulations de prototype de la

toiture ont montré que les toits réfléchissants opaques peints en blancs à faible coût réduisent et économisent l'énergie électrique de climatisation de 26% à 46% (pour TCT et CS respectivement) selon la composition de toit (Figure III.24).

Alors, l'utilisation des matériaux radiatifs passifs à faible coût est une solution intermédiaire qui peut réduire la température intérieure et économise l'énergie de refroidissement selon le type de composition de la couverture de la toiture sur laquelle a été appliquée. Ces types de revêtements réfléchissants peuvent être utilisés sur différents types de couverture de toit et qui peuvent économiser de l'énergie.



Figure III.23 : Phénomène de climatisation passive avec un rayonnement solaire incident de  $1 \text{ kW m}^{-2}$  (Muselli, 2010)



Figure III.24 : Plate-forme de toiture expérimentale de climatisation de  $48 \text{ m}^2$  avec 5 matériaux différents : PSS : 1 ; FC : 2 (2,1 et 2,2 pour les revêtements blancs et incolores) ; TCT : 3 (3,1 et 3,2 pour les revêtements blancs et incolores) ; Modules photovoltaïques : 4 et CS : 5 (Muselli, 2010)

Néanmoins, le toit traditionnel du Ksar est composé de matériaux locaux, ce qui prouve qu'un revêtement blanc peut donner d'autres valeurs de réduction de température. Aussi le prototype testé dans l'étude de (Muselli, 2010) est soumis à plusieurs facteurs extérieurs et

qui se diffère aux conditions climatiques de notre étude et de cas d'étude qui se situe dans le Ksar au Sud algérien.

- L'étude menée par (Zinzi, 2008) correspond à l'étude de l'influence des revêtements réfléchissants sur le confort thermique et la demande énergétique dans les habitations aux latitudes méditerranéennes. Pour mesurer les propriétés optiques d'une peinture froide de couleur claire, des analyses photométriques ont été effectuées.

Aussi, une série des simulations énergétiques ont été faites dans différentes localités méditerranéennes (Rome, Palerme, Séville, Athènes, Tripoli) pour évaluer l'influence des matériaux réfléchissants par rapport au refroidissement et à la demande d'énergie. La géométrie des bâtiments, propriétés thermo-physique de l'enveloppe à savoir : la réflectance solaire, la valeur U, la capacité thermique, avec d'autres paramètres comme l'ombrage des vitrages et le taux de ventilation ont été pris en compte. Les résultats montrent que les revêtements réfléchissants contribuent considérablement à réduire les charges de climatisation et à la demande d'énergie par un contrôle solaire efficace sur l'enveloppe d'un bâtiment.

- L'étude menée par (Nemunaitis-Berry, Klein, Basara, & Fedorovich, 2017) a examiné des changements des bilans énergétique de surface et de rayonnement affectant l'UHI. Cette recherche porte sur l'investigation de la sensibilité des températures de l'air près de la surface et le bilan énergétique de la surface urbaine aux variations des paramètres de la canopée urbaine à une couche unique (SLUCM) du système d'assimilation de données terrestres à haute résolution (HRLDAS), dans les simulations avec le modèle WRF, dans des prédictions non couplés (land) (HRLDAS-Noah-SLUCM) et couplés (terre-atmosphère) (WRF-Noah-SLUCM).

Une comparaison entre les sorties de HRLDAS et du WRF et aux observations de l'expérience « Oklahoma Mesonet » et « Joint Urban » en 2003 a été faite. Dans le rayonnement net et les flux de chaleur sensible, les variations de l'albédo du toit (0,04-0,4) ont produit des changements de 40 à 135 W m<sup>-2</sup>. Un changement de la conductivité thermique du toit (0,05 à 1,4), cause une variation de 40 à 100 W m<sup>-2</sup> pour les flux de chaleur sensible et du sol. La méthode appliquée à fin de calculer la température de la surface imperméable, influe sur la sensibilité des températures de l'air près de la surface (aux paramètres SLUCM).

Lorsque les températures de l'air urbain (prévu à 2m) étaient plus élevées que les observations avec des écarts de 8K le jour et moins à 3K la nuit, pour toutes les simulations, ce sont donc celles-ci qui affectent la capacité du modèle à prédire le

cycle diurne (de l'intensité de l'UHI). Donc, une amélioration de ces modèles, des cas et des approches sont nécessaires pour étudier la sensibilité des températures de l'air à la surface (niveau 2 m) et aussi des analyses en détail pour des niveaux plus élevés.

Ensuite, nous avons enrichi cette recherche avec une analyse de la littérature récente des dernières années.

- Par exemple, l'étude menée par (Rawat & Singh, 2021a) porte sur l'évaluation d'un toit froid en comparant avec un toit en béton en termes de températures intérieures dans le climat composite de l'Inde (à Madhya Pradesh) (Figure III.25). Un modèle mathématique a été développé pour évaluer l'effet de toit froid sur les températures intérieures. Les résultats ont montré que les températures ambiantes intérieures et extérieures du toit froid ont été minimisées avec 4,1°C et 9,2°C respectivement, et la température ambiante intérieure a été diminuée avec 2,4°C (Figure III.26). Cela montre qu'un toit froid est plus performant, plus économique et assure un confort thermique agréable avec une facilité à mettre en œuvre.

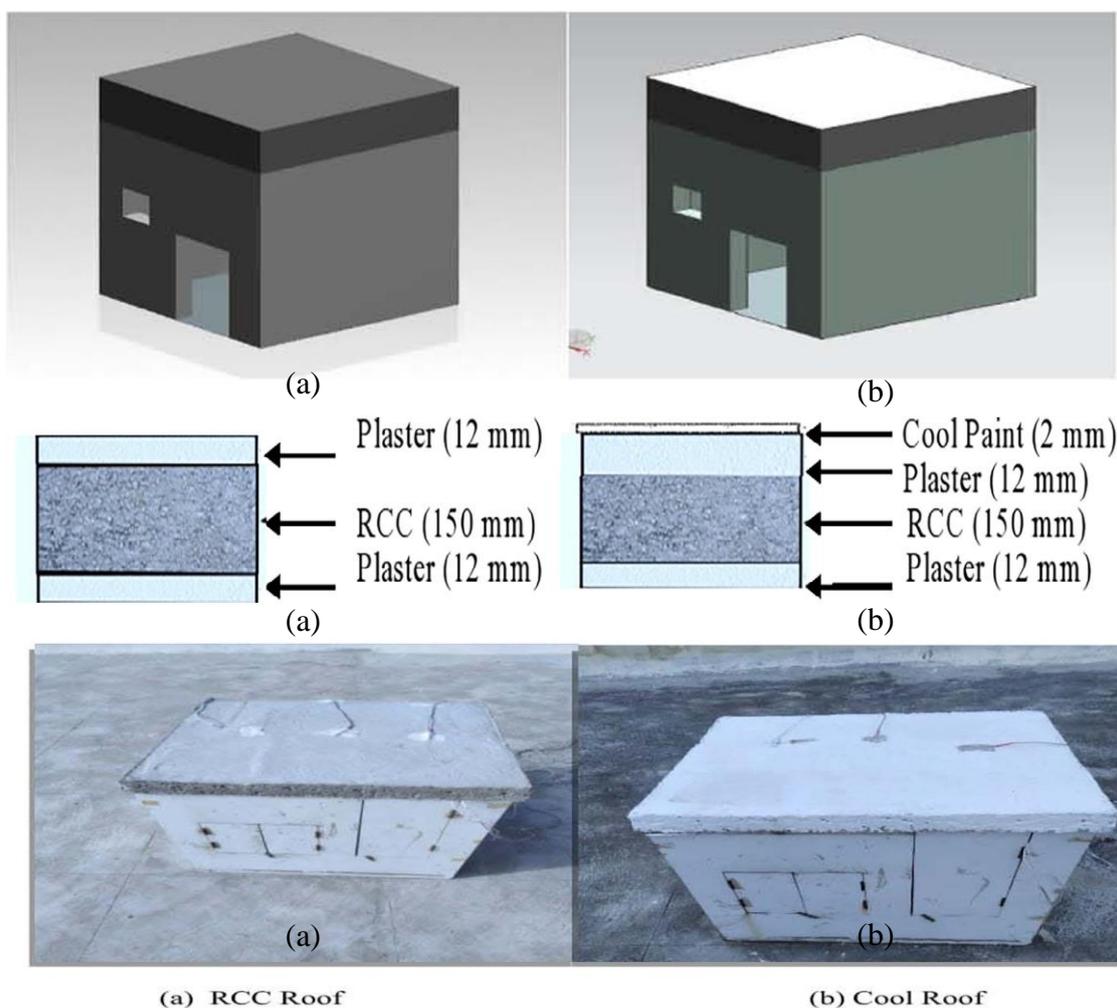


Figure III.25 : (a) Toit en béton de ciment armé avec configuration et le prototype ; (b) Toit froid avec configuration et le prototype (Rawat & Singh, 2021a)

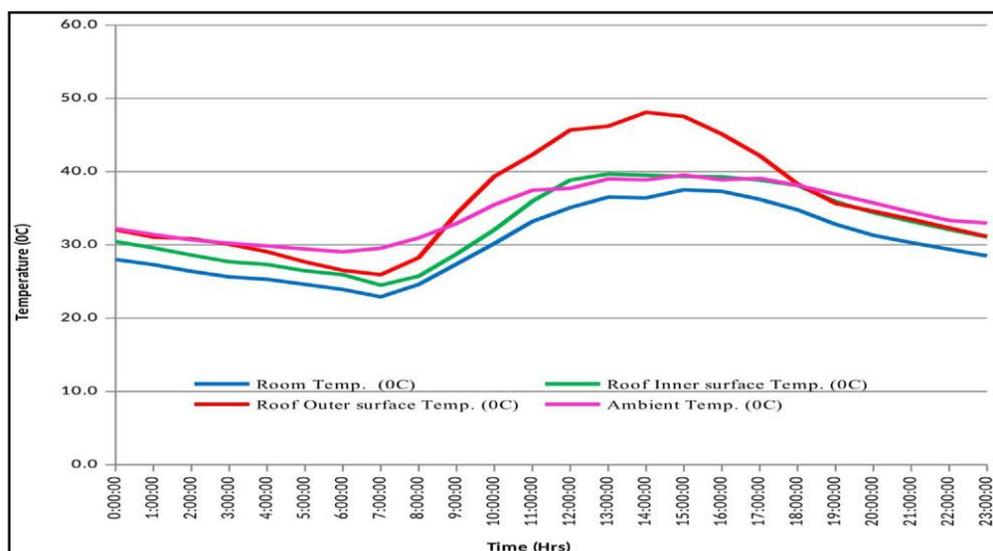


Figure III.26 : Variation de la température de surface du toit (Cool Roof) en Mai (Rawat & Singh, 2021a)

- la recherche faite par (Rawat & Singh, 2021b) correspond à une étude sur le bilan comparatif des performances thermiques des toitures fraîches dans différentes régions. Ce travail met en valeur les performances thermiques de différents types de revêtements de surfaces des toitures froides pour les bâtiments dans différentes zones climatiques avec des recommandations pour les recherches futures (Figure III.27). Selon les résultats de l'étude de la littérature, l'effet moyen d'économie d'énergie de la toiture s'exprime de 15% à 35,7% dans différentes zones climatiques (Tempérée, Tropicale, Composite, Chaude et Chaude-humide). De plus, la réduction moyenne de la température de surface du toit est de 1,4°C à 4,7 C par l'installation de la technologie « Cool Roof » (Rawat & Singh, 2021b).

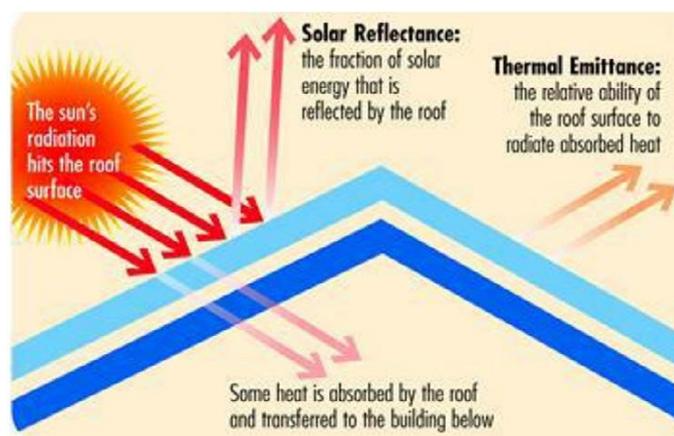


Figure III.27 : Principe de fonctionnement du cool roof (Rawat & Singh, 2021b)

- De plus, le travail mené par (Piselli et al., 2019) vise à évaluer l'impact de la combinaison entre la réflexion solaire et de l'isolation thermique des toitures froides, sur la performance énergétique des bâtiments par simulation dynamique dans différentes conditions climatiques dans le monde. Les résultats montrent une réduction considérable des besoins énergétiques annuels dans le cas d'une haute réflectance solaire du toit d'un petit immeuble de bureaux standard dans les climats considérés.
- L'étude menée par Pisello, Piselli, and Cotana (2015) indique que l'augmentation de la réflectance solaire sur le toit d'un bâtiment de 0,19 à 0,77 sert à réduire la température moyenne du toit jusqu'à 10°C et la température de l'air intérieur jusqu'à 3°C pendant l'été.
- Le travail effectué par (Pisello et al., 2015) s'intéresse à l'évaluation d'un toit de type froid-vert (Cool-Green roof) basé sur un toit qui combine les propriétés des toits froids et les toits verts (Figure III.28). Ce type innovant de toit est testé sur un ancien bâtiment multifamilial en Italie. Une étude expérimentale a été développée dans le

laboratoire et sur terrain avec une simulation thermo-énergétique pour évaluer la performance de la réflectance solaire du toit froid-vert pendant l'année. Les résultats indiquent que le type innovant de toit réduit les heures de surchauffe intérieure de 98.2% pendant l'été avec des pénalités négligeables en hiver.

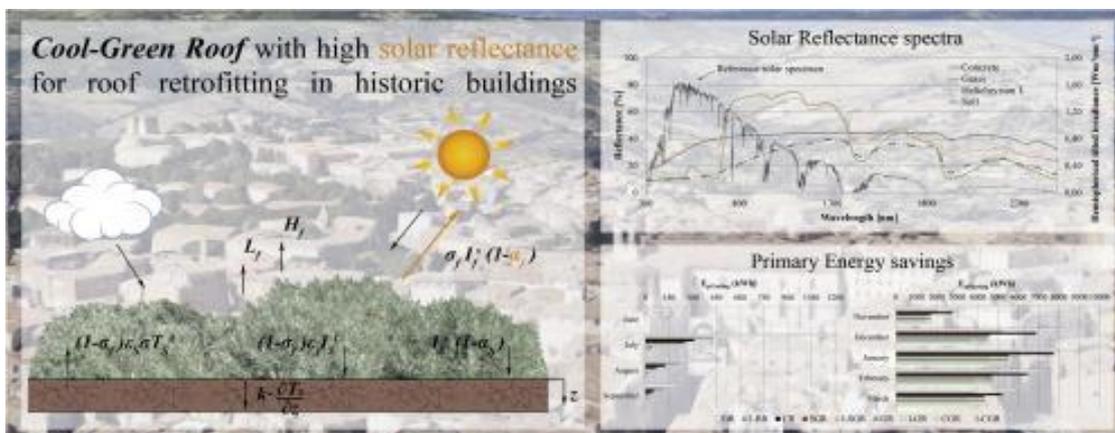


Figure III.28 : Différents flux participant au bilan énergétique du Cool-Green Roof (Pisello et al., 2015)

- La chercheuse « Synnefa » et ses collègues en 2011 a trouvé que l'application d'un revêtement blanc a les bonnes performances thermiques, en comparant avec 14 types de revêtements réfléchissants (Mat Santamouris, Synnefa, & Karlessi, 2011).
- De plus, les études effectuées par (Shen, Tan, & Tzempelikos, 2011) ont montrés que la peinture réfléchissante-solaire (SRP) assure une bonne isolation thermique et que les peintures réfléchissantes de couleur froide ont une réflectance du rayonnement élevé que les peintures conventionnelles de couleurs similaires et des températures de surface réduite de plus de 283K (10°C).
- Les chercheurs (Akbari, Bretz, Kurn, & Hanford, 1997) ont comparé l'énergie de refroidissement et la consommation électrique de pointe de deux bungalows scolaires identiques avec une réflectance de toit différent et ils ont trouvé une économie de 3.1 kWh (35 %) en énergie de refroidissement du toit à albédo élevé (Akbari et al., 1997)
- D'autre part, pour étudier la performance thermique de la peinture blanche appliquée sur les toitures, une étude menée par (Kachkouch, Ait-Nouh, Benhamou, & Limam, 2018) vise à évaluer la performance thermique des techniques de refroidissement sur le toit. L'expérimentation a basé sur l'étude de trois techniques passives de refroidissement d'air sur les toitures qui sont : la peinture blanche, l'ombrage et l'isolation thermique (Figure III.29). Ces techniques sont appliquées sur 3 cellules de

test, avec une cellule de référence à toit nu, réalisées dans les conditions réelles de Marrakech (Maroc) dont le climat est semi-aride chaud. L'évaluation des performances thermiques de trois techniques ont été faites à travers un suivi de 29 jours simultanément pendant l'été. Les résultats montrent que la toiture peinte en blanc présente les meilleures performances thermiques. La température du plafond du toit peint en blanc est réduite jusqu'à 13.0°C. Tandis que, les températures du plafond pour les toits isolés et ombragés égalent à 9.9°C et 8.9°C respectivement. Aussi, les résultats indiquent que le flux de chaleur transmis par le toit est réduit jusqu'à 66% pour le toit peint avec une peinture blanche.



Figure III.29 : Photo des cellules de test avec les techniques passives. De gauche à droite et de haut en bas : cellule de référence avec dalle nue, dalle peinte en blanc, toiture ombragée et toiture isolée thermiquement (Kachkouch et al., 2018)

- Dans une autre recherche faite par (Zingre, Wan, Tong, et al., 2015) à Singapour, un modèle CRHT a été proposé pour étudier l'impact du toit froid sur la réduction du gain de chaleur et le niveau de confort thermique intérieur. Il a été constaté que, dans un immeuble d'appartements d'où le toit est simple peau plate, le toit frais (réflectance solaire de 0,74) réduit le gain de chaleur quotidien de 0.66 kWh / m<sup>2</sup> (soit 54%) par rapport au toit nu sans toit frais.
- L'étude menée par Pisello et al en 2013, indique que la réflectance solaire sur le toit incrément de 0,19 à 0,77 réduit la température moyenne du toit jusqu'à 10°C et la température de l'air intérieur jusqu'à 3°C pendant l'été (Pisello, Santamouris, & Cotana, 2013).

- Givoni en 1994 a étudié l'effet de la couleur des toits depuis 1968 au Technion de Haïfa. L'étude a montré que ; pour les toits légers en béton d'une épaisseur de 7, 12 et 20 cm peint en gris ; d'où la température extérieure est de 31.1°C, les températures maximales du plafond sont : 45.1, 39.1, et 33.1°C respectivement. Tandis que, pour le toit peint en blanc d'où la température extérieure d'environ 27.1°C, la température maximale du plafond était d'environ 25.51°C. Givoni (1994) a montré que la différence de température maximale de surface extérieure entre un toit noir et blanc dans le désert pendant l'été peut être comprise entre 30,1C et 40,1C, une différence qui peut être considérée comme énorme et significative (Al-Obaidi et al., 2014).

Il existe de nombreuses recherches qui ont évalué l'impact de la réflectance solaire sur le confort thermique et le rendement énergétique dont certaines sont résumées comme suit :

- La recherche développée par (Urban & Roth, 2010) a montré que la température ambiante atteint environ 28.1°C dans un bâtiment avec un toit réfléchissant par rapport à un bâtiment avec des toits foncés d'où la température atteint jusqu'au 66.1°C pendant les journées chaudes et dans les mêmes conditions environnementales. (Karam M. Al-Obaidi, 2014).
- Akbari et al. en 2006 (Hashem et al., 2006) ont montré que le remplacement des couleurs des surfaces conventionnelles par des couleurs claires réduit considérablement le rayonnement infrarouge et l'absorption de chaleur. L'augmentation de la réflectance solaire d'un toit sombre résidentiel de 0,10 à 0,35 peut réduire la consommation d'énergie de refroidissement du bâtiment de 7 à 15% (Al-Obaidi et al., 2014)
- En addition, la recherche menée par (Arumugam, Garg, Ram, & Bhatia, 2015) à l'aide de la simulation énergétique sur un immeuble de bureaux en Inde vise à évaluer le rôle de toit froid et la modification des propriétés thermique comme l'isolation du toit. La simulation a été faite pour cinq zones climatiques avec 88 combinaisons de toitures différentes. Ensuite, la réalisation d'une analyse utilisant le taux de rendement interne pour identifier une épaisseur d'isolation de toiture avec un albédo élevé et une combinaison de barrières radiantes. Les résultats montrent que la valeur R du toit optimisé est de 0.48 m<sup>2</sup> K / W, pour un toit avec un albédo de 0.6 et une émittance de barrière radiante de 0.2, dans les climats chauds et secs.
- Le travail mené par (Costanzo et al., 2013) sur un immeuble de bureau à Catane en Italie pour étudier la performance des toits froids en tant que stratégie de refroidissement passif dans les climats chauds. Les résultats numériques montrent que

l'utilisation d'une peinture froide sur le toit peut améliorer le confort thermique des usagers en réduisant les températures et les besoins énergétiques en climatisation.

- L'étude de (Fantucci & Serra, 2019) correspond à l'étude du comportement thermique d'une toiture traditionnelle adoptant une isolation réfléchissante avec une peinture à faible émissivité. L'étude a été basée sur une campagne expérimentale sur le terrain effectuée à Turin en Italie en été. Les résultats indiquent que la réduction des gains de chaleur intérieure pour les toitures traitées avec un isolant réfléchissant avec des valeurs comprises entre 10% et 53% ce qui présente une performance thermique considérable et des économies d'énergie favorable.
- la recherche faite par (Hosseini, Lee, & Vakilinia, 2017) démontre l'importance d'évaluer la performance à long terme du toit frais en tenant compte des données météorologiques réelles. Il quantifie également la surestimation potentielle de la demande d'énergie et offre aux concepteurs une référence au début de la conception d'un toit froid dans un climat froid. Les résultats indiquent que le niveau d'isolation de la toiture le plus élevé entraîne la plus faible surestimation de la demande d'énergie pour la climatisation des locaux.

La toiture froide avec le niveau d'isolation de la toiture le plus faible entraîne la plus forte surestimation de la demande d'énergie pour la climatisation des locaux. la majorité des conceptions de toitures froides estimées par le CWEC ont tendance à être surestimées, ce qui conduit à des conceptions plus conservatrices (Hosseini et al., 2017).

Critique :

L'analyse bibliographique des recherches développées à travers le monde concernant l'effet des matériaux froids réfléchissants sur le confort thermique et la demande énergétique surtout dans les étés chauds des régions à climat chaud et aride a montré leur efficacité à réguler les températures ambiantes et surfaciques et contribuent significativement à offrir un confort thermique plaisant; ce qui influent positivement sur les besoins en climatisation.

Le tableau III.1 dans l'annexe 01 présente un récapitulatif des études réalisées dans le monde pour optimiser la performance thermique et énergétique des toitures avec justification des meilleurs résultats recherchés et attendus à s'inspirer pour développer une nouvelle conception de toiture avec les propriétés adéquates.

## Conclusion :

Dans ce chapitre, plusieurs techniques de refroidissement passif et d'optimisation de performance thermique et énergétique des toitures ont été passées en revue et discutées en référence à leurs implications en termes de conception et d'interventions architecturales.

L'analyse de la littérature des solutions étudiées sur l'optimisation de la performance thermique de la toiture par : évaporation, radiation, isolation, inertie, ombrage, ventilation et réflectivité nous montrée que la performance thermique des toitures composées de matériaux de forte inertie thermique et à forte isolation thermique dans divers climats ont de bons résultats. En addition, de nombreuses études ont montré l'efficacité de revêtement en blanc sur les terrasses et son impact positif sur le rendement thermique et énergétique intérieur.

Après l'analyse de la littérature, on déduit de nombreuses conclusions :

- Les systèmes d'évaporation nécessitent de grandes quantités d'eau ce qui constitue un problème majeur dans les zones chaudes et arides. Les étangs d'eau nécessitent un entretien régulier et le problème des charges supplémentaires des eaux et de structure porteuse doivent être résolus pour éviter les fissures. Ces systèmes sont inadéquats et difficiles à adapter dans le contexte Ksourien.
- Les systèmes d'ombrages sur les toitures restent très limités et ils n'offrent pas de bons résultats qui peuvent améliorer l'état de confort thermique dans les régions chaudes. Une technique d'ombrage sur le toit doit être combinée à d'autres techniques pour avoir de résultat acceptable d'amélioration du confort thermique.
- Les systèmes de toit ventilé avec une cavité d'air doivent être bien conçus pour assurer un rendement thermique agréable. Dans le cas d'un système de toit ventilé, si l'ouverture est fermée pendant le jour et ouverte pendant la nuit dans les étés chauds; elle doit être bien contrôlée pour assurer une meilleure isolation le jour et la bonne ventilation la nuit. Le contrôle de ce type de système est considéré comme difficile à gérer.
- L'utilisation des matériaux de construction avancés et de technologies passives dans les bâtiments peut offrir un confort thermique et réduire la consommation d'énergie, et par conséquent réduire l'impact sur l'environnement et l'empreinte du carbone du secteur de construction. Ces matériaux possèdent de bonnes propriétés thermiques et peuvent être intégrés dans plusieurs parties de l'enveloppe du bâtiment pour améliorer le confort thermique.

- Plusieurs études ont montré que l'utilisation des couleurs claires et des revêtements réfléchissants contribue à réduire les températures intérieures et améliore le confort thermique.
- L'utilisation des couleurs claires et peintures réfléchissantes sur les surfaces extérieures du bâtiment sont des solutions durables permettant la réduction de la charge thermique.
- L'utilisation d'une peinture à haute émissivité et à haut albédo est une solution efficace pour réduire les températures estivales intérieures dans les climats chauds.
- L'utilisation des couleurs claires, et des peintures réfléchissantes dans les surfaces extérieures, fournir l'ombrage pour les surfaces vitrées et opaques, le traitement des façades, l'utilisation d'une toiture jardin sont des solutions recommandées dans les climats chauds lorsqu'elles minimisent les températures des surfaces.
- De plus, les matériaux ayant des propriétés d'isolation élevées, avec de faibles conductivités thermiques comme la pierre et la terre permettent la réduction de la charge thermique d'un bâtiment. Ces matériaux sont peu coûteux, disponibles localement et à faible coût énergétique.

D'après la revue de littérature analysée et traitée dans cette partie, on a déduit que l'optimisation des performances thermiques des toitures par l'installation des matériaux de haute réflectance solaire et forte émittance, la forte isolation des toits, l'utilisation des matériaux de forte inertie thermique, et la ventilation nocturne suffisante sont des pratiques clés et primordiales à développer pour améliorer l'efficacité thermique et les charges d'énergie surtout dans les bâtiments des régions à climat chaud, sec et aride.

Donc, pour optimiser la performance thermique des toitures et les rendre économes en énergie, deux paramètres clés doit être gérés : l'amélioration des propriétés thermiques (isolation du toit) et le traitement des surfaces externes des toits par l'installation des techniques passives facile à appliquer (toits froids, matériaux réfléchissants). La combinaison entre ces deux techniques peut conduire à développer une nouvelle conception de toiture passive, efficace, et adaptable au contexte des Ksour des peuples mozabites.

La conception d'une toiture double peau composée de deux couches séparées avec une lame d'air est une solution innovante et prometteuse à entreprendre surtout dans le sud d'Algérie. Aussi, peindre la toiture en blanc avec une peinture thermo réfléchissante est une autre solution à intégrer pour optimiser plus la performance thermique des toitures des Ksour. Donc, la recherche développée se base principalement à développer un nouveau système de

toiture basé sur un couplage entre une toiture double peau combinée à une peinture thermo isolante, comme une solution à proposer dans ce type des habitations.

Dans les climats chauds et arides, le cas du Sud algérien, la performance de la toiture double paroi n'est pas encore étudiée et testés. Également, la performance de la peinture thermo réfléchissante pour les toitures double paroi n'est pas encore étudiée dans ces climats. Donc, le développement d'une toiture double peau couplée à une peinture thermo réfléchissante mérite d'être étudié et testé comme une conception originale dans le cas des Ksour.

# Chapitre IV :

## Présentation du contexte et les cas d'étude

### Introduction :

Le Ksar de Béni Isguen est l'un des cinq Ksour de la Vallée du M'Zab qui représente l'illustration parfaite de la capacité de l'homme à s'adapter à son environnement. Édifiés au 10e siècle par le peuple Ibadite, les cinq ksour (villes traditionnelles) sont sortis de cette terre aride et hostile, située au milieu du Sahara. Considéré aujourd'hui comme un chef-d'œuvre d'urbanisme très saisissant. Il est connu par la richesse de son patrimoine culturel, et plus particulièrement par son architecture et son urbanisme qui ont inspiré de grands architectes tels que Le Corbusier et Pouillon.

Le Ksar de Béni Isguen, présente un cadre de vie collectif qui répond à la fois à une organisation sociale, économique et environnementale, digne des valeurs actuelles du développement durable. Malgré les conditions sévères du site d'implantation, le climat chaud et aride, les mozabites ont toujours implanté leurs établissements humains selon leurs références culturelles, leurs pensées, leur religion et leur mode de vie. Tout au long de leur histoire, les ksour des Mozabites ont conservé leur identité qui transparaît dans leurs constructions. Plusieurs recherches ont entamé l'étude du patrimoine de la vallée du M'Zab. Bouchair et Dupagne en 2003 ont fait une étude détaillée sur les traditions des ksour de la vallée. Ils ont montré que les pratiques et traditions des mozabites qui ont exploité les sources disponibles localement pour répondre aux besoins spécifiques de la culture « Ibadites », présentent une source d'inspiration pour les créateurs. Le Ksar avec leurs palmiers, les maisons avec leurs détails constructifs et organisationnels, reflètent le mode de vie, les coutumes et la religion de la société mozabite par excellence.

Néanmoins, un nomadisme saisonnier et journalier est remarqué par les peuples autochtones. Pendant l'été les mozabites laissent les maisons à l'intérieur du Ksar et occupent les maisons de la palmeraie. Aussi, sur le plan architectural, les mozabites utilisent la terrasse pendant les nuits de la période estivale pour dormir, ce qui pose la question de l'inconfort thermique dans les espaces de nuit dans les chambres.

Donc, cette étude s'intéresse à lever le voile sur le problème de confort thermique à l'intérieur des maisons mozabites spécialement dans la période de surchauffe. Aussi, l'état de confort thermique en période hivernale est mis en valeur à travers cette étude. Ce chapitre va commencer par la présentation du contexte d'étude et les données climatiques du Ksar de Béni Isguen, ainsi que les cas d'étude traités par la suite.

## IV.1. Le Ksar de Béni Isguen :

### IV.1.1. Présentation du ksar de Béni Isguen :

Le Ksar de Béni Isguen dans la vallée du M'Zab, d'une longueur de 25 km, est situé dans un site désertique à 600 km au sud d'Alger caractérisée par un climat chaud et sec (Figure IV.1.a et b), c'est un plateau calcaire découpé en vallées et ravins qui s'entrecroisent en forme de filet (Chebka mozabite)(Bouchair & Dupagne, 2003).

Cette vallée, formant un ensemble urbain et paysager homogène constitué d'un réseau de cinq ksour (villes traditionnelles) et de palmeraies (Figure IV.2), couvre une superficie d'environ 6 000 hectares entre 32° et 33°20' de latitude Nord et 2°30' de longitude Est avec une altitude de 450 km, et abrite une population totale de 170 000 habitants (OPVM, 2018). La vallée du M'Zab, structurée autour d'un « Oued », s'est urbanisée selon une structure territoriale articulant un modèle d'organisation d'un agro système singulier (Côte, 2002 ; Côte, 2005), basé sur le triptyque eau / habitat / palmeraie (Casanovas Boixereu, 2012).

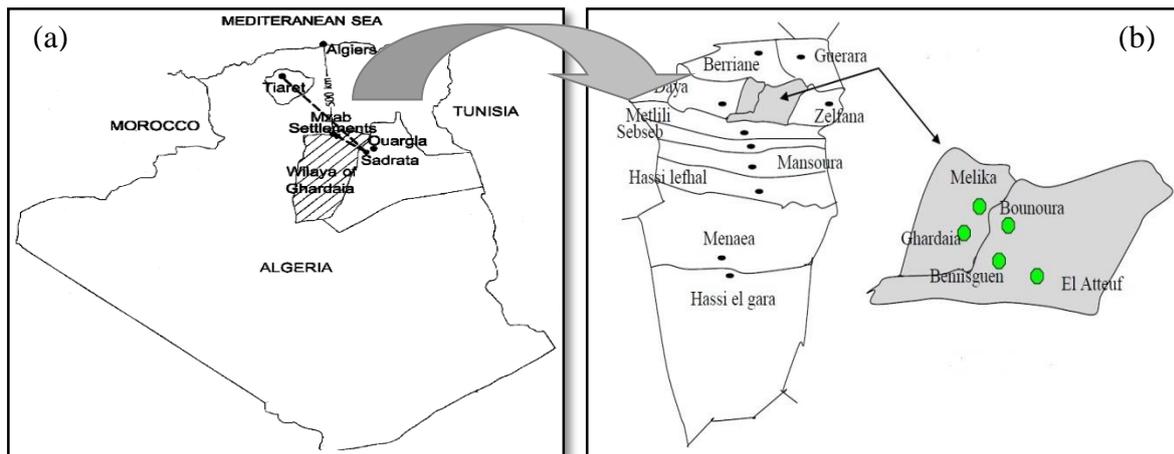


Figure IV.1 : (a) Localisation géographique de la vallée et parcours historique des Ibadites (Bouchair & Dupagne, 2003) ; (b) Situation du Ksar de Béni Isguen (Google image, 2018)

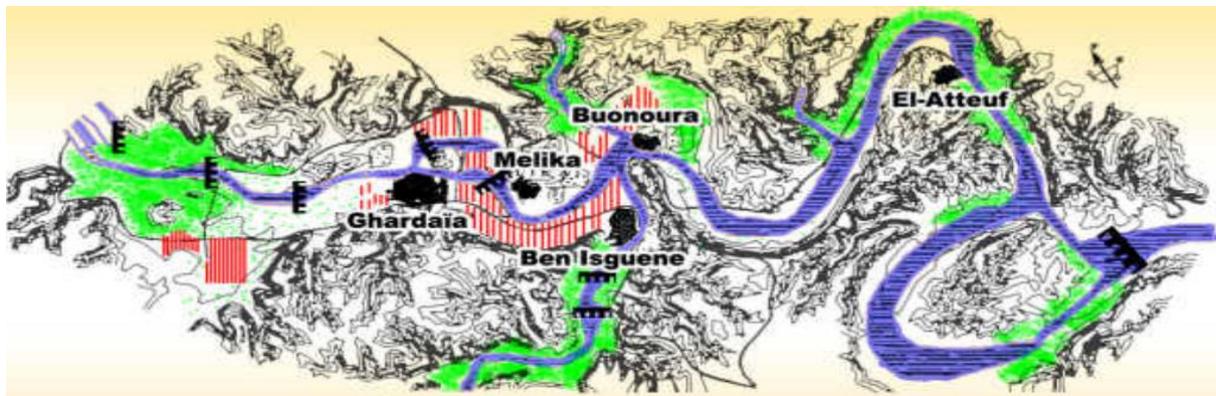


Figure IV.2 : Position du Ksar de Béni Isguen par rapport des cinq Ksour dans la Vallée (OPVM, 2018)

#### IV.1.2.Composition de la Vallée : les 5 Ksour:

Cinq ksour forment la vallée du M'Zab, située sur les rives de l'oued M'Zab et forment ce qu'on appelle communément la pentapole du M'Zab constituée de Beni-Isguen (1347), Bounoura (1046), El Atteuf (1012 ), Ghardaïa (1053) et Melika (1124) (Bensalah, Yousfi, Mena, & Bougattoucha, 2018).

Le ksar de Béni Isguen, qui est l'un des cinq Ksour de la vallée, se situe sur le flan d'un piton à équidistance entre le ksar de Melika et celui de Bounoura, au confluent de l'oued M'Zab et l'oued N'tissa (Figure IV.2). Le ksar de Béni Isguen s'organise à partir d'une vieille ville, « Tafilelt », qui occupe la partie supérieure du Ksar. Il compte deux portes principales situées au nord-est et au sud-ouest, reliées par une rue, ainsi que trois autres portillons menant aux différents cimetières. Toutes les ruelles aboutissent en fin de parcours à la place du marché (Figure IV.3). La superficie globale de ce ksar est estimée à 16,5 ha et le nombre total de ses habitations est de 1010 maisons (OPVM, 2018).

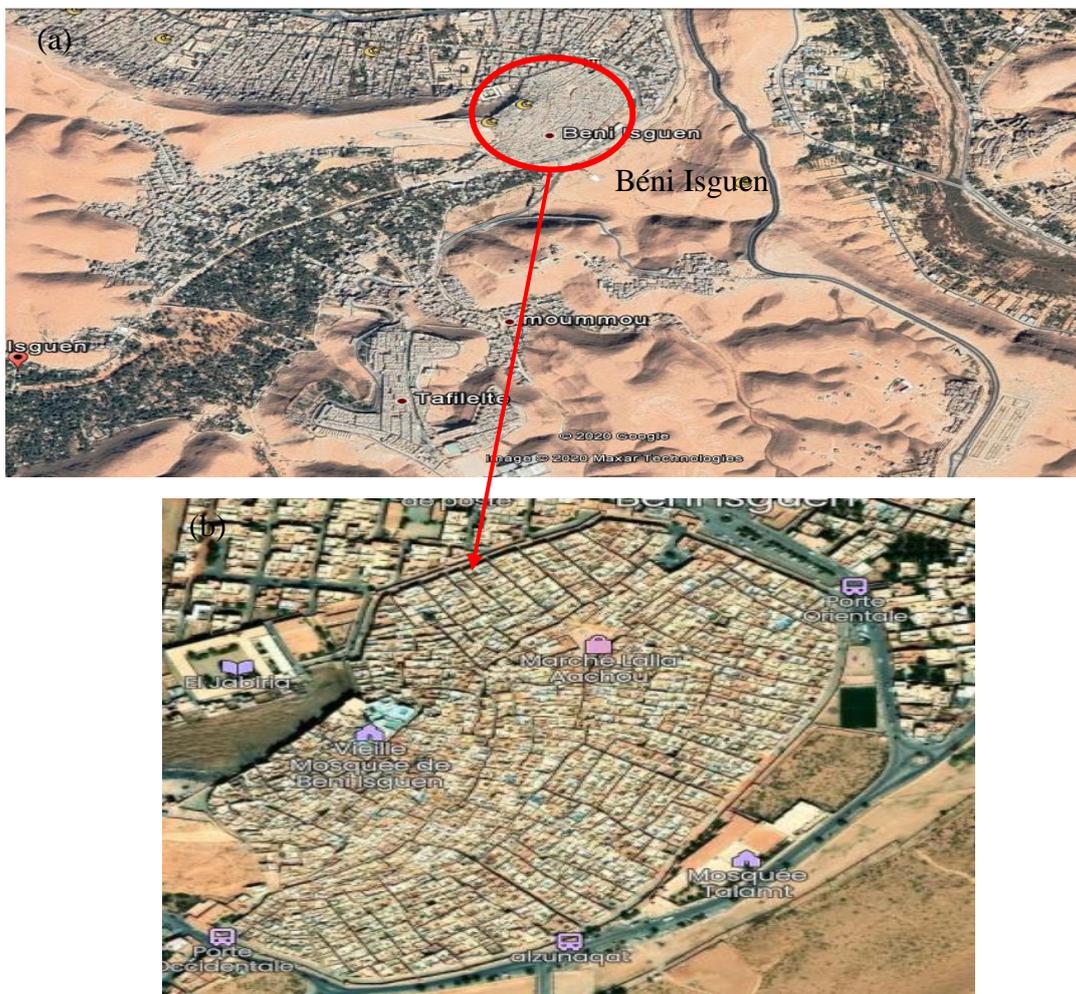


Figure IV.3 : Vue satellite de localisation du Ksar de Béni Isguen : (a) (Google earth, 2020) ;  
(b) (<https://mapcarta.com/fr/17355002/Carte>)

L'ancien petit village connu sous le nom de « Tafilelt » est le premier noyau du Ksar de Béni Isguen ; à partir lequel le Ksar a commencé à s'étendre (Figure IV.4).

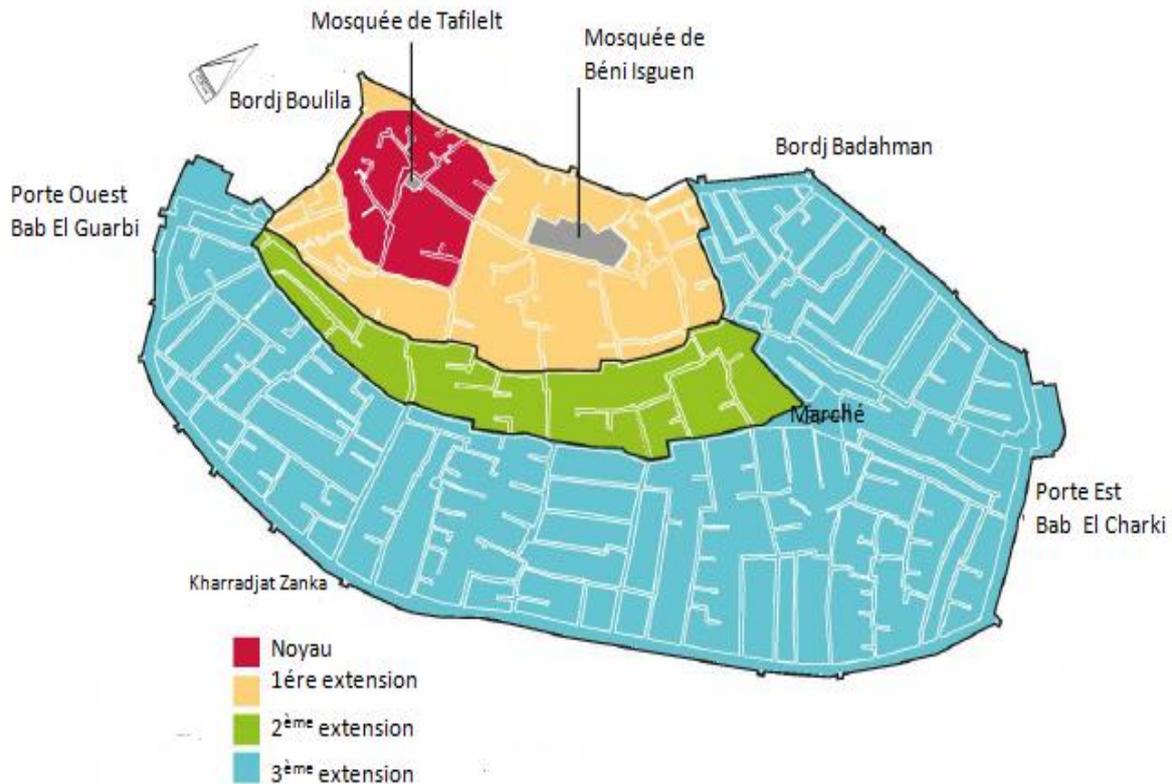


Figure IV.4 : Plan du Ksar de Béni Isguen avec les étapes d'extension du Ksar (OPVM, 2018)

#### IV.1.3. Les ressources territoriales du Ksar :

Le territoire du Ksar de Béni Isguen dispose trois ressources principales : les ressources culturelles, le paysage environnemental et une économie locale spécifique. Les ressources culturelles sont les plus importantes, car elles possèdent d'importantes potentialités matérielles et immatérielles. Le patrimoine matériel est principalement composé de :

- ✓ Le système d'urbanisation du territoire, structuré en ville-oasis avec une gestion de l'eau spécifique.
- ✓ Le patrimoine architectural Ksourien avec ses monuments tels que mausolées, systèmes défensifs, cimetières, etc.
- ✓ Le patrimoine immatériel comprend principalement : artisanat, gastronomie et fêtes populaires (Balalou, 2008).

#### IV.1.4. Héritage matériel :

Les cinq ksour de la pentapole présentent les mêmes composantes de structuration territoriale et de fonctionnement urbain (Benyoucef, 1986). Chaque ksar, avec son environnement immédiat, constitue une ville-oasis où se développe une palmeraie luxuriante avec un système hydraulique sophistiqué de collecte, de stockage et de distribution des eaux

de crue (Adad & MAZOUZ, 2013a). Les trois éléments qui composent les ensembles urbains et résidentiels du Ksar de Béni Isguen : ksar, cimetière et palmeraie avec sa cité d'été, sont un témoignage exceptionnel de la culture Ibadisme au principe égalitaire. Le Ksar de Béni Isguen avec leur palmeraie a été construit selon le même schéma structurel des autres Ksour de la vallée du M'Zab. Il a la caractéristique commune d'être situés en hauteur tout en restant en dessous de la ligne d'horizon de la colline, afin de se protéger des inondations de l'Oued M'Zab et de ses affluents et de défricher les terres arables (Casanovas Boixereu, 2012).

#### IV.1.5.Héritage immatériel :

Le patrimoine immatériel, ou autrement appelé "patrimoine culturel vivant", désigne les traditions et expressions orales, y compris la langue, les pratiques sociales, les arts du spectacle, les événements rituels festifs, les savoirs et pratiques concernant la nature et l'univers, les savoirs-faires liés à l'artisanat traditionnel. Transmis de génération en génération, le patrimoine culturel immatériel est recréé en permanence par les communautés en fonction de l'environnement dans lequel elles vivent (Benyoucef, 2018). Le patrimoine culturel immatériel assure aux populations et aux communautés un sentiment d'identité et de continuité (Benyoucef, 1992). Donc, la protection de ce patrimoine favorise le développement de la diversité culturelle et de la créativité (OPVM, 2018). La vallée du M'Zab a longtemps été célèbre pour sa variété d'artisanat, y compris le tissage de tapis (tapis haut laine, tapis courts, tapis à motifs berbères, tapis, hambels, etc.). Ce tissage traditionnel connu par sa singularité, son authenticité, ses formes, le travail de la laine fournit plusieurs types de vêtements familiaux 'Kachabia, burnous, mozabite gandoura, Khomris (Figure IV.5.a et b). D'autres formes d'artisanat sont la dinanderie, la poterie, etc. (OPVM, 2018).



Figure IV.5 : Habillage des M'Zab : (a) la photo montre le vêtement traditionnel de l'homme du M'Zab (OPVM, 2018), (b) la photo montre le vêtement traditionnel de la femme (Hayak) (Auteur, 2018)

IV.1.6. Mode d'urbanisation du Ksar : Association homme-culture-climat :

Le groupe fondateur a choisi un site en fonction des possibilités de défense militaire et de la disponibilité des ressources en eau, condition qui assure la création de palmeraies indispensables à l'implantation humaine. La taille du ksar et l'importance de son espace bâti dépendent des capacités nourricières du sol. Lorsqu'elle dépasse la capacité de la mosquée, il convient d'en construire une autre au sommet d'un piton et de fonder une nouvelle ville autour d'elle (M Chabi & Dahli, 2011). L'espace bâti, contenu dans des remparts, est structuré par trois éléments artificiels et symboliques, le puits garantissant la vie, la tour garantissant la paix et l'aire de prière garantissant la doctrine. La figure IV.6 illustre une vue d'ensemble du Ksar de Béni Isguen.

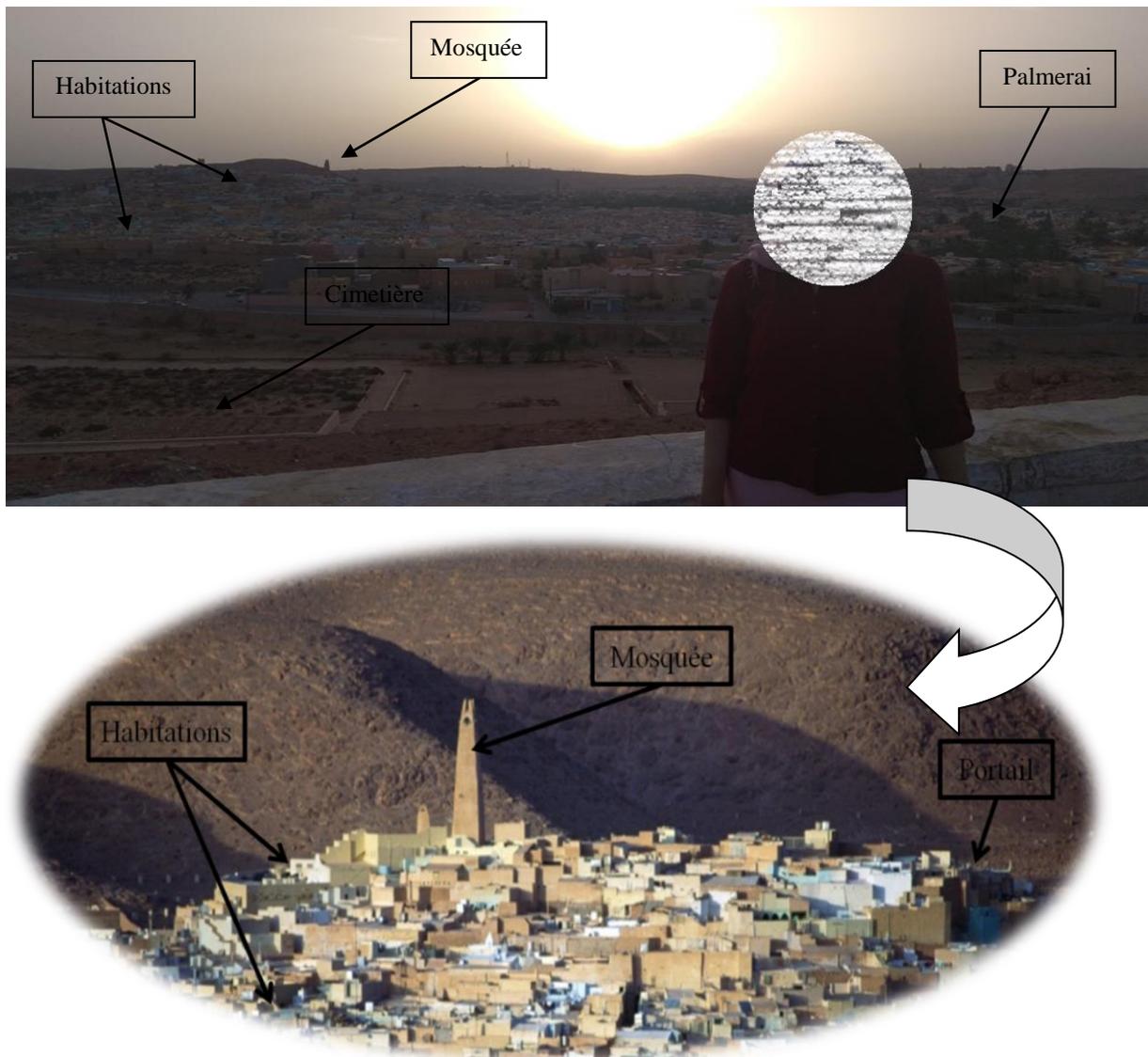


Figure IV.6 : Vue d'ensemble du Ksar de Béni Isguen (Auteur, 2018)

IV.1.7. Principe d'organisation urbaine du Ksar :

Le principe d'urbanisation du Ksar de Béni Isguen est lié à la méthode d'implantation bâti sur un piton autour d'une mosquée (Mohammed Chabi, 2009). Autour de la mosquée s'organisent les maisons agglomérées harmonieusement échelonnées en terrasses (Figure IV.7). La logique de l'implantation urbaine du ksar de Béni Isguen repose sur un tissu urbain compact aux ruelles étroites (Bouchair et al., 2013) (Figure IV.8).

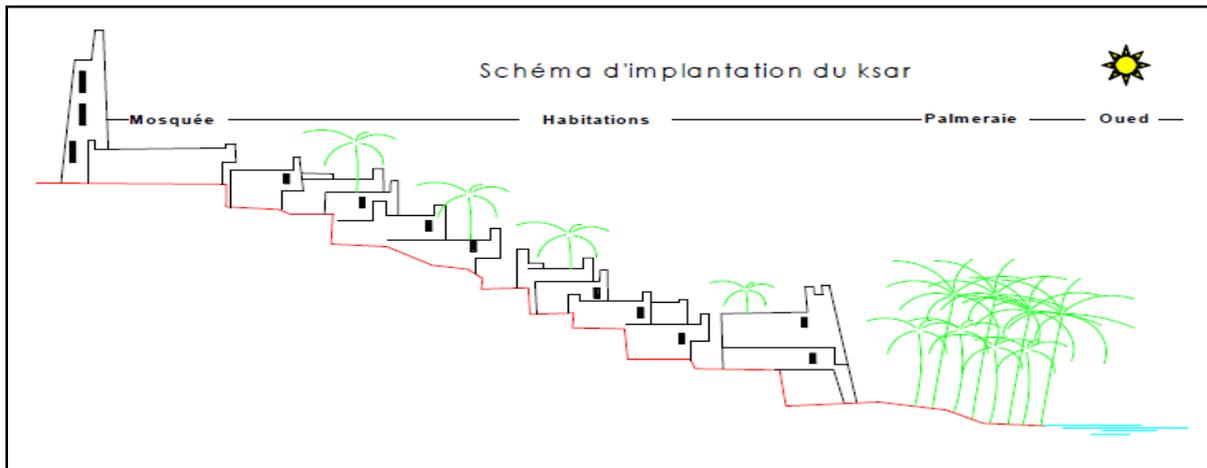


Figure IV.7 : Aménagement du ksar (Layout) (M Chabi & Dahli, 2011)

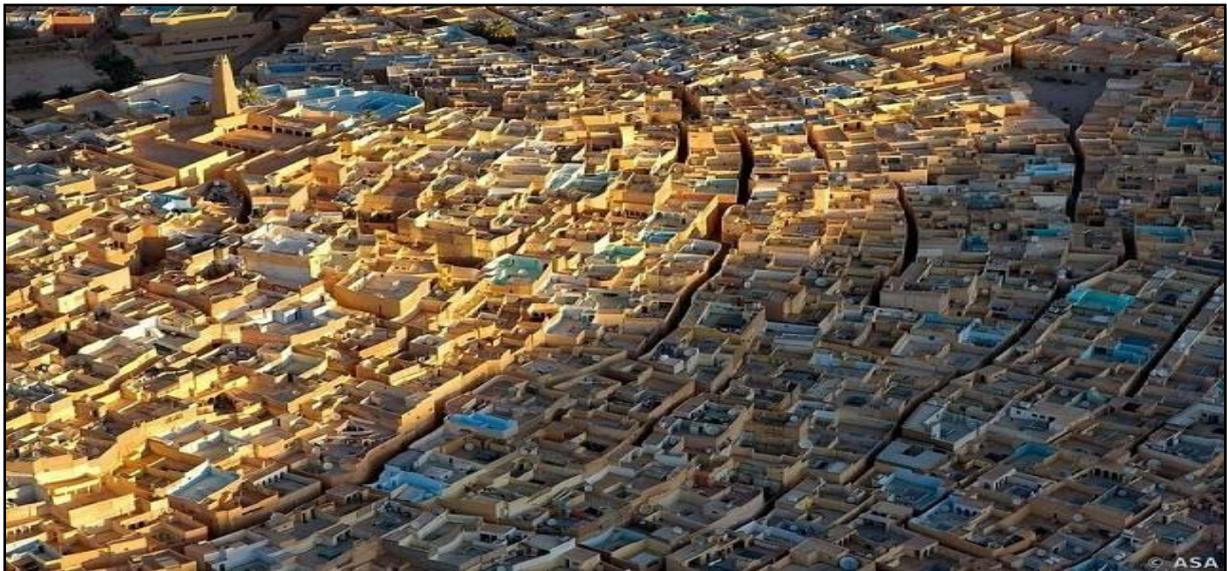


Figure IV.8 : Photo montrant le tissu urbain compact du ksar (Google image, consulté 2019)

IV.1.8. Les éléments du Ksar :

Les rues et les ruelles du Ksar sont tracées selon la topographie du terrain d'où la nature et la forme demi-sphérique divisent la structure ruelle en deux types. Les rues ascendantes vers la mosquée ont la forme de pentes, talus et d'escaliers et les rues de forme ovale et plate qui sont parallèles à la mosquée et relient entre le côté est et ouest du Ksar (Figure IV.9).

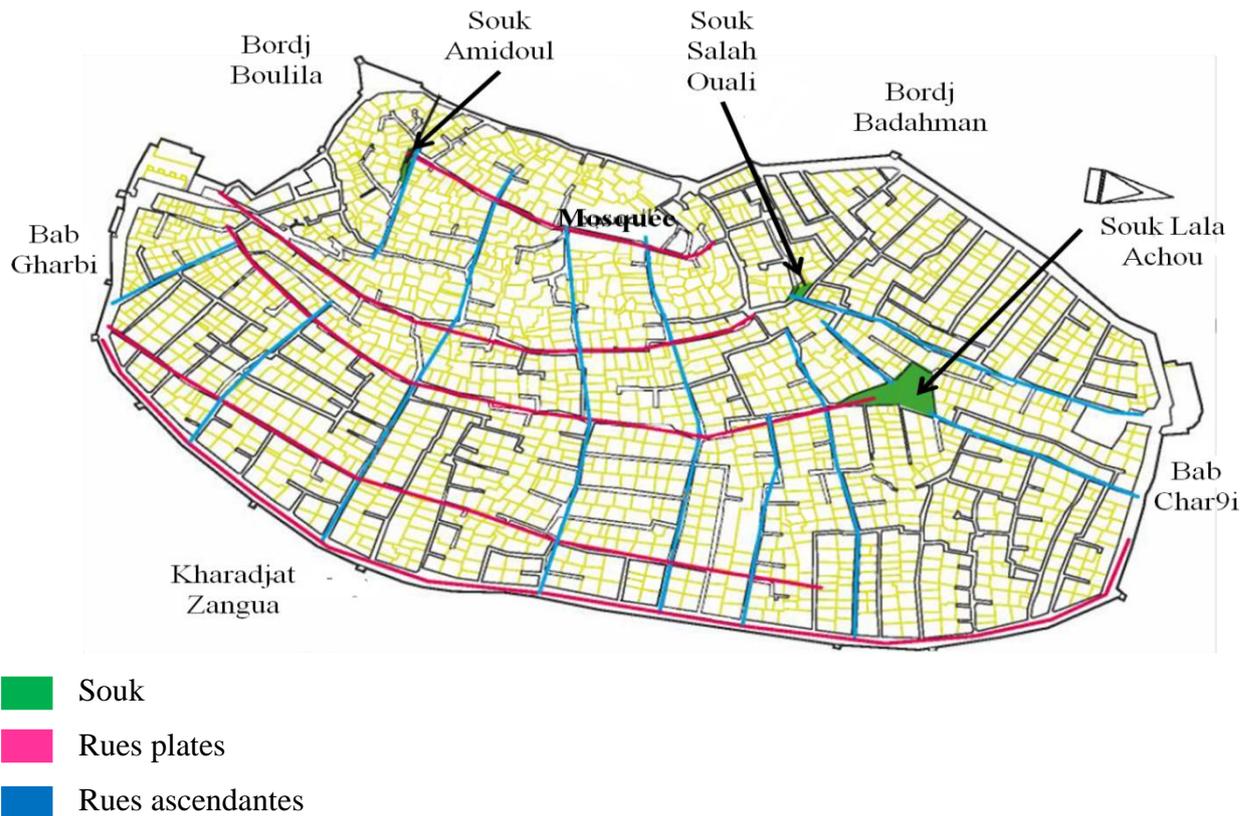


Figure IV.9 : Plan de structure viaire du Ksar de Béni Isguen (OVPM, 2018)

#### IV.1.8.1. Les rues :

Les rues sont simples et étroites ; il y a deux types de rues.

- ✓ Rues commerçantes: sont à proximité du souk, interdites aux femmes (la femme devant faire ses courses, demande à un enfant de les faire pour des raisons d'intimité). (Figure IV.10. a)
- ✓ Rue intime (hurm) : Sont à côté des maisons, autour de la mosquée, les étrangers de la ville n'entrent jamais (Figure IV.10. b).

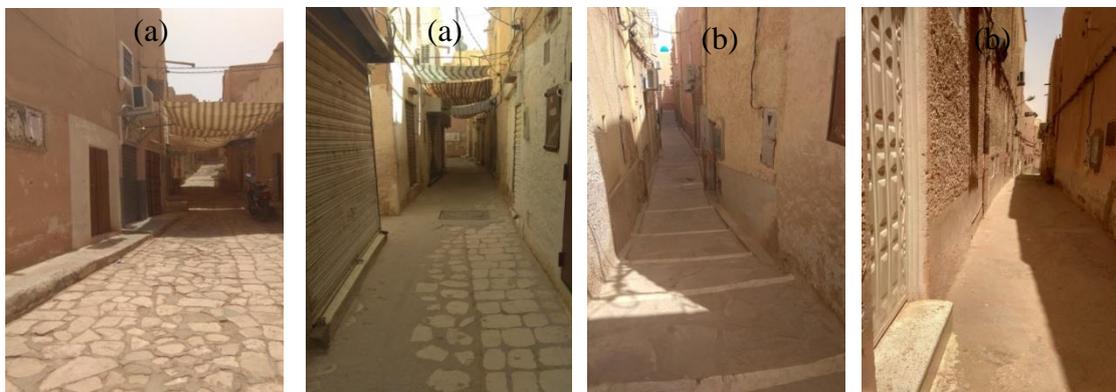


Figure IV.10 : (a) Photos montrant les rues commerçantes du Ksar de Béni Isguen, (b) photos montrant les rues intimes dans le Ksar de Béni Isguen (Auteur, 2018)

IV.1.8.2. Les ruelles :

À l'intérieur des villes, la circulation s'effectue par des ruelles parfois partiellement couvertes, accessibles aux piétons et aux ânes (Figure IV.11.a. b. et c). Architecturalement, la ruelle n'est animée que par la forme et la couleur des murs (Didillon & Donnadieu, 1977).



Figure IV.11 : Photos montrant les ruelles à l'intérieur du Ksar (Auteur, 2018)

IV.1.8.3. La mosquée :

Chaque ville possède une mosquée caractérisée par son haut minaret, elle n'est plus décorée que les maisons (Figure IV.12. a). Même le mihrab n'a ni stuc ni moulure. Outre la mosquée, il existe des lieux d'enseignement religieux (la médersa).

IV.1.8.4. Le souk:

Centre public, centre laïc, c'est la place du marché qui représente un lieu de rencontre masculin (Figure IV.12. b). Le souk prend des formes diverses, mais le plus souvent situé en périphérie de la ville, de sorte que les étrangers attirés par le commerce n'ont pas la possibilité d'entrer dans la ville réservée aux habitants.



Figure IV.12 : (a) Photo montrant le minaret de la mosquée du Ksar, (b) photo montrant le souk de 'Lala Achou' dans le Ksar de Béni Isguen (Auteur, 2018)

IV.1.8.5. Cimetière :

Chaque groupe de population a ses cimetières particuliers. À noter que les cimetières sont le lieu d'activités nombreuses et parfois intenses, lors de fêtes religieuses (mahadre) et occasionnellement de sacrifices ou de destructions de nourriture (marouf).

IV.1.8.6. Palmeraies :

Les palmeraies sont situées à proximité des villes, et équipées de nombreux ouvrages hydrauliques, barrages, foggara, puits et seguia (Benyoucef, 1988). Ces oasis tendent à devenir de véritables cités de résidences secondaires, des maisons y sont construites pendant la saison de cueillette des dattes et plus encore pendant la saison chaude (Côte, 2017).

IV.1.9. Les éléments de la maison mozabite:

La maison Mozabite se caractérise par sa simplicité et sa fonctionnalité dépourvue de toute décoration superficielle. Il ne doit comporter aucun signe extérieur de richesse par principe d'égalité et de solidarité sociale. La maison du M'Zab correspond au type « maison à patio ». Il existe deux types de maisons dans le Ksar de Béni Isguen : celle qui est intégrée au tissu urbain du Ksar à l'intérieur du rempart et celle de leur palmeraie ou maison d'été (Tableau IV.1).

Tableau IV.1 : Types d'habitats dans le Ksar (OPVM, 2018)

Types de maisons	Plan	Aperçu
Maison urbaine		
Maison du palmier (maison d'été)		

IV.1.9.1. Maison introvertie à Chebek :

La maison à patio constitue une méthode de construction très répandante dans le climat chaud et sec du Ksar de Béni Isguen, puisque le patio a plusieurs rôles climatiques, d'où il laisse ventiler la maison pendant la nuit (Figure IV.13.a). En effet, après le coucher du soleil, les températures chutent considérablement et créent des courants de convection qui remplacent l'air chaud par l'air frais (Bouchair, 2013). Le patio est généralement recouvert par le Chebek dans la terrasse (Figure IV.13.b).

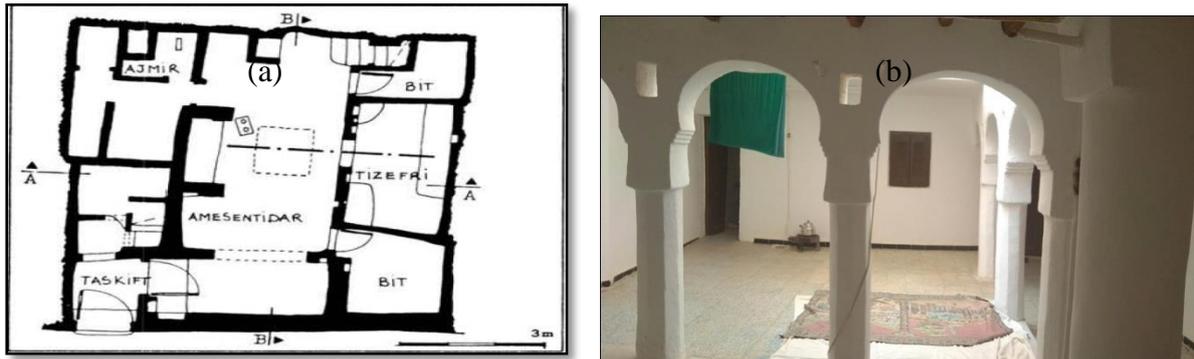


Figure IV.13 : (a) Plan d'une maison mozabite avec patio (OPVM, 2018) ; (b) vue du patio couvert par tapis pendant la journée d'été (Auteur, 2018)

IV.1.9.2. Chebek :

C'est une ouverture vaste donnant sur l'extérieur. C'est un percement au plafond qui joue le rôle d'un élément d'éclairage et de ventilation et d'enseillement. Il peut être ouvert ou recouvert avec une toile selon le besoin (Figure IV.14. a et b). Il a une forme rectangulaire et il se situe généralement au-dessus de la position centrale.



Figure IV.14 : (a) Vue de chebek depuis la terrasse ; (b) vue de couvert de chebek dans la terrasse d'une maison à béni Isguen (Auteur, 2018)

#### IV.1.9.3. Le toit-terrasse :

Dans le logement, la famille utilise le toit de la maison pour dormir en plein air pendant les nuits d'été. Le toit est utilisé pour dormir, car les pièces restent chaudes la nuit à cause de la petite ventilation (Bouchair, 2013) où se retrouvent deux sortes de terrasses ; l'une qui communique directement avec les terrasses voisines, et l'autre marquée par un léger relevé de maçonnerie, et des portes qui permettent la communication avec les autres maisons. C'est un espace réservé aux femmes (OPVM, 2018).

#### IV.1.9.4. Matériaux de construction :

Les matériaux de construction traditionnels se distinguent, tels que les murs porteurs en maçonnerie de pierre locale ou de terre (Figure IV.15.a) , les planchers traditionnels en troncs et branches de palmier (Figure IV.15.b), ou encore les toits et leur étanchéité traditionnelle en sable, mortier de chaux traditionnel, lait de chaux en deux couches, enduits extérieurs avec du sable, de la chaux traditionnelle, du Timchemt (enduit traditionnel) ou encore des ouvertures et des éléments de façade tels que des meurtrières (Casanovas Boixereu, 2012; Didillon & Donnadiou, 1977).

Les logements sont construits avec des murs épais de haute capacité thermique, à partir de matériaux disponibles localement, tels que les pierres, la boue et la chaux.



Figure IV.15 : (a) Mur en terre dans la maison de palmeraie de Béni Isguen ; (b) Toit en palmier (Auteur, 2018)

#### IV.1.9.5. Ensoleillement/orientation et éclairage de la maison ksourienne :

Les différents espaces de la maison s'articulent autour le patio, basant sur les principes et les coutumes qui reflètent le mode de vie des peuples mozabites. Par exemple, le Skiffa qui offre l'intimité de l'intérieur de l'habitation vis-à-vis l'espace extérieur. Les maisons sont bien orientées pour profiter du soleil en hiver tout en protégeant des rayons solaires agressifs pendant l'été (Figure IV.16.a et b).

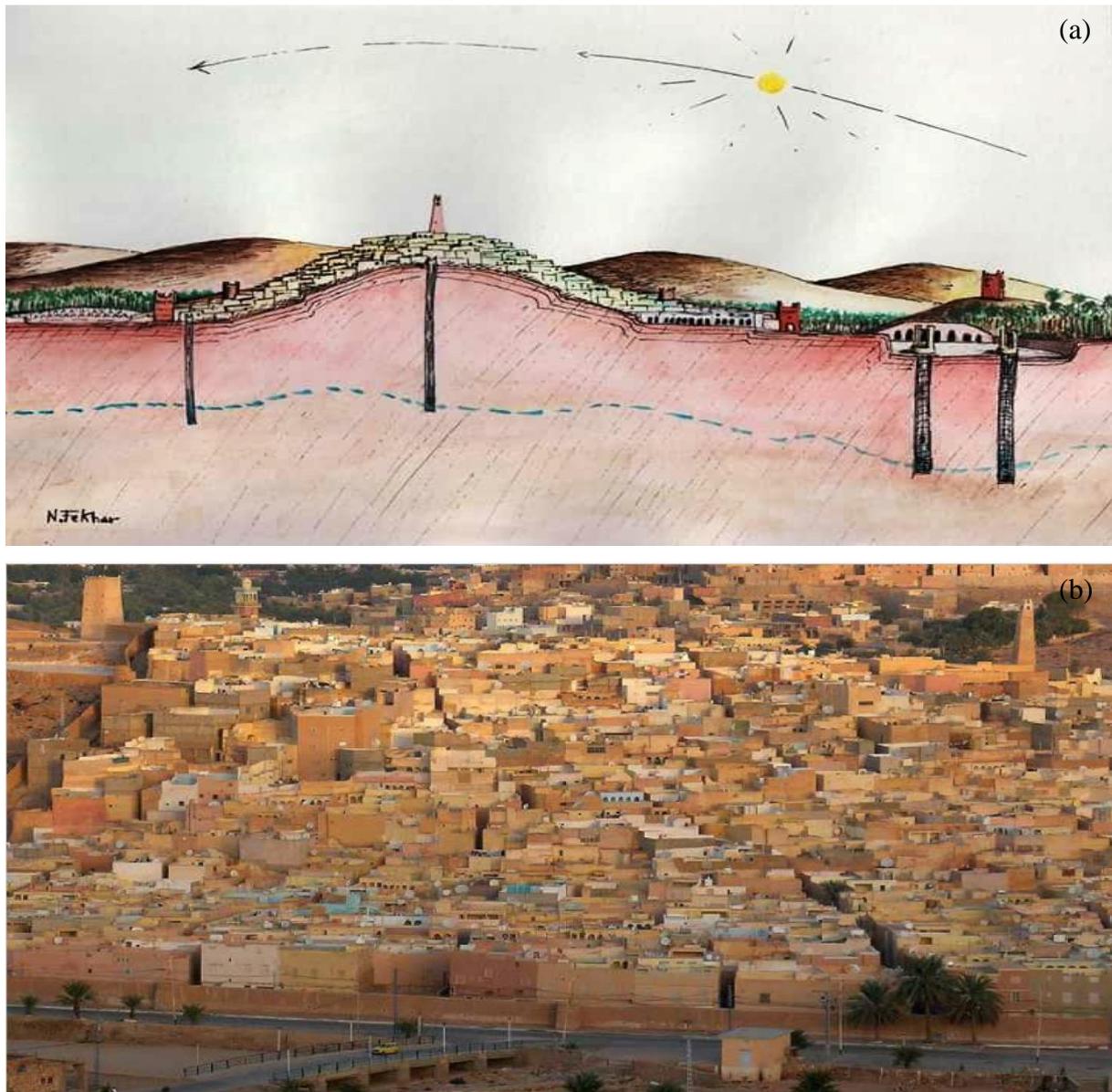


Figure IV.16 : Ensoleillement du Ksar : (a) Course du soleil à travers le Ksar

(<https://cjb.hypotheses.org/698>) ; (b) Vue du Ksar (OPVM, 2015)

L'éclairage naturel se fait pendant la journée à travers le patio qui est considéré comme la source principale de l'éclairage et de l'ensoleillement de la maison. Pendant les jours très chauds de la période estivale, le Chebek est couvert pour réduire la forte irradiation solaire et minimiser l'éblouissement intérieur. La figure IV.17 montre l'orientation et l'ensoleillement de la maison traditionnelle mozabite dans le Ksar de Béni Isguen.

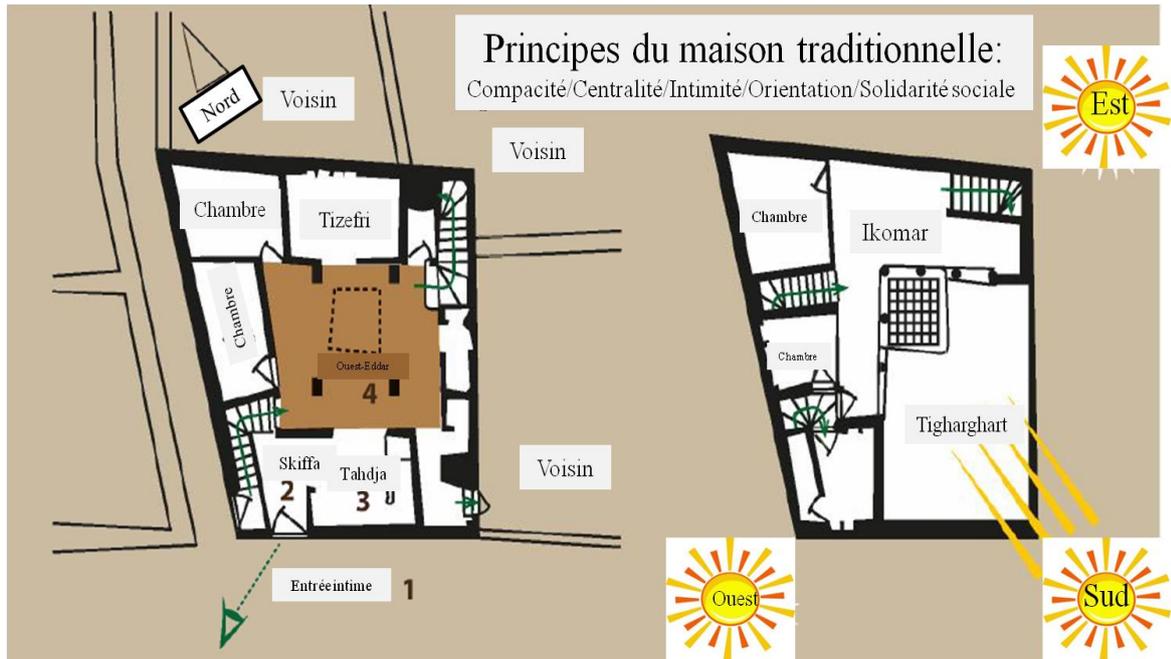


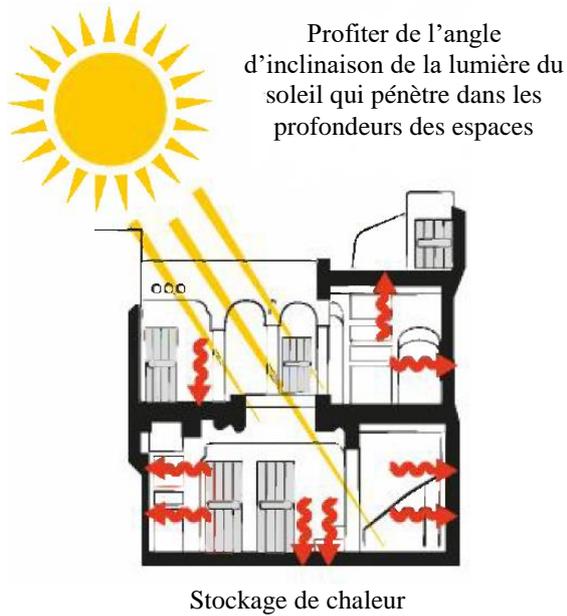
Figure IV.17 : Orientation et ensoleillement de la maison traditionnelle mozabite dans le Ksar de Béni Isguen (Plan : OPVM, 2018)

#### IV.1.9.6. Ventilation et aération de la maison ksourienne :

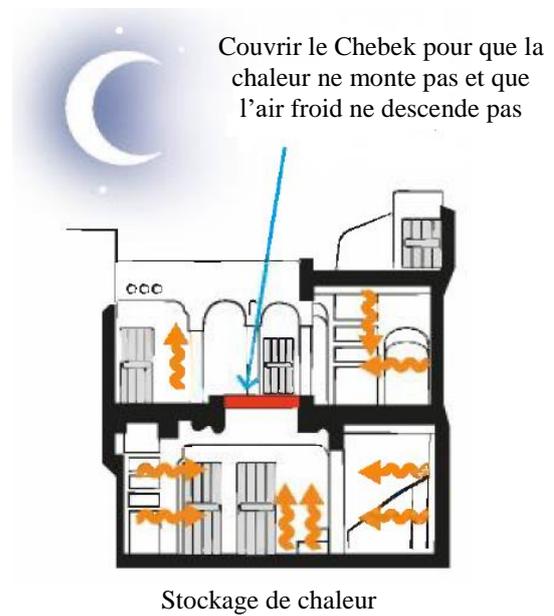
L'aération de la maison ksourienne se fait à travers le patio. La différenciation de la pression entre les terrasses chaudes exposées aux rayons solaires et la cour ombragée permet de créer de courants d'air par ventilation de la porte extérieure et dissiper l'air chaud par l'ouverture de Chebek dans le toit. L'ajout de dispositif de rafraîchissement comme plan d'eau dans le patio augmente l'humidité de l'air, ce qui améliore l'état de confort thermique intérieur pendant l'été. Les matériaux locaux des toits et des murs épais sont utilisés comme une solution bioclimatique et une stratégie passive pour fournir le rafraîchissement en été et le chauffage en hiver. La figure IV.18 illustre les stratégies passives d'aération et de ventilation des maisons ksouriennes.

## Hiver

Journée

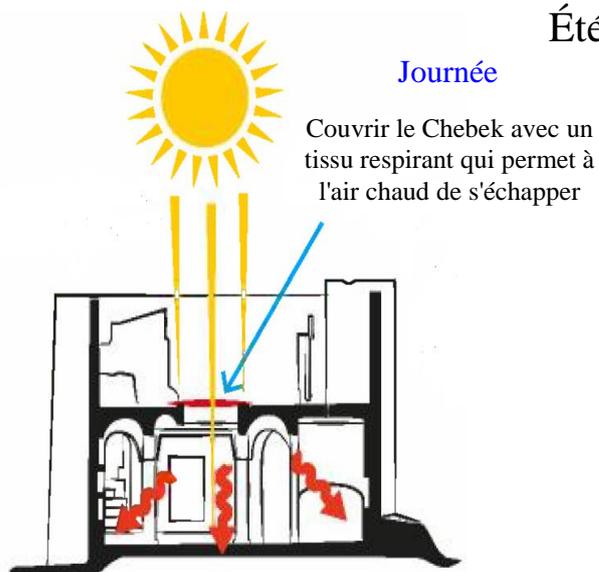


Nuit



## Été

Journée



Nuit

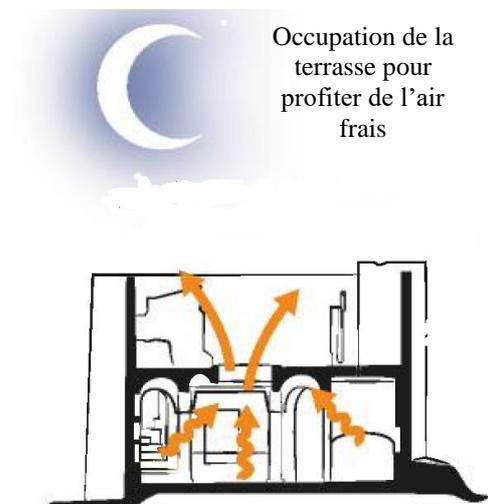


Figure IV.18 : Stratégies passives d'aération, de ventilation et d'ensoleillement de la maison ksourienne (Schéma adapté par OPVM, 2018)

## IV.2. L'étude climatique du Ksar de Béni Isguen :

Le climat a été le principal facteur environnemental qui a influencé l'évolution des établissements vernaculaires et la conception des bâtiments, au cours des siècles. Il est bien connu que le sud de l'Algérie est l'une des terres les plus arides du monde. Les conditions environnementales dominantes qui influencent le confort des habitants sont principalement de quatre types :

températures élevées et rayonnement solaire intense, éblouissement dû à la lumière directe et réfléchie, tempêtes de poussière, principalement l'après-midi, dans certaines régions avec hivers froids, vents froids en hiver, faibles précipitations annuelles, pluies torrentielles entraînant de graves inondations. En général, le sud de l'Algérie et le Ksar de Béni Isguen principalement a un climat désertique typique avec des variations entre les saisons et entre les températures de jour et de nuit. Le climat est chaud et sec pendant l'été avec des nuits froides et des jours doux pendant l'hiver. La pluie se produit principalement en hiver (quelques jours par an) et l'humidité relative est basse surtout pendant l'été. Des tempêtes se produisent pendant certaines périodes de l'année, habituellement en mars et avril. En ce qui concerne le Sirocco, il se produit à une moyenne de 10 jours / année pendant la période de mai à septembre (Sebti et al., 2013).

### IV.2.1. Les données climatiques du Ksar de Béni Isguen :

Le Ksar de Béni Isguen dans la vallée du M'Zab est situé dans le sud-est de l'Algérie. C'est l'une des régions sahariennes caractérisées par un climat chaud et sec. La vallée du M'Zab se situe à 190 km à l'ouest de la ville de Ouargla, à 505 km au sud-ouest de la ville de Biskra et à 550 km au sud d'Alger. Elle s'étend sur environ 8 000 kilomètres carrés, entre 32° et 33°20' de latitude Nord et 0°4' et 2°30' de longitude Est avec une altitude de 450 km (<https://fr.wikipedia.org/wiki/Mzab>).

Latitude : 32.4 | Longitude : 3.81 | Altitude : 450

Le climat de la région du Ksar de Béni Isguen est de type saharien chaud et sec qui recouvre une grande partie de l'Afrique du Nord. Le caractère fondamental de ce type de climat est la sécheresse de l'air conjugué à une faible pluviométrie, mais les microclimats jouent un rôle considérable dans le désert par le relief ou la végétation qui modifient localement les conditions climatiques (Chabi, 2008). Dans le Ksar de Béni Isguen, le climat local, à travers la température de l'air, l'humidité, les vents, l'irradiation solaire, précipitations et insolation solaire (Kitous, S. et al, 2006), dépend essentiellement :

- ✓ de sa position en latitude qui détermine l'intensité de la radiation solaire reçue.

- ✓ des conditions du site et de l'environnement qui sont à l'origine de modifications climatiques particulières.

Les tableaux IV.2 et IV.3 montrent les données climatiques de températures et d'humidités relatives du Ksar de Béni Isguen entre l'année 2011 et 2017.

Tableau IV.2 : Température moyenne mensuelle en °C du Ksar de Béni Isguen (O.N.M, station Noumret de Ghardaïa)

Mois/année	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
<b>Janvier</b>	12.6	10.8	12.7	12.3	11	13.8	9.8
<b>Février</b>	12.4	9.7	12.6	14.4	11.5	14.7	14.7
<b>Mars</b>	15.2	16.1	18.7	15.8	16.4	17	18.1
<b>Avril</b>	21.8	21	21.5	22.7	23	22.7	21.3
<b>Mai</b>	24.6	27.8	25.6	26.8	27.9	26.8	28.5
<b>Juin</b>	29.4	34	30	30.1	30.6	31.3	31.4
<b>Juillet</b>	35.1	26.4	34.6	35.5	33.4	34.2	33.9
<b>Août</b>	23.6	27.4	32.1	35.6	33.7	33	33.7
<b>Septembre</b>	31.2	29.1	29.5	31.4	29.3	29.3	28.1
<b>Octobre</b>	20.9	24.7	26.9	24.4	23.7	25.2	21.8
<b>Novembre</b>	16.3	17.1	16.5	17.5	16.4	16.6	16
<b>Décembre</b>	12.6	12.6	10.5	11.4	12.4	12.6	11.5

Tableau IV.3 : Humidité relative moyenne mensuelle en % du Ksar de Béni Isguen (O.N.M, station Noumret de Ghardaïa)

Mois/année	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
<b>Janvier</b>	48	34	32	49	43	40	32
<b>Février</b>	44	31	39	38	42	36	39
<b>Mars</b>	53	28	36	33	31	27	12
<b>Avril</b>	43	20	35	22	24	30	29
<b>Mai</b>	36	18	31	24	20	22	23
<b>Juin</b>	35	16	28	22	22	21	23
<b>Juillet</b>	24	14	25	13	19	20	17
<b>Août</b>	26	24	31	17	28	25	34
<b>Septembre</b>	33	33	40	26	35	35	32
<b>Octobre</b>	59	39	36	28	40	38	42
<b>Novembre</b>	55	59	46	43	51	45	40
<b>Décembre</b>	60	55	66	51	54	65	49

Voir Annexe 02 pour plus de détails sur les données climatiques du Ksar de Béni Isguen.

#### IV.2.2. Les outils graphiques d'évaluation du confort thermique :

Les diagrammes bioclimatiques présentent la synthèse de la connaissance des variables climatiques pour déterminer l'effet des caractéristiques architecturales et constructives sur le confort thermique dans les bâtiments. Le premier diagramme bioclimatique a été proposé par V. Olgyay en 1953. Ce dernier a mis en évidence une zone de confort avec des plages d'été et d'hiver pour normaliser l'intégration des conditions climatiques dans la conception des bâtiments. Ensuite, en 1973, Koenigsberger et ses collègues, ont élaboré la méthode basée sur les tableaux de « Mahoney ». Il s'agit d'une série de tableaux utilisés comme guide pour obtenir des bâtiments adaptés et confortables à leurs environnements. Aussi, la méthode de « Mahoney » va aider l'architecte concepteur à prendre les meilleures décisions en phase d'esquisse, en fonction des données climatiques du site d'intervention (Chabi, 2009).

Ensuite, B. Givoni en 1978 a établi un autre diagramme bioclimatique basé sur une méthode plus efficace dans la mesure où il évalue les exigences physiologiques du confort en considérant la personne en état d'activité. Cependant, ce diagramme représente des limites du fait que les zones de confort et de contrôle sont définies dès le départ. Alors, c'est un diagramme standard dont l'utilisation est étroite et son pertinence est limitée à des régions spécifiques du monde (Givoni, 1992).

Ensuite, M. Evans et S. V. Szocolay, en 1980, ont critiqué les outils et les diagrammes bioclimatiques proposés antérieurement à cause de l'incohérence entre les résultats du confort réel et le confort thermique calculés perçu par les sujets. Ces auteurs révèlent que la zone de confort doit être propre à chaque région, et doit tenir compte des caractéristiques du climat local (Szocolay, 1980).

Application du digramme bioclimatique :

Le digramme bioclimatique permet de déterminer la zone de confort thermique pour chaque type de climat, ainsi que les grandes lignes de conception qui permettent de le garantir. La zone de confort est positionnée au centre ; l'aire extérieure est subdivisée en zones secondaires, où maintes procédures permettant de réintégrer les conditions de confort sont proposées. En positionnant les douze mois de l'année sur le diagramme, on arrive à définir les stratégies qu'il faut utiliser pour l'optimisation du confort thermique.

#### IV.2.3. Le diagramme psychrométrique (bioclimatique) de Givoni :

Givoni a développé un outil d'aide qui synthétise les zones thermo hygrométriques utilisées pour couvrir les performances des principales options architecturales. Il exprime sur un diagramme psychométrique (ou bioclimatique), présenté dans son ouvrage, « L'homme,

l'architecture, le climat » (Givoni & Izard, 1978), les moyens d'intervention par des dispositifs architecturaux qui peuvent être utilisés et appliqués pour faire face aux sollicitations climatiques.

**Comment représenter les segments des mois de l'année sur le diagramme de Givoni :**

Il revient à représenter le climat mois par mois par deux points sur le diagramme, chaque mois est représenté par un segment qui représente une journée type du mois. Le point gauche du segment représente le couple, température minimale ( $T_{\min.}$ ) et humidité relative maximale ( $HR_{\max.}$ ) et le point de droite représente le couple, température maximale ( $T_{\max.}$ ) et humidité relative minimale ( $HR_{\min.}$ ).

Le diagramme psychométrique permettra de déterminer :

- La zone de confort
- La zone de surchauffe
- La zone de sous-chauffe

L'utilisation du diagramme bioclimatique permet de dégager des recommandations pratiques et architecturales relatives à chaque zone. Il permet également de savoir si l'espace considéré se trouve dans la zone de confort (zone hachurée dans le diagramme) ou hors de cette zone pour chercher quels aménagements à apporter pour retrouver le confort (chauffage, humidification, mouvement d'air, rafraîchissement par évaporation, action de la masse thermique...).

La figure IV.19 illustre le diagramme psychométrique du Ksar de Béni Isguen avec dessin de 12 segments des mois de l'année.

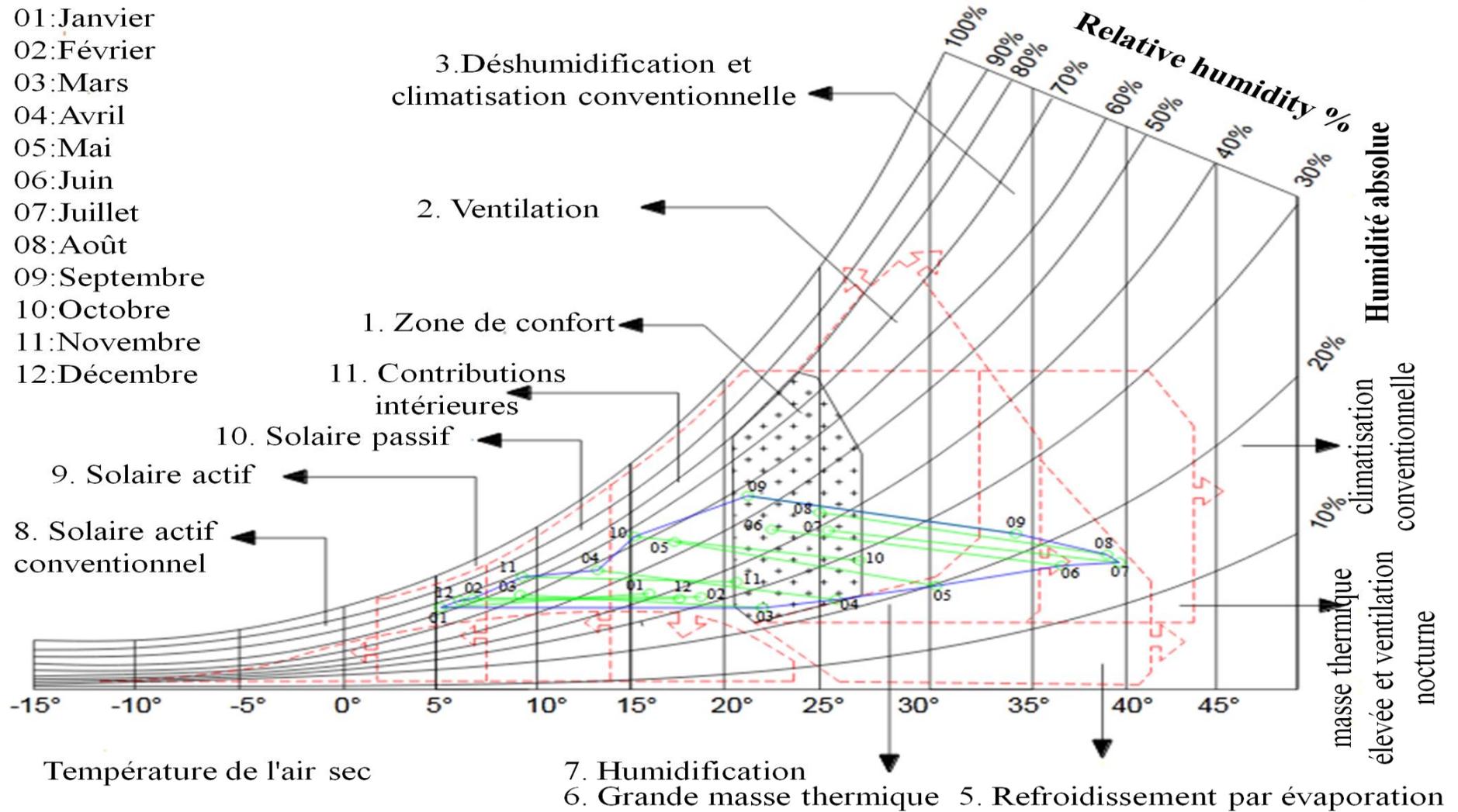


Figure IV.19 : Diagramme bioclimatique du Ksar de Béni Isguen (Charte psychrométrique, 2018)

IV.2.4. Analyse de diagramme bioclimatique selon les données climatiques du Ksar de Béni Isguen :

Remarque : Au mois de **juillet**, la température moyenne est de **39.8°C** et l'humidité relative est de **14.2%**, Alors que **juillet** est de ce fait le mois le plus chaud de l'année.

**Janvier** est le mois le plus froid de l'année. La température moyenne est de **11°C** à cette période avec une moyenne d'humidité relative de 75.9%.

-Pour le mois de janvier, on remarque que le segment se trouve dans la zone de sous-chauffe d'où la nécessité d'une stratégie de solaire passif et d'apports internes.

-Pour le mois de février, on remarque une basse température de 7.2°C avec une humidité de 72%, par contre le degré de T max peut atteindre 19°C et 33.1 % comme pourcentage minimal d'humidité Relative, ce qui implique une position de segment du mois dans la zone de sous-chauffe d'où le besoin d'une stratégie de solaire passif et des apports internes.

-Pour le mois de mars et le mois d'avril, une partie du mois nécessite une stratégie de solaire passif, par contre l'autre partie du mois se trouve dans la zone de confort.

-Pour le mois de mai et de juin, une partie du segment est dans la zone de confort à la limite, et le besoin d'une grande masse thermique.

-Pour le mois de juillet et d'août, une partie du segment se trouve dans la limite de la zone du confort, mais une grande partie du mois (l'autre partie du segment) nécessite une grande masse thermique avec ventilation nocturne, sachant bien, que le mois de juillet est de haut degré de température (°C) avec un taux d'humidité relative basse en comparaisant par rapport au mois d'août ; c'est-à-dire qu'une grande partie se trouve dans la zone de **surchauffe**.

-Pour le mois de septembre, une partie est dans la zone de confort, et l'autre partie du segment implique le besoin d'une grande masse thermique.

-Pour le mois d'octobre, on remarque qu'une petite partie du segment se trouve dans la limite de la zone de confort, et l'autre partie dans la zone d'où la nécessité des apports internes.

-Pour le mois de novembre, une petite partie du segment se trouve dans la limite de la zone de confort, par contre une grande partie du segment se prolonge dans la zone de stratégie de solaire actif.

-Pour le mois de décembre, deux stratégies qui impliquent le confort qui sont : une stratégie de solaire actif avec des apports interne.

En résumé, on peut regrouper les mois avec ses stratégies de confort comme suit :

-Une stratégie de solaire actif pour le mois de janvier et de décembre.

-Une stratégie de solaire passif pour les mois de février, mars et novembre.

- L'encouragement des apports internes pour les mois de janvier, février, octobre, et décembre.
- Une grande masse thermique dans le mois de mai et de septembre.
- Une grande masse thermique avec ventilation nocturne dans les mois de juin, juillet et d'août.
- On peut dire que la zone de confort englobe les mois d'avril, et Octobre.

#### Interprétation :

Selon le diagramme de Givoni : Sur chaque partie du diagramme, on peut avoir la zone de confort pour des températures combinées avec l'humidité, où le confort est obtenu, soit par l'inertie uniquement (la grande masse thermique) ou par une ventilation nocturne associée à une forte inertie dans le cas d'une température dépassant les 35°C.

Dans les mois qui se caractérisent par des degrés de température forte avec un taux d'humidité relative basse à l'exemple du mois de juin, juillet et le mois d'août : une grande masse thermique avec ventilation nocturne est nécessaire pour atteindre un confort thermique optimal surtout avec de températures qui dépassent les 39°C. Ensuite, une grande masse thermique avec des matériaux lourds à forte inertie thermique, renforcée par le bois des palmiers pour les plans horizontaux, afin d'accumuler de la fraîcheur dans les parois durant la nuit et de la restituer le jour.

Pour les mois à faibles degrés de température qui peut atteindre les 5.1°C avec un taux d'humidité minimum de 35.1% à l'exemple du mois de janvier et décembre (6.3°C, 35.5%), les segments se trouvent dans la zone de sous-chauffe où le besoin de système de solaire actif et des apports internes dus à la bonne orientation, l'inertie des matériaux de construction locaux, minimiser les ponts thermiques, etc.

On remarque que dans les mois d'avril et de septembre que les segments se trouvent dans la zone de confort. Ceci est dû aux conditions climatiques équilibrées avec des températures (°C) moyennes entre 21°C et 25°C et de taux d'humidité modérée entre 22% et 56%. Cela ne nécessite pas de grandes stratégies de confort comme le solaire actif ou la ventilation nocturne.

Alors d'après la lecture du diagramme, 03 zones en découlent :

1. La zone de confort : qui correspond en grande partie aux mois d'avril, mai, septembre et octobre et à un degré moindre aux mois de juin, juillet, août ;
2. La zone de sous-chauffe : qui correspond aux mois de décembre, janvier, février et en partie aux mois de novembre et mars ;

3. La zone de surchauffe : qui correspond aux mois de juillet, août et en partie aux mois de juin et septembre.

IV.2.5. Quelles stratégies faut-il adopter pour atteindre un confort thermique dans ce cas ?

Pour atteindre un confort thermique dans les milieux désertiques chauds et secs à l'exemple du Ksar de Béni Isguen, une série de stratégies peut être dressée. L'enveloppe du bâtiment et sa structure doivent se présenter sous **une forme compacte** avec des **patios** et des **cours intérieurs** qui agissent comme régulateurs thermiques ; sachant bien que la forme compacte réduit au maximum l'exposition des murs avec les rayons solaires intenses extérieurs.

Les bâtiments doivent être conçus avec des **toits plats**, des **matériaux lourds** et de **très petites ouvertures** (dans les ksour du M'Zab, **les ouvertures ne dépassent pas 30 cm en largeur et 70 cm** en hauteur).

Les murs et les toits extérieurs épais amortissent les fluctuations de température et stabilisent les températures intérieures à un niveau proche de la température de surface externe moyenne. La ventilation devra être réduite au minimum pendant la journée pour ne pas introduire l'air extérieur chaud.

Une orientation nord-sud est alors favorable à une orientation est-ouest.

**Recommandations :**

D'après le diagramme psychrométrique pour le Ksar de Béni Isguen, quelques recommandations pour améliorer les conditions du confort été/hiver sont :

- ✓ **La zone de confort** qui recouvre les mois de mars, et juin (nuit), avril (jour) et octobre ne nécessite aucun système.
- ✓ Pour les mois de décembre, janvier et février, des apports internes sont nécessaires le jour, et le besoin d'**un système actif** durant la nuit ; d'où la nécessité d'introduire de l'énergie solaire du jour et la transformer en chaleur pour la restituer la nuit (exemple : chauffage central, etc.).
- ✓ **Un système passif** est recommandé pour les mois de novembre, décembre, janvier et février (jour) ; à titre d'exemple : l'utilisation des matériaux de construction locaux et lourds pour stocker l'énergie solaire pendant le jour et la restituer la nuit (le déphasage thermique).
- ✓ Durant la période de surchauffe (juillet et août), des stratégies de grande masse avec ventilation nocturne sont à privilégier pour rafraîchir l'intérieur des espaces à l'exemple des systèmes de tour à vent, patios, etc.

### Une lecture du climat du Ksar :

La distribution annuelle des températures est apparemment uniforme ; ou la saison d'été est marquée par des températures très élevées, avec une grande amplitude entre celles du jour et celles de nuit.

La période chaude commence au mois de mai et dure jusqu'au mois de septembre. La température la plus élevée est observée au mois de juillet avec une moyenne de 39.8°C avec une très basse humidité relative de 14.2%. Tandis que, pour la période hivernale la température moyenne la plus basse est remarquée dans le mois de janvier avec 11°C et une humidité relative de 75.9%.

Il a été remarqué, toutefois, une augmentation sensible des moyennes enregistrées ces dernières années, résultat du réchauffement climatique, qui est une réalité fortement ressentie en Algérie. Alors que, le Ksar de Béni Isguen possède un climat chaud et sec. Les meilleurs mois pour visiter le Ksar sont : avril, mai, septembre, octobre.

#### IV.2.6. Calcul de l'indice d'aridité de MARTONE :

D'après ED.MARTONNE, l'indice d'aridité est donné par la formule suivante :

$$I_a = P/T+10$$

D'où ;  $I_a$  : est l'indice d'aridité

- P : précipitations annuelles.
- T : température moyenne annuelle

La lecture de cet indice se fait comme suit :

- $I_m < 5$  : c'est climat très aride
- $5 < I_m < 10$  : climat aride
- $10 < I_m < 20$  : climat semi-aridité
- $20 < I < 30$  : climat semi-humide
- $30 < I_m < 55$  : climat humide

\*pour le Ksar de Béni Isguen on obtient :

$$I_m = 237,1 / (21.95+10) = 7.42$$

Donc : **le climat est aride**

Voir l'annexe 03 qui montre la carte mondiale avec la classification du climat.

#### IV.2.7. Les isothermes :

Les isothermes sont effectuées selon les données climatiques de températures (°C) de l'année 2018 de 12 mois à partir du site en ligne : Climat Win : La figure IV.20 montre les isothermes du Ksar de Béni Isguen.

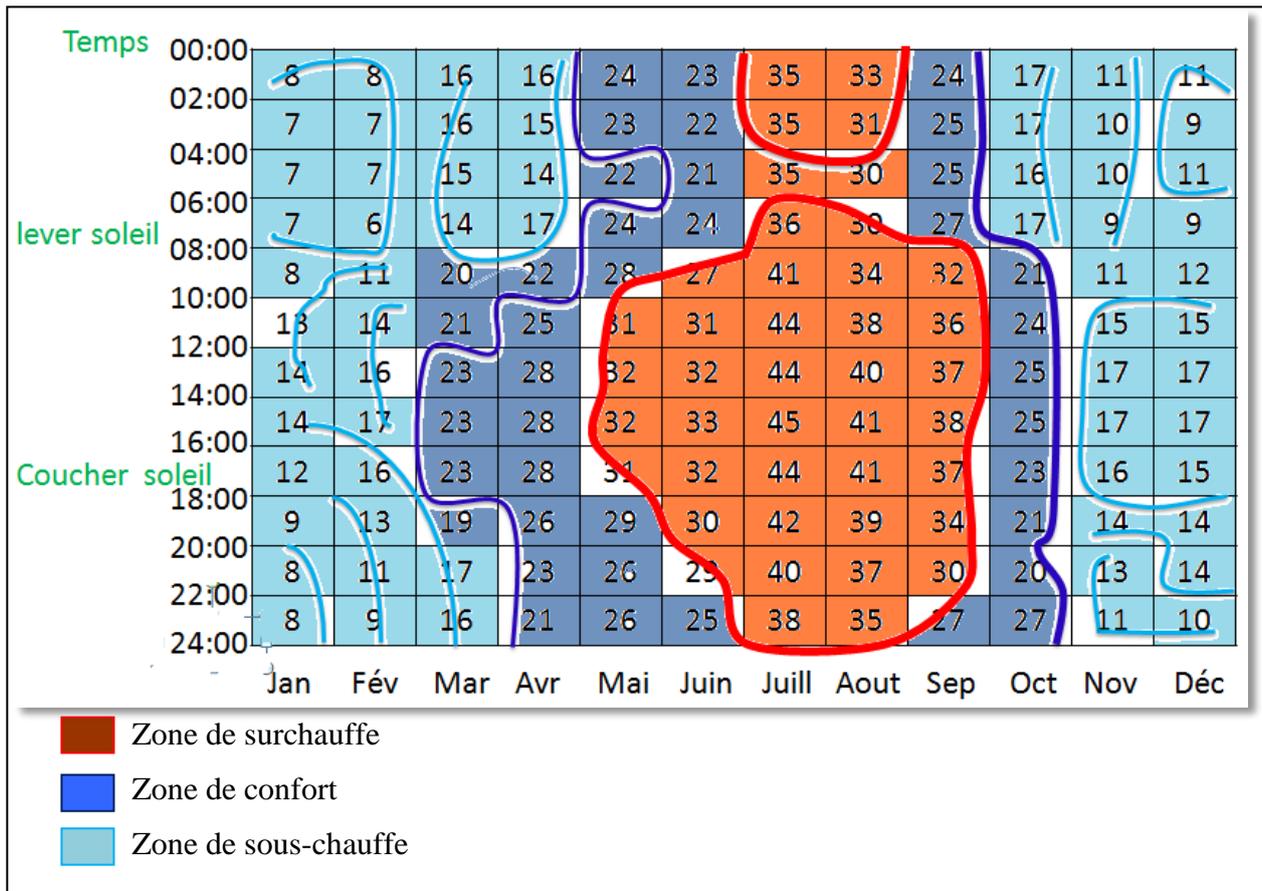


Figure IV.20 : Isothermes indiquant les différentes zones thermiques (Auteur, 2018)

### Synthèse :

D'après l'analyse du digramme de Givoni et la matrice des isothermes, on peut dire que le Ksar de Béni Isguen appartient à un climat chaud et sec.

La conception dans les climats chauds et secs ; le cas du Ksar de Béni Isguen vise à équilibrer les besoins thermiques de l'homme. Pour assurer le confort dans le climat chaud et sec, les bâtiments doivent être adaptés au confort d'été, et aux exigences d'hiver.

On peut obtenir un climat intérieur supportable et une ambiance thermique adéquate pendant la période la plus chaude en choisissant des matériaux locaux et des pratiques de conception adéquate, qui agiront sur la régulation des températures et d'humidité relative. La compréhension des variations climatiques dans l'espace et dans le temps est absolument indispensable pour une meilleure adaptation de l'homme à son environnement.

### IV.3. Présentation des cas d'étude :

Afin d'étudier les ambiances thermiques intérieures et la problématique des toitures des maisons du Ksar de Béni Isguen, nous avons pris des mesures dans quelques habitations ksouriennes situées à l'intérieur du Ksar de Béni Isguen.

Pour effectuer notre recherche, on a choisi quelques habitations ksouriennes qui se situent dans un tissu compact à l'intérieur du rempart de Béni Isguen (Figure IV.21, IV.22). Chacune de ces habitations possède une seule façade avec une seule entrée des maisons. La surface des façades est petite cela réduit l'exposition aux rayons solaires intenses. Les maisons du Ksar de Béni Isguen se caractérisent par l'existence d'une cave, RDC, étage et terrasse.

La première maison ; d'une surface de 80 m<sup>2</sup> ; est composée d'une cave (sous-sol), rez-de-chaussée, un étage et la terrasse. Alors ; comme la majorité des maisons mozabites ; cette habitation possède une cave (sous-sol) ou il existe un puits d'eau. Ensuite, le rez-de-chaussée contient les pièces de jours à savoir : le Tizefri, une chambre, la cuisine, WC et deux cages d'escalier : une cage d'escalier vers le sous-sol et l'autre pour aller vers l'étage. De plus, dans l'étage se trouve les chambres : parents, de filles et de garçons et la chambre des invités (Laâli) et le SDB. Pour la terrasse, Il y'a un coin réservé pour le rangement avec l'existence de Chebek pour laisser pénétrer la lumière (Figure IV.23). Le chebek est la seule ouverture dans l'habitation. Pour l'aération des espaces intérieurs, y'a quelques ouvertures sous forme de trous dans les murs comme : El manfass qui s'étale du sous-sol jusqu'à la terrasse.

La deuxième maison : Également, la deuxième maison mozabite typique se constitue d'une cave, rez-de-chaussée, un étage et la terrasse avec un chebek. Elle a une surface de 50 m<sup>2</sup> (Figure IV.24). Elle est proche du premier cas. Cela nous a facilité le travail de prise de mesures pendant la même journée et pendant des horaires simultanés.

La maison est de type : moyenne variante. Elle se constitue d'un rez-de-chaussée constitué de Tizefri, une chambre, une cuisine, SDB et la cage d'escalier. Pour l'étage, Il y'a les chambres (3chambres : des parents, de filles et de garçons).

La troisième maison : La maison se compose d'une cave, un rez-de-chaussée, l'étage et une terrasse. Au rez-de-chaussée, on trouve, Skiffa : l'entrée, Tizefri (salon), deux chambres, Tahdja et Douira, West Dar, escalier avec un coin pour la cuisine, et un coin pour la salle de bain. À l'étage se trouvent les chambres (3 chambres avec Laâli), Ikomar avec un espace ouvert par le Chebek servant à l'éclairage de la maison et un coin pour le stock de dattes. Pour atteindre notre objectif de caractériser le niveau de confort intérieur de cette maison mozabite, nous avons choisi la chambre 1 comme espace d'investigation (Figure IV.25).

La quatrième maison : Elle est composée de sous-sol, un rez-de chaussée, un étage et une terrasse. Dans la cave se trouve une chambre pour que les habitants l'occupent pendant la journée durant la période estivale. Le rez-de-chaussée est constitué de l'espace Tizefri, chambres (2 chambres, houdjarat et tahdjat) et une cuisine. À l'étage se trouve les chambres (4 chambres) avec Laâli qui est une chambre réservée aux invités (Figure IV.26).

## Chapitre IV : Présentation du contexte et les cas d'étude

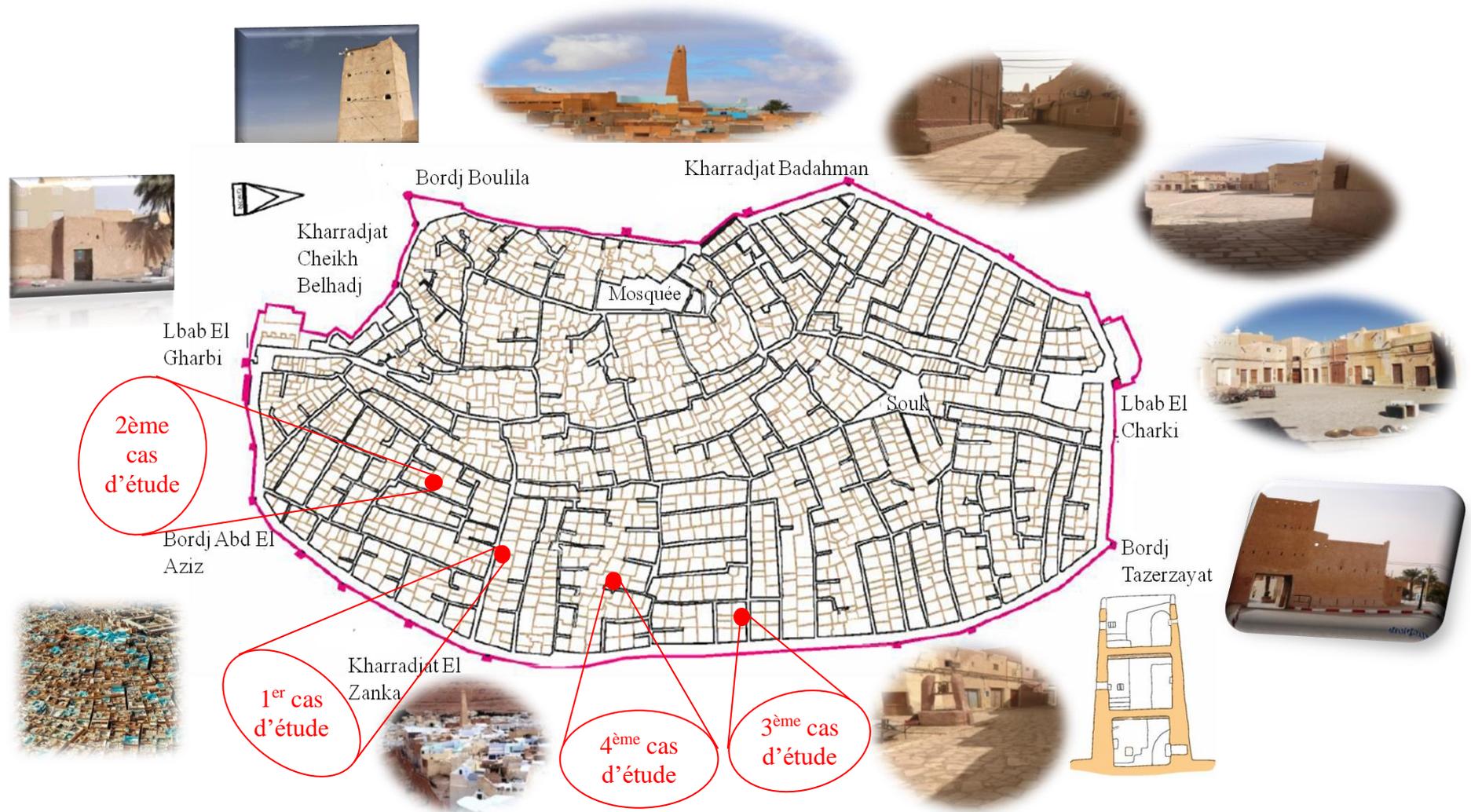


Figure IV.21 : Situation des cas d'étude dans le Ksar de Béni Isguen (OPVM, 2018)

## Chapitre IV : Présentation du contexte et les cas d'étude

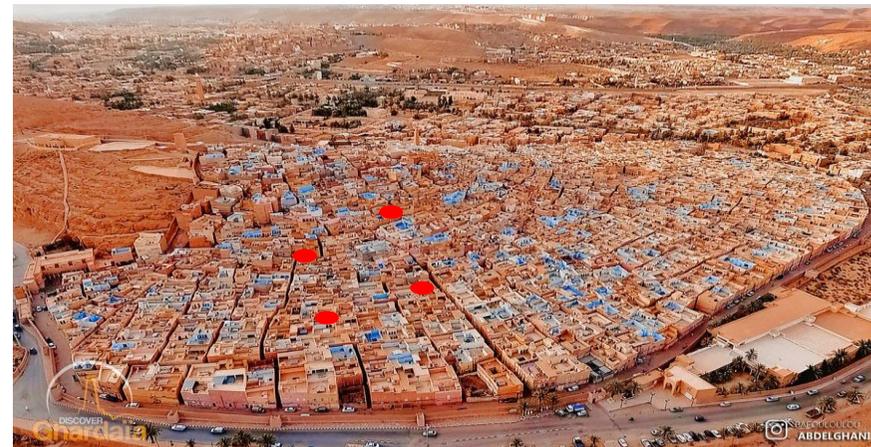


Figure IV.22 : Situation des cas d'études (OPVM, 2018)

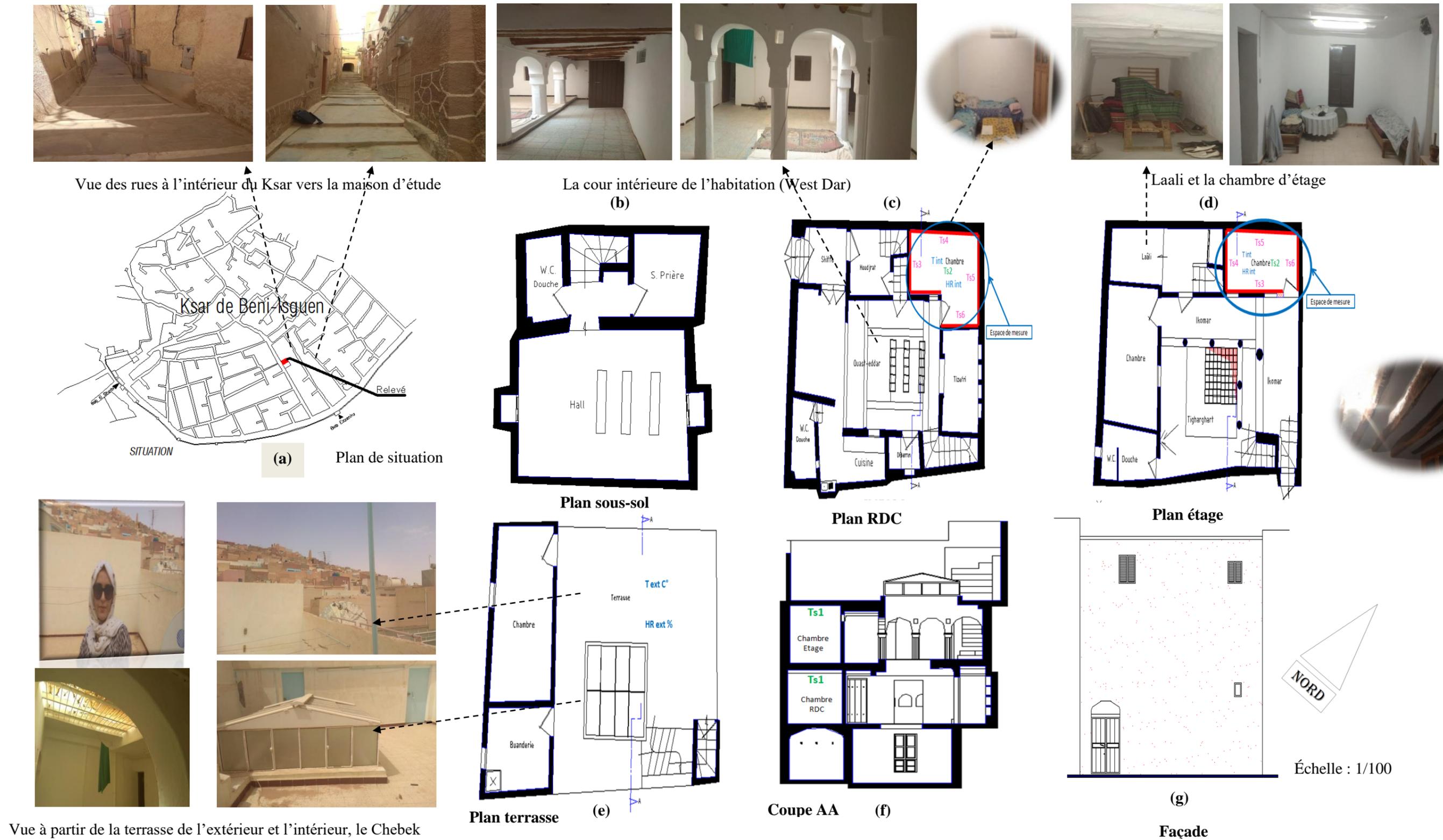


Figure IV.23 : Plan de maison 1 avec photos : (a) Situation (b) Plan sous-sol, (c) Plan RDC, (d) Plan Étage, (e) Plan-terrasse, (f) Coupe AA, (g) Façade (Auteur, 2018)



Figure IV.24 : Plan de maison 2 avec photos : (a) Situation (b) Plan sous-sol, (c) Plan RDC, (d) Plan Étage, (e) Plan terrasse, (f) Coupe AA, (g) Façade (Auteur, 2018)

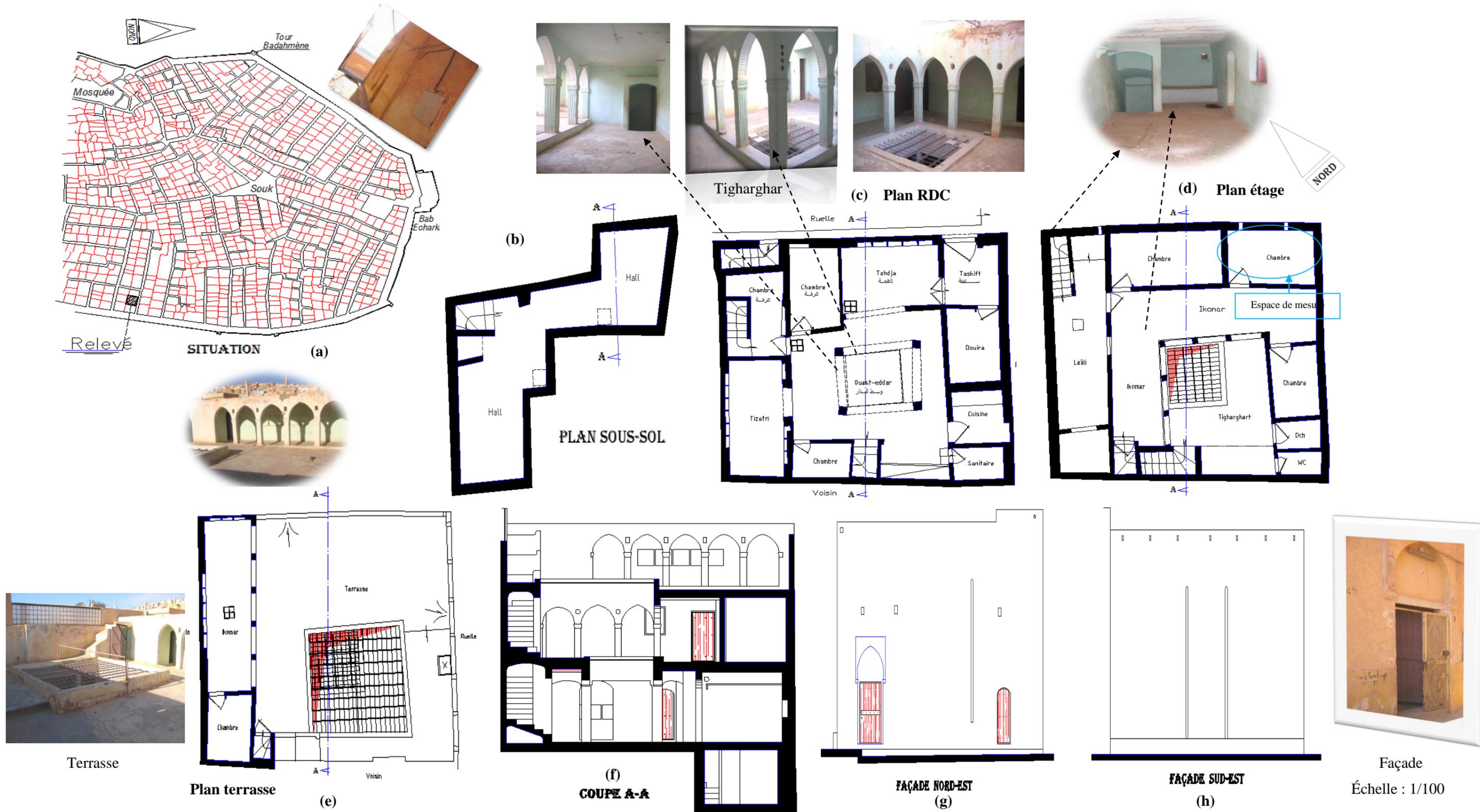


Figure IV.25 : Plan de maison 3 avec photos : (a)Situation (b) Plan sous-sol, (c) Plan RDC, (d) Plan Étage, (e) Plan terrasse, (f) Coupe AA, (g) Façade (OPVM, 2018)



Figure IV.26 : Plan de maison 4 avec photos : (a) Situation (b) Plan sous-sol, (c) Plan RDC, (d) Plan Étage, (e) Plan terrasse, (f) Coupe AA, (g) Façade (OPVM, 2018)

Le plafond des cas d'étude est constitué, soit par un lattis serré de nervures de palmes, soit par des pierres plates, soit par des voûtains formés de pierres liées au *Timchent* entre les solives (Donnadieu C. et al 1986). Cette base est recouverte d'une couche de terre pouvant atteindre jusqu'au 30 cm d'épaisseur, et au-dessus de cette couche une chape de mortier de chaux est appliquée (Figure IV.27). Quant aux Voûtains, leur construction relève de la même technique que celle des arcs, à savoir des pierres montées au *Timchent* sur coffrage perdu de nervures de palmes (Chabi, 2008) (Figure IV.28).

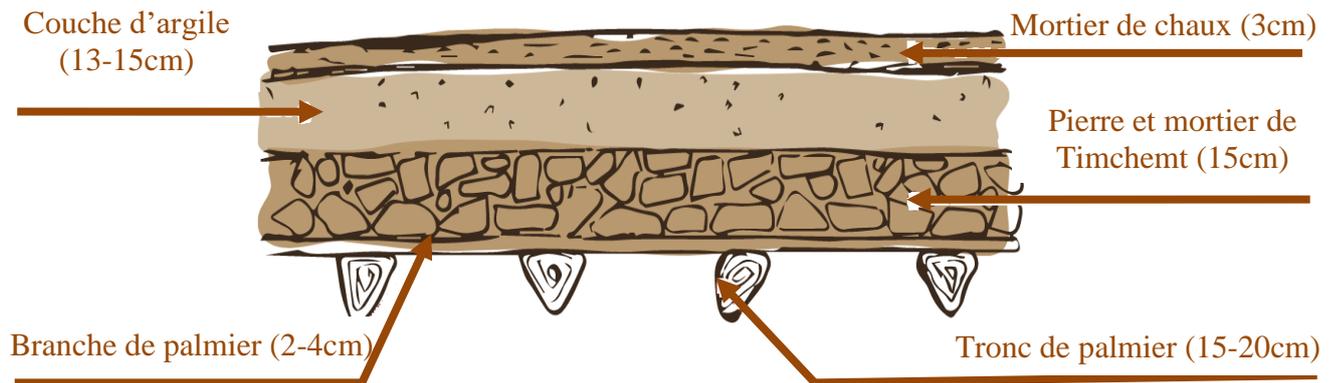


Figure IV.27 : Coupe sur un toit en tronc et branches de palmier dans les cas d'étude (OPVM, 2013)

Ce type de plancher est utilisé largement dans les habitations, vu la disponibilité de la matière première de construction comme les troncs et branches de palmier, l'argile, la chaux et le « Timchent » (Figure IV.29.a et b). Dans les chambres, les mozabites utilisent de petits voûtains en pierres et mortier de chaux placés sur les troncs de palmiers (Figure IV.30.a et b).

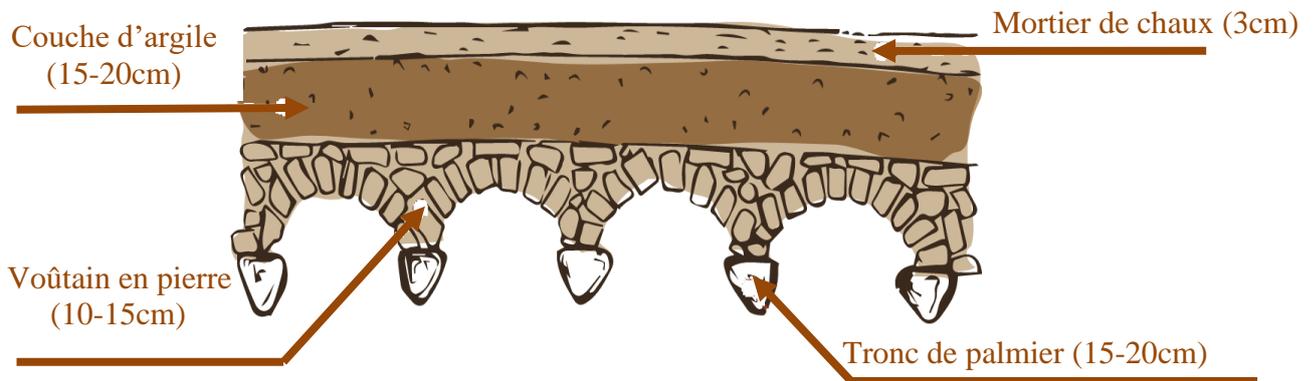


Figure IV.28: Coupe sur une toiture de troncs de palmiers et voûtains (OPVM, 2013)



Figure IV.29 : (a), (b) Photos de plancher de troncs de palmiers et voûtains dans la chambre de l'étage dans le premier cas d'étude (Auteur, 2018)



Figure IV.30 : (a), (b) Photo de plancher en tronc et branches de palmiers dans la chambre des parents et des enfants dans l'étage du deuxième cas d'étude (Auteur, 2018)

### Conclusion :

Les pratiques urbaines et architecturales identifiées dans le Ksar de Béni Isguen présentent des alternatives pour répondre aux exigences sociales, et culturelles des mozabites, mais aussi des obstacles du climat chaud et sec.

En effet, le mode de développement du ksar présente une démarche de savoir-faire face aux problèmes des conditions climatiques implémentés par le contexte. L'inspiration des pratiques des anciens Ksour est considérée comme une bonne voie pour mieux gérer et développer le territoire saharien sans prendre risque aux espaces sensibles et fragiles du désert. Également, les Ksour possèdent des stratégies passives pour mieux gérer l'espace en matière de construction, bénéficier de la ventilation naturelle, concevoir avec les moyens et les matériaux locaux en introduisant des solutions locales, pour mettre en évidence un espace de vie de qualité ; économiquement efficace, socialement équitable et écologiquement tolérable.

Ces pratiques peuvent être résumées dans les points suivants :

- Compacité du tissu urbain est la meilleure façon d'aménagement pour faire face aux conditions sévères d'un climat chaud et sec.

- La taille réduite des rues avec une forme sinueuse et une orientation adéquate vers les vents dominants peuvent améliorer les conditions du confort extérieur.

- Les oasis avec principe bâti/eau/palmeraies sont une solution très prépondérante dans ce type de climat aride. On trouve dans ces oasis des maisons d'été pour l'occupation estivale.

- les palmerais présentent une solution viable pour rafraichir l'air chaud. Elles contrôlent les vents dominants, les températures élevées, de plus elle donne de dattes source de nourriture

- La maison à patio est la bonne conception du bâti puisque, elle contrôle les rayons solaires intenses avec l'existance de l'espace de patio avec leur rôle climatique de ventilation et d'éclairage naturel.

- L'utilisation des matériaux locaux dans la construction est un moyen efficace pour atteindre un confort optimal intérieur.

Ce chapitre a exposé une présentation du contexte d'étude qui s'appuie sur une analyse climatique, un état des lieux et des observations réelles après une visite académique du Ksar comme témoignage de l'originalité de l'espace bâti et vécu à travers les modes de construction, les habitudes et les pensées des « Mozabites » traduites dans leur cadre de vie.

Cependant, puisque le Ksar de Béni Isguen est construit selon un plan compact avec des ruelles très étroites, on a remarqué, que les surfaces horizontales exprimées par les toits sont

les plus exposées aux rayons solaires intenses pendant la période d'été. Pour cela, on dit que la toiture est la surface problématique qui cause largement l'inconfort thermique.

Pendant la période d'été surtout durant le mois de juillet et d'août, on a remarqué que les habitants du Ksar utilisent la terrasse pour dormir la nuit. On peut dire qu'il y'a vraiment un problème d'inconfort thermique et de hauts degrés de température de l'air surtout dans les espaces de l'étage (Dormir dans la terrasse se voit comme une solution pour éviter la haute température et les situations de surchauffe à l'intérieur des chambres pendant la nuit).

**Chapitre V:**  
**Étude expérimentale**  
**par des mesure in situ**

### Introduction :

La toiture peut jouer un rôle important dans l'amélioration des performances thermiques du bâtiment. De plus, cela a un impact sur le confort thermique des utilisateurs. Il reçoit une quantité importante de rayonnement solaire pendant la journée et transmet une partie non négligeable de cette chaleur à l'intérieur de la maison sous l'effet du déphasage thermique. Pour cela, plusieurs types de toits ont été construits dans le Ksar ; à savoir : le toit-terrasse, le toit voûté, etc. Dans les maisons du Ksar de Béni Isguen, le toit-terrasse est le type le plus utilisé.

Alors, afin de quantifier et qualifier l'état de confort thermique à l'intérieur des habitations, un travail de mesure in situ a été développé durant l'été de 2018 et l'hiver de l'année 2019 sur des cas au Ksar de Béni Isguen. Le travail de mesure des paramètres thermiques de ces habitations permet d'avoir une idée de l'impact de la toiture sur le confort intérieur et de savoir si les toitures ont la capacité de réguler les ambiances thermiques intérieures. Nous avons donc pris des mesures pendant la période de surchauffe pendant le mois de juillet 2018 et sous-chauffe durant le mois de février 2019. Le travail présenté dans ce chapitre s'appuie donc sur des mesures réelles in situ à l'intérieur des habitations de Béni Isguen en période estivale et hivernale. L'objet est d'étudier le rôle des toitures dans la maîtrise des variations de température afin d'obtenir un confort thermique agréable.

Donc, dans cette partie, on va présenter un travail d'enquête qui correspond à des mesures réelles, dont l'objet est l'étude et l'évaluation des ambiances thermiques dans quelques cas d'études des habitations du Ksar de Béni Isguen et surtout l'influence des toitures sur le niveau de confort intérieur sous les effets microclimatiques extérieurs. Nous commençons par la présentation de protocole de mesure, les campagnes de mesure et les résultats obtenus avec l'analyse et l'interprétation.

*« It doesn't matter what you have, the matter is what you do with what you have »*

### V.1. Processus expérimental :

La méthode d'investigation prévue dans cette recherche correspond à un travail d'enquête qui correspond à des mesures in situ en période estivale et hivernale. Ce travail est élaboré après des observations réelles durant une visite académique en été 2018 dans le Ksar de Béni Isguen. Ensuite, un travail de simulation dynamique thermo-énergétique a été développé pour valider les résultats de mesure réelle et pour développer un nouveau modèle de toiture qui peut contribuer considérablement à améliorer les conditions de vie à l'intérieur des maisons ksouriennes. La figure V.1 illustre un schéma simplifié du processus expérimental.

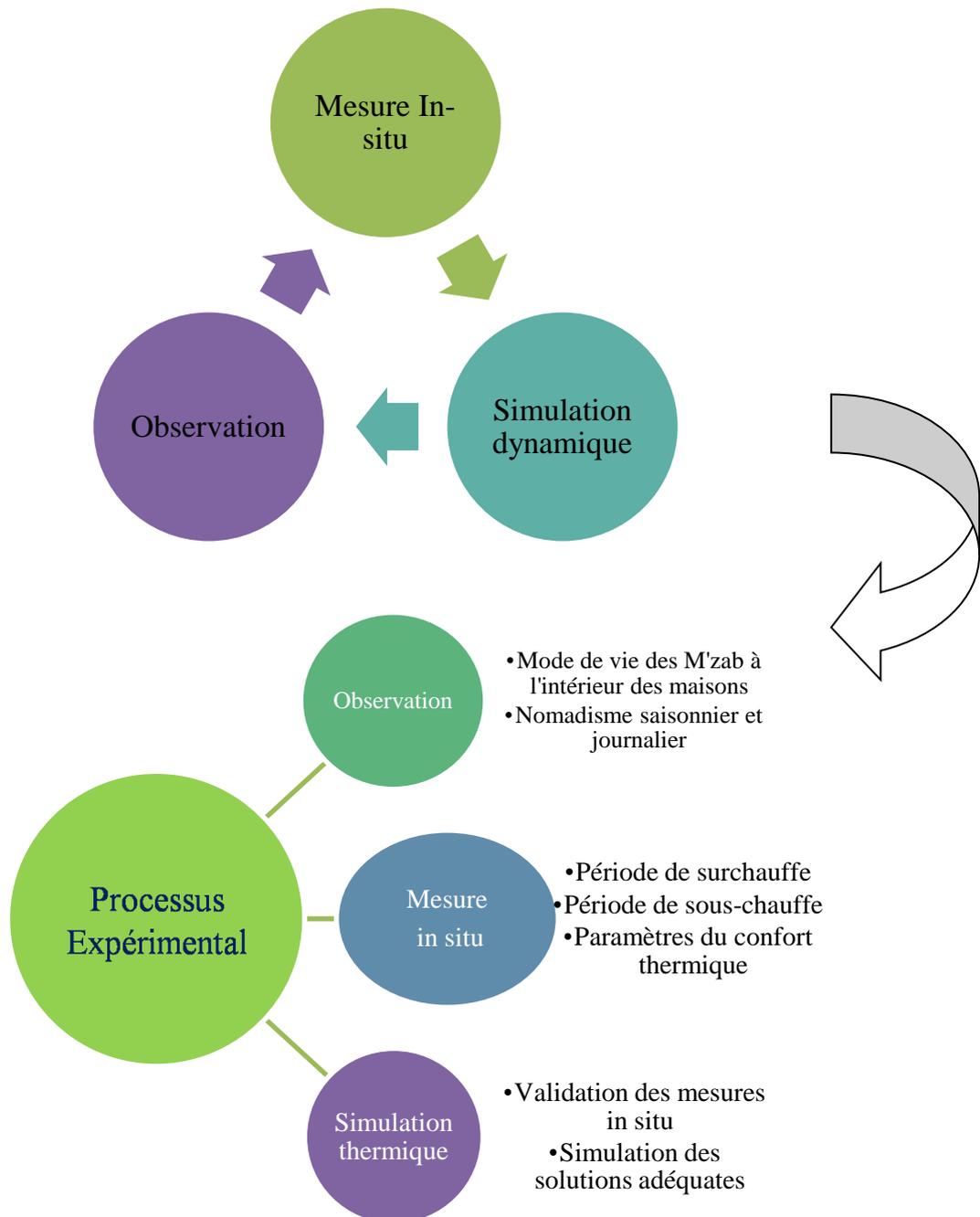


Figure V.1 : Processus expérimental développé dans l'étude (Auteur, 2018)

### V.2. Observation :

D'après l'analyse bibliographique, l'état de l'art et les remarques déduites lors d'une visite académique pendant quinze jours à l'intérieur du Ksar de Béni Isguen en juillet et août 2018, concernant le mode de vie des mozabites, les pratiques d'occupation et l'usage de différents espaces de la maison ksourienne, une série d'observations ont été conclues.

Il est connu que les peuples autochtones mozabites se migrent saisonnièrement et quotidiennement. Pendant la saison chaude, les mozabites se déplacent vers ses maisons d'été qui se situent dans la palmeraie. Ils se retournent vers ses maisons du Ksar pendant la saison d'automne. L'objet est d'assurer le confort thermique des habitants toute l'année. La migration pendant l'été indique que les maisons du Ksar sont inconfortables d'où la nécessité de quitter ces endroits. Néanmoins, les habitants des maisons ksouriennes ne sont pas tous possèdent des maisons d'été ; dont ils sont obligés de rester dans ses maisons du Ksar. L'analyse spatiale des espaces intérieurs des maisons avec la méthode d'occupation des usagers nous montre que les pièces sont utilisées de façon saisonnière. Ce nomadisme journalier sert à créer des pièces fraîches et des pièces ensoleillées.

En été, les mozabites occupent l'espace de sous-sol (la cave) pendant la journée à partir de 08 :00 a.m. du matin lorsque les espaces de l'étage commencent à réchauffer. Les femmes utilisent la cuisine dans le rez-de-chaussée pour les activités diurnes comme la cuisson et le ménage. Les espaces de rez-de-chaussée restent un peu supportables lorsqu'ils profitent de l'ombre et ils ne sont pas en contact direct avec la toiture. Aussi, le patio est couvert pendant la journée et il est entouré des murs ombragés par les galeries (Ikomar) qui offrent l'ombre aux pièces et assurent la lumière. Pendant les heures de pointe, à partir de midi et l'après-midi, les habitants occupent la cave lorsque la chaleur remarquée durant ces heures est très haute dont il est impossible de rester dans l'étage ou dans le rez-de-chaussée. Pendant la journée, les espaces de l'étage sont abandonnés. Il est remarqué que les habitants utilisent des systèmes de climatisation actifs (ventilateur et dans certaines maisons des climatiseurs) pendant l'été et durant les heures de surchauffe pour assurer un certain confort. Les femmes utilisent des ventilateurs dans les espaces de rez-de-chaussée pour accomplir les activités journalières.

Ce nomadisme saisonnier et journalier se considère comme une solution aux conditions sévères impliquées par le climat et l'environnement sec et aride, mais on peut dire qu'il y'a un problème d'inconfort thermique. En été, les chambres situées dans l'étage sont devenues des espaces abandonnés et utilisées seulement pour le séchage des dattes et un

## Chapitre V : Étude expérimentale par des mesures in situ

espace de rangement. À partir de 19 :00 p.m., les habitants commencent à ouvrir la porte extérieure et ouvrir le Chebek pour aérer les espaces. Pendant la nuit, les femmes nettoient la terrasse pour l'utiliser comme un espace de nuit. Les chambres de l'étage ne sont jamais utilisées comme un espace de nuit ou de repos pendant l'été dans les maisons ksouriennes. La terrasse est protégée des regards des voisins par de hauts murs, pour l'utiliser confortablement. L'utilisation de la terrasse dans la nuit sert à profiter du rayonnement infrarouge vers le ciel et les brises du vent. La figure V.2 illustre un schéma simplifié de mode d'occupation des espaces durant l'été.

Pendant la saison fraîche, les températures extérieures remarquées sont supportables dont les pièces de l'étage sont occupées par les habitants et les chambres jouent leurs rôles lorsque le patio sert à faire pénétrer les rayons solaires et la chaleur vers l'intérieur des pièces.

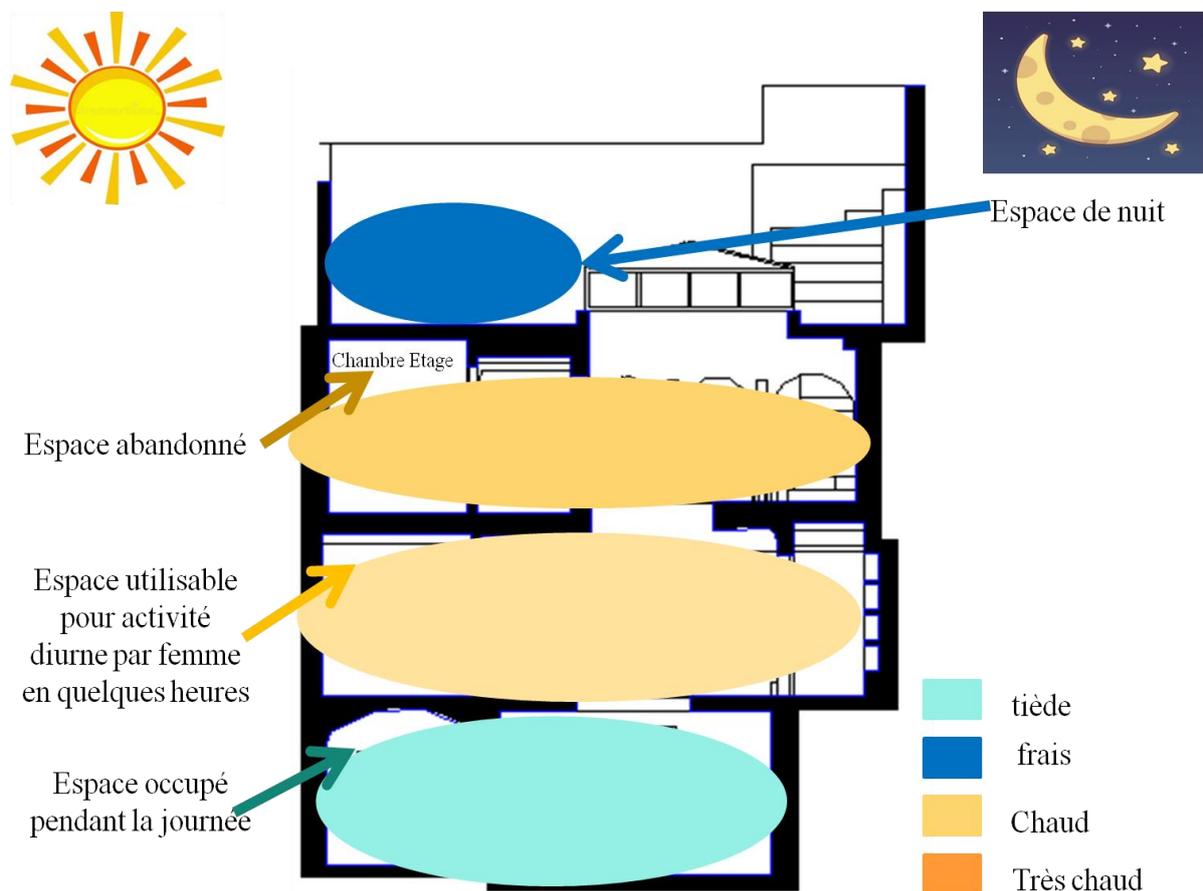


Figure V.2 : Mode d'occupation des espaces d'une maison mozabite pendant une journée d'été (Auteur, 2021)

### V.3. Description des campagnes de mesure : procédures et instrumentation

L'étude de l'impact des toitures sur la performance thermique des habitations nécessite un choix particulier des cas d'études sous des conditions bien précises. Pour cela, nous avons choisi des habitations qui se situent dans un tissu compact et qui sont presque isolées ; avec une seule façade exposée à l'extérieur et les autres façades sont mitoyennes ; pour réduire au maximum l'exposition des façades aux rayons solaires et par conséquent, la toiture reste la plus exposée aux conditions extérieures.

Les mesures des paramètres microclimatiques dans les habitations ksouriennes, nous aident à former une idée sur le niveau du confort thermique et comprendre l'effet des toitures sur la performance thermique et le confort intérieur et si les toitures ont la capacité de réguler les ambiances thermiques intérieurs. Les habitations mesurées se situent dans le Ksar de Béni Isguen et les mesures sont faites pendant la période de juillet et août 2018 pour la période de surchauffe et février 2019 pour la période de sous-chauffe.

### V.4. Problèmes rencontrés :

Parmi les problèmes rencontrés, nous citons principalement ceux liés à :

- L'instrumentation : le manque des instruments de mesures chez l'université de rattachement et pas de collaboration avec nous.
- Le problème de prendre des mesures simultanément et ça à cause du manque des appareils. Pour faire des mesures simultanées et en plusieurs cas d'étude, cela nécessite l'existence de plusieurs instruments de mesure.
- La complexité des mesures sous des conditions climatiques contraignantes (période d'été) et pour plusieurs heures de la journée.
- le problème de l'opposition de quelques habitants quant à la prise de mesure à l'intérieur de leurs maisons à plusieurs heures de la journée.

### V.5. Les paramètres climatiques mesurés :

Les paramètres climatiques mesurés à travers cette étude sont :

- La température de l'air ambiant( $T_a$ ) (moyenne, maximale et minimale), à 1.20 m du niveau du sol, (à l'intérieur des habitations)
- La température de l'air ( $T_a$ ) (moyenne, maximale et minimale), à l'extérieur, prise à l'ombre, à 1.20 m du niveau du sol.
- L'humidité relative (%) intérieure et extérieure, à 1.20 du niveau du sol
- La vitesse de l'air.

-la température moyenne radiante ( $T_{mr}$ ), des surfaces des murs, prises au milieu des surfaces des murs.

-Les températures de surface du sol ( $T_{sol}$ ) et de toiture ( $T_{toit}$ ), prises au milieu des surfaces.

### V.6. Les instruments de mesure :

Afin d'atteindre notre objectif de caractériser le confort thermique et de mesurer les paramètres du confort, on a utilisé des instruments adéquats à chaque paramètre thermique :

#### 1. Le thermo hygromètre : Portables étanches : Hi 9564 – Hi 9565<sup>1</sup> :

Hi 9564 et Hi 9565 sont des thermo hygromètres portables. Ils permettent de mesurer la température et de l'humidité relative. Ils possèdent une sonde RH/° qui comporte les capteurs, l'électronique nécessaire pour les mesures ainsi qu'une mémoire pour stocker les données d'étalonnage. Ceci permet une interchangeabilité des sondes sans réétalonnage de l'instrument. L'instrument est livré complet avec une pile 9V. L'instrument mesure des températures de -30 à 80°C et l'humidité relative peut être mesurée dans une gamme de 0 à 60°C (Figure V.3.a).

#### 2. Thermo hygrometer recorder: Reference: FI 84ED

Le FI 84ED est un enregistreur de température et d'humidité efficace et très simple d'utilisation. Il se présente sous la forme d'une clé USB permettant un contrôle précis des fluctuations de température et d'hygrométrie, afin de détecter les variations les plus infimes. Cet enregistreur de données compact enregistre jusqu'à 32 000 relevés de température et d'humidité relative. Branchez simplement le R6020 directement sur l'ordinateur pour configurer les paramètres (taux d'échantillonnage, alarmes min/max, durée, etc.) et débranchez-le pour commencer l'enregistrement. Une fois la collecte de données terminée, reconnectez-vous via USB pour télécharger afin d'inclure le logiciel pour l'analyse. Les caractéristiques :

- Mesure jusqu'à 16 000 relevés de température et d'humidité
- branchez simplement le port USB pour commencer le téléchargement - aucun câble requis
- Taux d'échantillonnage sélectionnable par l'utilisateur de 2 secondes à 24 heures
- Alarme visible (LED) si les valeurs max/min sont dépassées
- Compatible avec Windows 7, 8 et 10
- Support de montage mural et vis pour une surveillance à long terme (Figure V.3.b et c).

---

<sup>1</sup> Pris de la part du département d'architecture de l'université de Guelma

### 3. Le thermomètre à infrarouge<sup>2</sup> :

Le thermomètre à infrarouge ScanTemp 0-1353 est un thermomètre portable sans contact, facile à utiliser. L'intervalle de mesure est de -32 à 600°C (-25 à 1100°F). Il suffit d'appuyer sur la gâchette pour lire la température courante de surface en moins d'une seconde. Il sert à mesurer en toute sécurité les températures de surface d'objets les toucher brûlants, dangereux ou difficiles d'accès sans contact. Nous avons utilisé cet instrument pour mesurer les températures des surfaces des murs, des sols et des toitures (Figure V.3.d).

### 4. Le thermo anémomètre BA16 :

L'anémomètre BA16 est un thermo-anémomètre à hélice doté d'un col de cygne facilitant les mesures au niveau des systèmes de climatisation et de ventilation. Cet anémomètre permet de mesurer la vitesse du vent, le débit d'air, la température ambiante et le débit volumétrique. Le BA16 est immédiatement opérationnel. Les résultats s'affichent lisiblement sur l'écran rétro éclairé. Au besoin, il est possible de geler l'écran sur la valeur en cours d'affichage et d'afficher les valeurs min/max relevées. Le BA16 est doté d'un long col de cygne flexible de 40 centimètres qui facilite la mesure au niveau des installations de ventilation et d'aération difficiles d'accès (Figure V.3.e).

#### **Points forts et détails pratiques :**

- Appareil développé et fabriqué par Trotec
- Mesure rapide et simple de la vitesse du vent, du débit d'air, de la température et du débit volumétrique (m<sup>3</sup>/min => CFM)
- Excellent rapport qualité/prix
- Fonction de gel de l'écran et d'affichage du minimum et maximum relevés
- Grande sonde à col de cygne semi-flexible de 40 cm de long
- Écran rétro-éclairable
- Arrêt automatique après une courte période d'inactivité

---

<sup>2</sup> Instrument de mesure pris de la part du Labo cadre bâti et environnement(CBE) de l'université MSB, Jijel

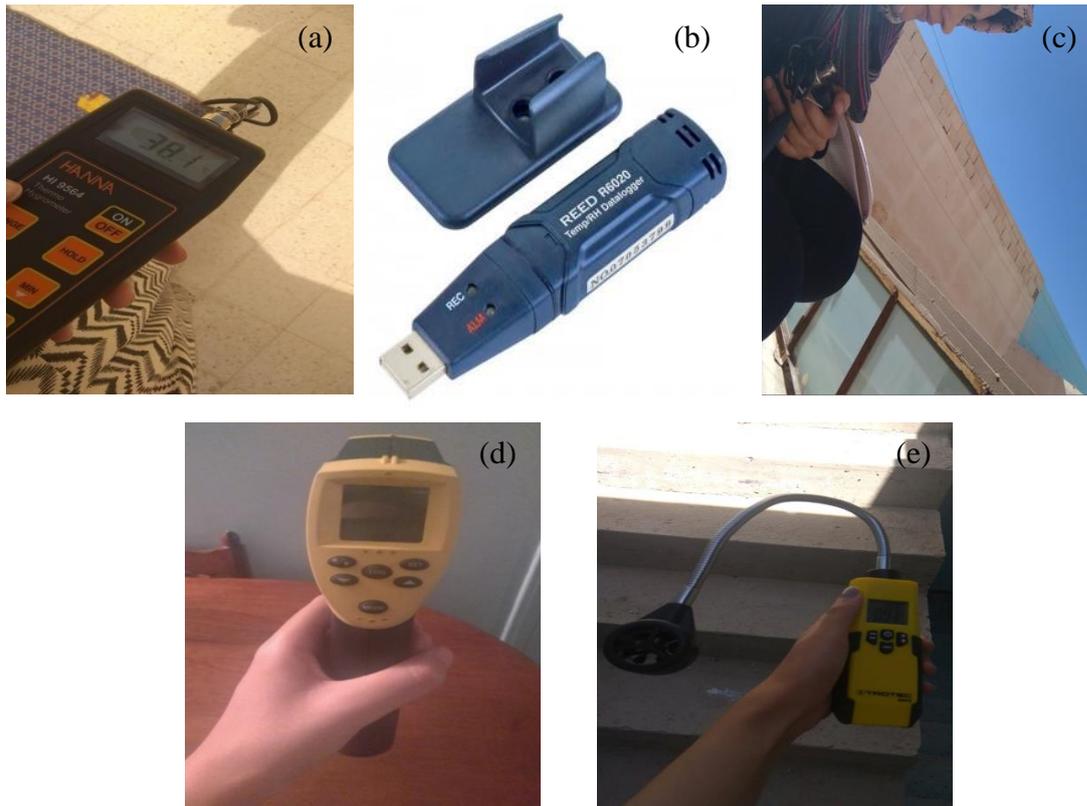


Figure V.3 : Instruments de mesure : (a) thermo hygromètre Hi 9564 – Hi 9565, (b) FI 84ED, (c) FI 84ED enregistreur de température et d'humidité relative fixé au sol de la terrasse, (d) thermomètre à infrarouge, (e) thermo anémomètre BA16

### V.7. Déroulement des campagnes de mesure en période estivale :

Le travail de mesure des paramètres climatiques a été élaboré pendant trois journées du mois de Juillet 2018 : le 28, 29 et 30 et pendant le mois d'août pour les différents cas. Les mesures ont été faites chaque 3 heures, de 6 :00 du Matin jusqu'au 00 :00 de la nuit, c'est-à-dire pendant 18 heures de la journée. Pour les valeurs de températures de l'air ambiant, d'humidité relative et de vitesse du vent, on a pris des valeurs à 1.20 m au-dessus du sol. Pour ces cas d'études, dans le mois de juillet et août, on a commencé par prendre les mesures dans le cas d'étude 1, puis rapidement on a déplacé vers le cas d'étude 2. Par exemple, à 9 :00 on a fait les mesures dans le cas 1, et à 9 :10 on a fait les mesures dans le cas d'étude 2 dont l'objectif est de prendre des paramètres microclimatiques dans deux habitations qui se situent dans le même tissu, et dans la même journée et presque dans les mêmes horaires. De la même façon, on a fait pour les autres horaires de mesure (à 12 :00, 15 :00, 18 :00, 21 :00 et à 00 :00).

Également, on a fait les mesures durant la période hivernale dans les cas d'étude du Ksar de la même façon.

### V.8. Protocole de la prise des mesures :

#### V.8.1. Choix des points des mesures :

Nous avons choisis la chambre des parents (chambre 1) comme espace d'investigation pour le premier cas. Également, on a choisis la chambre 01 pour prendre des mesures pour le deuxième, le troisième cas et le quatrième cas d'étude.

On a commencé par la prise des mesures de température de l'air ambiant (Text) et d'humidité relative (HR<sub>ext</sub>) à l'extérieur dans la terrasse pour chaque cas. On a utilisé le thermo-hygromètre comme instrument de mesure. La sonde de l'instrument a été mise dans l'ombre pour éviter les rayons solaires intenses. Ensuite, on a pris des mesures de température, de température moyenne radiante des surfaces, d'humidité relative et de vitesse de l'air dans la chambre de l'étage et dans la chambre dans le RDC au-dessous d'elle pour le premier cas. Pour le deuxième cas, on a pris des mesures des mêmes paramètres dans la chambre de l'étage (chambre 1) et dans la chambre de RDC (voir les plans dans le chapitre précédent).

Pour faciliter l'opération de mesure, on a fixé des points sur les différentes surfaces de la chambre en utilisant des petites tiqués collées sur ces surfaces (photo). On a pris la température de l'air ambiant (T<sub>int</sub>) et le pourcentage d'humidité relative (HR) dans la chambre de RDC, sur le point central de la chambre, à 1.20 m du niveau du sol. Ensuite, on a pris les températures des différentes surfaces : Température de toiture (Ts1), Température du sol (Ts2), Température des surfaces des murs : Ts3, Ts4, Ts5, Ts6. On a fait la même chose dans la chambre de l'étage qui se situe au-dessus la chambre du rez-de-chaussée (Figure IV.23 : plans dans le chapitre précédent) du premier cas. Également, on a fait la même chose dans le deuxième, le troisième et le quatrième cas d'étude.

NB :

Ts1 : Température de toit

Ts2 : Température du sol

Ts3, Ts4, Ts5 et Ts6 : Températures des surfaces des murs

#### ➤ Motivation du choix du 2ème cas d'étude :

On a choisi ce cas d'étude lorsqu'il présente la maison mozabite typique avec ces différents espaces. Ensuite, on a voulu d'effectuer des mesures dans 2 habitations ksouriennes dans la même journée et presque dans les mêmes horaires pour faire une comparaison entre les résultats des mesures simultanément.

### V.9. Déroulement des campagnes de mesure en période hivernale :

Le travail de mesure des paramètres climatiques a été développé durant quelques jours du mois de février 2019. Les mesures ont été réalisées pendant plusieurs heures de la journée. La prise des mesures avec l'enregistreur FI 84ED facilite le travail puisqu'il suffit de programmer l'appareil avec un micro-ordinateur (date, heure, durée, etc.). Ensuite, nous cliquons sur le bouton de l'instrument pour commencer à collecter les mesures. La méthode de prise de mesures de différents paramètres climatiques a été faite de même façon que la période estivale.

### V.10. Justification du choix de la méthode d'investigation à travers des mesures in situ :

Les mesures in situ ont été développées pendant quelques jours typiques du mois de juillet et le mois d'août 2018 ; qui représente les mois les plus chauds de l'année. L'objectif est de caractériser et de quantifier l'état du confort thermique intérieur, notamment en période de surchauffe estivale par des mesures de température ambiante de l'air, de température radiative moyenne, d'humidité relative et de vitesse de l'air. Ces mesures permettent d'identifier l'état de confort thermique d'une maison typique « mozabite » en climat chaud et aride.

Des mesures de terrain ont été faites à l'intérieur de certaines maisons mozabites dans le Ksar de Béni Isguen, et les résultats de quelques cas sont mentionnés dans ce travail car les résultats sont similaires. Nous avons passé plusieurs jours et nuits à l'intérieur des maisons pour quantifier et mesurer les températures de l'air ambiant, les températures surfaciques des parois, l'humidité relative et les vitesses du vent dans les conditions difficiles du désert algérien. Les jours d'été typiques sont choisis parce qu'ils représentent les conditions microclimatiques les plus dures qui causent un inconfort thermique.

Pour réaliser les mesures in situ, une analyse détaillée des données climatiques du Ksar de Béni Isguen a été faite pour sélectionner les journées typiques de surchauffe.

Le diagramme bioclimatique et les isothermes thermiques de Givoni ont été utilisés pour spécifier les jours typiques de surchauffe en saison chaude. Le diagramme bioclimatique de Givoni offre une méthode plus efficace dans la mesure où il évalue les exigences physiologiques de confort. Il détermine la zone de confort thermique pour chaque type de climat, la zone de surchauffe et la zone de sous-chauffe, ainsi que les grandes lignes directrices de conception pour le garantir. La zone de confort doit être spécifique à chaque région, et doit tenir compte des caractéristiques du climat local. La zone de confort est positionnée au centre du diagramme ; l'espace extérieur est subdivisé en sous-zones, zones de

sous-chauffé et de surchauffé. La figure IV.19 dans le chapitre précédent a montré le schéma psychrométrique du Ksar de Béni Isguen. L'analyse du diagramme bioclimatique de Givoni indique que la répartition annuelle des températures est apparemment uniforme ; soit la saison estivale est marquée par des températures très élevées, avec des valeurs d'humidité relative très faibles. La période chaude commence en mai et dure jusqu'en septembre. La température la plus élevée est observée en juillet avec une moyenne de 39,8°C avec une humidité relative très faible de 14,2%. Ainsi, le mois de juillet est donc le mois le plus chaud de l'année.

De plus, des isothermes thermiques sont réalisées en fonction des données de température climatique (°C) de l'année 2018 sur 12 mois. Les isothermes thermiques permettent de préciser clairement le mois, les jours types et les heures de surchauffe de l'année. La figure IV.20 dans le chapitre précédent montre les isothermes thermiques du cas d'étude pour toute l'année 2018. L'analyse des isothermes confirme également que les mois de surchauffe s'étalent de mai à septembre, le mois de juillet étant le mois le plus chaud de l'année et les températures ambiantes dépassant parfois 40°C.

### **Plus d'explications sur le déroulement des mesures in situ au cours des journées investiguées :**

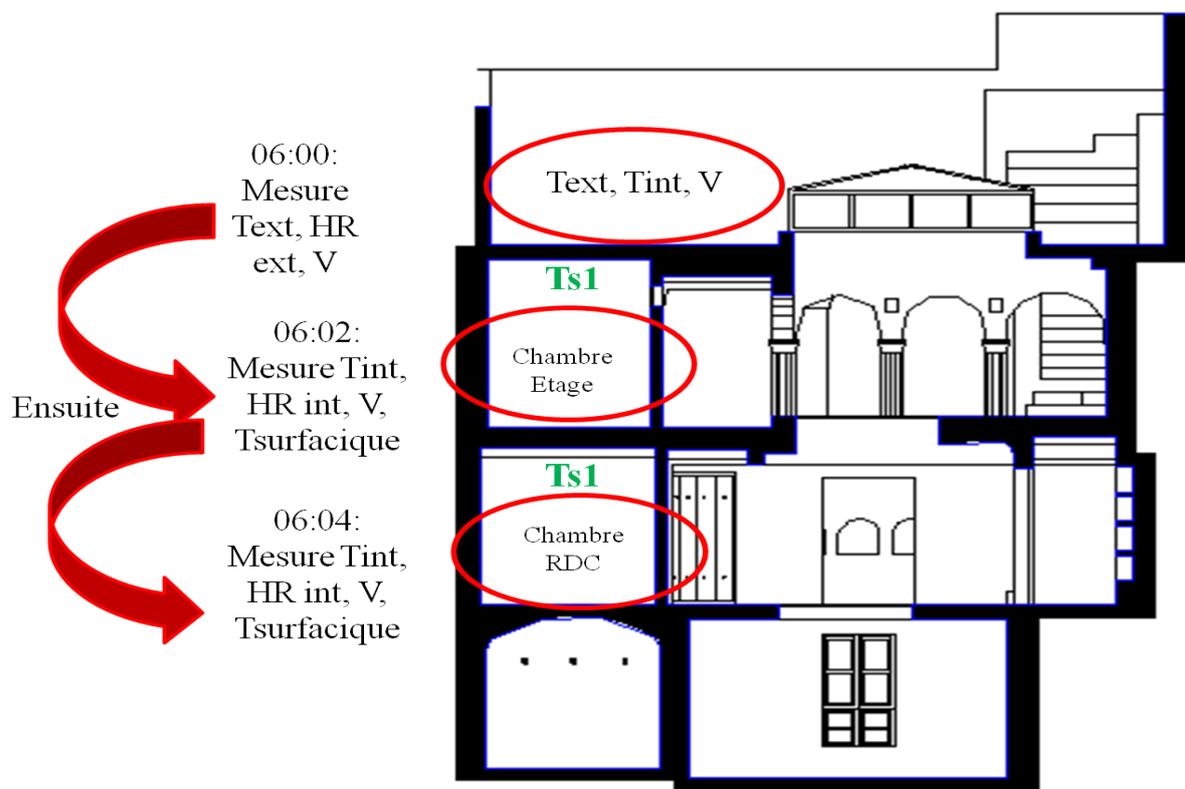
Nous avons commencé par la procédure consistant à prendre les valeurs de la température de l'air ambiant, de la température radiante moyenne et de l'humidité relative à partir de 6h00 (le matin). Nous avons commencé par relever la température ambiante extérieure et l'humidité relative extérieure par le thermo hygromètre de la terrasse. Ensuite, nous avons effectué des mesures de température et d'humidité relative de l'air ambiant à l'intérieur de la pièce du premier étage par le thermo-hygromètre, et nous avons relevé les températures radiatives moyennes des différentes surfaces des murs, du sol et du toit par le thermomètre infrarouge. Ensuite, les mêmes valeurs ont été prises de la même manière dans la salle du rez-de-chaussée.

Le thermo-hygromètre est placé à 1,20 m du niveau du sol. Puis, de la même manière, les mêmes valeurs ont été prises aux différentes heures de la journée qui se succèdent jusqu'à minuit. Cette procédure a été effectuée pendant 18 heures de la journée pendant trois jours consécutifs.

Le choix de ces heures de 6h00 du matin à 00h00 de minuit visent à quantifier et qualifier les variations de différents paramètres microclimatiques sur la quasi-totalité de la journée, afin de caractériser l'état de confort thermique intérieur. La figure V.4 illustre une coupe représentative de protocole de prise de mesure.

➤ **Les différentes heures choisies sont liées au régime journalier :**

- Avant le lever du soleil (6h00) : le premier gain de chaleur.
- Après le lever du soleil (9h00) : le début de l'accumulation ou du gain de chaleur.
- Puis, lorsque le soleil est perpendiculaire au milieu du ciel (à midi), puis l'après-midi pendant la période d'accumulation de chaleur (à 15h).
- Avant le coucher du soleil (18h00) : après une forte exposition au soleil et une accumulation maximale de chaleur
- Après le coucher du soleil (21h00) : début de dissipation de la chaleur accumulée.
- A minuit (00:00) : la dissipation de la chaleur emmagasinée dans les surfaces épaisses des murs et surtout de la toiture aux différentes heures de la journée.



Text : Température ambiante extérieure

Tint : Température ambiante intérieure

V : Vitesse de l'air en m/s

HRExt : Humidité relative extérieure

HRint : Humidité relative intérieure

Tsurf : Température des surfaces des parois

Figure V.4 : Coupe représentative du protocole de prise de mesure (Auteur, 2018)

## Chapitre V : Étude expérimentale par des mesures in situ

### V.11. Résultats de l'étude sur terrain :

#### V.11.1. Résultats de la saison chaude :

##### V.11.1.1. Résultats des mesures in situ du premier cas d'étude :

###### ➤ Résultats de variation de température :

Les résultats de mesures in situ obtenus lors des trois journées typiques d'été de 28, 29 et 30 juillet 2018 pour le premier cas d'étude sont présentés dans les tableaux suivants. Les tableaux V.1, V.2 et V.3 montrent respectivement les valeurs de température de l'air ambiant extérieur et intérieur. Pour les températures ambiantes extérieures ont été prises dans la terrasse.

Tableau V.1 : Valeurs de température de l'air ambiant extérieur pendant les trois jours d'enquête avec la température moyenne

Date/H/T°	06 :00	09 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
28/7/2018	35 °C	41.5	48	45.8	42.2	40.3	36.6
29/7/2018	34.4	49.9	41.8	45.2	41.3	37.2	35
30/7/2018	33.5	37.5	42	44	38.5	37	35.7
<b>T° moy</b>	<b>34.3°C</b>	<b>42.9</b>	<b>43.9</b>	<b>45</b>	<b>40.6</b>	<b>38.1</b>	<b>35.7</b>

Tableau V.2 : Valeurs de température de l'air ambiant intérieur au premier étage pendant les trois jours d'enquête avec la température moyenne

Date/H/T°	06 :00	09 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
28/7/2018	36.8	37.5	37.5	38.5	38.4	37.6	36.6
29/7/2018	36.5	38	39.5	39.6	37.8	37.6	36.6
30/7/2018	36	36.5	38	37.7	37.7	37.2	36.3
<b>T° m</b>	<b>36.43 °C</b>	<b>37.33</b>	<b>38.33</b>	<b>38.6</b>	<b>37.96</b>	<b>37.46</b>	<b>36.5</b>

Tableau V.3 : Valeurs de température de l'air ambiant intérieur au rez-de-chaussée pendant les trois jours d'enquête avec la température moyenne

Date/H/T°	06 :00	09 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
28/7/2018	35.4	34.9	34	35.2	35.4	35.4	34.9
29/7/2018	34.7	35	35.4	35.6	35.4	35.2	35.4
30/7/2018	34.1	34.5	34	36.5	35.1	35.2	34.9
<b>T° m</b>	<b>34.73</b>	<b>34.8</b>	<b>34.46</b>	<b>35.76</b>	<b>35.3</b>	<b>35.26</b>	<b>35.06</b>

## Chapitre V : Étude expérimentale par des mesures in situ

Ensuite, les résultats des températures radiantes moyennes des parois durant les trois journées typiques d'été d'investigation de juillet 2018 sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau V.4 : Valeurs moyennes de la température radiante au premier étage pendant les trois jours d'enquête

Heure/Surface	6 :00	9 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
Ts1toit	39.2	39.3	38.9	38.7	39.2	39.3	39.4
Ts2 sol	37.6	37.4	37.3	37.5	37.8	37.7	37.7
Ts3	38.4	38.2	38.1	38.3	38.5	38.6	38.5
Ts4	38.5	38.4	38.3	38.4	38.6	38.6	38.6
Ts5	38.3	38.2	38.2	38.2	38.4	38.4	38.4
Ts6	38.6	38.5	38.4	38.4	38.9	38.8	38.8

Après avoir calculé la température moyenne de l'air ambiant extérieur et intérieur et la température radiante moyenne, les résultats ont été traités par Excel. La figure V.5 illustre les résultats de la température moyenne de l'air ambiant. La figure V.6 illustre la température moyenne radiante des parois.

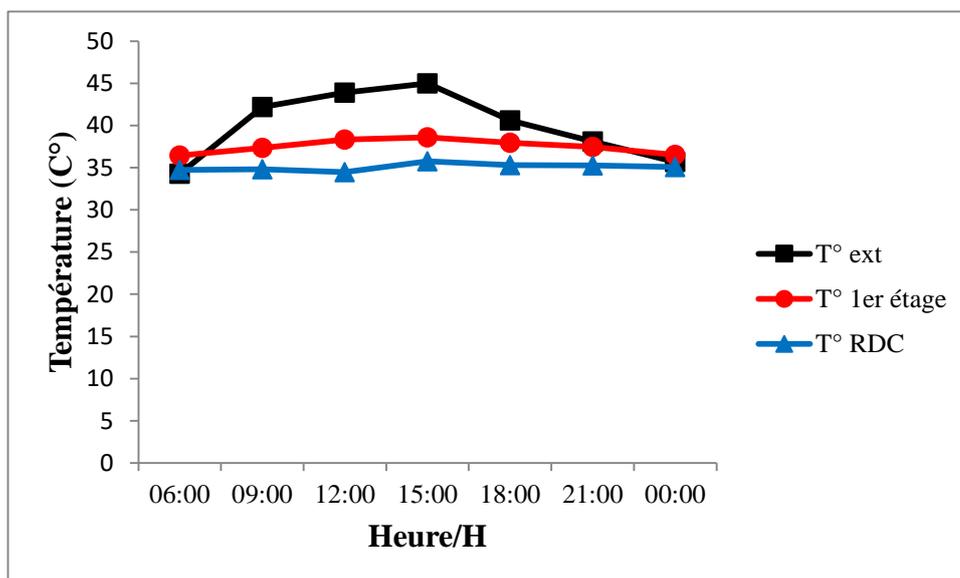


Figure V.5 : Graphe de variation de température moyenne de l'air ambiant pour trois jours d'été typiques de juillet 2018 du premier cas d'étude

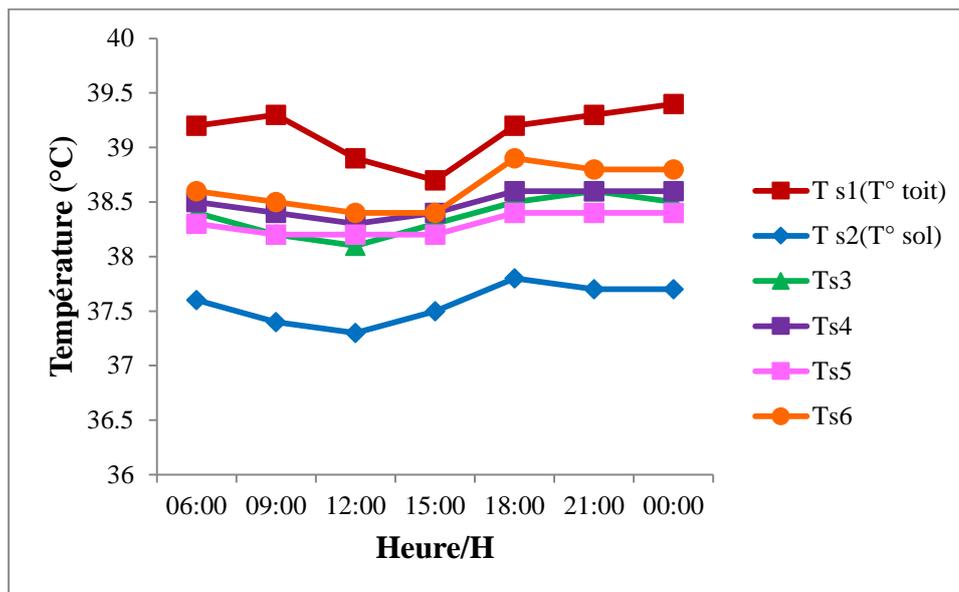


Figure V.6 : Graphe de variation de température moyenne radiante des parois pour trois journées typiques d'été de juillet 2018 du premier cas d'étude

➤ Variation de l'humidité relative :

Les résultats des mesures de l'humidité relative avec la moyenne des trois jours du premier cas d'étude sont présentés dans les tableaux suivants : V.5, V.6 et V.7.

Tableau V.5 : Valeurs d'humidité relative extérieure en % pendant les trois jours d'enquête avec la moyenne

Date/H/HR%	06 :00	09 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
28/7/2018	18.5%	16	7.1	6	10.5	10.8	22.5
29/7/2018	21.8	18.3	15.2	9.8	11.4	18.1	20
30/7/2018	18.6	12.3	10.2	8.5	14.3	15.3	16.2
<b>HR moy</b>	<b>19.63%</b>	<b>15.53</b>	<b>10.83</b>	<b>8.1</b>	<b>12.06</b>	<b>14.73</b>	<b>19.56</b>

Tableau V.6 : Valeurs d'humidité relative intérieure en % en étage pendant les trois jours d'enquête avec la moyenne

Date/H/HR%	06 :00	09 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
28/7/2018	19.4	21	26	16.5	20	17.5	25.8
29/7/2018	23.7	20	20.6	18.3	18.3	23.6	22.6
30/7/2018	20.1	17.2	17.9	16.6	18.9	19.1	21.8
<b>HR moy</b>	<b>21.06</b>	<b>19.4</b>	<b>21.5</b>	<b>17.13</b>	<b>19.06</b>	<b>20.06</b>	<b>23.4</b>

## Chapitre V : Étude expérimentale par des mesures in situ

Tableau V.7 : Valeurs d'humidité relative intérieure en % au rez-de-chaussée pendant les trois jours d'enquête avec la moyenne

Date/H/HR%	06 :00	09 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
28/7/2018	19.6	29.3	29	29.2	22	17.8	28
29/7/2018	25.5	29.4	23.1	23.5	20.9	26.3	24.9
30/7/2018	21.2	17.8	29	23.8	22.7	23.6	21.7
<b>HR moy</b>	<b>22.1</b>	<b>25.5</b>	<b>27.03</b>	<b>25.5</b>	<b>21.86</b>	<b>22.56</b>	<b>24.86</b>

Ensuite, les résultats de l'humidité relative ont été traités avec Excel. La figure V.7 montre le graphe de l'humidité relative moyenne du premier cas d'étude.

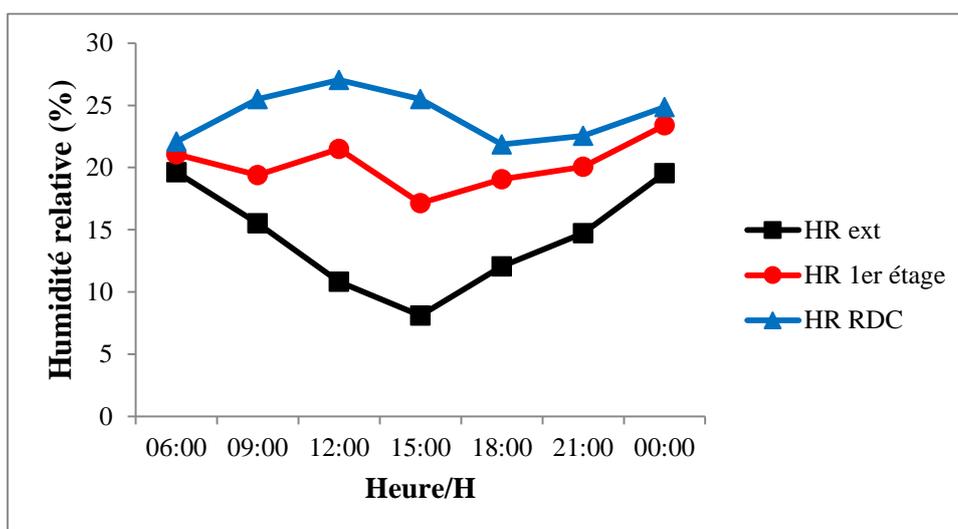


Figure V.7 : Humidité relative moyenne en % pour trois jours d'été typiques de juillet 2018

➤ Résultats de variation de vitesse de l'air :

Les résultats des mesures de variation de vitesse de l'air sont montrés dans la figure V.8, pendant les trois jours d'investigation du premier cas d'étude.

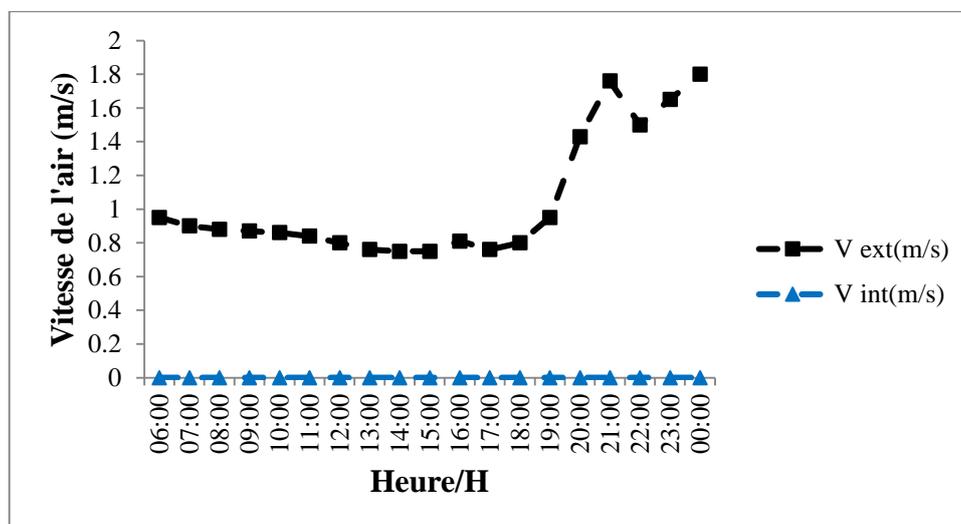


Figure V.8 : Graphe de variation de vitesse de l'air dans le premier cas d'étude

## Chapitre V : Étude expérimentale par des mesures in situ

---

La valeur de température moyenne de l'air à l'extérieure enregistrée à 6 :00 h du matin est de 34.3 °C avec une humidité relative de 19.63%. À l'intérieur du cas d'étude dans l'étage, la température de l'air ambiant égale à 36.43°C avec une humidité relative de 21 % et une valeur de 34.73°C dans le RDC et une humidité relative de 22.1%. On remarque que la température de l'air à l'intérieur dans l'étage dépasse la valeur de température extérieure avec quelques degrés. À 9 :00, à l'extérieure, la température de l'air égale à 42.9°C avec une humidité relative de 15.53%. À l'étage, elle égale à 37.33 °C et 19.4%. Au RDC, la température est de 34.8°C et l'humidité relative est de 25.5%. On remarque que la température intérieure est moins que celle à l'extérieure. Cela est dû à l'isolation thermique par la toiture épaisse construite de matériaux locaux de forte capacité thermique avec des parois en pierre. L'humidité relative intérieure est un peu élevée à celle de l'extérieure puisque la température de l'air ambiant extérieur est haute. À 12 :00, la température extérieure est de 43.9°C avec une humidité relative de 10%. La température ambiante à l'intérieur dans l'étage égale à 38°C et 21.5% d'humidité relative et au rez-de-chaussée (RDC), la température ambiante égale à 34.46°C et l'humidité relative égale 27%. Également, la température ambiante intérieure est moins que celle de l'extérieure. Cela est dû à l'isolation thermique intérieure de la maison, mais les valeurs de température reste toujours au-delà de la plage du Confort thermique, les valeurs de l'humidité relative sont très faible et au-delà de la plage du confort thermique. Sachant bien que selon la norme ASHRAE 55, la température optimale de l'air ambiant est comprise entre 25.1 °C et de 32.1°C pour la période de surchauffe. Ensuite à 15 :00, à l'extérieure, la température de l'air égale à 45°C et l'humidité relative égale à 8%. À l'intérieur, à l'étage, la température ambiante égale à 38.6°C et l'humidité relative égale à 17% ; tandis que dans le RDC, la température ambiante égale à 35°C et l'humidité relative égale 25%. On remarque que la valeur de la température à l'intérieur est moins à celle de l'extérieure. Cependant, elle reste toujours au-delà de la plage de confort optimal. À 18 :00, la température ambiante extérieure est de 40.6°C et l'humidité relative égale à 12%. À l'étage, la température ambiante égale à 38°C et l'humidité relative égale à 19%, et au RDC, la température ambiante égale à 35°C et l'humidité relative égale à 21%. Même à 18 :00, la température ambiante à l'intérieur reste un peu moins à celle de l'extérieure. Cela est toujours dû à la masse thermique de la toiture qui minimise de la température extérieure excessive. Mais, la valeur de température ambiante de l'air intérieur reste toujours au-delà de la valeur optimale. À 21 :00, la température ambiante extérieure est de 38.1°C et l'humidité relative est de 14.7%. À l'intérieur, la température à l'étage est de 37.46 °C et au RDC est de 35°C, et pour l'humidité relative est de 20% et de 22.5% à l'étage et au RDC respectivement. On

## Chapitre V : Étude expérimentale par des mesures in situ

remarque que la température ambiante intérieure s'augmente et s'approche à celle de l'extérieur. À minuit, la température de l'air ambiant extérieur a une valeur de 35.7°C avec une humidité relative de 19.56%. À l'étage, la température ambiante est de 36.7°C et l'humidité relative est de 23.4%, tandis que dans le RDC, la température est de 35.06°C et l'humidité relative est de 24.8%. Puisque le rayonnement solaire irradiant pendant le jour est en partie absorbé par la toiture, ce dernier sera ensuite transformé en chaleur et accumulé à l'intérieur de la toiture. Dans la nuit, la chaleur stockée dans la toiture durant le jour commence à se dégager. Pour cela, on remarque que la température ambiante intérieure s'augmente et elle est plus élevée que celle de l'extérieur.

Les valeurs de température moyenne radiante des différentes parois sont presque d'ordre de 37°C, 38°C et 39°C pour les surfaces du sol, les murs et la toiture respectivement durant les différentes heures. La valeur de température surfacique de la toiture est toujours plus élevée que les autres surfaces, puisque la toiture est la surface exposée aux rayons solaires intenses extérieurs. Les valeurs de température des surfaces des parois sont toujours au-delà de la valeur optimale du confort thermique qui est comprise entre 25 et 32.1°C selon la norme ASHRAE pour le confort durant la saison chaude des climats chauds et arides du Ksar de Béni Isguen. Enfin, les résultats des mesures de vitesse de l'air pendant les jours d'investigation indiquent que les valeurs à l'intérieur de la maison restent nulle (0m/s) et les vitesses du vent dans la terrasse se varient entre 0.8 à 2 m/s dans la nuit. Cela indique que l'écoulement des vents est très faible lorsque la source principale d'aération est le Chebek pendant la journée d'où ce dernier est fermé pendant les heures de surchauffe.

### 11.1.2. Résultats des mesures in situ du deuxième cas d'étude : (Chambre 01)

#### ➤ Résultats de variation de températures de la chambre 01 :

Les résultats de températures de l'air ambiant obtenus pour le deuxième cas d'étude, pour la chambre 01, sont montrés dans les tableaux V.8, V.9 et V.10, pendant les trois jours d'étude 31 juillet, 1 et 2 août.

Tableau V.8 : Valeurs de température de l'air ambiant extérieur pendant les trois jours d'enquête avec la température moyenne du 2ème cas d'étude

Date/H/T°	06 :00	09 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
31/7/2018	40 °C	40.9	42	44	41	39	38.4
01/8/2018	36.2	37.8	39	39.7	40.4	37.9	36.8
02/8/2018	36.7	37.5	37.6	40.6	37.9	37.4	37.3
<b>T° moy</b>	<b>37.63°C</b>	<b>38.73</b>	<b>39.53</b>	<b>41.43</b>	<b>39.76</b>	<b>38.1</b>	<b>37.5</b>

## Chapitre V : Étude expérimentale par des mesures in situ

Tableau V.9 : Valeurs de température de l'air ambiant intérieur au premier étage pendant les trois jours d'enquête avec la température moyenne

Date/H/T°	06 :00	09 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
31/7/2018	36.7	37.2	37.8	38.2	37.8	38.1	37.2
01/8/2018	36.3	37.1	38	37.9	38.5	37.4	37.2
02/8/2018	36.7	36.2	39.9	37.4	37.3	36.9	36.6
<b>T° moy</b>	<b>36.56 °C</b>	<b>36.83</b>	<b>38.56</b>	<b>37.83</b>	<b>37.86</b>	<b>37.46</b>	<b>37</b>

Tableau V.10 : Valeurs de température de l'air ambiant intérieur au rez-de-chaussée pendant les trois jours d'enquête avec la température moyenne

Date/H/T°	06 :00	09 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
31/7/2018	35.4	34.9	34	35.1	37.7	35.3	35
01/8/2018	35.3	35.3	35.5	36.1	35.5	35.3	35.2
02/8/2018	34.3	34.8	34.8	37	35.1	35.2	35
<b>T° moy</b>	<b>35</b>	<b>35</b>	<b>34.76</b>	<b>36.06</b>	<b>36.1</b>	<b>35.26</b>	<b>35.06</b>

Ensuite, les résultats de la température radiante moyenne des parois durant les trois journées typiques d'été d'investigation de juillet et août 2018 sont présentés dans le tableau 11 suivant :

Tableau V.11 : Valeurs moyennes de la température radiante au premier étage pendant les trois jours d'enquête

Heure/Surface	6 :00	9 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
Ts1 toit	39,5	39.5	39.2	39.6	39.6	39.8	39.8
Ts2 sol	37.5	37.4	37.5	37.6	37.8	37.8	37.9
Ts3	38.4	38.3	38.3	38.5	38.7	38.6	38.7
Ts4	38.3	38.5	38.6	38.7	38.8	38.7	38.9
Ts5	38.2	38.3	38.3	38.4	38.4	38.4	38.7
Ts6	38.4	38.6	38.4	38.6	39.1	39	39.1

Après avoir calculé la température moyenne de l'air ambiant extérieur et intérieur et la température radiante moyenne, les résultats ont été traités par Excel. La figure V.9 illustre les résultats de la température moyenne de l'air ambiant. La figure V.10 illustre la température moyenne radiante.

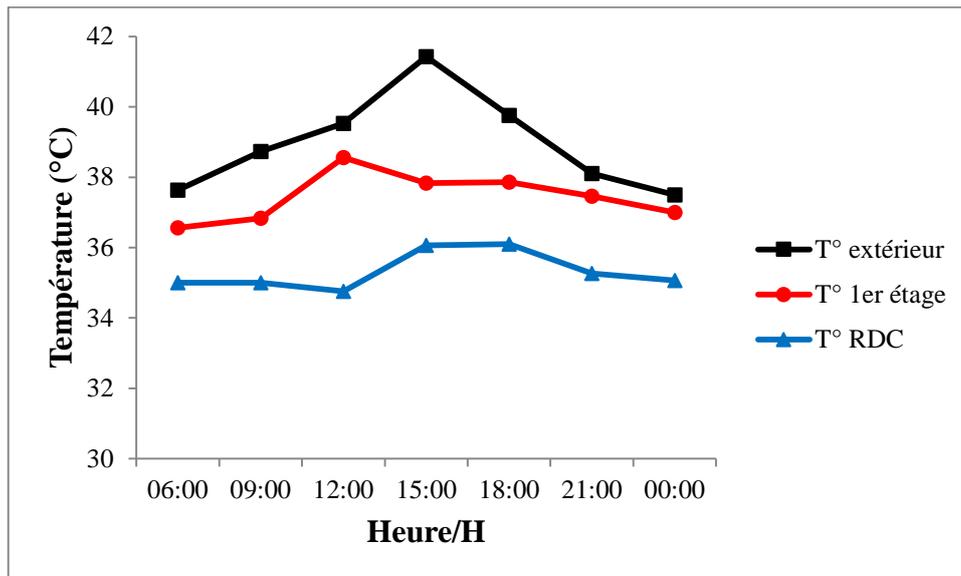


Figure V.9 : Graphe de variation de température moyenne de l'air ambiant des trois jours d'investigation du deuxième cas d'étude (Chambre 01)

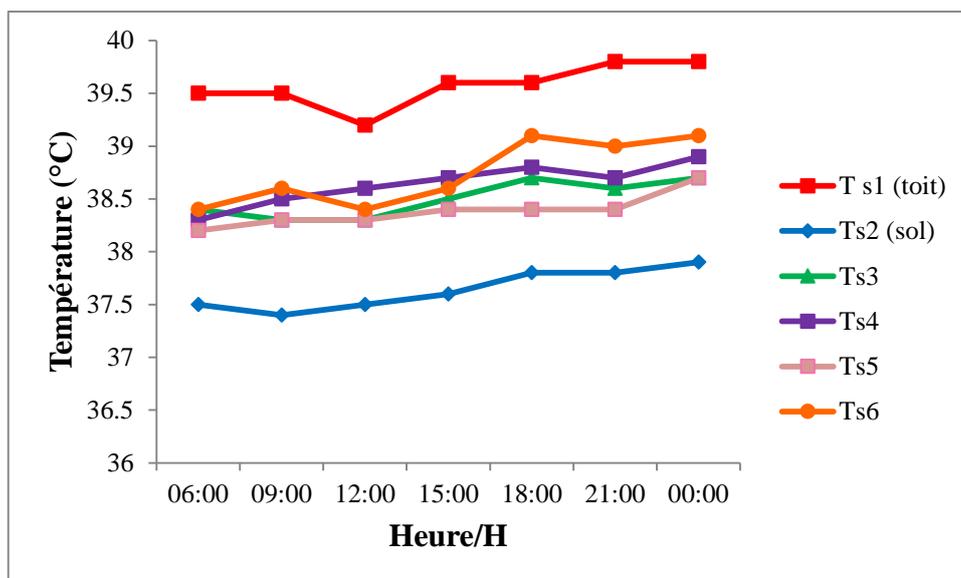


Figure V.10 : Graphe de variation de température moyenne radiante des parois des trois jours d'investigation du deuxième cas d'étude (Chambre 01)

➤ Variation de l'humidité relative de la chambre 01 :

Les résultats des mesures de l'humidité relative du deuxième cas d'étude pour la chambre 01 avec la moyenne des trois jours d'investigation sont présentés dans les tableaux suivants : V.12, V.13 et V.14.

## Chapitre V : Étude expérimentale par des mesures in situ

Tableau V.12 : Valeurs d'humidité relative extérieure en % pendant les trois jours d'enquête avec moyenne

Date/H/HR%	06 :00	09 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
31/7/2018	15.9%	16.2	15.5	6.9	14	17.5	21.5
01/8/2018	21.5	22.5	19.8	16.2	14.4	19.6	23.5
02/8/2018	19.2	15.3	16.8	16	19.1	18.4	22.7
<b>HR moy</b>	<b>18.86%</b>	<b>18</b>	<b>17.36</b>	<b>13.03</b>	<b>15.83</b>	<b>18.5</b>	<b>22.56</b>

Tableau V.13 : Valeurs d'humidité relative intérieure en % en étage pendant les trois jours d'enquête avec la moyenne

Date/H/HR%	06 :00	09 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
31/7/2018	20.1	25	26	16.5	20.5	17.5	25.1
01/8/2018	23.5	21.7	20.4	18.9	19.8	21.7	22.9
02/8/2018	19.5	16.1	15.1	17.9	19.9	21.2	20.8
<b>HR moy</b>	<b>21.03</b>	<b>20.93</b>	<b>20.5</b>	<b>17.76</b>	<b>20.06</b>	<b>20.13</b>	<b>22.93</b>

Tableau V.14 : Valeurs d'humidité relative intérieure en % au rez-de-chaussée pendant les trois jours d'enquête avec la moyenne

Date/H/HR%	06 :00	09 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
31/7/2018	19.6	16.2	29	30.1	22	19.9	29.5
01/8/2018	25	33	27	18.8	23.3	26	25.9
02/8/2018	21.3	17.8	17.8	20.9	24.6	21.5	20.5
<b>HR moy</b>	<b>21.96</b>	<b>22.33</b>	<b>24.6</b>	<b>23.26</b>	<b>23.3</b>	<b>22.46</b>	<b>25.3</b>

Le traitement des résultats des mesures de l'humidité relative moyenne du deuxième cas d'étude pour la chambre 01 avec Excel est montré dans la figure V.11.

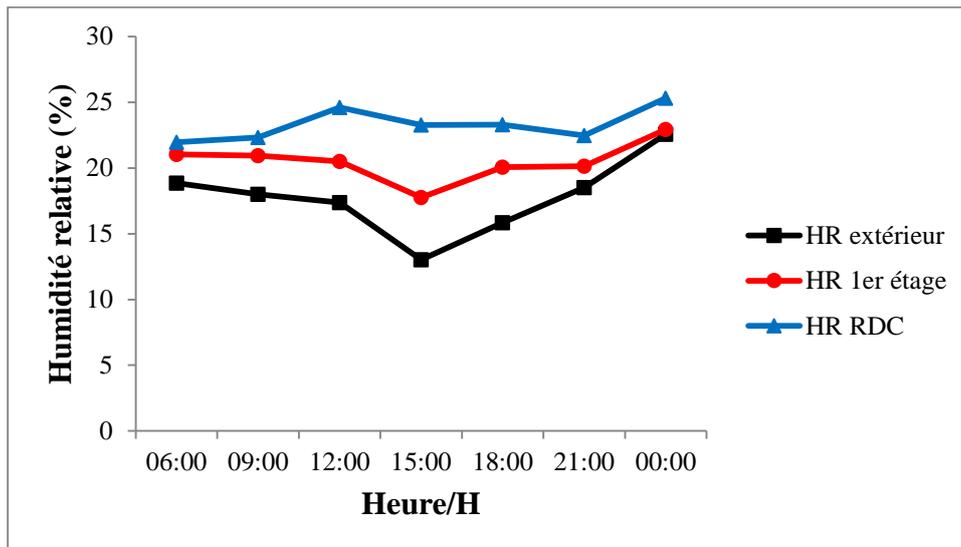


Figure V.11 : Graphe d'humidité relative moyenne en % des trois jours d'investigation du deuxième cas d'étude (Chambre 01)

➤ Résultats de variation de vitesse de l'air de la chambre 01 :

La figure V.12 montre les résultats des mesures de vitesse de l'air des trois jours d'investigation du deuxième cas d'étude (Chambre 01).

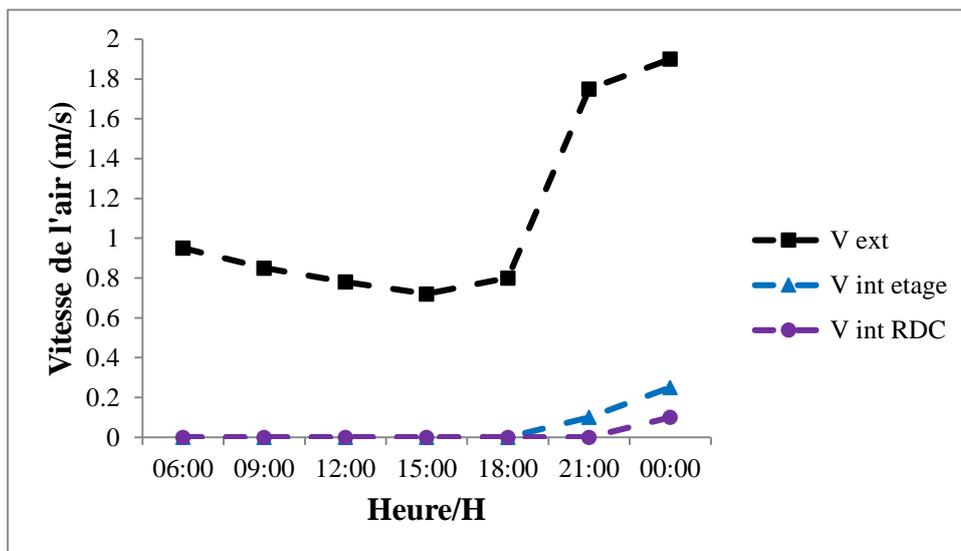


Figure V.12 : Graphe de variation de vitesse de l'air des trois jours d'investigation du deuxième cas d'étude (Chambre 01)

Résultats des mesures du deuxième cas d'étude : (Chambre 02)

➤ Résultats de variation de température de la chambre 02 :

Les résultats des mesures in situ obtenus lors des trois journées typiques d'été de 31 juillet, 01 et 02 août 2018 pour le deuxième cas d'étude sont présentés dans les tableaux suivants. Les tableaux V.15, V.16 et V.17 montrent respectivement les valeurs de température de l'air ambiant extérieur et intérieur.

## Chapitre V : Étude expérimentale par des mesures in situ

Tableau V.15 : Valeurs de température de l'air ambiant extérieur pendant les trois jours d'enquête avec la température moyenne de chambre 02

Date/H/T°	06 :00	09 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
31/7/2018	36.6 °C	41.3	39	46.2	42.3	40.2	36.2
01/8/2018	35	38.7	42.8	45.3	41.7	37.2	35.1
02/8/2018	34.3	38.9	43.2	43	38.7	36.8	36.6
<b>T° moy</b>	<b>35.3°C</b>	<b>39.63</b>	<b>41.66</b>	<b>44.83</b>	<b>40.9</b>	<b>38.06</b>	<b>35.96</b>

Tableau V.16 : Valeurs de température de l'air ambiant intérieur au premier étage pendant les trois jours d'enquête avec la température moyenne

Date/H/T°	06 :00	09 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
31/7/2018	34.8	37.1	37	38.2	37.5	37.1	37
01/8/2018	36.3	36.7	37.2	37.4	37.6	37.6	37.1
02/8/2018	36.7	36.6	37.2	37.3	37.3	37	36.6
<b>T° moy</b>	<b>35.93 °C</b>	<b>36.8</b>	<b>37.13</b>	<b>37.63</b>	<b>37.46</b>	<b>37.23</b>	<b>36.9</b>

Tableau V.17 : Valeurs de température de l'air ambiant intérieur au rez-de-chaussée pendant les trois jours d'enquête avec la température moyenne

Date/H/T°	06 :00	09 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
31/7/2018	34.4	35	34	35.4	35.5	35.5	35.2
01/8/2018	34.3	36.5	36.1	33.4	35.5	35.4	35.5
02/8/2018	33.7	33.9	33.9	36	34.8	35.5	34.5
<b>T° moy</b>	<b>34.13</b>	<b>35.13</b>	<b>34.66</b>	<b>34.93</b>	<b>35.26</b>	<b>35.46</b>	<b>35.06</b>

Ensuite, les résultats de la température radiante moyenne des parois durant les trois journées typiques d'été d'investigation de juillet et août 2018 sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau V.18 : Valeurs moyennes de la température radiante au premier étage pendant les trois jours d'enquête

Heure/Surface	6 :00	9 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
Ts1 (toit)	39.1	39.4	38.9	38.8	39.2	39.3	39.4
Ts2 (sol)	37.6	37.4	37.3	37.5	37.9	37.8	37.4
Ts3	38.3	38.2	37.9	38.2	38.5	38.7	38.2
Ts4	38.6	38.4	38.1	38.3	38.8	38.7	38.4

## Chapitre V : Étude expérimentale par des mesures in situ

Ts5	38.3	38.1	38.1	38.2	38.4	38.5	38.2
Ts6	38.8	38.6	38.4	38.2	38.9	38.8	38.6

Après avoir calculé la température moyenne de l'air ambiant extérieur et intérieur et la température radiante moyenne, les résultats ont été traités par Excel. La figure V.13 illustre les résultats de la température moyenne de l'air ambiant. La figure V.14 illustre la température moyenne radiante des parois.

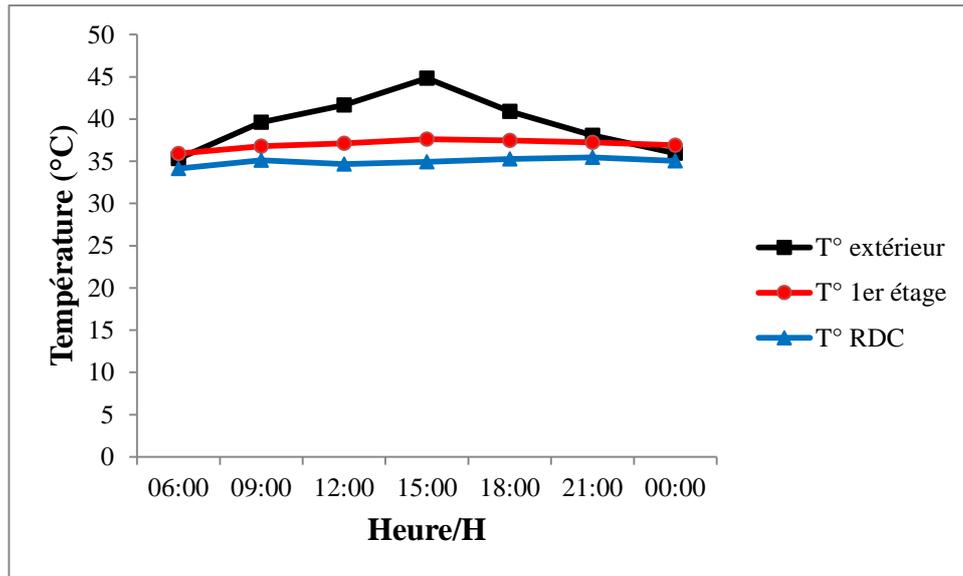


Figure V.13 : Graphe de variation de température moyenne de l'air ambiant des trois jours d'investigation du deuxième cas d'étude (Chambre 02)

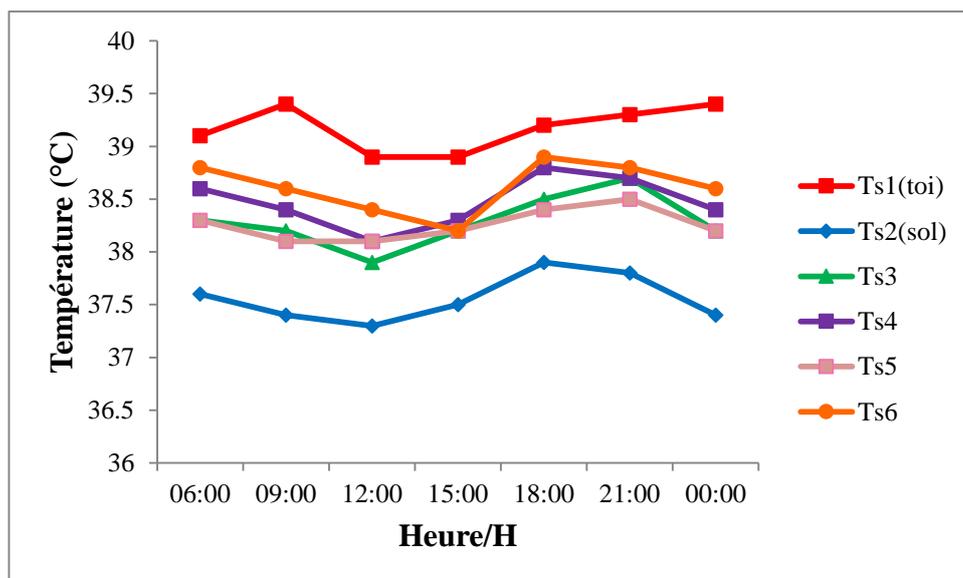


Figure V.14 : Graphe de variation de température moyenne radiante des parois des trois jours d'investigation du deuxième cas d'étude (Chambre 02)

## Chapitre V : Étude expérimentale par des mesures in situ

### ➤ Variation de l'humidité relative de la chambre 02 :

Les résultats de la mesure de l'humidité relative avec la moyenne des trois jours sont présentés dans les tableaux suivants : V.19, V.20 et V.21.

Tableau V.19 : Valeurs d'humidité relative extérieure en % pendant les trois jours d'enquête avec moyenne

Date/H/HR%	06 :00	09 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
31/7/2018	18.2%	15.2	25	6	9.9	9.8	22.5
01/8/2018	21.8	21	14.5	9	10.5	17.8	20.6
02/8/2018	18.6	11.9	8.1	8.8	13.7	16.2	19.1
<b>HR moy</b>	<b>19.53%</b>	<b>16.03</b>	<b>15.86</b>	<b>7.93</b>	<b>11.36</b>	<b>14.6</b>	<b>20.73</b>

Tableau V.20 : Valeurs d'humidité relative intérieure en % en étage pendant les trois jours d'enquête avec la moyenne

Date/H/HR%	06 :00	09 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
28/7/2018	21.4	20.5	26.6	14.1	21.7	17.5	25
29/7/2018	23.5	21.7	24.5	19.8	20	23	22.4
30/7/2018	20.1	15.6	21.1	18.6	21.7	19.7	21.6
<b>HR moy</b>	<b>21.66</b>	<b>19.26</b>	<b>24.06</b>	<b>17.5</b>	<b>21.13</b>	<b>20.06</b>	<b>23</b>

Tableau V.21 : Valeurs d'humidité relative intérieure en % au rez-de-chaussée pendant les trois jours d'enquête avec la moyenne

Date/H/HR%	06 :00	09 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
28/7/2018	19.6	28	29	20.5	29.1	16.6	28
29/7/2018	28.1	28	23.8	20.5	20.8	24.6	24.5
30/7/2018	21.5	17.3	17.3	20.8	22.2	19.6	21.7
<b>HR moy</b>	<b>23.06</b>	<b>24.43</b>	<b>23.36</b>	<b>20.6</b>	<b>24.03</b>	<b>20.26</b>	<b>24.73</b>

La figure V.15 montre le graphe de variation de l'humidité relative moyenne de la chambre 02 du deuxième cas d'étude.

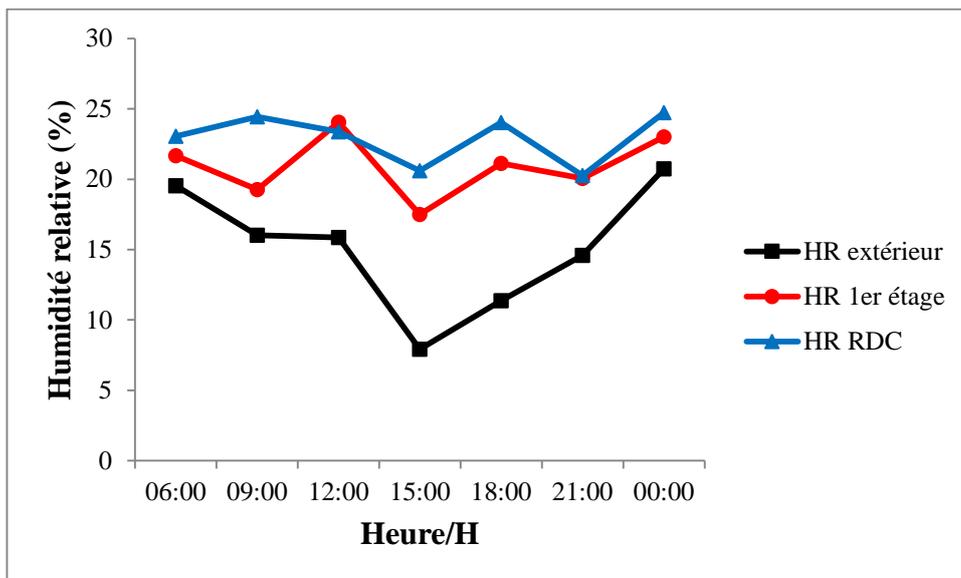


Figure V.15 : Graphe de variation de l'humidité relative moyenne en % des trois jours d'investigation du deuxième cas d'étude (Chambre 02)

➤ Résultats de variation de vitesse de l'air :

Les résultats des mesures de variation de vitesse de l'air des trois jours d'investigation du deuxième cas d'étude (Chambre 02) sont montrés dans la figure V.16.

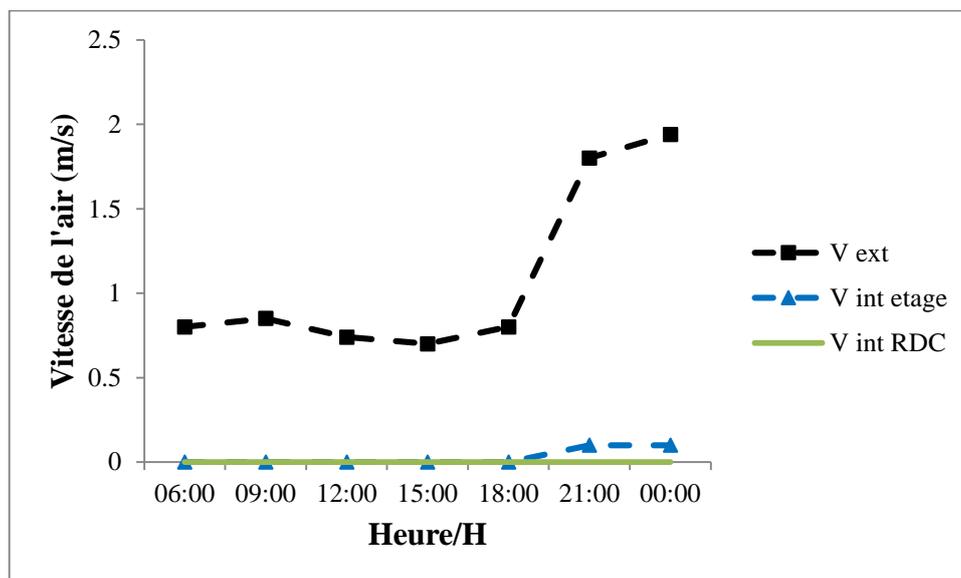


Figure V.16 : Graphe de variation de vitesse de l'air des trois jours d'investigation du deuxième cas d'étude (Chambre 02)

Les figures V.9 et V.13 représentent les graphes de la variation de température de l'air ambiant à travers les diverses heures de la journée des chambres 01 et 02 du deuxième cas d'étude durant la période d'investigation qui s'étale de 31 juillet à 2 août 2018.

On remarque une valeur moyenne de température de l'air extérieur dans la terrasse de 37°C à 6 :00 du matin avec une humidité relative de 18.8 % à l'extérieur et une température

## Chapitre V : Étude expérimentale par des mesures in situ

---

de 36.56°C et une humidité de 20 % intérieure dans la chambre 01 de l'étage. La température ambiante intérieure enregistrée dans la chambre 02 à 6 :00 du matin est de 35.93°C avec une humidité relative de 21.6%. La température continue à s'augmenter à l'extérieur jusqu'au 39°C à 9 :00 du matin avec une humidité de 18%. À l'intérieur, on enregistre une température de 37°C et une humidité de 21%. Aussi, la température ambiante moyenne enregistrée à 9 :00 du matin dans la chambre 02 est de 36.8°C avec une humidité relative de 19.26%.

À midi (12 :00), on enregistre à l'extérieur une température de 40°C avec une humidité de 17.3%, tant dis que la température intérieure dans la chambre 01 à l'étage égale à 38.5°C et une humidité de 20.5%. Dans la chambre 02, la température ambiante moyenne est de 37.13°C et une humidité de 24%. Après-midi, la valeur de température extérieure s'augmente avec quelque degré où à 15 :00 on enregistre une température de 41.4°C et une humidité très basse de 13%. À l'intérieur, on remarque une température moyenne de 37.8°C et une humidité de 17.7% dans la chambre 01 à l'étage. La température ambiante moyenne dans la chambre 02 égale à 37.63°C et l'humidité relative égale à 17.5%. Ensuite, la température extérieure commence à diminuer à 18 :00 avec une valeur moyenne de 39.7 °C et une valeur de 38.1°C à 21 :00 avec une humidité de 15.8% et 18.5% respectivement. La température intérieure égale à 37.8°C et 37.4°C avec une humidité relative de 20.03% et 20.13% respectivement. Dans la chambre 02, la température moyenne égale à 37.46°C et 37.27°C avec une humidité relative moyenne de 21.13% et 20% à 18 :00 et 21 :00 respectivement.

À minuit, on remarque une température de 37.5°C et l'humidité relative s'augmente un peu avec une valeur de 22.5% dans la terrasse, et dans la chambre de l'étage, la valeur de température égale à 37°C avec une humidité relative de 22.9%. Dans la chambre 02, la température ambiante moyenne égale à 36.9°C avec une humidité relative de 23%.

Pour les valeurs de température surfacique des différentes parois, on remarque des valeurs de température moyenne de 39°C pour la surface du toit, 37°C pour la surface du sol et de 38°C pour les surfaces des murs dans les différentes heures de la journée.

On remarque que les valeurs des températures ambiantes enregistrées dans les deux chambres de l'étage du deuxième cas d'étude sont au-delà de la plage du confort thermique. Dès la matinée à 6 :00 du matin, les valeurs de température ambiante dans les chambres sont d'ordre de 37°C et elles commencent à s'augmenter jusqu'elles dépassent les 38°C avec une faible humidité à 21 :00 la nuit. On peut dire que les températures ambiantes intérieures sont élevées ; ce qui entraîne une sensation d'inconfort thermique à l'intérieur des chambres, et pour cela les habitants occupent la cave durant toute la journée et ils utilisent les terrasses pendant la nuit lorsque les températures sont élevées même la nuit.

## Chapitre V : Étude expérimentale par des mesures in situ

Les résultats des mesures de vitesse de l'air (figure V.12 et V.16) montrent que les vitesses à l'intérieur des chambres pendant la journée sont nulles avec un très faible mouvement de l'air à partir du 21 :00 de 0.2 m/s, ce qui laisse l'air très sec et l'utilisation des chambres en été est devenue très difficile.

### V.11.1.3. Comparaison des résultats des mesures in situ des deux premiers cas d'étude simultanément :

#### ➤ Résultats de variation de température :

Les résultats des mesures in situ obtenus en 03 août 2018 pour le premier et le deuxième cas d'étude sont présentés dans les tableaux suivants. Les tableaux V.22, V.23 et V.24 montrent respectivement les valeurs de température de l'air ambiant extérieur et intérieur. La figure V.17 illustre le graphe de comparaison des valeurs de température ambiante dans les deux cas simultanément.

Tableau V.22 : Valeurs de température de l'air ambiant extérieur et intérieur du premier cas d'étude (03 août 2018)

Date/H/T°	06 :00	09 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
T° ext	31°C	32.5	41.5	38.5	37.2	33	30
T° étage	30	37	37.3	36	36.3	36	28.9
T°RDC	29	32	34.2	34	34.2	34	27.4

Tableau V.23 : Valeurs de température de l'air ambiant extérieur et intérieur du deuxième cas d'étude (03 août 2018)

Date/H/T°	06 :00	09 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
T° ext	30	32	39	38	36	33	29.9
T° étage	34	34.9	36	35.2	35.4	35	31
T°RDC	31	33	34.3	34	33.9	33.3	29.3

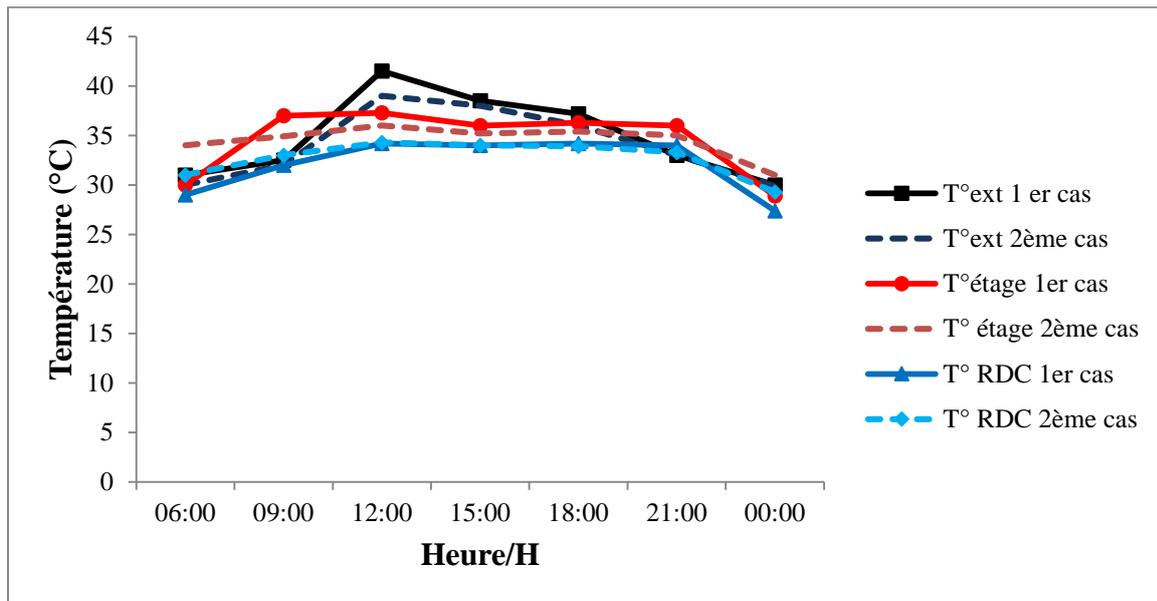


Figure V.17 : Comparaison entre la variation de température ambiante des deux premiers cas d'étude en °C

Ensuite, les résultats de la température radiante moyenne des parois durant la journée de 03 août 2018 sont présentés dans le tableau V.24. La figure V.18 illustre la température moyenne des parois radiantes.

Tableau V.24 : Valeurs moyennes de la température radiante au premier étage pendant les trois jours d'enquête

Heure/Surface	6 :00	9 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
Ts1 (toit)	39.1	39.2	38.7	38.9	38.9	38.8	38.9
Ts2 (sol)	37.9	37.6	37.3	37.6	37.7	37.6	37.9
Ts1	38.7	38.3	38.1	38.3	38.4	38.4	38.6
Ts2	38.7	38.4	38.2	38.4	38.4	38.6	38.6
Ts3	38.5	38.2	38.2	38.2	38.4	38.4	38.4
Ts4	38.8	38.4	38.4	38.4	38.7	38.7	38.7

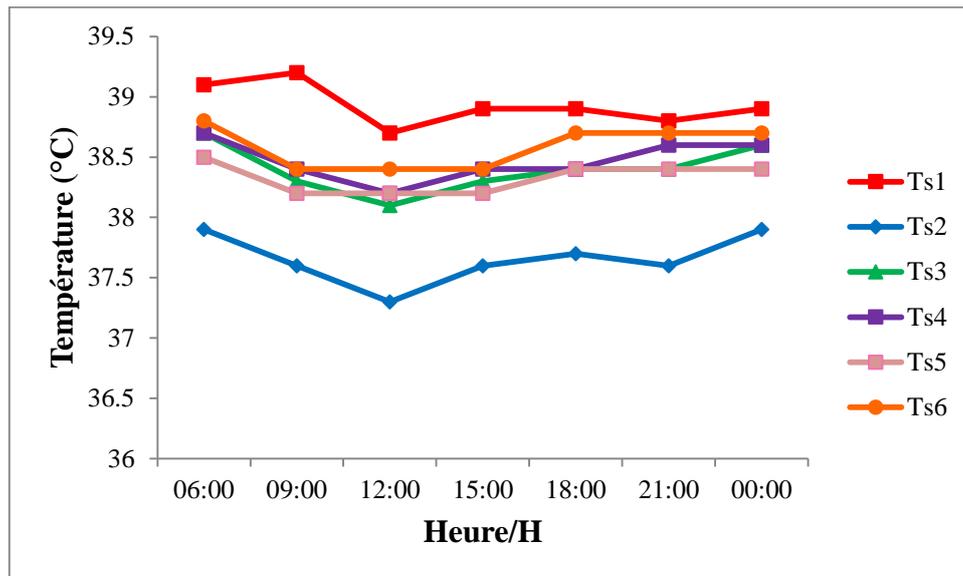


Figure V.18 : Graphe de variation de température moyenne radiante des parois des cas d'étude en 03 août 2018

➤ Variation de l'humidité relative des deux cas simultanément :

Les résultats des mesures de l'humidité relative avec la moyenne des deux premiers cas d'étude dans la journée de 03 août 2018 sont présentés dans les tableaux suivants : V.25 et V.26. La figure V.19 montre le graphe de l'humidité relative moyenne des deux cas d'étude.

Tableau V.25 : Valeurs d'humidité relative extérieure et intérieure en % du premier cas d'étude (3 août 2018)

(31/7/2018)/HR%	06 :00	09 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
HR ext	28.2%	26.8	18	18.6	20.5	21.6	25.1
HR étage	29	25.8	28	18	24	25.8	22.6
HR rdc	29.9	28.4	24	19.1	22.8	23.6	23.8

Tableau V.26 : Valeurs d'humidité relative intérieure et extérieure en % du deuxième cas

(31/7/2018)/HR%	06 :00	09 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
HR ext	29.1	27.9	18	17.9	21.3	22.5	25
HR étage	27.9	27.1	24.5	24.9	26.9	24.5	21.3
HR rdc	29.9	31.4	26.1	27	28.4	27.8	23.3

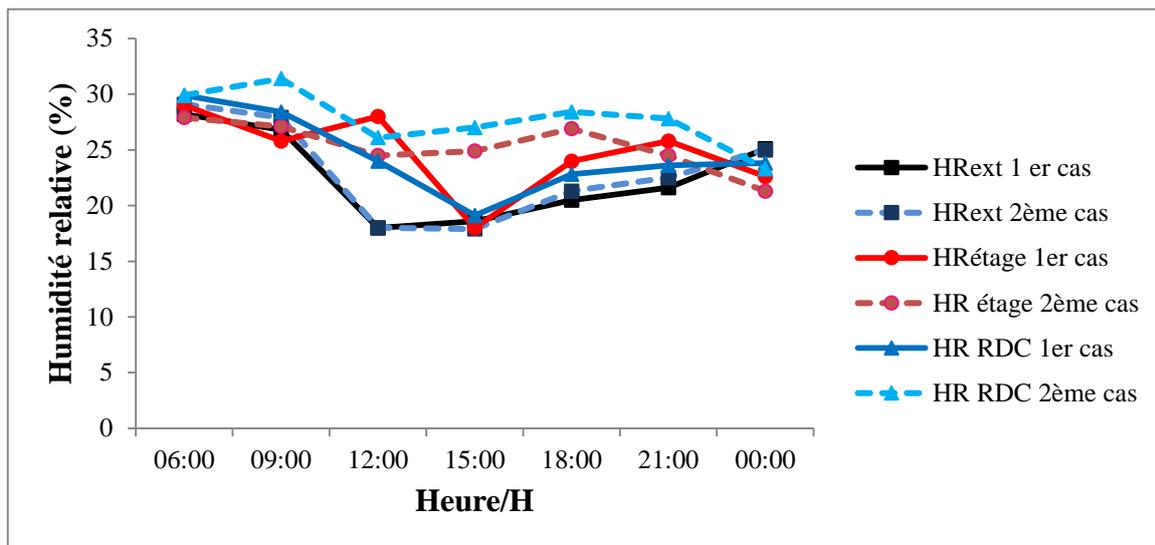


Figure V.19 : Graphe de variation d'humidité relative moyenne en % pour les deux cas d'étude d'août 2018

➤ Résultats de variation de vitesse de l'air :

Les résultats de mesures de variation de vitesse de l'air sont montrés dans la figure V.20 pendant le jour d'investigation.

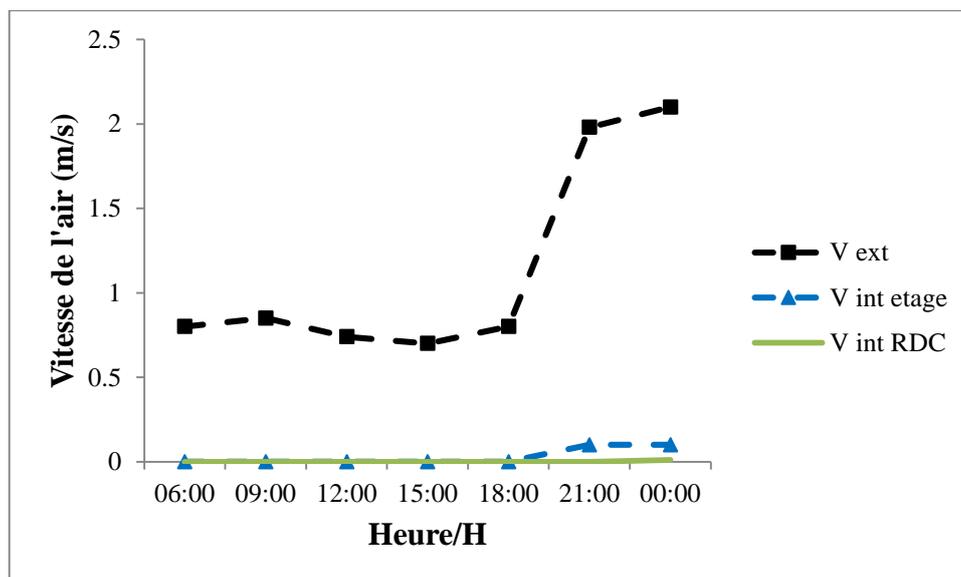


Figure V.20 : Graphe de variation de vitesse de l'air des deux cas d'étude

La comparaison entre les mesures des deux cas d'étude simultanément indique que les valeurs sont similaires. On déduit que l'état de sensation du confort dans les cas d'étude est similaire. On peut dire que les valeurs de températures de l'air ambiant, sont élevées durant la journée et qui dépassent les limites de confort de la zone aride. Pour cela, les habitants ferment le chebek durant la journée pour éviter les rayons solaires intenses de la journée après le lever de soleil. À 6 :00 du matin, la température de l'air ambiant intérieur égale une valeur au-dessus la

## Chapitre V : Étude expérimentale par des mesures in situ

---

valeur de température extérieure et qui dépasse les 35°C. Elle commence à augmenter progressivement jusqu'à elle dépasse les 40°C à l'extérieur et elle dépasse les 37°C à l'intérieur des chambres de l'étage. Ces valeurs sont élevées et dépassent la plage de confort optimal. D'autre part, les valeurs d'humidité relative se diminuent quand les températures sont élevées, cela entraîne un état d'inconfort à l'intérieur des habitations. Après-midi, les températures descendent avec quelques degrés et les valeurs d'humidité augmentent avec quelques pourcentages, mais elles sont toujours hors de la plage du confort optimal. Dans la nuit, même les valeurs de température continuent à descendre avec quelques degrés et l'humidité relative augmente avec quelque pourcentage mais ces valeurs restent toujours insupportables. Pour cela, les habitants occupent la terrasse dans la nuit pour se dormir parce que les températures enregistrées dans l'étage sont très élevées et ne permettent pas à utiliser les chambres. Également, les habitants ouvrent le chebek dans la nuit pour aérer les espaces intérieurs de l'étage et les espaces de rez-de-chaussée.

On remarque que les valeurs des vitesses de l'air à l'intérieur des chambres dans l'étage égalent presque toujours à 0 m/s. Pour les mesures de la vitesse de l'air à l'extérieur dans la terrasse, on remarque que pendant la journée à partir de six heures du matin des valeurs inférieure à 1m/s. À partir de 20 :00 h, les valeurs de vitesse de l'air extérieur se varie entre 1.43 et 2 m/s jusqu'au minuit et elles restent très faibles dans les chambres où elles ne sont pas sentées. Lorsque les vitesses du vent extérieur augmentent la nuit, elles restent un moyen pour rafraichir les espaces quand le Chebek est ouvert.

### V.11.1.4. Résultats des mesures du troisième cas d'étude :

Les mesures dans cette maison sont effectuées durant trois jours à partir de : 4, 5 et 6 août 2018. Les mesures sont prises durant chaque trois heures du 6 heures du matin jusqu'à 00 :00 de nuit. Les résultats obtenus sont montrés dans les tableaux et les figures suivants :

#### ➤ Résultats de variation de températures :

Les résultats de mesures in situ obtenus lors des trois journées typiques d'été de 4, 5 et 6 août 2018 pour le troisième cas d'étude sont présentés dans les tableaux suivants. Les tableaux V.27, V.28 et V.28 montrent respectivement les valeurs de température de l'air ambiant extérieur et intérieur. Sachant bien que les valeurs extérieures ont été prises dans la terrasse.

Tableau V.27 : Valeurs de température de l'air ambiant extérieur pendant les trois jours d'enquête avec la température moyenne du troisième cas

Date/H/T°	06 :00	09 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
4/8/2018	34 °C	36	36.2	35.3	36.5	35.4	36.6

## Chapitre V : Étude expérimentale par des mesures in situ

5/8/2018	32.8	34	37.6	35.1	37	36	34.9
6/8/2018	32.5	32.6	36.2	37	35.5	35.5	34.1
<b>T° moy</b>	<b>33.1°C</b>	<b>34.2</b>	<b>36.66</b>	<b>35.8</b>	<b>36.33</b>	<b>35.63</b>	<b>35.2</b>

Tableau V.28 : Valeurs de température de l'air ambiant intérieur au premier étage pendant les trois jours d'enquête avec la température moyenne

Date/H/T°	06 :00	09 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
4/8/2018	35.1	35.2	36.6	37.5	36.9	36.1	36
5/8/2018	33.8	34.1	33.8	37.5	35.5	34.1	33.5
6/8/2018	33.7	34.4	33.9	37.5	36.7	35.7	32.5
<b>T° moy</b>	<b>34.2 °C</b>	<b>34.56</b>	<b>34.76</b>	<b>37.5</b>	<b>36.36</b>	<b>35.3</b>	<b>34</b>

Tableau V.29 : Valeurs de température de l'air ambiant intérieur au rez-de-chaussée pendant les trois jours d'enquête avec la température moyenne

Date/H/T°	06 :00	09 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
4/8/2018	34.3	34.6	34.7	34.5	33.8	34.2	33.7
5/8/2018	32	32.1	31.9	34	32.9	33.1	32.5
6/8/2018	31.5	31.6	31.9	35	31.1	32.3	32
<b>T° moy</b>	<b>32.6</b>	<b>32.76</b>	<b>32.83</b>	<b>34.5</b>	<b>32.6</b>	<b>33.2</b>	<b>32.73</b>

Ensuite, les résultats de la température radiante moyenne des parois durant les trois journées typiques d'été d'investigation de la période d'août 2018 sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau V.30 : Valeurs moyennes de la température radiante au premier étage pendant les trois jours d'enquête du troisième cas d'étude

Heure/Surface	6 :00	9 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
Ts1 toit	35.1	37.5	37.4	37.3	37.3	37.4	37.3
Ts2 sol	32.9	36.3	36.3	36.3	36.5	36.4	36.1
Ts1	34.4	37.2	37.2	37.1	37.2	37.2	37.1
Ts2	34.4	37.2	37.2	37.1	37.1	37.1	37.1
Ts3	34.2	37.2	37.2	37.1	37.2	37.1	37.1
Ts4	34.4	37.1	37.1	37.1	37.2	37.1	37

## Chapitre V : Étude expérimentale par des mesures in situ

Après avoir calculé la température moyenne de l'air ambiant extérieur et intérieur et la température radiante moyenne des trois jours investigués, les résultats ont été traités par Excel. La figure V.21 illustre les résultats de la température moyenne de l'air ambiant. La figure V.22 illustre la température moyenne radiante des parois.

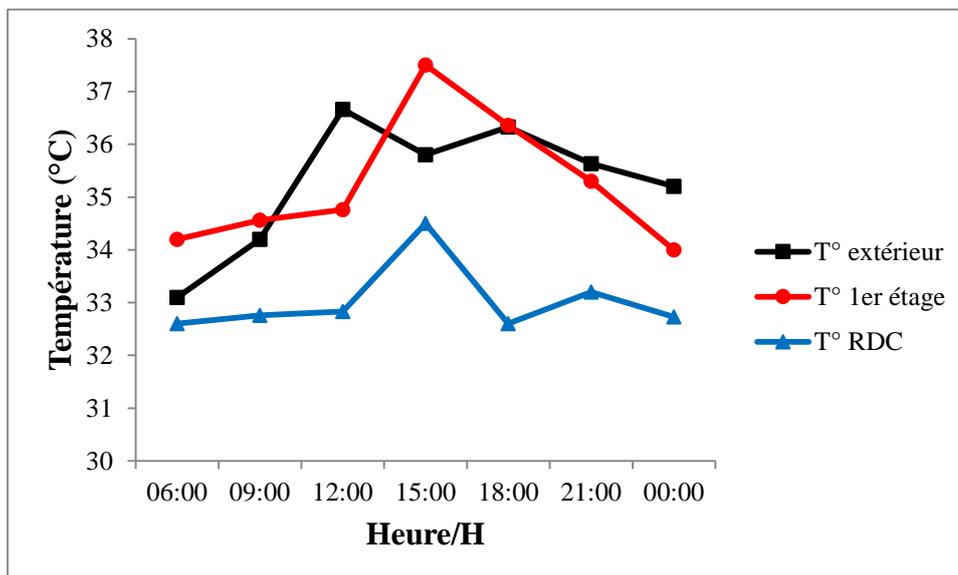


Figure V.21 : Graphe de variation de température moyenne de l'air ambiant des trois jours d'investigation du troisième cas d'étude

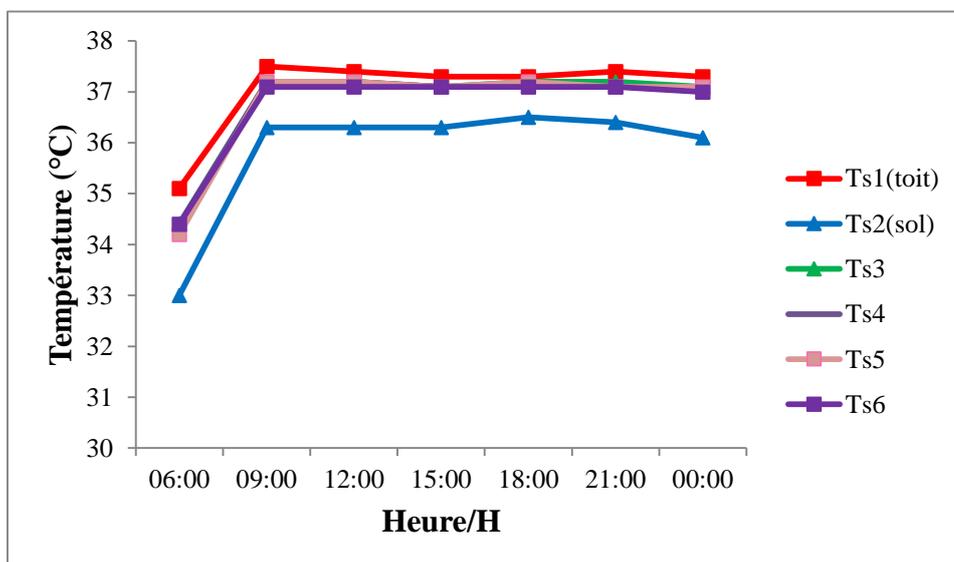


Figure V.22 : Graphe de variation de température moyenne radiante des parois des trois jours d'investigation du troisième cas d'étude

### ➤ Variation de l'humidité relative :

Les résultats des mesures de l'humidité relative avec la moyenne des trois jours d'investigation sont présentés dans les tableaux suivants : V.31, V.32 et V.33.

## Chapitre V : Étude expérimentale par des mesures in situ

Tableau V.31 : Valeurs d'humidité relative extérieure en % pendant les trois jours d'enquête avec moyenne

Date/H/HR%	06 :00	09 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
4/8/2018	18.6%	16.6	17	17.6	16.3	16.7	20.1
5/8/2018	18.9	19.8	16	19.5	14.8	13	16.3
6/8/2018	23.3	23.2	17.4	17	20.5	19.5	20.4
<b>HR moy</b>	<b>20.26%</b>	<b>19.86</b>	<b>16.8</b>	<b>18.03</b>	<b>17.2</b>	<b>16.4</b>	<b>18.93</b>

Tableau V.32 : Valeurs d'humidité relative intérieure en % en étage pendant les trois jours d'enquête avec la moyenne

Date/H/HR%	06 :00	09 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
4/8/2018	18	19.2	18.5	16.5	16.7	16.8	23.3
5/8/2018	18	18.4	20.8	14.5	17.6	16	17.2
6/8/2018	21.3	21.6	22	16.5	18	15.9	24.6
<b>HR moy</b>	<b>19.1</b>	<b>19.73</b>	<b>20.43</b>	<b>15.83</b>	<b>17.43</b>	<b>16.23</b>	<b>21.7</b>

Tableau V.33 : Valeurs d'humidité relative intérieure en % au rez-de-chaussée pendant les trois jours d'enquête avec la moyenne

Date/H/HR%	06 :00	09 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
4/8/2018	19.6	20.8	17.8	18.7	18.8	21.9	24.5
5/8/2018	19.5	20.3	21	17.5	15.8	14.2	20.6
6/8/2018	24.9	26.2	24.3	18	22.8	19.2	24.5
<b>HR moy</b>	<b>21.33</b>	<b>22.43</b>	<b>21.03</b>	<b>18.06</b>	<b>19.13</b>	<b>18.43</b>	<b>23.2</b>

Ensuite, La figure V.23 montre le graphe de variation de l'humidité relative moyenne du troisième cas d'étude.

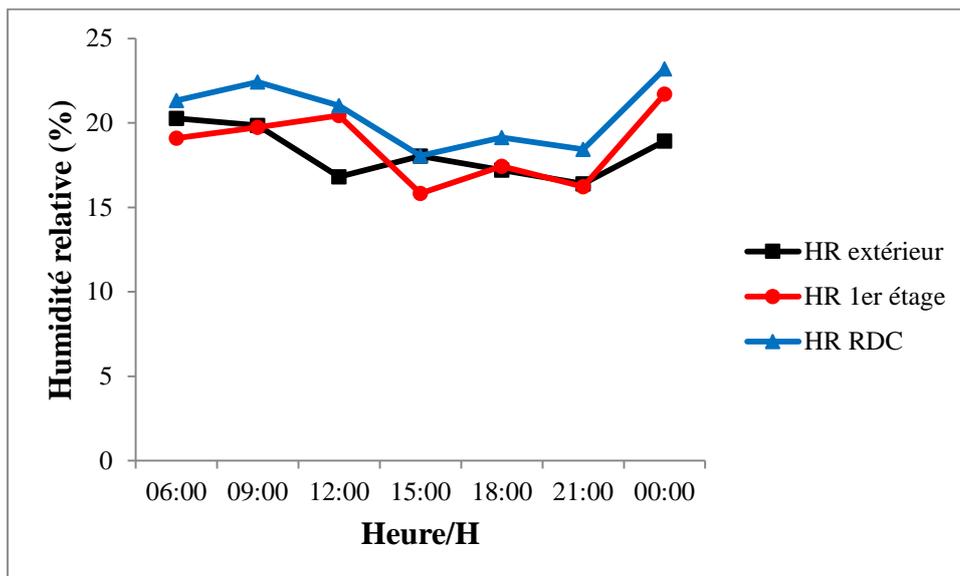


Figure V.23 : Graphe de variation de l'humidité relative moyenne en % des trois jours d'investigation du troisième cas d'étude

➤ Résultats de variation de vitesse de l'air :

Les résultats des mesures de variation de vitesse de l'air pendant les trois jours d'investigation du mois d'août 2018 sont montrés dans la figure V.24.

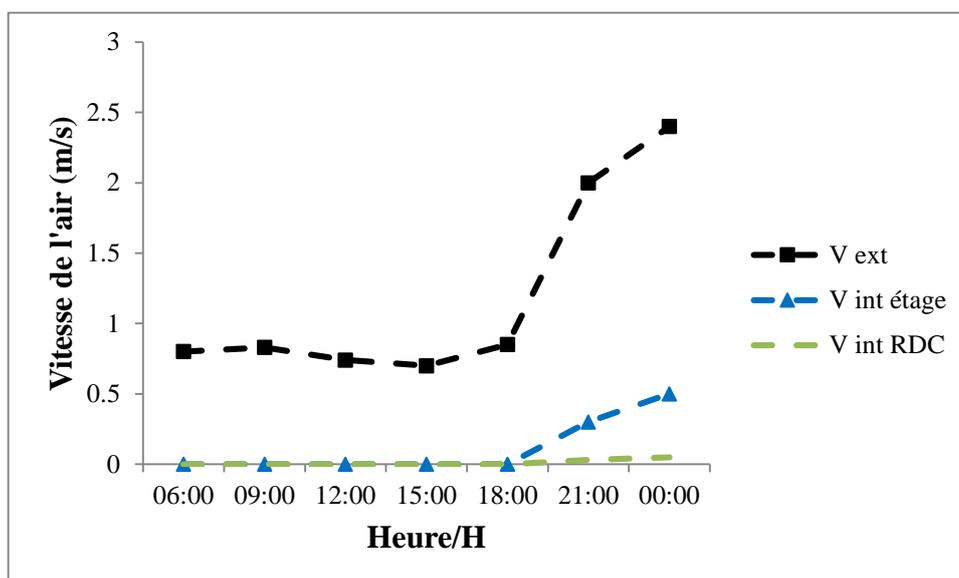


Figure V.24 : Graphe de variation de vitesse de l'air des trois jours d'investigation du troisième cas d'étude

La valeur moyenne de la température de l'air extérieur enregistrée à 6h00 du matin est de 33.1°C avec une humidité relative de 20.26 % pour les trois journées d'été typiques du mois d'août 2018. À l'intérieur, la température de l'air ambiant à l'étage est de 34.2 °C avec une humidité de 19.1 % et une température ambiante de 32.6°C au rez-de-chaussée avec une

## Chapitre V : Étude expérimentale par des mesures in situ

---

humidité relative de 21.33%. On remarque qu'à 6h00 du matin, la température de l'air enregistrée dans la chambre d'étage dépasse la valeur de la température extérieure. A 9h00, la température de l'air à l'extérieur est égale à 34.2°C avec une humidité relative de 20%. Au premier étage, elle équivaut à 34.56°C et 19,73%. Au rez-de-chaussée, la température ambiante est de 32.76°C et l'humidité relative est de 22.4%. On remarque que la température intérieure à 9h00 du matin est presque équivalente à celle de l'extérieur. Cela est dû de la forte chaleur entrée par le toit. L'humidité relative à l'intérieur est un peu plus élevée qu'à l'extérieur car la température de l'air extérieur est élevée. A midi, la température extérieure est de 37°C avec une humidité relative de 16.8%. La température intérieure au premier étage est de 35°C et 20.43% et au rez-de-chaussée, la température de l'air est de 32.83°C et l'humidité relative est de 21%. De plus, la température intérieure à midi est inférieure à celle de l'extérieur par quelques degrés. Cela est dû à l'isolation thermique à l'intérieur de la maison, mais les valeurs de température restent toujours en dehors de la plage du confort thermique. Aussi, les valeurs d'humidité relative sont très basses et hors de l'intervalle du confort thermique. Sachant que, selon la norme ASHRAE 55, la température optimale se varie entre 25,1°C et 32,1°C et entre 28% à 50% pour l'humidité. Ensuite, à 15h00 après-midi, en extérieur, la température moyenne de l'air ambiant égale à 36°C et l'humidité relative vaut 18%. À l'intérieur, au premier étage, la température de l'air est de 37.5°C et l'humidité relative est de 16%. Au rez-de-chaussée, la température de l'air est de 34.5°C et l'humidité relative de 18%. C'est perceptible cet après-midi ; la température intérieure dépasse la valeur enregistrée à l'extérieur. Cependant, elle reste toujours au-delà de la plage de confort optimal. À 18h00 du soir, la température ambiante extérieure est de 36.33°C et l'humidité relative égale à 17%. À l'étage, la température de l'air est de 36.3°C et l'humidité relative de 17.4%. Au rez-de-chaussée, la température de l'air est de 32.6°C et l'humidité relative est de 19%. À 18h00 le soir, la température ambiante intérieure reste un peu inférieure à celle de l'extérieur. Cela est toujours dû à la masse thermique du toit, qui minimise la température extérieure excessive. Cependant, la valeur de la température de l'air intérieur reste toujours supérieure à la valeur optimale. À 21h00 du soir, la température moyenne extérieure est de 35.63°C et l'humidité de 16.4%. À l'intérieur, la température de l'air au premier étage est de 35.3°C et au rez-de-chaussée elle est de 33°C. Pour l'humidité relative, elle est de 16.2 % au premier étage et de 18.4 % au rez-de-chaussée. On remarque qu'en soirée à 21h00, la température ambiante intérieure s'augmente et se rapproche de celle de l'extérieur. À minuit, la température moyenne de l'air extérieur est de 35,2°C avec une humidité relative de 18.93%. Au premier étage, la température ambiante est de 34°C et l'humidité relative est de 21.7%. Alors qu'au

## Chapitre V : Étude expérimentale par des mesures in situ

rez-de-chaussée, la température est de 32.7°C et l'humidité relative est de 23.2%. La forte irradiation solaire incidente sur la surface du toit est en partie absorbée, transformée en chaleur et accumulée dans le toit. La nuit, la chaleur stockée dans le toit pendant la journée commence à être libérée. Pour cela, on remarque que la température ambiante intérieure s'augmente et qu'elle s'approche à celle de l'extérieur, et souvent elle sera supérieure à la température moyenne extérieure.

Les valeurs moyennes de température radiante des différentes parois sont quasiment de l'ordre de 34°C, 36°C et 37°C respectivement pour les surfaces de sol, les murs et le toit aux différentes heures de la journée. La valeur de la température de surface du toit est toujours supérieure à celle des autres surfaces pendant les différentes heures de la journée du matin, du midi, de l'après-midi, du soir et de la nuit, puisque le toit est la surface qui est en contact au rayonnement solaire extérieur intense. Les valeurs de température des surfaces des parois sont toujours supérieures à la valeur optimale qui se situe entre 25 et 32,1°C selon la norme ASHRAE-55.

### V.11.1.5. Résultats des mesures du quatrième cas d'étude :

#### ➤ Résultats de variation de températures :

Les résultats des mesures in situ obtenus lors des trois journées typiques d'été de 4, 5 et 6 août 2018 pour le quatrième cas d'étude sont présentés dans les tableaux suivants. Les tableaux V.34, V.35 et V.36 montrent respectivement les valeurs de température de l'air ambiant extérieur et intérieur.

Tableau V.34 : Valeurs de température de l'air ambiant extérieur pendant les trois jours d'enquête avec la température moyenne du quatrième cas d'étude

Date/H/T°	06 :00	09 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
4/8/2018	34 °C	39.5	36.6	39	36.1	34	33.3
5/8/2018	34.5	35	36.2	39	40	35.9	35.6
6/8/2018	34.6	35	36.2	35.3	40.1	35.2	35.6
<b>T° moy</b>	<b>34.36°C</b>	<b>36.5</b>	<b>36.33</b>	<b>37.76</b>	<b>38.73</b>	<b>35.03</b>	<b>34.83</b>

Tableau V.35 : Valeurs de température de l'air ambiant intérieur au premier étage pendant les trois jours d'enquête avec la température moyenne

Date/H/T°	06 :00	09 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
4/8/2018	36	36.1	36	36.3	36.3	35.4	35.1
5/8/2018	34.8	34.9	35.6	37.5	35.3	35.6	35

## Chapitre V : Étude expérimentale par des mesures in situ

6/8/2018	34.1	34.4	35.6	38	35.4	35.2	35
<b>T° moy</b>	<b>34.96 °C</b>	<b>35.13</b>	<b>35.73</b>	<b>37.26</b>	<b>35.66</b>	<b>35.4</b>	<b>35.03</b>

Tableau V.36 : Valeurs de température de l'air ambiant intérieur au rez-de-chaussée pendant les trois jours d'enquête avec la température moyenne

Date/H/T°	06 :00	09 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
4/8/2018	34.8	34.8	34.6	33.5	35.1	34.1	34.6
5/8/2018	33	32.2	34	34.5	32.7	34.3	32.7
6/8/2018	32	33.1	35	34.5	33.5	33.7	33
<b>T° moy</b>	<b>33.26</b>	<b>33.36</b>	<b>34.53</b>	<b>34.16</b>	<b>33.76</b>	<b>34.03</b>	<b>33.43</b>

Ensuite, pour la température radiante moyenne, les résultats durant les trois journées typiques d'été d'investigation du mois d'août 2018 sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau V.37 : Valeurs moyennes de la température radiante au premier étage pendant les trois jours d'enquête du quatrième cas d'étude

Heure/Surface	6 :00	9 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
T s1 (toit)	35.2	38.7	38.4	38.3	38.9	38.6	39.2
T s2 (sol)	33.9	37.7	37.7	37.7	37.7	37.4	37.3
Ts1	34.8	38	38.1	38.1	38.1	37.8	37.8
Ts2	34.8	38.1	38	38.2	38.3	38.1	38
Ts3	34.9	38.2	38.2	38.1	38.3	38.2	38.1
Ts4	34.9	37.7	38.2	38.2	38.5	37.9	38

Après avoir calculé la température moyenne de l'air ambiant extérieur et intérieur et la température radiante moyenne, les résultats ont été traités par Excel. La figure V.25 illustre les résultats de la température moyenne de l'air ambiant. La figure V.26 illustre la température surfacique moyenne des parois.

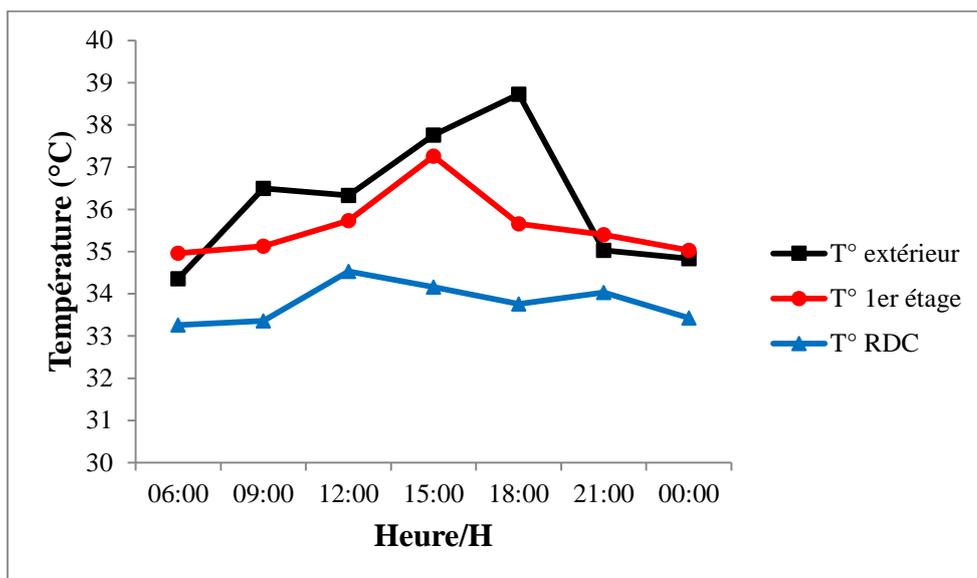


Figure V.25 : Graphe de variation de température moyenne de l'air ambiant des trois jours d'investigation du quatrième cas d'étude

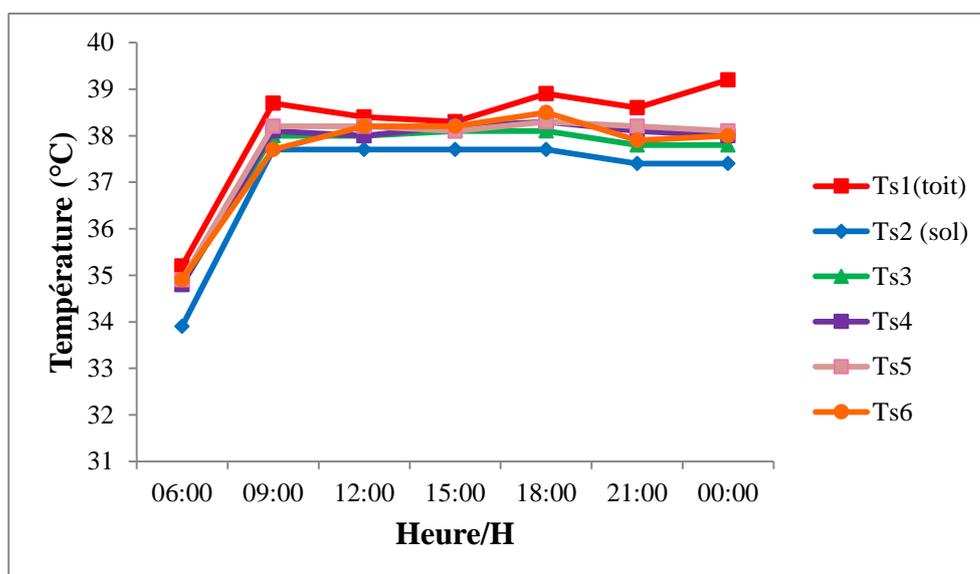


Figure V.26 : Graphe de variation de température moyenne radiante des parois des trois jours d'investigation du quatrième cas d'étude

➤ Variation de l'humidité relative :

Les résultats des mesures de l'humidité relative avec la moyenne des trois jours sont présentés dans les tableaux suivants : V.38, V.39 et V.40. La figure V.27 montre le graphe de l'humidité relative moyenne du quatrième cas d'étude.

Tableau V.38 : Valeurs d'humidité relative extérieure en % pendant les trois jours d'enquête avec moyenne du quatrième cas d'étude

Date/H/HR%	06 :00	09 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
4/8/2018	18.6%	13.6	16	13.5	14.6	16.7	16

## Chapitre V : Étude expérimentale par des mesures in situ

5/8/2018	17.3	17.4	17	15	12.4	11.9	20.1
6/8/2018	21.3	21.5	17	17.6	13.7	19.2	20.1
<b>HR m</b>	<b>19.06</b>	<b>17.5</b>	<b>16.66</b>	<b>15.36</b>	<b>13.56</b>	<b>15.93</b>	<b>18.73</b>

Tableau V.39 : Valeurs d'humidité relative intérieure en % en étage pendant les trois jours d'enquête avec la moyenne

Date/H/HR%	06 :00	09 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
4/8/2018	16	16	17.9	18.4	16.5	17.1	16.4
5/8/2018	18.9	18.5	16.8	16.5	17.3	13.7	23.3
6/8/2018	22.5	22.9	19	17	19	22	23
<b>HR m</b>	<b>19.13</b>	<b>19.13</b>	<b>17.9</b>	<b>17.3</b>	<b>17.6</b>	<b>17.6</b>	<b>20.9</b>

Tableau V.40 : Valeurs d'humidité relative intérieure en % au rez-de-chaussée pendant les trois jours d'enquête avec la moyenne

Date/H/HR%	06 :00	09 :00	12 :00	15 :00	18 :00	21 :00	00 :00
4/8/2018	16.4	16.4	16.6	18.6	16.4	18.5	16.6
5/8/2018	19.7	22.6	18	18.7	20.6	12.8	24.5
6/8/2018	24.6	25	18	18.7	21	24.9	24.5
<b>HR m</b>	<b>20.23</b>	<b>21.33</b>	<b>17.45</b>	<b>18.66</b>	<b>19.33</b>	<b>18.73</b>	<b>21.86</b>

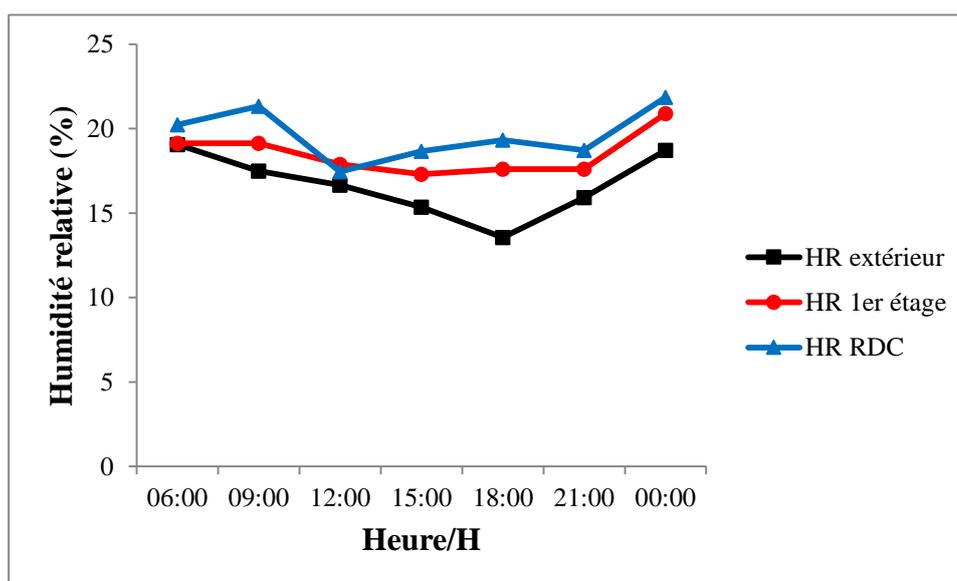


Figure V.27 : Graphe d'humidité relative moyenne en % des trois jours d'investigation du quatrième cas d'étude

➤ Résultats de variation de vitesse de l'air :

Les résultats des mesures de variation de vitesse de l'air sont montrés dans la figure V.28 pendant les trois jours d'investigation du mois d'août.

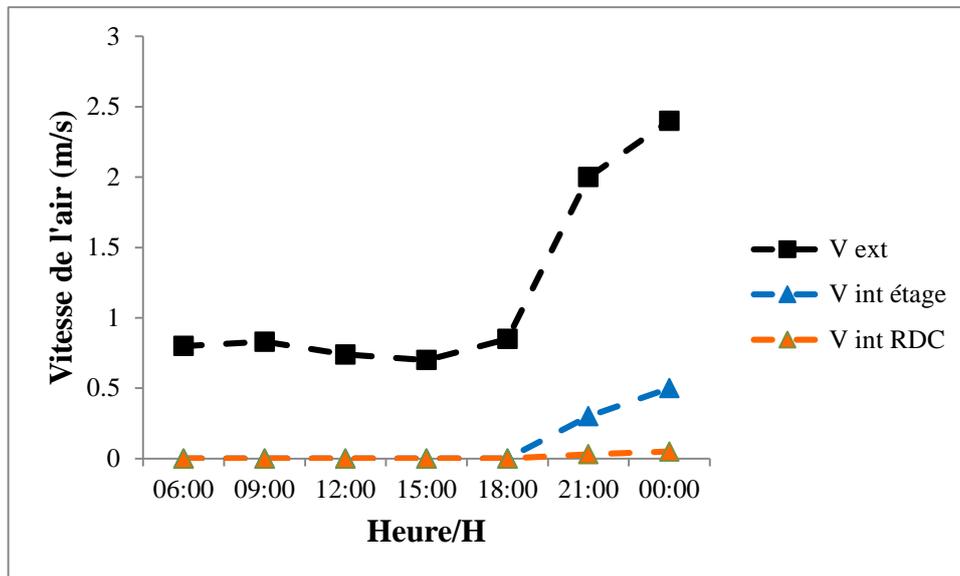


Figure V.28 : Graphe de variation de vitesse de l'air des trois jours d'investigation du quatrième cas d'étude

On remarque que la température de l'air ambiant dans la terrasse à 9 :00 du matin égale à 36.5°C et l'humidité relative est de 17.5% et dans la chambre de l'étage, elle égale à 35°C et de 19.1% d'humidité relative. À 12 :00, la température extérieure dépasse les 36°C et de 16% pour l'humidité, tandis qu'à l'intérieur, la température égale à 34°C et l'humidité est de 17% ce que provoque un état d'inconfort thermique pendant la matinée. À 18:00, la température de l'air extérieure est de 39°C avec une humidité relative de 13.5%, et des valeurs de 35.6°C et de 17.6% à l'intérieur de l'étage. Ensuite, la température moyenne de l'air ambiant dans la terrasse à 21 :00 égale à 35°C et 15.9% d'humidité relative, tandis que les valeurs dans la chambre de l'étage sont de 35.4°C et de 17.6%. On peut dire que l'état de niveau de confort intérieur est insupportable pendant toute la journée, et à partir de 18 :00, on remarque que les valeurs de température sont élevées et les valeurs d'humidité relative sont basses et elles sont au-delà de la zone de confort. Cela est dû à l'effet de déphasage thermique de différentes parois et de l'enveloppe en général, ce qui entre un état d'inconfort surtout dans les chambres de l'étage et par conséquent, la nécessité de l'utilisation de la climatisation ou un système de refroidissement. Les températures surfaciques se varient entre 37.6, 35 et 37°C pour les surfaces du toit, du sol et des murs. Les valeurs de températures surfaciques élevées provoquent aussi l'augmentation de température intérieure par rayonnement. Les valeurs de la vitesse de l'air intérieur est toujours nulles à l'intérieur des chambres de l'étage surtout dans

la période diurne et elles se varient entre 0.5 et 1 m/s le maximum pendant la nuit après l'ouverture du Chebek.

### V.11.1.6. Discussion :

Les valeurs moyennes des températures de l'air extérieur enregistrées à 6h00 dans les différents cas est d'ordre de 34°C avec une humidité relative qui peut atteindre 20 % pour les journées d'été typiques d'investigation de juillet et août 2018. À l'intérieur, la température de l'air ambiant à l'étage est de 36,43 °C avec une humidité de 21 % et une de 34,73°C au rez-de-chaussée avec une humidité de 22,1%. Dans les chambres de l'étage, les températures se varient entre 34 et 36°C avec une humidité relative de 22%. On remarque qu'à 6h00 du matin, la température de l'air à l'intérieur du plancher dépasse de quelques degrés la valeur de la température extérieure. À 9h00, la température de l'air à l'extérieur enregistrée dans la terrasse se varie entre 36 et 42°C avec une humidité relative entre 15 à 19%. Au premier étage, elle équivaut à 37°C et 19%. On remarque que la température intérieure à 9h00 du matin est inférieure à celle à l'extérieur. Cela est dû à l'isolation thermique par l'épaisse toiture construite en matériaux locaux à haute capacité thermique avec d'épais murs en pierre. L'humidité à l'intérieur est un peu plus élevée qu'à l'extérieur car la température de l'air extérieur est élevée. À midi, la température extérieure est de 43°C avec une humidité relative de 10% et la température intérieure au premier étage est de 38°C et 21%. Cela est dû à l'isolation thermique à l'intérieur de la maison, mais les valeurs de température restent toujours en dehors de la plage de confort thermique. Les valeurs d'humidité relative sont très basses et hors de portée du confort thermique également selon la norme ASHRAE 55, d'où la température optimale se situe entre 25,1°C et 32,1°C. Puis après-midi, en extérieur, la température de l'air vaut 45°C et l'humidité relative vaut 8%. À l'intérieur, au premier étage, la température de l'air est de 38°C et l'humidité relative est de 17%. C'est perceptible cet après-midi ; la température intérieure est inférieure à celle de l'extérieur. Cependant, il reste toujours au-delà de la plage de confort optimal. Même à 18h00 le soir, la température ambiante intérieure reste un peu inférieure à celle de l'extérieur. Cela est toujours dû à la masse thermique du toit, qui minimise la température extérieure excessive. Cependant, la valeur de la température de l'air intérieur reste toujours supérieure à la valeur optimale. À 21h00 du soir, la température extérieure se varie entre 35 à 38°C et l'humidité de 14%. À l'intérieur, la température de l'air au premier se varie entre 34 à 37°C. On remarque qu'en soirée à 21h00, la température ambiante intérieure augmente et se rapproche de celle de l'extérieur. À minuit, la température de l'air extérieur est de 35°C avec une humidité relative de 19% et dans l'étage, la

## Chapitre V : Étude expérimentale par des mesures in situ

---

température ambiante est de 36°C et l'humidité relative est de 23%. On peut dire que le rayonnement solaire pendant les heures de surchauffe est en partie absorbé par le toit. Ce rayonnement sera ensuite transformé en chaleur et accumulé à l'intérieur du toit. La nuit, la chaleur stockée dans le toit pendant la journée commence à être libérée. Pour cela, on remarque que la température ambiante intérieure augmente et qu'elle est supérieure à celle de l'extérieur, la nuit (après le coucher du soleil).

Les valeurs moyennes de température radiante des différentes parois sont quasiment de l'ordre de 37°C, 38°C et 39°C respectivement pour les surfaces de sol, les murs et le toit aux différentes heures de la journée des différentes journées d'investigation des différents cas. La valeur de la température de surface du toit est toujours supérieure à celle des autres surfaces pendant les différentes heures de la journée du matin, du midi, de l'après-midi, du soir et de la nuit, puisque le toit est la surface exposée aux conditions extérieures et au rayonnement solaire extérieur intense. Les valeurs de température des surfaces murales sont toujours supérieures à la valeur optimale qui se situe entre 25 et 32,1°C selon la norme ASHRAE.

On peut dire que les valeurs de température de l'air ambiant sont élevées pendant la journée et dépassent les limites de confort de la zone chaude et aride.

Pour cette raison, les habitants ferment le 'Chebek' pendant la journée pour éviter les intenses rayons solaires du lendemain du lever du soleil. Le matin, la température de l'air ambiant intérieur est égale à une valeur supérieure à la valeur de la température extérieure et dépasse 35°C. Elle commence à augmenter progressivement jusqu'à dépasser 48°C à l'extérieur et elle dépasse 37°C à l'intérieur de la pièce du haut du premier étage, à midi. Ces valeurs sont élevées et dépassent la plage de confort optimal. D'autre part, les valeurs d'humidité relative diminuent lorsque les températures sont élevées, ce qui conduit à un état d'inconfort à l'intérieur des maisons. Après-midi, les températures chutent de quelques degrés et les valeurs d'humidité relative augmentent avec certain pourcentage, mais elles sont toujours en dehors de la plage du confort optimale. Pendant la nuit, même les valeurs de température continuent de baisser par quelques degrés et l'humidité relative augmente par quelques pourcentages, mais ces valeurs restent insupportables. Pour cette raison, les habitants occupent la terrasse la nuit pour dormir car les températures relevées au premier étage sont très élevées et ne permettent pas d'utiliser les pièces intérieures.

Le toit traditionnel est construit de matériaux locaux et lorsque les toits des maisons traditionnelles « mozabites » sont des terrasses à toit plat, ils sont exposés aux rayons solaires agressifs longtemps pendant les jours de la période estivale. Cette toiture traditionnelle est

épaisse avec une masse thermique élevée, mais elle reste un élément de chaleur transitoire du fait de son exposition au fort rayonnement solaire des jours d'été. À cette fin, les valeurs obtenues à partir des mesures réelles indiquent que les températures intérieures sont toujours élevées et les valeurs de l'humidité relative sont très faibles pendant toutes les heures de la journée du matin à minuit des journées d'été typiques étudiées.

Donc, malgré l'architecture traditionnelle a offert de nombreuses solutions et pratiques pour s'adapter à l'environnement extérieur, mais les valeurs de températures sont encore élevées et insupportables, ce qui entraîne un état d'inconfort thermique ressenti.

### V.11.2. Résultats des mesures in situ de la période hivernale :

Dans la suite de notre travail d'enquête qui correspond à l'étude et l'évaluation des ambiances thermiques dans quelques habitations du Ksar de Béni Isguen, nous avons pris des mesures pendant la période de sous-chauffe durant le mois de février 2019.

L'étude de l'état de confort thermique dans les maisons ksouriennes du Ksar de Béni Isguen pendant la période hivernale a été développée après le choix des jours typiques. On a fait un travail de mesure à l'aide des instruments adéquats pour qualifier les ambiances thermiques intérieures à travers les mesures des températures de l'air ambiant et des températures des surfaces de toit, de l'humidité relative et de la vitesse de l'air en hiver. L'objet du travail est de lever le voile sur le rôle des toitures dans les constructions mozabites pour contrôler les variations de température afin d'obtenir un confort thermique agréable dans la période hivernale. Les mesures in situ de différents cas d'étude pendant la période de février 2019 ont données des valeurs similaires.

NB : Ces mesures ont été effectuées dans les mêmes cas d'étude que nous avons pris pendant la période de surchauffe.

#### ➤ Déroulement des campagnes de mesure in situ dans la période hivernale :

Le travail de mesure des paramètres climatiques a été élaboré pendant quelques jours du mois de février à partir du 9 à 12 Février 2019. Les mesures ont été faites pendant plusieurs heures de la journée.

La prise de mesures avec l'enregistreur FI 84ED facilite le travail puisque il suffit de programmer l'instrument avec un micro-ordinateur (date, heure, durée,...). Ensuite, on clique sur le bouton de l'instrument pour commencer la collecte des mesures. On fixe l'instrument dans le local à mesurer par exemple sur un mur ou sur une chaise puisque il possède un support de fixation mural. Une fois, la durée programmée a terminé, on connecte l'instrument avec le micro-ordinateur pour transférer les résultats. Les résultats sont montrés directement

sur des graphes. De plus, on a fixé des points dans les différentes surfaces des espaces de mesure pour faciliter l'opération de prise de mesures. On a utilisé des tickets collés sur les surfaces des murs et les surfaces des sols (même méthode utilisée pendant la période de surchauffe). Donc, après la prise des mesures in situ pendant quelques jours de 9, 10, 11 et 12 février 2019, les résultats sont montrés dans les figures et les tableaux suivants.

### V.11.2.1. Résultats des mesures in situ du premier cas d'étude :

Les mesures réelles dans le premier cas d'étude sont effectuées durant le 9 février 2019. Les mesures sont prises pendant plusieurs heures de la journée du matin jusqu'à la nuit. Lorsque on possède deux instruments d'enregistreur de température et d'humidité « FI 84 ED », on a met l'un dans la terrasse, et l'autre dans la chambre d'étage. De plus, on a utilisé le thermo hygromètre manuel pour prendre des mesures dans la chambre de RDC. D'autre part, on a utilisé le thermomètre à infrarouge pour prendre les températures des surfaces des parois, de sols et de toits. Les espaces qu'on a mesurés sont montrés sur les plans dans le chapitre IV. Les résultats obtenus sont montrées dans les graphes et les tableaux suivants :

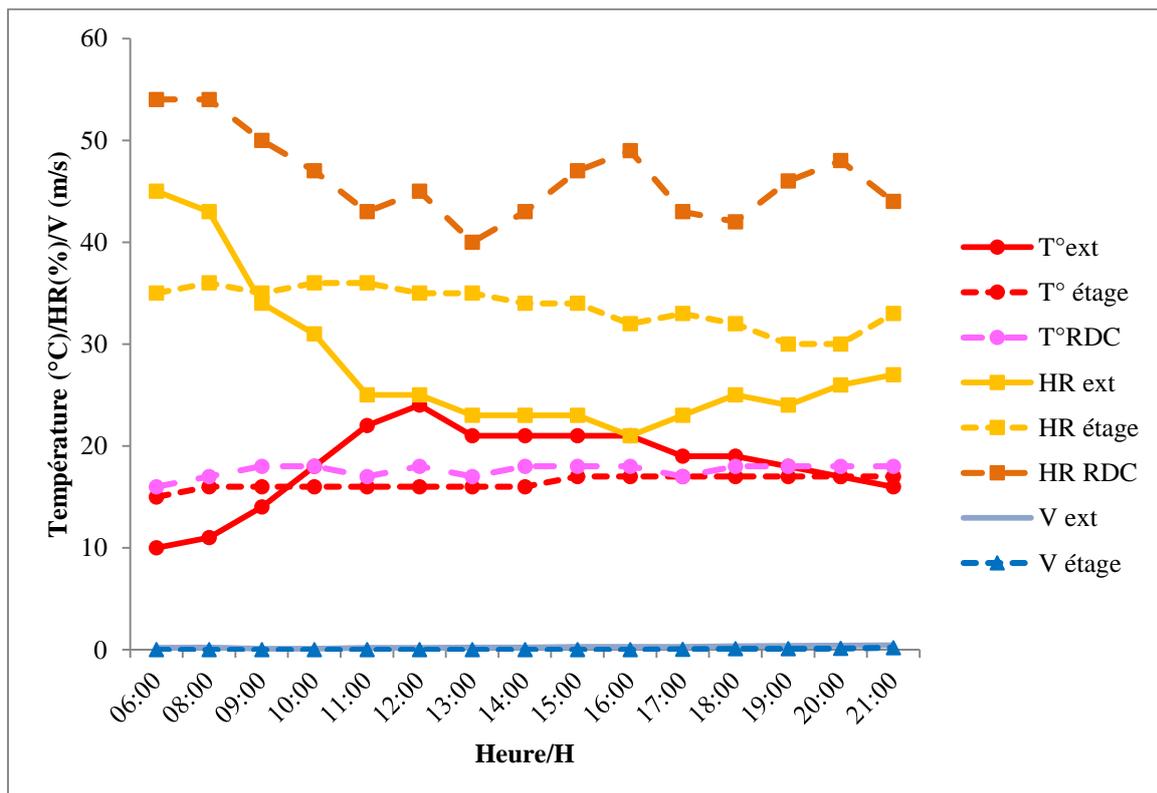


Figure V.29 : Variation de température, humidité relative et vitesse de l'air du premier cas d'étude durant la période d'investigation hivernale

## Chapitre V : Étude expérimentale par des mesures in situ

Tableau V.41 : Température moyenne radiante des parois de la chambre d'étage du premier cas d'étude durant la période investiguée

Heure/ T°	Ts1 (toit)	Ts2 (sol)	Ts3	Ts4	Ts5	Ts6
6 :00	16.7	16.9	16.9	17.8	18.2	16.7
8 :00	16.8	17	16.7	17.7	18.2	16.6
9 :00	16.7	17.1	16.8	17.9	18.3	16.7
10 :00	16.8	17.2	16.9	17.8	18.3	16.7
11 :00	16.7	17.1	16.9	17.9	18.3	16.7
12 :00	16.6	17.1	16.8	17.8	18.2	16.4
13 :00	17.1	17.4	16.9	18.1	18.4	16.9
14 :00	17	17.4	17.1	18.1	18.6	16.8
15 :00	16.7	17.3	17.2	18.2	18.6	16.8
16 :00	16.7	17.4	17	17.9	18.4	16.9
17 :00	16.8	17.3	16.8	17.8	18.3	16.7
18 :00	16.9	17.6	17.3	18.1	18.6	17.1
19 :00	17.1	17.6	17.3	18.2	18.5	17.1
20 :00	16.9	17.4	17.1	17.9	18.4	16.9
21 :00	17	17.3	17.2	17.9	18.3	16.9

On remarque que la courbe de la température de l'air ambiant dans la chambre d'étage est presque stable. La valeur est de 15°C à 6 :00 du matin et à l'extérieur est de 10°C. À 9 :00, la valeur se lève à 16°C et à l'extérieur à 14°C et ainsi de suite. On remarque qu'il y'a une relation presque inverse entre l'intérieur et l'extérieur d'où il y'a une certaine isolation thermique de la maison. Au niveau de la surface de la toiture, on remarque aussi une certaine isolation thermique même qu'elle est réduite puisque ces toitures sont faites des troncs de palmiers et de Timchemt avec une capacité d'isolation thermique considérable. Malgré ça, on remarque dans plusieurs temps qu'il n'a pas une différenciation dans la valeur de température entre l'intérieur et l'extérieur comme à 20 :00 où à l'extérieur est de 18°C et même dans la chambre d'étage est de 18°C. Parfois, on remarque que la température intérieure est supérieure que la température extérieure d'où la nécessité de l'utilisation d'un chauffage surtout dans la nuit.

## Chapitre V : Étude expérimentale par des mesures in situ

### V.11.2.2. Résultats des mesures in situ du deuxième cas d'étude :

Les résultats des mesures sur terrain du deuxième cas d'étude durant la journée du 10 février 2019 sont montrés dans la figure V.30 pour les résultats de températures, d'humidité relative, de vitesse de l'air et le tableau V.42 pour les températures radiantes.

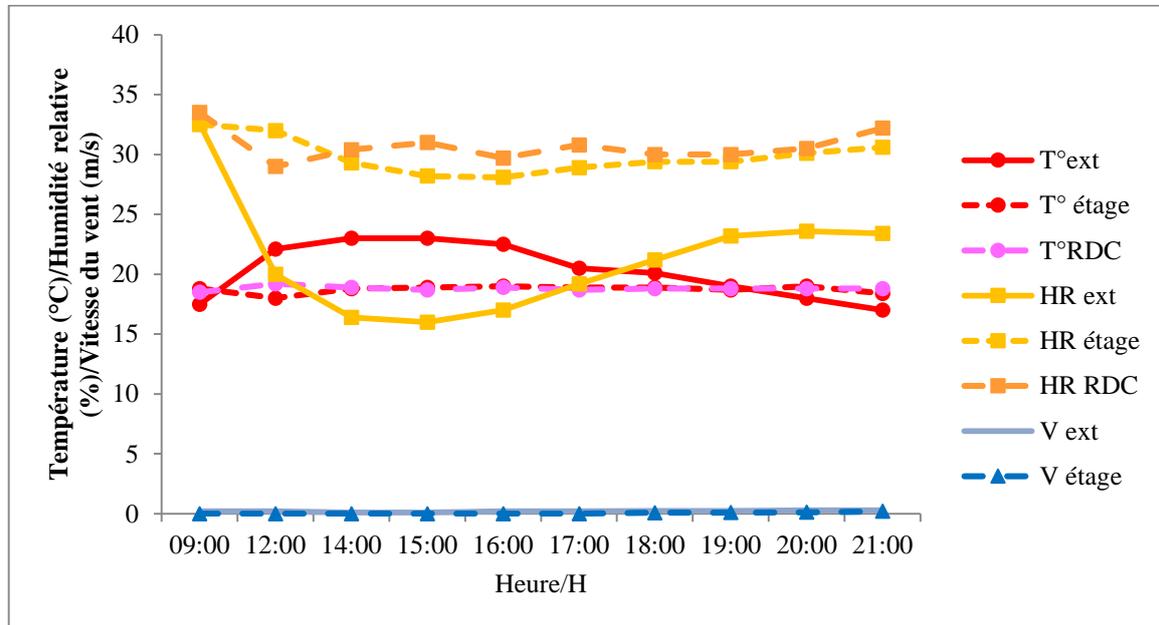


Figure V.30 : Variation de température, humidité relative et vitesse de l'air du deuxième cas d'étude durant la période d'investigation hivernale

Tableau V.42 : Températures moyenne radiante des parois de la chambre d'étage du deuxième cas d'étude durant la période investiguée

Heure/T°	Ts1 (toit)	Ts2 (sol)	Ts3 <sup>3</sup>	Ts4	Ts5	Ts6
9:00	17.8	19.4	19.2	19.8	19.6	19.4
12 :00	18	19.2	19.1	19.6	19.3	19
14 :00	17.9	18.9	18.8	19.4	19	18.6
15 :00	17.9	19.2	19.1	19.3	19.2	18.9
16 :00	17.8	19.3	18.9	19.4	19.1	18.9
17 :00	17.9	18.9	18.9	18.8	18.9	18.8
18 :00	17.7	18.8	18.6	19.2	19.1	18.6
19 :00	18.1	19.2	19.1	19.4	19.1	18.9
20 :00	17.8	18.9	18.9	19.3	19.1	18.8
21 :00	18.1	19.1	19.2	19.4	19.1	18.8

<sup>3</sup> Ts3, Ts4, Ts5, et Ts6 : sont les températures des surfaces des murs.

## Chapitre V : Étude expérimentale par des mesures in situ

On remarque que la courbe de température ambiante à l'intérieur de l'habitation est presque stable durant la journée du 10 février 2019 d'où la température de l'air ambiant se varie entre 18 et 19.5°C pendant 24 heures. D'un autre côté, la température extérieure pendant ces heures se varie entre 17°C et 23°C pendant la journée de 9 :00 à 17 :00 et elle descend doucement jusqu'au 16 °C, la nuit. L'humidité relative intérieure se varie entre 28 à 33% durant les différentes heures de la journée. On peut dire que l'état de confort thermique est agréable et supportable lorsque les valeurs de températures sont fraîches et se rapproche des valeurs de l'intervalle du confort thermique qui s'étale de 18°C à 25°C dans les climats chauds et arides. Il y'a une certaine isolation thermique entre l'intérieur et l'extérieur fournie par l'enveloppe de l'habitation et plus précisément par la masse thermique de la toiture, ce qui offre un état de confort intérieur supportable.

### V.11.2.3. Résultats des mesures in situ du troisième cas d'étude :

Pour le troisième cas d'étude, on a pris des mesures dans quelques heures de la journée du 11 février 2019. On n'a pu pas prendre pendant toute la journée à cause de la contradiction des habitants. Les résultats des mesures sont montrés dans les graphes et les tableaux suivants :

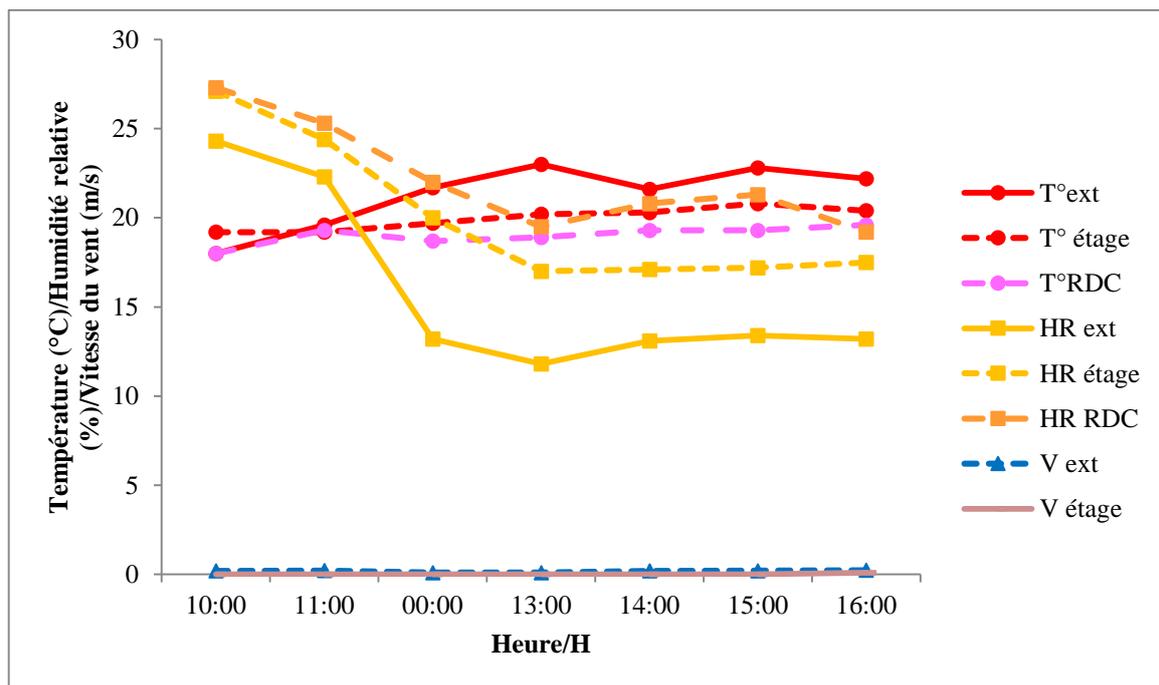


Figure V.31 : Variation de température, humidité relative et vitesse de l'air du troisième cas d'étude durant la période d'investigation hivernale

## Chapitre V : Étude expérimentale par des mesures in situ

Tableau V.43 : Température moyenne radiante des parois de la chambre d'étage du troisième cas d'étude durant la période investiguée

Heure/T°	Ts1 (toit)	Ts2 (sol)	Ts3	Ts4	Ts5	Ts6
10 :00	16.6	17.3	17.6	18.1	18.1	17.9
11 :00	16.3	18	18.5	18.1	18.2	18
12 :00	17.8	18.4	18.8	18.8	18.3	18.3
13 :00	19.2	18.8	19.2	18.1	18.8	17.9
14 :00	19.9	18.7	18.9	18.9	18.9	19
15 :00	22	18.8	19.9	18.7	19.9	19.9
16 :00	19.9	18.9	18.8	18.8	19.8	19.8

On remarque que la température moyenne de l'air ambiant se varie entre 18 C° à 10 :00 du matin jusqu'au 19.8°C à 16 :00 dans la chambre d'étage à l'intérieur de la maison. Pour l'humidité relative, elle se varie entre 28% à 10 :00, 19% à 13 :00 et elle se lève à 21% à 15 :00, puis elle descend encore vers 21% à 16 :00. Pour la chambre de l'étage, la température ambiante est de 19°C à 10 :00, 20°C à 13 :00 et à 16 :00h du soir. On peut dire que les valeurs de température ambiante et d'humidité relative intérieurs sont supportables par rapport à la température extérieure qui se varie dans la plage de 19 à 21°C et l'humidité relative entre 25% et 14%. On remarque qu'il n'a pas un grand changement de température pendant la journée d'où la courbe du graphe est presque stable, d'où l'utilisation d'un système de chauffage n'est pas nécessaire. La chaleur peut être produite lors des activités diurnes comme la cuisson.

### V.11.2.4. Résultats des mesures in situ du quatrième cas d'étude :

Les résultats des mesures sur terrain de températures, d'humidité relative et de vitesse de l'air du quatrième cas d'étude durant la journée du 12 février 2019 sont montrés dans la figure V.32 et le tableau V.44.

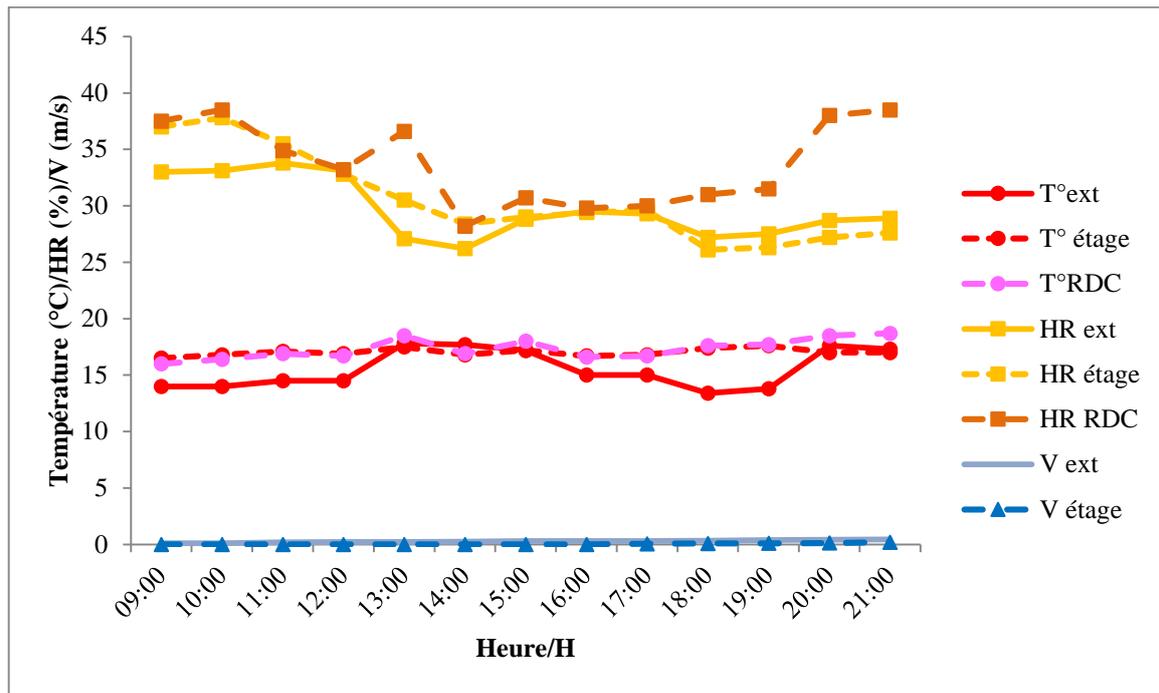


Figure V.32 : Variation de température, humidité relative et vitesse de l'air du quatrième cas d'étude durant la période d'investigation hivernale

Tableau V.44 : Température moyenne radiante des parois des de la chambre d'étage du quatrième cas d'étude

Heure/T°	Ts1 (toit)	Ts2 (sol)	Ts3	Ts4	Ts5	Ts6
9:00	17.8	19.4	19.2	19.8	19.6	19.4
12 :00	18	19.2	19.1	19.6	19.3	19
14 :00	17.9	18.9	18.8	19.4	19	18.6
15 :00	17.9	19.2	19.1	19.3	19.2	18.9
16 :00	17.8	19.3	18.9	19.4	19.1	18.9
17 :00	17.9	18.9	18.9	18.8	18.9	18.8
18 :00	17.7	18.8	18.6	19.2	19.1	18.6
19 :00	18.1	19.2	19.1	19.4	19.1	18.9
20 :00	17.8	18.9	18.9	19.3	19.1	18.8
21 :00	18.1	19.1	19.2	19.4	19.1	18.8

On remarque que la courbe de température ambiante à l'intérieur de l'espace de l'étage est presque stable durant le jour de 12 février d'où la température de l'air se varie entre 16 et 17.5°C pendant 24 heures. D'un autre côté, la température ambiante extérieure pendant ces heures se varie entre 14°C et 18°C pendant le jour de 9 :00 du matin à 21 :00 du soir. L'isolation thermique de la maison à travers l'enveloppe construite en matériaux locaux

permet de garantir une isolation entre l'intérieur et l'extérieur. On peut dire que les valeurs de température et d'humidité relative sont tièdes et supportables en comparant avec la plage du confort thermique dans ce type de climat qui se varie entre 18 et 25°C. Le besoin de chauffage est nécessaire parfois dans quelques heures de la journée et quelques heures de la nuit lorsque les valeurs de températures dans la plupart des heures sont acceptables et supportable que les habitants peuvent les résister. On a remarqué que les mozabites n'utilisent pas des systèmes de chauffage pendant la saison hivernale sauf dans quelques heures des journées et dans quelques jours de pointe de sous-chauffe. Les charges de chauffage remarquées dans les factures des maisons ksouriennes de Béni Isguen sont très faibles en comparant par rapport aux charges de climatisation. (Voir Annexe 05 pour plus de détails sur les résultats des mesures in situ de la période hivernale par FI 84FD).

### Conclusion :

Un travail d'investigation qui correspond à des mesures in situ dans les habitations mozabites du Ksar de Béni Isguen est traité, analysé, discuté dans ce chapitre.

Les résultats des mesures de la période de surchauffe indiquent que les valeurs de températures de l'air ambiant, sont élevées durant la journée et qui dépassent les limites de confort de la zone chaude et aride. Pour cela, les habitants ferment le chebek durant la journée pour éviter la pénétration des rayons solaires intenses de la journée après le lever du soleil. Au matin, la température de l'air ambiant intérieur égale une valeur au-dessus de la valeur de température extérieure et qui dépasse les 35°C. Elle commence à augmenter progressivement jusqu'elle dépasse les 48°C à l'extérieur et elle dépasse les 37°C à l'intérieur des chambres de l'étage des habitations. Ces valeurs sont élevées et dépassent les valeurs comprises dans la plage du confort optimal. D'autre part, les valeurs d'humidité relative se diminuent quand les températures sont élevées, cela entraîne un état d'inconfort à l'intérieur des habitations. Après-midi, les températures descendent avec quelques degrés et les valeurs d'humidité relative s'augmentent avec quelques pourcentages mais elles sont toujours hors de la plage de confort optimal. Dans la nuit, même les valeurs des températures continuent à descendre avec quelques degrés et l'humidité relative s'augmente avec quelques pourcentages mais ces valeurs restent toujours insupportables. Pour cela, les habitants occupent la terrasse dans la nuit pour se dormir parce que les températures enregistrées dans l'étage sont très élevées et ne permettent pas à occuper les chambres. Également, les habitants ouvrent le chebek dans la nuit pour aérer les espaces intérieurs de l'étage et les espaces du rez-de-chaussée.

Dans la période hivernale, On peut dire que les valeurs de température sont stables dans les maisons qui se situent dans l'ancien tissu du Ksar de Béni Isguen. De plus, les valeurs de température sont incluses dans la plage de confort ou elles sont très proches de celle-ci. Au niveau des toitures, on remarque également une isolation thermique même si elle est petite puisque ces toitures sont construites de troncs de palmiers et de Timchemt avec une capacité d'isolation thermique considérable. Parfois, on remarque à plusieurs reprises qu'il n'y a pas de différenciation de la valeur de température entre l'intérieur et l'extérieur. On remarque parfois que la température intérieure est supérieure à la température extérieure, d'où la nécessité d'utiliser le chauffage, surtout la nuit. La comparaison entre les résultats des mesures estivales et hivernale nous montre clairement qu'il y'a de problème d'inconfort thermique durant la période de surchauffe avec un confort acceptable et adaptable durant la période de sous-chauffe. **Bien que l'architecture traditionnelle a offert beaucoup de solutions, pratiques et stratégies passives pour s'adapter avec l'environnement extérieur mais on a trouvé des problèmes de confort thermique, surtout en période estivale.**

**Chapitre VI:**  
**Optimisation de la performance thermique**  
**de la toiture :**  
**Simulation numérique**

### Introduction :

Dans les villes traditionnelles des régions à climat chaud et aride, les toitures sont les surfaces les plus exposées aux rayons solaires intenses. De plus, la consommation énergétique est plus élevée dans ces régions à cause de la haute température excessive extérieure. Pour cela, l'application de solutions passives est beaucoup plus demandée dernièrement pour réduire la consommation énergétique.

Après le travail de mesures in situ, un travail de simulation thermique avec le logiciel TRNSYS V16 a été développé pour valider les résultats des mesures réelles dans les habitations ksouriennes et l'évaluation d'un nouveau modèle de toit par la suite pour optimiser le confort thermique. La toiture double peau est une solution de refroidissement passif efficace pour réduire le gain de chaleur testée dans quelques régions du monde. Cependant, elle n'est pas testée en Algérie. De plus, il est connu que le revêtement des terrasses avec la couleur blanche est une solution populaire pour optimiser le confort thermique intérieur, surtout dans les régions chaudes.

Le travail présenté dans ce chapitre correspond à l'étude et l'optimisation de la performance thermique et énergétique des toitures dans les habitations du Ksar de Béni Isguen dans la vallée du M'Zab dans le sud de l'Algérie. L'objectif est l'optimisation de la performance thermique des toitures par la modélisation d'une toiture double peau couplée avec une peinture thermo réfléchissante. Pour tester la performance thermique de ce modèle, une simulation dynamique thermo énergétique a été réalisée à l'aide du système expert TRNSYS.

## VI.1. La simulation numérique :

### VI.1.1. TRNSYS Simulation Studio :

C'est un logiciel spécialisé dans la simulation thermique dynamique appliquée au bâtiment. Il constitue une référence depuis des années à l'échelle mondiale. Il a été créé dans les années 70 par l'université du Wisconsin (USA) et développé dans les années 90 par un comité de développement international le CSTB (Raffenel, 2008).

### VI.1.2. Description du logiciel TRNSYS :

Il est composé d'une liste de sous-programmes écrits en Fortran constituant une bibliothèque de plusieurs modules ou types. Chaque type est un objet informatique indépendant : il correspond à un élément du système thermique et se compose d'entrées, de sorties et de paramètres.

Afin de définir le bâtiment, on introduit toutes ses caractéristiques dans TRNBuild. Cette interface permet de décrire tous les composants d'un bâtiment multizones utilisant le « Type 56 ». En fait, nous spécifions la composition des murs, leurs orientations respectives, les surfaces vitrées et les types de vitrages utilisés. Il est nécessaire aussi de définir les conditions initiales de la zone étudiée (la température intérieure et l'humidité relative), les paramètres de contrôle du chauffage et du rafraîchissement ainsi que les apports gratuits. Les différents niveaux du bâtiment sont reconstitués par découpage en zones thermiquement homogènes, ainsi le bâtiment 1 est devisé en 8 zones thermiques et la partie L en 14 zones thermiques. Les caractéristiques des murs, fenêtres, portes, planchers et plafonds (dimensions, matériaux, orientation, etc.) dans chaque zone ont été obtenues à partir des dessins d'architecture. Le modèle de bâtiments multizones par le logiciel TRNSYS permet à l'utilisateur de construire des types de murs à partir de couches, dans lesquels chaque couche est un matériau unique. Les propriétés thermo physiques de chaque couche (conductivité thermique, densité, chaleur spécifique, épaisseur, etc.) sont entrées par l'utilisateur ou choisies à partir d'une bibliothèque existante (Guechhati, Moussaoui, Mezrhab, & Mezrhab, 2010a).

### VI.2. Justification de choix de la méthode d'investigation par simulation dynamique :

Les mesures in situ des paramètres microclimatiques ont pour but de quantifier et de qualifier l'état de confort thermique à l'intérieur des maisons traditionnelles « Mozabites ». L'objectif est d'identifier le problème de la surchauffe dans les maisons traditionnelles et de mettre la lumière sur la problématique des toitures dans ce type de maisons. Ensuite, le travail de simulation numérique par le logiciel TRNSYS apparaît adéquat à notre recherche puisque nous avons pu valider les résultats des mesures et obtenir des résultats de températures et de

consommation d'énergie. La méthode d'évaluation qui correspond aux mesures in situ et à la simulation thermique dans les maisons traditionnelles du Ksar de Béni Isguen apparaît récente et adéquate à notre étude. La simulation numérique par TRNSYS est considérée comme un outil puissant pour faire les bons choix pour optimiser l'efficacité énergétique des bâtiments. TRNBuild est également utilisé pour modifier les caractéristiques du bâtiment, où à chaque fois nous avons changé les entrées telles que l'épaisseur de la lame d'air entre les deux couches du toit. Changer l'épaisseur de la lame d'air qui agit comme un très bon isolant thermique et ralentit le transfert de chaleur du toit secondaire vers le toit principal permet d'évaluer à chaque fois les résultats adéquats. De plus, augmenter les propriétés thermiques de la peinture avec un albédo de 0,8 sert à améliorer l'efficacité énergétique du bâtiment Mozabit (Figure VI.1).

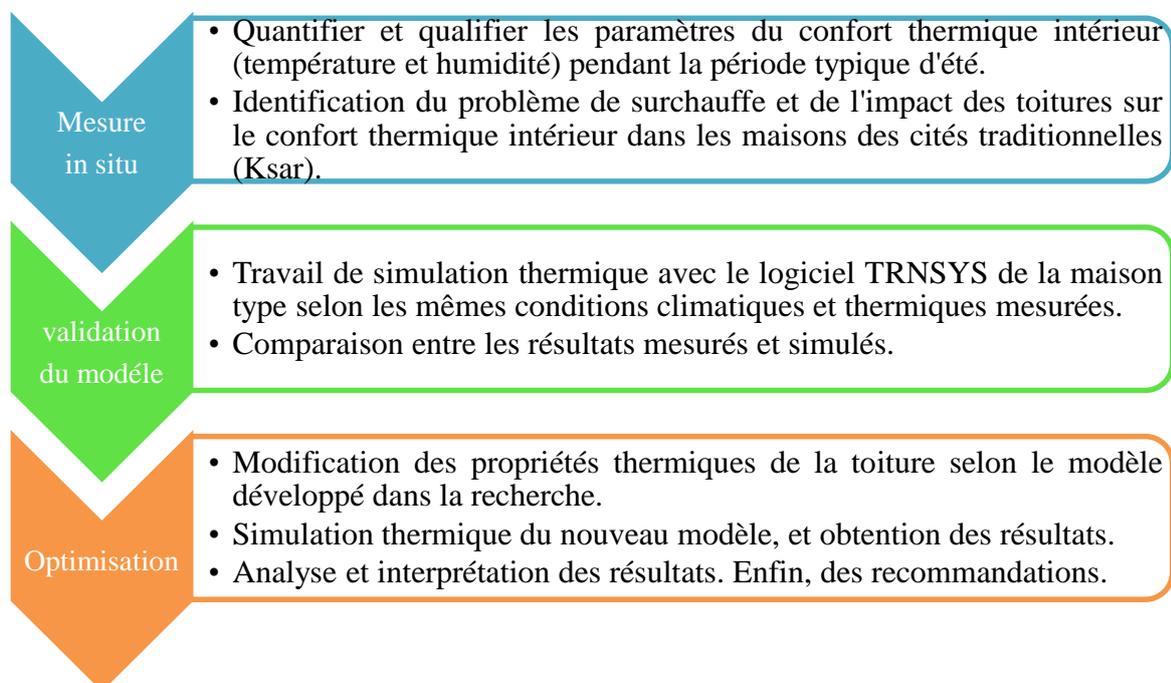


Figure VI.1: Résumé de méthode d'investigation utilisé dans la recherche (Auteur, 2021)

### VI.3. Simulation numérique par le logiciel TRNSYS :

Afin de définir le bâtiment, nous introduisons toutes ses caractéristiques dans TRNBuild. Cette interface permet de décrire l'ensemble des composants d'un bâtiment multizone utilisant le Type 56. En effet, on précise la composition des murs, leurs orientations respectives, les surfaces vitrées, la composition du plancher et du toit. Le modèle de construction multizone TRNSYS permet à l'utilisateur de construire des types de murs à partir de couches, dans lesquelles chaque couche est un matériau unique. Les propriétés thermo physiques de chaque couche (conductivité thermique, densité, chaleur spécifique, épaisseur, etc.) sont renseignées par l'utilisateur ou choisies dans une bibliothèque existante (Guechhati,

Moussaoui, Mezrhab, & Mezrhab, 2010b; Lamrhari, 2018). Ensuite, pour valider nos résultats de mesure in situ, nous avons développé un modèle avec TRNSYS V.16 de la maison mesurée avec les mêmes caractéristiques existantes. La figure VI.2 illustre une vue générale de la méthodologie d'analyse numérique.

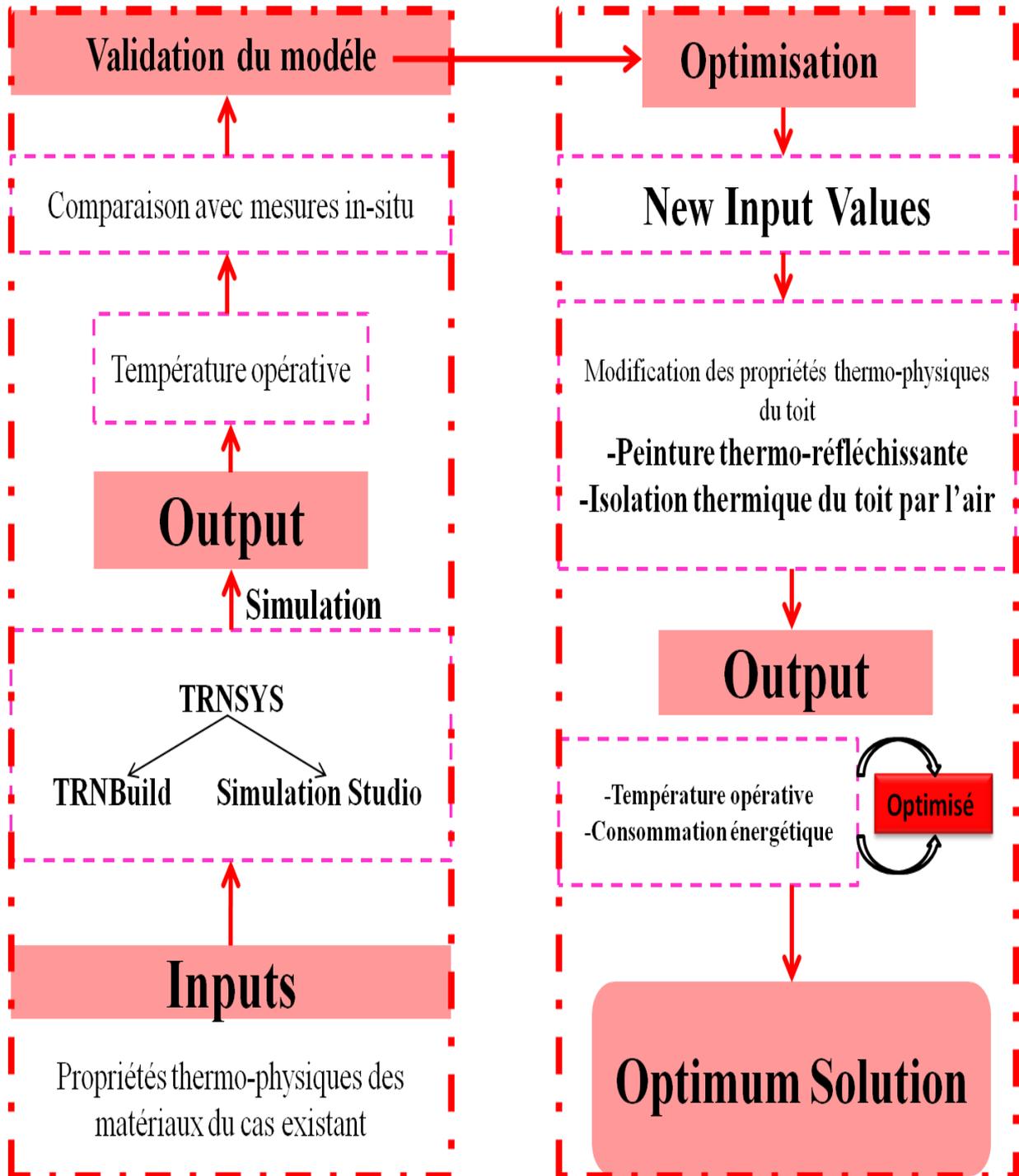


Figure VI.2 : Schéma de principe de la méthode de simulation dynamique (Auteur, 2021)  
 Les étapes de simulation thermo énergétique avec TRNSYS V.16 sont détaillées dans l'annexe 06.

### VI.3.1. Les scénarios :

Deux scénarios ont été développés par la simulation numérique. Pour le premier scénario, il concerne la simulation de l'état existant (Figure VI.3). L'objectif est de valider les résultats des mesures in situ. Dans le deuxième scénario, on a proposé une nouvelle conception d'une toiture double peau couplée avec une peinture thermo réfléchissante (Figure VI.4).

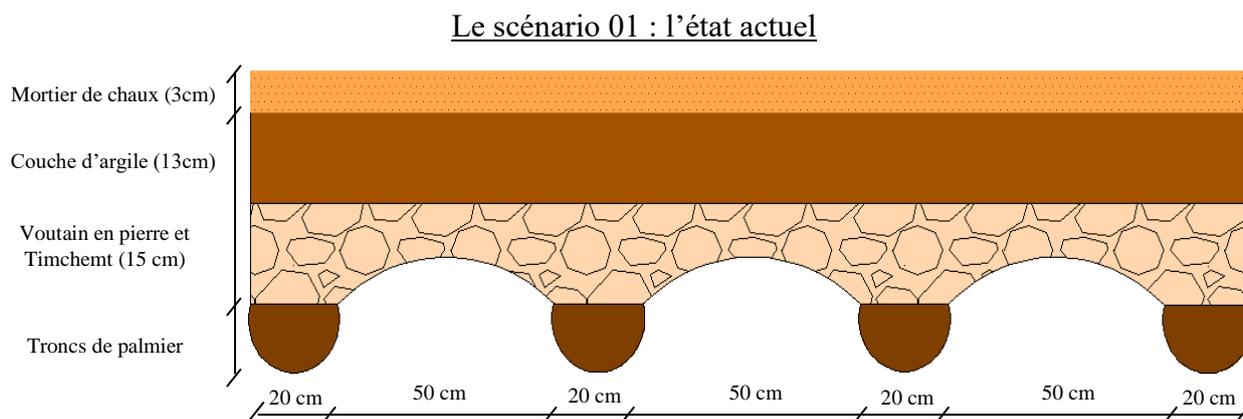


Figure VI.3 : Schéma représentatif de toiture existante

Le scénario 02 : toiture double-peau combinée à une peinture thermo réfléchissante

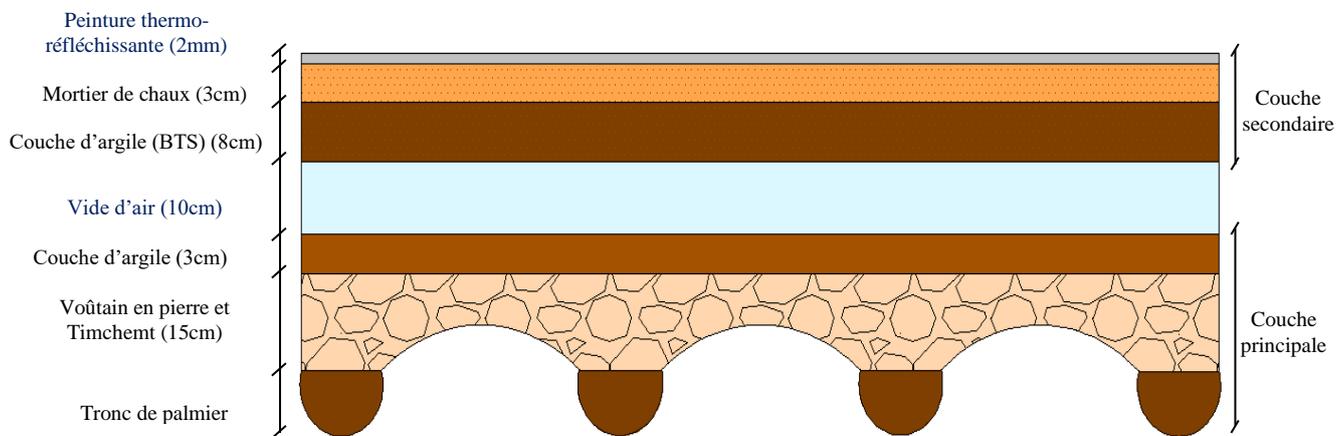


Figure VI.4 : Schéma représentant une toiture double peau combinée à une peinture thermo réfléchissante

Pour la simulation dynamique du premier scénario, une série de données a été saisie à travers TRNBuild. Les tableaux VI.1, VI.2 et VI.3 illustrent la composition des murs, du sol et de toit de la maison respectivement avec les épaisseurs de chaque couche et les propriétés thermiques. Les murs ont une épaisseur de 40 cm de l'extérieur et de 30 cm de l'intérieur, Le sol a une épaisseur totale de 30 cm et le toit a une épaisseur de 40 cm.

Tableau VI.1 : Les caractéristiques thermiques des matériaux des murs du modèle simulé (DTR3.2, 2011)

couche / propriétés	Conductivité thermique $\lambda$ (W/m.K)	Capacité thermique (J/kg. °C)	Densité D (kg/m <sup>3</sup> )	Épaisseur (cm)
Pierre dures	2.4	936	2350 à 2580	38
Mortier de chaux	0.87	1080	1800	À coller
Sable (mélange avec la chaux et l'eau)	0.6	823	1300	/
La chaux	0.87	1080	1080	0.02

Tableau VI.2 : Les caractéristiques thermiques des matériaux du sol du modèle simulé (DTR3.2, 2011)

couches / propriétés	Conductivité thermique $\lambda$ (W/m.K)	Capacité thermique (J/kg. °C)	Densité D (kg/m <sup>3</sup> )	Épaisseur (cm)
Tronc de palmier	0.122(ALMI, 2018)	/	850	Diamètre entre 15 à
Pierre plates		936	1840 à 2340	20
Mortier de Timchemt	1.4	1080	100 to 1300	13
Argiles (terre sèche)	0.75			collage
	1.15	936	1700 à 2000	10
Mortier de chaux	0.87	1080	1800	5

Tableau VI.3 : Les caractéristiques thermiques des matériaux de toiture du modèle simulé (DTR3.2, 2011)

couches / propriétés	Conductivité thermique $\lambda$ (W/m.K)	Capacité thermique (J/kg. °C)	Densité D (kg/m <sup>3</sup> )	Épaisseur (cm)
Tronc de palmier	0.08 (0.122)		850	15 to 20
Pierre	1.4	936	1840 à 2340	15
Mortier de Timchemt	0.7	1080	100 to 1300	collage
Couche de terre	1.15	936	1700 à 2000	14
La chaux	0.87	1080	1800	8

La simulation réalisée pour la chambre à l'étage a été élaborée sur une période d'un an. Le logiciel TRNSYS calcule la température opérative et donne les besoins de consommation d'énergie pour une année.  $T^{\circ} \text{opérative} = T_a + T_{mr} / 2$ .

Quand  $T_a$  : est la température de l'air ambiant et  $T_{mr}$  : est la température moyenne radiante. Ensuite pour le deuxième scénario, le tableau VI.4 illustre les caractéristiques thermiques des matériaux utilisés.

Tableau VI.4 : Caractéristiques thermiques des matériaux de toiture améliorée du modèle simulé

Couche/propriétés	Couche	Épaisseur (cm)	Valeurs de transmission thermique U ( $W m^{-2} K^{-1}$ )
Toit	Tronc de palmier	15 à 20	0.457
	Pierre	15	
	Mortier de Timchemt	Collage	
	Air gap: vide d'air	10	
	Couche de terre (BTS)	14	
	Chaux	8	
Peinture thermo réfléchissante			Coefficient de réflexion solaire : 0.8
			Coefficient d'absorption : 0.2

### VI.3.2. Déroulement et détails sur la simulation numérique :

La simulation thermique est une approche appropriée pour valider nos travaux de mesure in situ et pour évaluer les solutions proposées et développées. TRNSYS est un logiciel spécialisé dans la simulation thermique dynamique appliquée aux bâtiments. Alors ;

-Après l'attribution des mesures in situ, un travail de simulation thermique a été développé pour valider le modèle.

-La simulation numérique par le logiciel TRNSYS a été réalisée dans les mêmes conditions climatiques pendant la même période mesurée (28, 29 et 30 juillet 2018).

-La simulation a commencé par introduire les caractéristiques et les propriétés de la maison étudiée dans TRNBuild (Figure VI.5). Les propriétés thermiques des matériaux qui composent les différentes couches des murs, du sol et du toit sont présentées dans les tableaux VI.1, VI.2 et VI.3.

- Le fichier climatique du Ksar de Béni Isguen est intégré par « Meteonorm V7.2 ».
- Apporter les résultats de la simulation thermique de la température ambiante intérieure et de la température opérative sous forme de graphe.
- Introduire les graphes des résultats de température ambiante et opérative mesurées et simulées pendant la période d'étude (juillet 2018).
- La comparaison entre les résultats simulés et mesurés commence par :  
 Comparaison entre les données climatiques extérieures du fichier météo et les mesures de température ambiante extérieure. Ensuite, le calcul du « pourcentage d'erreur » pour faire ressortir l'erreur entre les résultats mesurés et simulés.
- Puis, après la validation du modèle, un travail de simulation thermique et énergétique a été développé pour évaluer les performances thermiques et énergétiques de la nouvelle contribution du système de toiture.
- Enfin, l'analyse, l'interprétation, l'explication et la justification des résultats obtenus.

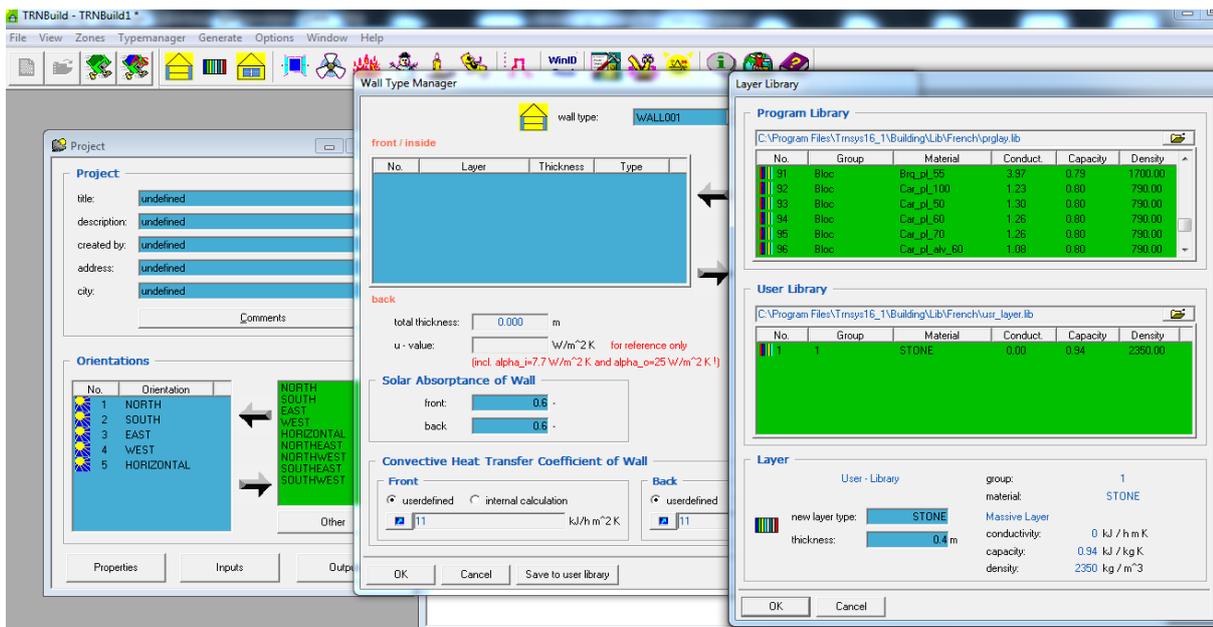


Figure VI.5 : Interface du TRNBuild (TRNSYS V.16)

### VI.3.3. Les conditions aux limites (The boundary conditions) :

La simulation sous "TRNSYS" a été réalisée grâce à l'utilisation de "Type 56" "MultiZone Building". Le "Type 56" a été utilisé pour la simulation numérique en tenant compte des différents facteurs thermiques tels que les gains convectifs de surface et d'infiltration, les gains de ventilation, les gains de convection interne, etc., (guide TRNSYS). Les détails des modèles mathématiques du flux de chaleur convectif dans le « nœud Air » (Airnode) sont définis dans le "Type 56" du logiciel TRNSYS par l'équation suivante :

$$Q_i = Q_{surf} + Q_{inf} + Q_{vent} + Q_{g.c.i} + Q_{cplg,i} + Q_{solair,i} + Q_{ISHCCI,i} \text{ (DTR, 2019)}$$

Où :

$Q_{surf,i}$  : Gain convectif des surfaces (murs, sol et toit);

$Q_{inf,i}$  : Gains d'infiltration (flux d'air extérieur uniquement);

$Q_{vent,i}$  : Gains d'aération;

$Q_{g,c,i}$  : Gains de convection interne (par les personnes, les équipements, l'éclairage, les radiateurs, etc.);

$Q_{cplg,i}$  : Les gains dus au débit d'air (connexion) de l'Airnode (I) ou à la condition aux limites;

$Q_{solar,i}$  : La fraction de rayonnement solaire pénétrant dans un nœud d'air par les fenêtres extérieures ;

$Q_{ISHC}$  : Rayonnement solaire absorbé sur tous les dispositifs d'ombrage internes de la zone et transféré directement sous forme de gain convectif à l'air intérieur.

Il est à noter :

- Le fichier climatique du Ksar de Béni Isguen a été généré par le logiciel « Meteonorm V7.2 » sous le format « TM2 » pour le « Type 15-2 » « Données météorologiques ».
- Pour estimer les besoins énergétiques, un seuil de température a été déterminé pour le fonctionnement des équipements, qui est de 20 °C pour le chauffage et de 27 °C pour le refroidissement (Laafer, Semmar, Hamid, & Bourouis, 2021). Cet intervalle se situe dans la zone de confort thermique telle que définie dans les recherches de (Lavoye, Boeuf, & Thellier, 2015). Dans la même optique, la norme (NF EN 15251) a donné des plages de température en fonction du type de construction.

TRNSYS est divisé en deux parties principales :

- TRNBuild : Saisir les caractéristiques de la maison (zones, murs, apports intérieurs, taux de ventilation). Il génère un fichier "point.bui".
- Simulation Studio : C'est l'interface de calcul. Il permet de modéliser l'environnement du bâtiment (climat, apport de chaleurs solaires et autres données d'entrée) et d'obtenir les résultats de simulation. Il génère un fichier ".tpf".

Une série de simulations thermiques dynamiques ont été réalisées dans cette recherche.

- Simulation thermique du modèle existant pour valider les mesures in situ durant la même période investiguée les 28, 29 et 30 juillet 2018 (journées typiques de saison chaude). Lorsque les mesures in situ ont été faites dans les espaces de l'étage, les simulations ont été réalisées sur le même espace.
- Simulation thermique après modification et amélioration des propriétés thermiques de la toiture pour évaluer le nouvel apport sur le plan thermique et énergétique.

- Les espaces sont divisés en zones thermiques homogènes selon les besoins de refroidissement en été (et selon les besoins de chauffage en hiver). Dans ce cas, l'espace étudié a besoin de refroidissement en été.
- TRNSYS utilisé pour simuler les températures intérieures et la demande d'énergie à l'intérieur.
- Le cas étudié se situe à l'intérieur du tissu urbain compact du Ksar de Béni Isguen dans la vallée du M'Zab en Algérie où les coordonnées sont : 32° 17' N, 3° 25'E.
- L'espace choisi pour réaliser les simulations thermiques est l'espace à l'étage comme montré dans les plans de la maison.

**Justification :** La pièce à l'étage est choisie lorsque l'objectif de ce travail est d'étudier l'impact de la toiture sur les températures intérieures et la consommation d'énergie. La pièce à l'étage est située sous le toit, ce qui la rend plus influencée par les effets convectifs et radiatifs du toit que les pièces des autres niveaux (rez-de-chaussée) en raison du gain de chaleur supplémentaire provenant du toit.

- Superficie de la maison : 77.20 m<sup>2</sup>. La pièce simulée a une surface de 10 m<sup>2</sup>, et les hauteurs des murs sont 3 m.
- La maison est orientée vers le nord-est. elle est composée d'un sous-sol, d'un rez-de-chaussée et d'un premier étage avec une terrasse accessible comme décrite dans la section étude de cas du document.
- Les températures extérieures pendant les différentes heures des journées d'enquête de 28, 29 et 30 juillet 2018 avec les humidités relatives extérieures sont indiquées dans les tableaux V.1 et V.5 respectivement dans le chapitre précédent. Ces valeurs sont comparées aux valeurs du fichier météo du Ksar.
- Les bâtiments voisins ont été inclus dans TRNSYS.
- Les flux de rayonnement solaire et le potentiel d'éclairage naturel pour la zone thermique de l'espace simulé ont également été ajustés dans le modèle de bâtiment.
- Tout d'abord, la condition microclimatique (Meteo-file) comprend les composantes d'irradiation et le flux de vent a été intégré via le logiciel "METEONORM" au format Tm2.
- Deuxièmement, les conditions thermiques, les apports solaires passifs, les charges de refroidissement (et de chauffage) sont étudiées quantitativement pour la pièce.
- Conditions initiales :  
 $T_{ex}(\text{weather file})$ ;  $T_{\text{room left}} 28^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{neighbor right}} 28^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\text{set thermostat}} 28^{\circ}\text{C}$ ; Relative humidity 10% ( weather file); Air speed 0,2m/s.

- Conditions aux limites : Régime permanent ; la vitesse de l'air est constante ; Les surfaces sont homogènes et opaques ; Milieu isotrope.

➤ Alors :

#### 1. Description de l'espace simulé (la pièce à l'étage) :

- Emplacement : 1er étage (sous le toit)
- Utilisation : espace couchage et aire de repos (espace nuit).
- Surface : 10 m<sup>2</sup>
- Orientation : Nord-Est
- Orientation des masques:
  - Mur nord-ouest et mur nord-est : murs mitoyens avec voisinage
  - Mur sud-est : donnant sur Ikomar (galerie du patio)
  - Mur sud-ouest : mur attenant à la pièce voisine (appelé localement Laâli)

2. Définition des orientations : pour les orientations des murs et de l'emplacement ; il n'y a pas de façade exposée directement à l'extérieur et il n'y a pas d'ouverture donnant vers l'extérieur, ce qui fait que la toiture est la seule surface en contact avec les conditions climatiques extérieures. Par conséquent, la pièce simulée a deux murs voisins et deux murs adjacents faisant face à l'intérieur.

#### 3. Définir les bibliothèques (TYPES MANAGERS):

- Caractéristiques des murs avec les matériaux qui composent chaque couche. Les matériaux sont définis par la conductivité thermique, la capacité et la densité thermique. Les propriétés thermiques des parois verticales, du plancher et de la composition du toit sont données dans les tableaux VI.1, VI.2 et VI.3 du chapitre. Les propriétés de la composition du toit après amélioration sont présentées dans le tableau VI.4.

Justification :

Pour chaque mur, on définit la structure du mur avec les différentes couches qui les composent, avec les propriétés physiques et thermiques de chaque matériau et l'épaisseur, en indiquant le sens de chaque couche : face "avant" (vers l'intérieur), et face "arrière" (côté). Pour chaque couche ; l'épaisseur et la valeur U (W/m<sup>2</sup>K) sont insérées.

- Définition des caractéristiques des huisseries :

La pièce simulée n'a pas de fenêtre donnant sur l'extérieur. Les deux petites fenêtres donnant sur la cour. La surface de chacune est 0.17m<sup>2</sup> (0.59\*0.29m). Le type de

vitrage est simple avec la valeur « U-value » de  $5.74 \text{ W/m}^2\text{K}$  et g-Value (solar factor) est 0.87%.

De plus, la surface de la fenêtre opaque est définie par rapport à la surface totale de la fenêtre. La surface opaque est de  $0.02 \text{ m}^2$ .

- Définir les types d'infiltration : l'échange d'air d'infiltration défini est  $0.5 \text{ Vol/h}$ . Justification : en été, pendant la nuit après le coucher du soleil à partir de 20h00, on ouvre le Chebek (couverture sur le patio appelée localement Tigharghart) et on ouvre les portes et les fenêtres de la chambre.
- Définir le type de ventilation : le taux de renouvellement d'air pour la ventilation est  $0.6 \text{ Vol/h}$ . Lorsque le "Chebek" s'ouvre la nuit, un taux de renouvellement d'air de  $0.6 \text{ Vol/h}$  est créé. La nuit, l'ouverture et la porte de la chambre s'ouvrent, mais la ventilation ne suffit pas. La ventilation ne se fait pas directement au local, lorsqu'il existe un espace intermédiaire entre la cour et le local ; cela rend le taux d'échange d'air faible et les températures diurnes restent élevées (Plus de  $35^\circ\text{C}$ ) et les vents (ne dépassant pas  $0,2 \text{ m/s}$ ) restent très limités. De plus, la nuit, les surfaces des murs et du toit commencent à libérer la chaleur accumulée pendant les heures de surchauffe de la journée, ce qui rend la température de la pièce élevée et au-delà de la plage de confort. (Le Chebek est fermé pendant la journée, aux heures de surchauffe, pour éviter une surchauffe excessive du patio en été. La nuit (vers 21h00), les habitants ouvrent le Chebek) (Figure VI.6).

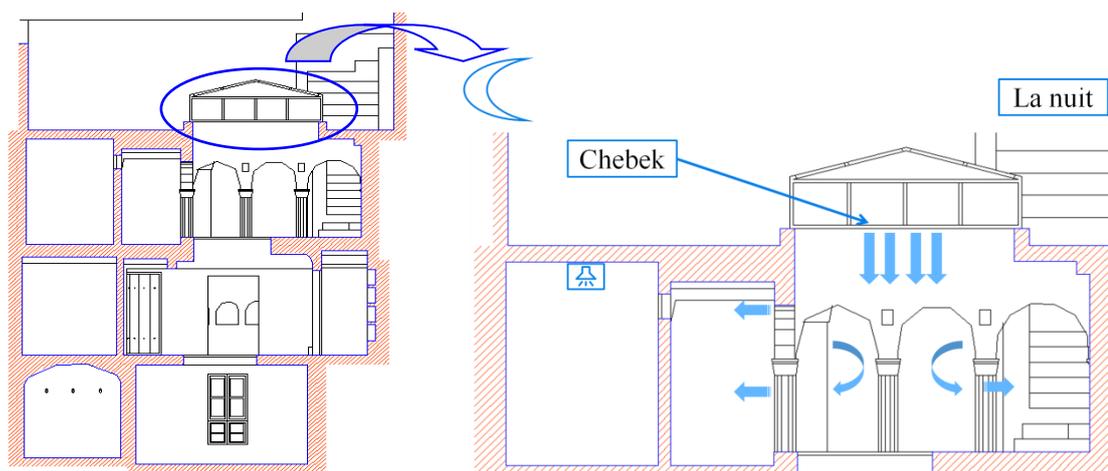


Figure VI.6 : Comportement thermique pendant la nuit, lorsque le Chebek est ouvert

- Définir le type de refroidissement : pour ce paramètre, on met la température de consigne à  $28^\circ\text{C}$  (en été). Cette valeur est idéale dans le contexte étudié, lorsque les stratégies de refroidissement tentent d'abaisser la température pendant la saison chaude jusqu'à ce qu'elle atteigne cette valeur. Cette valeur est considérée comme limite

supérieure de confort pendant la saison chaude dans le cas du Ksar étudié au climat chaud et sec (en hiver, la température de consigne est de 21°C).

- Types de chauffage : En hiver, la température de consigne est de 21°C en journée. Lorsque les systèmes de chauffage essaient d'atteindre cette valeur pour assurer une température optimale. En été, la valeur 0 est réglée lorsqu'il est en dehors de la période de chauffage. (La valeur 0 lorsque le chauffage se fait directement sur l'air de la zone).
- Définir les gains internes : entrer les gains internes (INPUT) qui sont générés dans la zone étudiée. Par exemple : nombre de personnes : 1/ pièce, éclairage artificiel.
- Le rayonnement solaire global quotidien sur le plan horizontal est estimé à 22kWh/m<sup>2</sup> et pour le plan vertical sud-est inférieur à 11kWh/m<sup>2</sup> en été à Béni Isguen. En hiver, le rayonnement solaire global quotidien sur le plan horizontal dépasse la valeur de 16kWh/m<sup>2</sup> et pour le plan vertical sud dépasse 19kWh/m<sup>2</sup>. Le tableau VI.5 représente les paramètres généraux pour la simulation. Le tableau VI.6 illustre les épaisseurs des couches, composition des parois et les valeurs U pour l'enveloppe de l'espace simulé et le tableau VI.7 montre les variables de cas d'étude paramétrique.

Tableau VI.5 : Paramètres généraux pour les simulations avec TRNSYS

	Ville	Ksar de Béni Isguen (32° 17' N, 3° 25' E)
Paramètres de simulation	*Climat	Chaud et sec
	Date de simulation	28, 29 et 30 juillet 2018
	Temps de simulation	De 6h00 à 00h00
	Espace simulé	Chambre à l'étage de maison traditionnelle : contact avec le toit (espace sous le toit)
	Période d'occupation (OP) (Utilisation)	Espace nuit + aire de repos
Modèle de configuration	Orientation	Nord-est
	Orientation du masque (orientation des différents murs)	-Mur Nord-ouest et mur nord-est : mur mitoyen avec voisinage - Mur Sud-est : donnant sur Ikomar (Galerie Patio) -Mur sud-ouest : donnant sur

la pièce voisine (appelée localement Laâli)

Inertie thermique

Construction massive

\*Les données climatiques du Ksar de Béni Isguen sont fournies par « METEONORM 7.2 ».

Tableau VI.6 : Épaisseur de couche, composition des parois et valeurs U pour l'enveloppe de la pièce simulée

	Composition	Épaisseur (cm)	Valeurs de transmission thermique U (W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> )
Murs extérieurs (voisins)	Pierre dures	38	1.34
	Mortier de chaux	4	
	Sable (mélangé avec de la chaux et de l'eau)	2	
Murs intérieurs (adjacents)	Pierre dures	20	2.65
	Mortier de chaux	2	
	Sable (mélangé avec de la chaux et de l'eau)	2	
Sol	Tronc de palmier	15 à 20	0.57
	Pierre	13	
	Mortier de Timchemt (pour collage)	/	
	Terre (Terre sèche)		
Toit	Tronc de palmier	15 à 20	0.53
	Pierre	13	
	Mortier de Timchemt	/	
	Couche de terre	10	
	Chaux	5	

Tableau VI.7 : Variables du cas d'étude paramétrique utilisées pour les simulations TRNSYS

les fenêtres (donnant sur la galerie du patio)	Surface : 0.17 m <sup>2</sup> (0.59*0.29)	Type de vitrage : Simple Cadre : Area Frame/Window(%) 31.05	U-Value (W/m <sup>2</sup> K) 5.74 Absorption solaire 0.6
Infiltration	Renouvellement d'air de ventilation (Vol/h) 0.5	Température du flux d'air (°C) 28°C	Humidité relative du flux d'air (%) 30
Ventilation	Air exchange rate (Vol/h) 0.6	Température du flux d'air (°C) 28°C	Humidité relative du flux d'air (%) 30
Cooling types	Set temperature (°C) 28		
Heating types	Set temperature (°C) 21		
Gains interns	2 personnes : 75W / personne  Éclairage artificiel : 10W/m <sup>2</sup>	lumière fluorescente	

## VI.4. Résultats et discussion :

### VI.4.1. Validation des résultats mesurés :

La validation du modèle est une étape importante pour s'assurer que les données mesurées sont cohérentes avec les résultats simulés et pour assurer le calibrage des résultats de simulation. De plus, il est essentiel de s'assurer qu'il est efficace pendant des périodes plus longues que la période surveillée. Les valeurs d'incertitude ne doivent pas diverger (Pisello et al., 2013). Les valeurs d'une même variante (ex : température ambiante) doivent être cohérentes. Il faut détecter les écarts entre les données mesurées et les résultats simulés sur la période étudiée.

Selon des recherches récentes, les erreurs entre les valeurs des données mesurées et celles simulées sont déterminées par une différence en pourcentage entre ces données. Cette valeur fait référence à la moyenne des valeurs mesurées et simulées d'une même variante (Amraoui, Sriti, Di Turi, Ruggiero, & Kaihoul, 2021; Huerto-Cardenas et al., 2020). "Error Percentage" ne doit pas dépasser 5% pour calibrer correctement le modèle (Maile, Bazjanac, & Fischer, 2012).

$$\text{Error Percentage (\%)} = \left( \frac{\text{Measured value} - \text{Simulated value}}{\text{Measured value}} \right) \times 100$$

Par exemple :

- ✓ La température moyenne de l'air ambiant intérieur mesurée = 37,44°C ; et la valeur moyenne de la température simulée = 37,35°C ; puis après un calcul simple, on trouve que le pourcentage d'erreur = 0,24%.
- ✓ La température intérieure moyenne opérative mesurée = 37,90°C ; et la valeur moyenne de la température simulée = 37,70°C ; puis après un calcul simple, on trouve que le pourcentage d'erreur = 0,52%.

Les valeurs de "pourcentage d'erreur" de ces paramètres sont inférieures à 5 % (Maile et al., 2012).

En plus de cette vérification simple, la norme ASHRAE14–2002 propose des équations qui permettent de définir la fiabilité du modèle. À cet effet, l'équation de l'erreur de biais moyen normalisé (NMBE) (Normalized Mean Bias Error) et le coefficient de variation de l'erreur quadratique moyenne (CVRMSE) (Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error) qui peuvent être appliqués pour donner l'écart entre les valeurs globales simulées et mesurées sur la période étudiée. NMBE exprime la différence entre les valeurs globales simulées déviant de celles mesurées sur la période étudiée, et CVRMSE donne l'écart de la distribution du modèle par rapport à la distribution des données. Le modèle est considéré

comme calibré lorsque le NMBE est inférieur à  $\pm 10\%$  et le CVRMSE est inférieur à  $30\%$  (ASHRAE, 2002; Shittu et al., 2020).

$$\text{NMBE} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{(n-p) \cdot \bar{y}} \times 100$$

$$\text{CVRMSE} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{(n-p)}}}{\bar{y}} \times 100$$

Bien que :  $y_i$  est la mesure réelle pour la période  $i$ ,  $\hat{y}$  est la valeur simulée pour la période  $i$ ,  $\bar{y}$  est la mesure moyenne,  $n$  est le nombre de périodes mesurées et  $p = 1$  (ASHRAE, 2002; Haberl, Claridge, & Culp, 2005). La figure VI.7 montre les résultats de la simulation numérique du cas d'étude en comparant avec les résultats réellement mesurés.

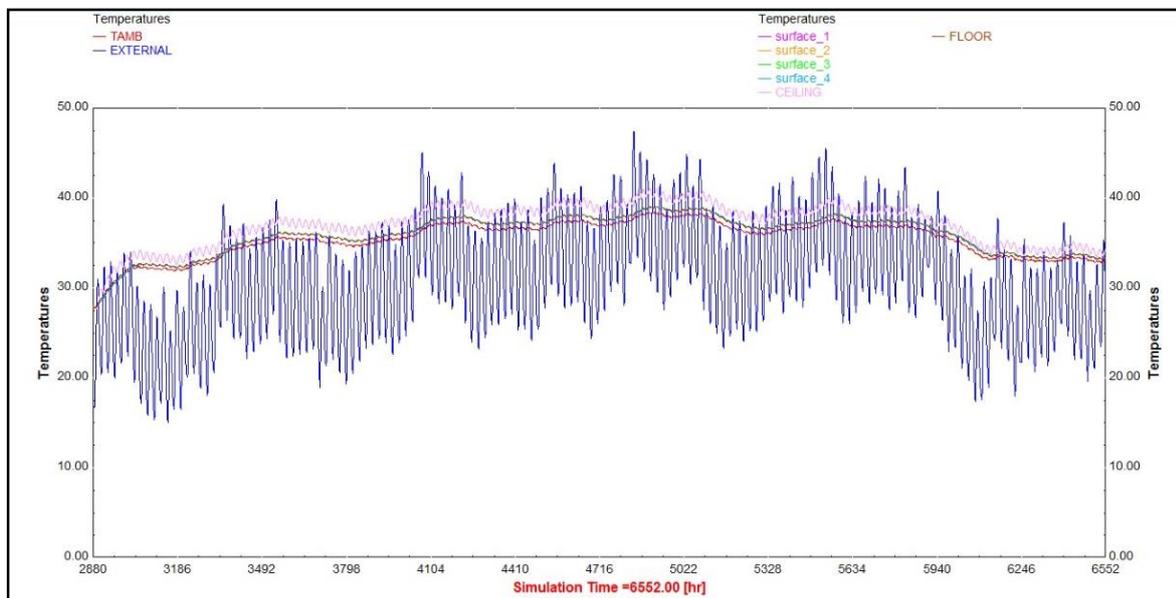


Figure VI.7 : Graphe de comparaison entre les températures mesurées et simulées (Validation du modèle existant)

Après traitement des résultats avec Excel, les graphes VI.8, VI.9 et VI.10 représentent les résultats du cas d'étude simulé de 28, 29 et 30 juillet respectivement.

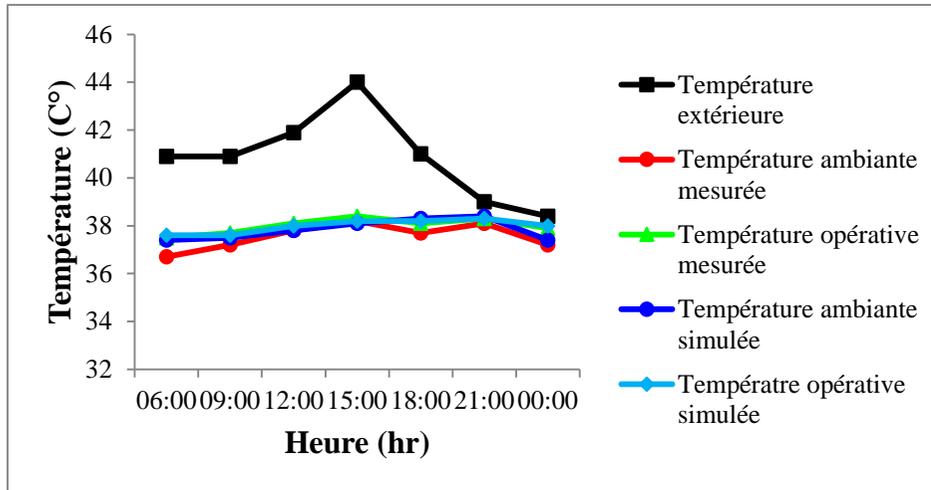


Figure VI.8 : Graphe de comparaison entre les résultats de températures mesurées et simulées pour le 28 juillet 2018

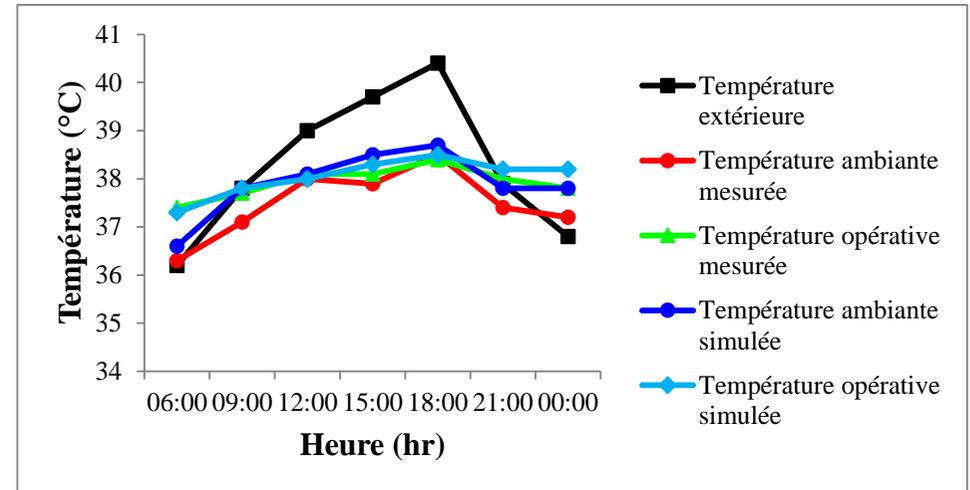


Figure VI.9 : Graphe de comparaison entre les résultats de températures mesurées et simulées pour le 29 juillet 2018

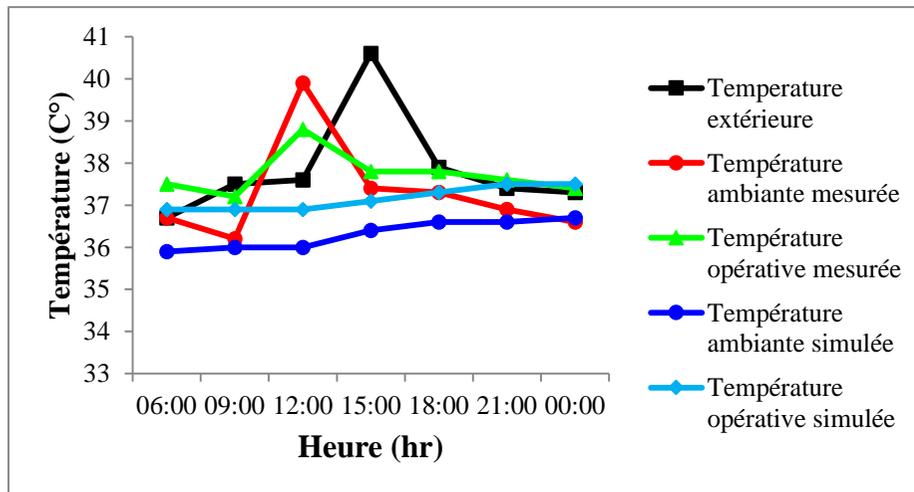


Figure VI.10: Graphe de comparaison entre les résultats de températures mesurées et simulées pour le 30 juillet 2018

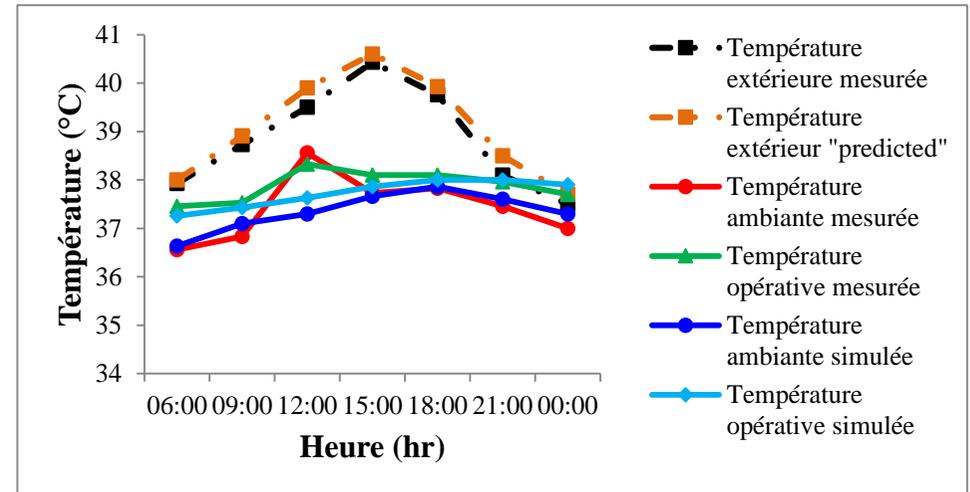


Figure VI.11 : Valeurs moyennes des résultats de température mesurée et simulée pour la période étudiée

Après traitement des résultats, le graphe VI.11 illustre les résultats de validation. Il représente les résultats des températures de l'air et des températures opératives simulées et mesurées pour le cas d'étude après traitement avec Excel pour la période étudiée.

En comparant la courbe de la température ambiante mesurée avec la température simulée, on constate une cohérence entre les deux courbes avec un écart de près de  $0,2^{\circ}\text{C}$ . Aussi, la comparaison entre les résultats de la température opérative simulée avec la température opérative mesurée montre une correspondance avec un écart de  $0,2^{\circ}\text{C}$  également. L'étalonnage (la calibration) a été effectué pour la période mesurée.

La différence entre les mesures réelles et les résultats prédits du modèle, pour la température de l'air ambiant intérieur et la température opérative en NMBE absolu de près de 0,25 %, 0,43 % respectivement. Ensuite, pour le CVRMSE, les valeurs après calcul sont respectivement de 1,13 % et 1,95 % pour la température de l'air intérieur et la température opérative.

Par conséquent, ces valeurs sont inférieures à la norme ASHRAE 14–2002 acceptable de  $\pm 10\%$  pour le coefficient NMBE (ASHRAE, 2002; Haberl et al., 2005) et 30% pour les coefficients CVRMSE. Donc, notre modèle est validé.

Le système expert TRNSYS V.16 a montré leur performance pour valider le modèle. Il présente un système expert adéquat et efficace pour tester le modèle proposé.

**VI.4.2. La toiture double peau couplée à une peinture thermo réfléchissante comme solution pour optimiser les performances thermiques et énergétique de la toiture :**

Les maisons traditionnelles du ksar de Béni Isguen sont conçues en utilisant des pratiques adaptatives traditionnelles avec des matériaux de construction locale pour répondre aux exigences de l'environnement sévère, mais des problèmes d'inconfort subsistent. La nuit, les températures étant très élevées surtout dans les chambres des étages supérieurs, les habitants du Ksar utilisent les terrasses pour dormir. Ces toitures sont épaisses, lourdes, ce qui nécessite une grande quantité de matière première (pierre, terre, chaux) et demande une main-d'œuvre importante pour réaliser ce type de toiture par rapport aux toitures conventionnelles. Pour cela, Le développement des solutions économiques, disponibles, faciles à appliquer et efficaces pour contrôler les problèmes de surchauffe à l'intérieur des maisons sont primordiales dans ce contexte. Sur la base de l'étude approfondie des toits des maisons du Ksar de Béni Isguen, et après une analyse détaillée de la littérature récente dans ce contexte,

un nouveau système de toiture a été développé et testé selon des méthodes scientifiques. Deux couches avec une lame d'air sont une solution qui a prouvé son efficacité.

Le vide d'air (Air gap) stable entre les deux couches est le meilleur isolant avec une très bonne conductivité thermique où  $\lambda = 0,047 \text{ (W/m.k)}$  par rapport à d'autres matériaux comme le terre avec  $\lambda = 1,15 \text{ (W/m.k)}$ . La culture de la conception d'un toit à double peau est nouvelle en Algérie et n'a jamais été examinée auparavant. D'autre part, avec l'émergence du concept "Cool Roof" et l'encouragement de l'utilisation des peintures réfléchissantes, plusieurs recherches ont été développées pour tester leur efficacité. Aussi, après avoir étudié la toiture et ses performances thermiques et l'état du confort thermique intérieur, il a été déduit que les valeurs de la température opérative sont en dehors de la plage de confort thermique optimal. A cet effet, un modèle de toiture double peau (DSR) couplée à une peinture thermo réfléchissante a été développé comme une solution innovante pour optimiser l'état actuel. La toiture double peau est composée de deux couches : principale et secondaire. Le toit secondaire protège le toit principal du rayonnement solaire excessif. L'espace d'air entre les deux couches agit comme un isolant qui protège davantage le toit principal. L'isolation thermique par le vide d'air réduit le flux de chaleur traversant un toit de la pièce la plus chaude à la pièce la plus froide. Le matériau à conductivité thermique plus faible est le plus isolant. D'autre part, le climat étant chaud avec une forte irradiation solaire, d'où les surfaces des toits sont exposées aux rayons solaires agressifs pendant longues heures de la journée en été. L'utilisation de peinture réfléchissante est efficace, sachant que la peinture utilisée dans notre cas a un coefficient de réflexion de 0,8 avec un coefficient d'absorption très faible de 0,2 ; ce qui reflète 80% des rayons solaires incidents.

Cette peinture est blanche en matériau local non toxique, contient des composants qui réfléchissent plus efficacement les rayons du soleil et ralentit considérablement le passage de la chaleur à travers le toit. Elle augmente la durée de vie du toit en le protégeant des rayons du soleil. Comme cette peinture augmente l'albédo, une grande quantité de rayons solaires est réfléchi. Cela diminue le transfert de chaleur vers l'intérieur et abaisse les températures de l'air intérieur, diminuant ainsi la consommation d'énergie. Elle s'applique en une ou deux couches puis une autre couche de protection « anti-UV » et « anti-moisissure » à base d'un enduit de résine acrylique et de pigments minéraux. La peinture thermo réfléchissante froide utilisée dans cette étude contient des éléments naturels liés par différentes résines. Elle contient des pigments minéraux et un revêtement en résine acrylique. Cette peinture froide produit une réflectance élevée par rapport aux peintures ordinaires de la même couleur avec une grande différence de température de surface. Les nanoparticules entrant dans la

composition de cette peinture donnent une réflexion élevée du spectre visible jusqu'à 90% et une valeur de 95% de l'infrarouge, ce qui minimise la quantité de chaleur absorbée et réduit le transfert de chaleur. Sa haute réflectivité offre une réflexion élevée des rayons solaires sur la surface peinte du toit, car la chaleur produite des rayons du soleil n'est pas absorbée. Malgré sa très faible épaisseur (250 microns), cette peinture contient peu de COV (environ 20 g/L), ce qui la rend respectueuse de l'environnement.

Cette peinture contient :

- ✓ Pigments minéraux qui reflètent naturellement le rayonnement solaire en raison des propriétés optiques de la couleur claire et physiques qui augmentent la dureté du film.
- ✓ Un revêtement en résine acrylique pour garantir l'élasticité et l'imperméabilité. De plus, qu'il s'agit d'un élément clé de cette peinture puisqu'il lie les composants entre eux.
- ✓ Solvant ou diluant qu'est l'eau dans ce type de peinture, donne sa fluidité à la peinture pour permettre son application.

Cette peinture s'applique en terrasse sur un enduit aérien à la chaux de la toiture, contient des composants naturels comme l'argile qui est un matériau disponible à Béni Isguen, pas cher et sa fabrication ne pollue pas (Figure VI.12). La figure VI.15 montre le modèle développé dans notre étude pour la simulation. Le tableau VI.8 montre les caractéristiques thermiques du cas de toit amélioré. Les résultats de la simulation thermo-énergétique par TRNSYS sont présentés dans la figure VI.16. Le tableau VI.9 montre la comparaison entre la température opérative dans le cas réel et amélioré.

## COMPOSITION SCHEMATIQUE D'UNE PEINTURE

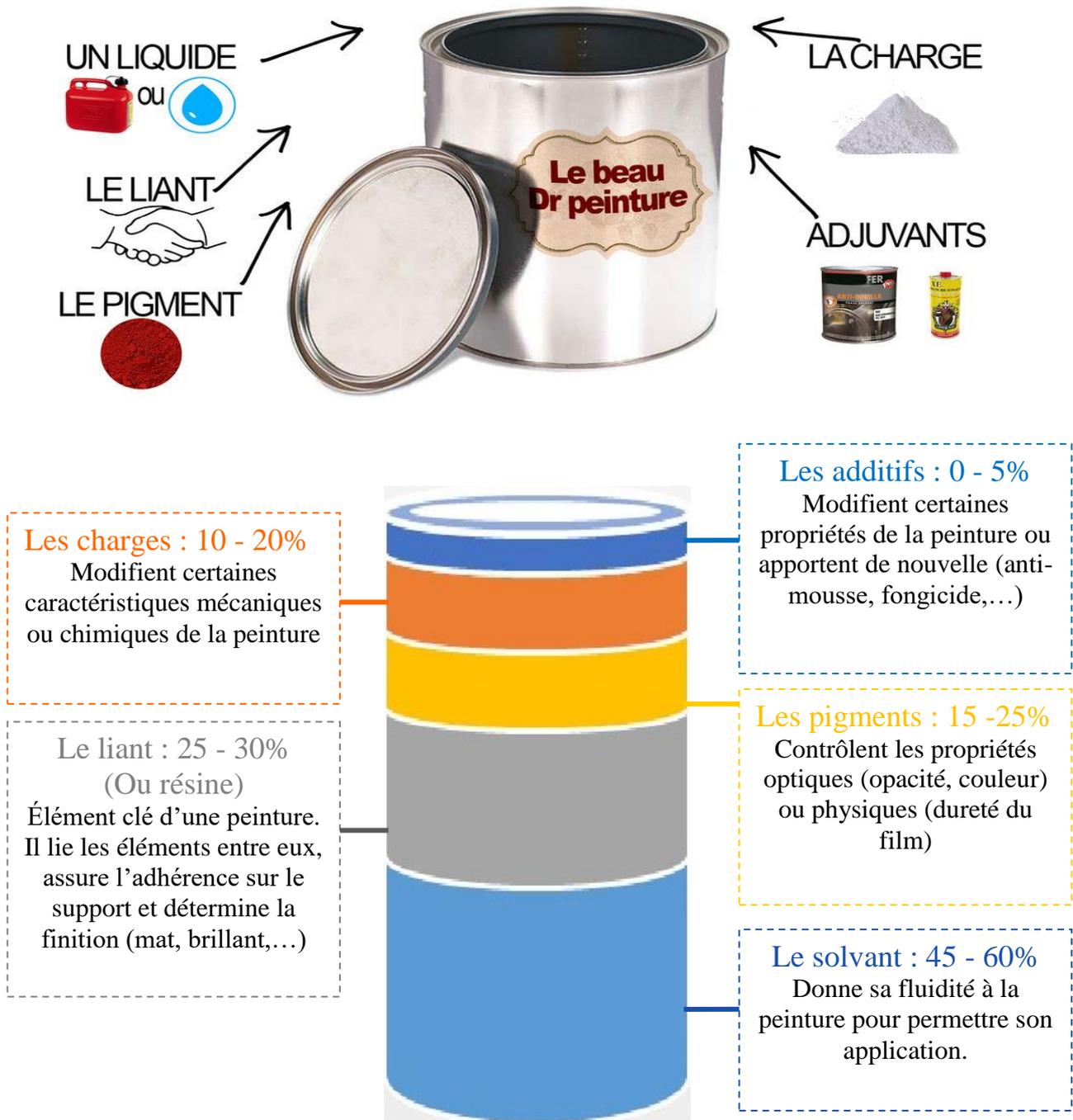
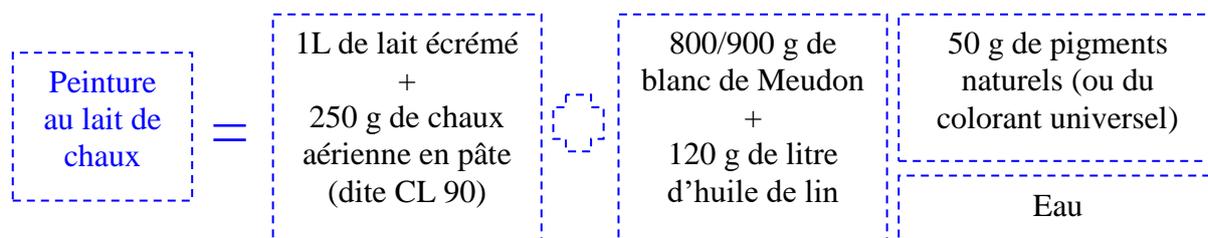


Figure VI.12 : Composition schématique de la peinture : (a)

(<https://www.docteurpeinture.com/post/la-composition-de-la-peinture>) ; (b) (Guide peinture, 2018)

VI.4.2.1. Peinture au lait de chaux :

La peinture au lait de chaux est bien adaptée au contexte d'étude et peut être appliquée sur un enduit en chaux aérienne, un enduit de terre d'une toiture. La fabrication de cette peinture est facile. La préparation qui suit (Figure VI.13) permet d'obtenir 2,5 L de peinture pouvant couvrir 30 m<sup>2</sup> en une couche. Cependant, il est conseillé de doubler les doses, car les peintures naturelles nécessitent au moins 2 couches (Guide peinture, 2018).



NB : Le blanc de Meudon est une craie naturelle en poudre (se trouve dans les enseignes de bricolages, au rayon-ciment).

La chaux est issue de la cuisson de pierres de calcaire (se trouve dans les magasins de bricolages, rayon matériaux de construction). La chaux est disponible largement dans le Ksar de Béni Isguen.

**La mise en œuvre et exécution de la peinture au lait de chaux :**

La mise en œuvre de la peinture au lait de chaux sur le toit passe par plusieurs étapes :

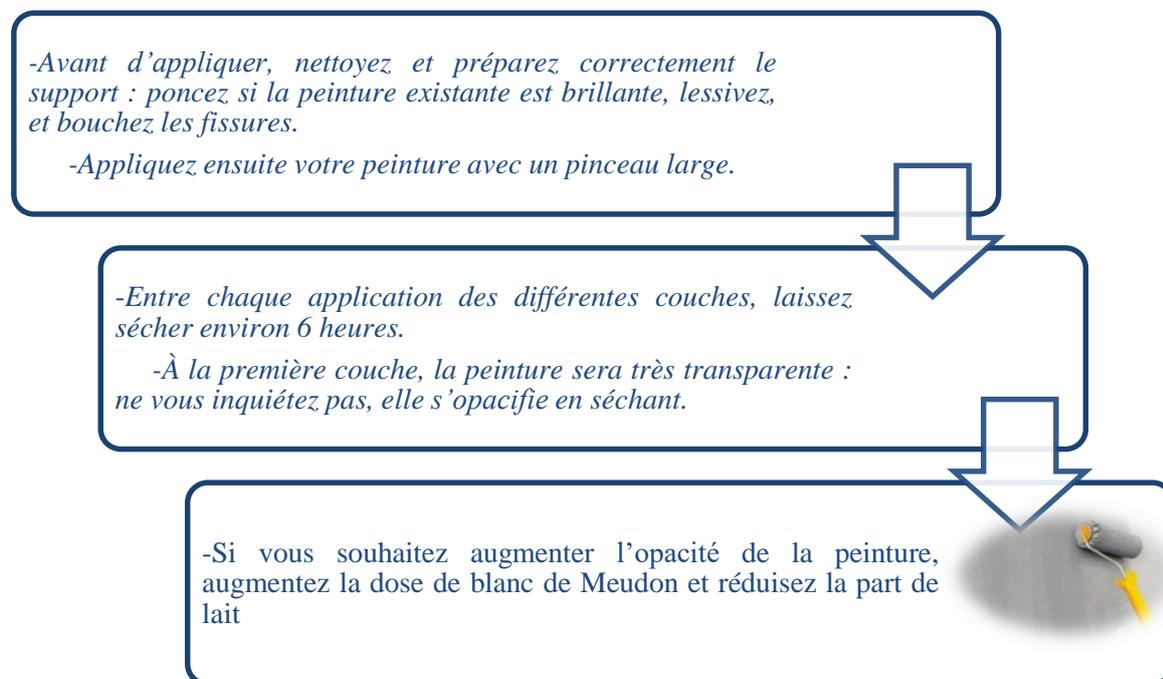


Figure VI.13 : Étapes d'application d'une peinture naturelle au lait de chaux (Guide peinture, 2018)

#### VI.4.2.2. Peinture à l'argile :

La peinture à l'argile est une peinture naturelle à base d'eau, spécialement conçue pour recouvrir les murs, les plafonds et les toits. Elle possède de très bonnes qualités physiques et thermiques que la peinture traditionnelle. Aussi, elle présente des atouts non négligeables. Cette peinture peut être appliquée sur plusieurs supports comme la terre, le plâtre, la chaux. L'argile est le composant principal de cette peinture, qui est une matière disponible largement à Béni Isguen. De plus, l'argile n'est pas cher et la fabrication de la peinture à base d'argile ne pollue pas l'environnement. La figure VI.14 montre les composants de cette peinture.

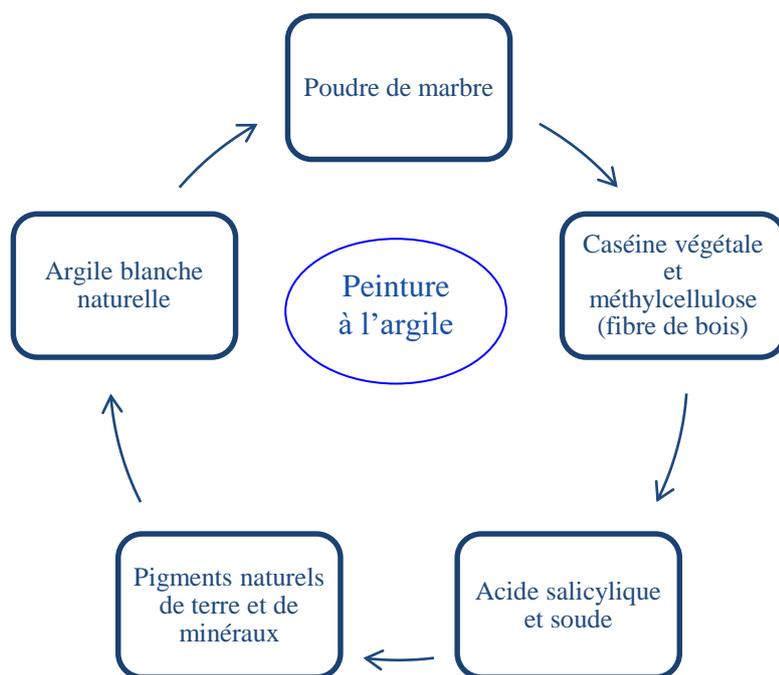


Figure VI.14 : Composants d'une peinture à l'argile (Guide peinture, 2018)

La peinture à l'argile offre plusieurs atouts qualitatifs de plus qu'elle ne coûte plus cher qu'une peinture classique (entre 30 et 50 € les 5 litres). Alors, la peinture à l'argile :

- possède un pouvoir couvrant élevé : 1 litre suffit pour peindre une surface de 6 à 8 m<sup>2</sup>.
- s'applique facilement au rouleau ou au pinceau.
- sèche rapidement (entre 4 et 5 heures suffisent) et ne goute pas.
- se nettoie à l'eau et au savon (un mode de nettoyage à appliquer sur les pinceaux, rouleaux et en cas de taches).
- nécessite le passage d'une seule couche lorsque le support :
  - est de couleur claire
  - ne présente aucune irrégularité

- se conserve plusieurs mois lorsque le pot est entamé (jusqu'à un an lorsque le récipient n'a pas été ouvert) (Ooreka, 2021).

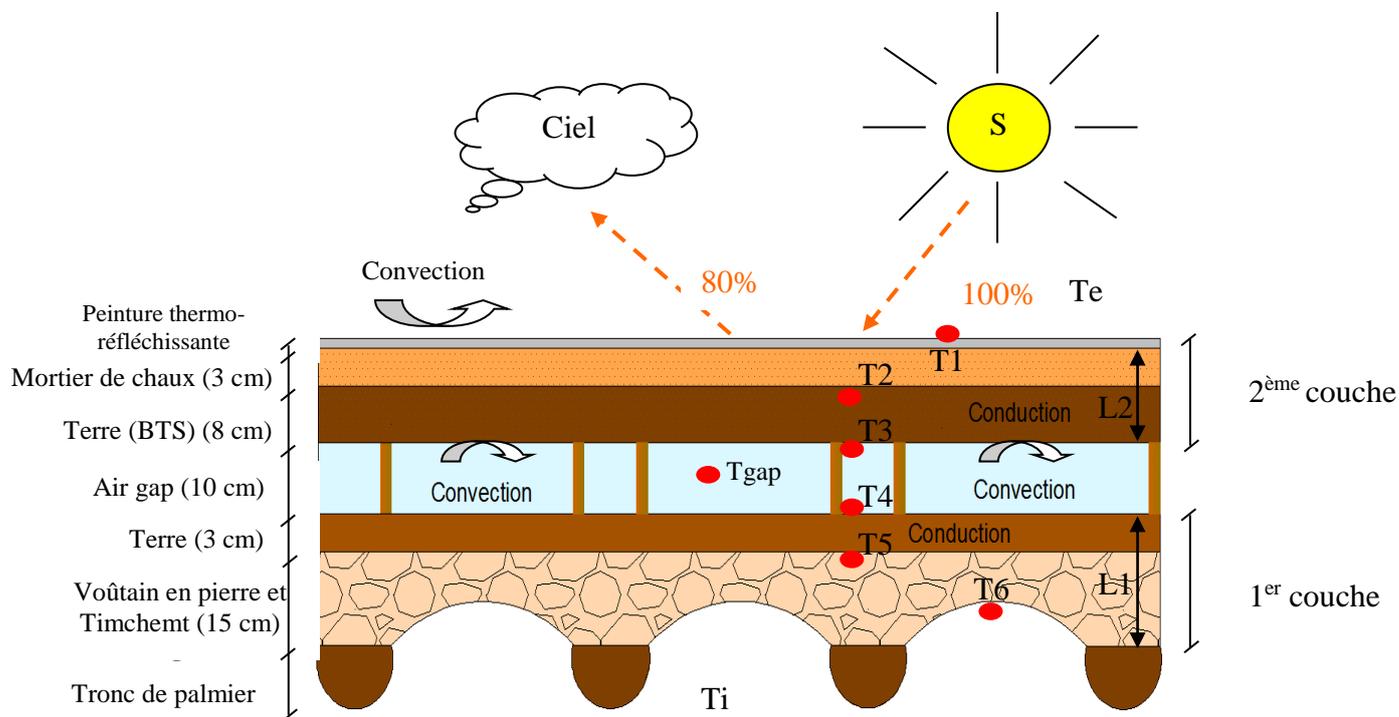


Figure VI.15 : Coupe sur toiture double peau combinée à la peinture thermo réfléchissante du modèle développé et simulé

Tableau VI.8 : Les caractéristiques thermiques des matériaux de toiture améliorée du modèle simulé

Couche / propriétés	Conductivité thermique $\lambda$ (W/m.K)	Capacité thermique (J/kg. °C)	Densité D (kg/m <sup>3</sup> )	Épaisseur (cm)
Tronc de palmier	0.08 (0.122)	/	850	15 à 20
Pierre	1.4	936	1840 à 2340	15
Mortier de Timchemt	0.7	1080	100 to 1300	collage
Air gap	0,047	1000	1	10
Couche de terre	1.15	936	1700 à 2000	14
Chaux	0.87	1080	1800	8

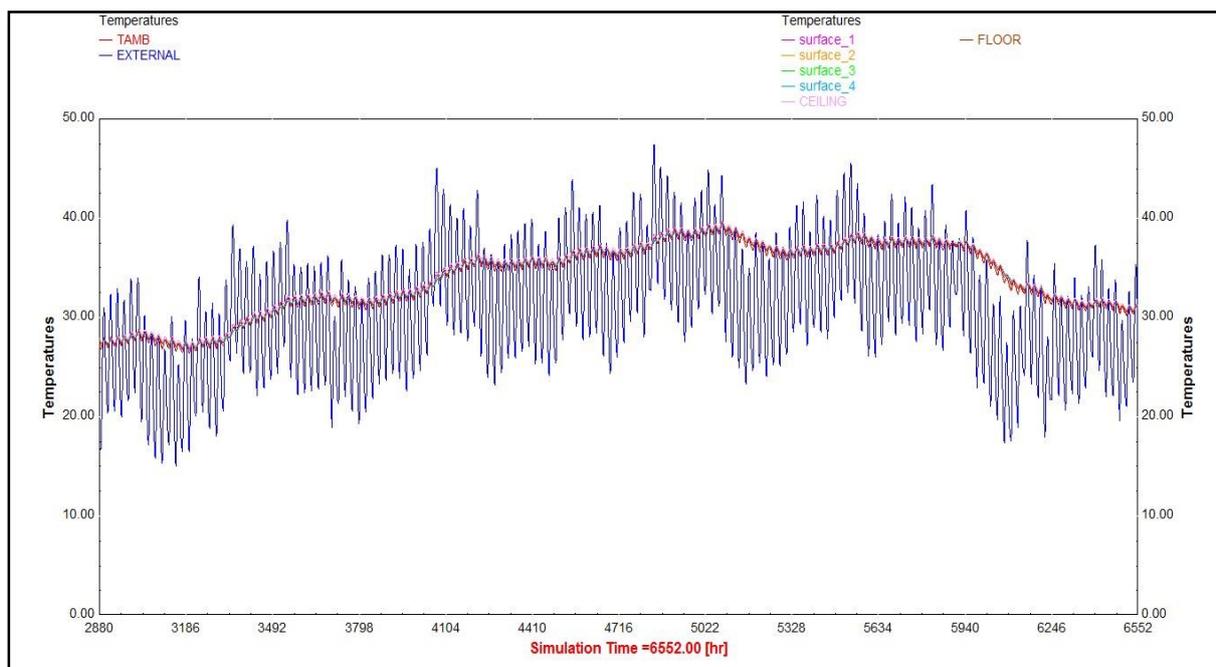


Figure VI.16 : Résultats de simulation du modèle étudié et amélioré par TRNSYS

#### VI.4.2.3. Résultats de la saison chaude :

Après traitement des résultats par le programme « Origin », la figure VI.17 montre les résultats de simulation dynamique thermo énergétique du cas existant. La figure VI.18 montre les résultats de la simulation après changement des caractéristiques de la toiture et amélioration des propriétés thermiques. On a met les résultats de deux scénarios dans le tableau VI.9 pour faciliter la lecture et la comparaison des résultats.

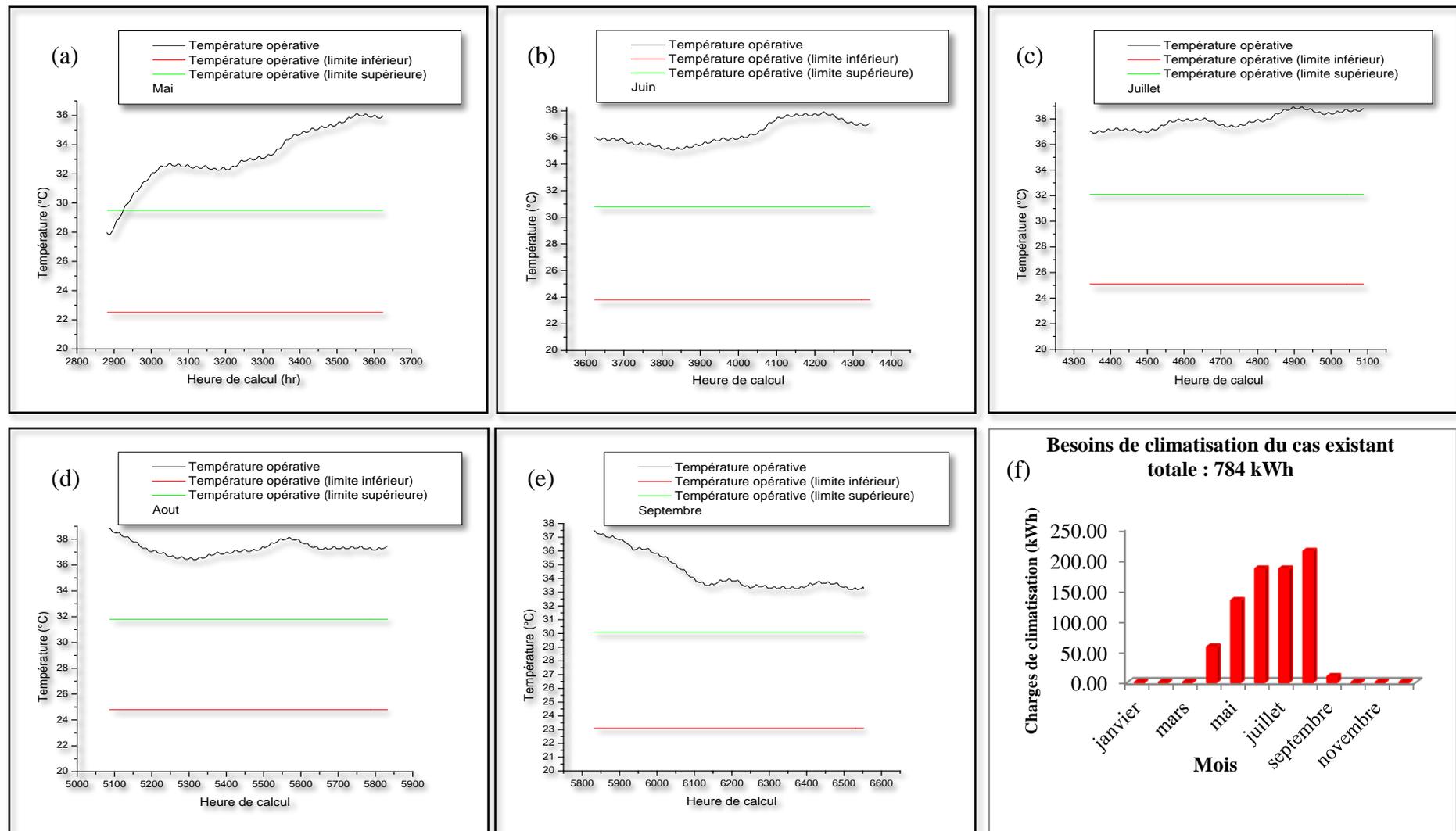


Figure VI.17 : Résultats des simulations de la température opérative dans le cas existant : (a) résultats du mois de mai, (b) mois du juin, (c) mois du juillet, (d) mois d’août, (e) mois du septembre, (f) résultats de consommation énergétique : charges de climatisation

## Chapitre VI : Optimisation de la performance thermique de la toiture : Simulation numérique

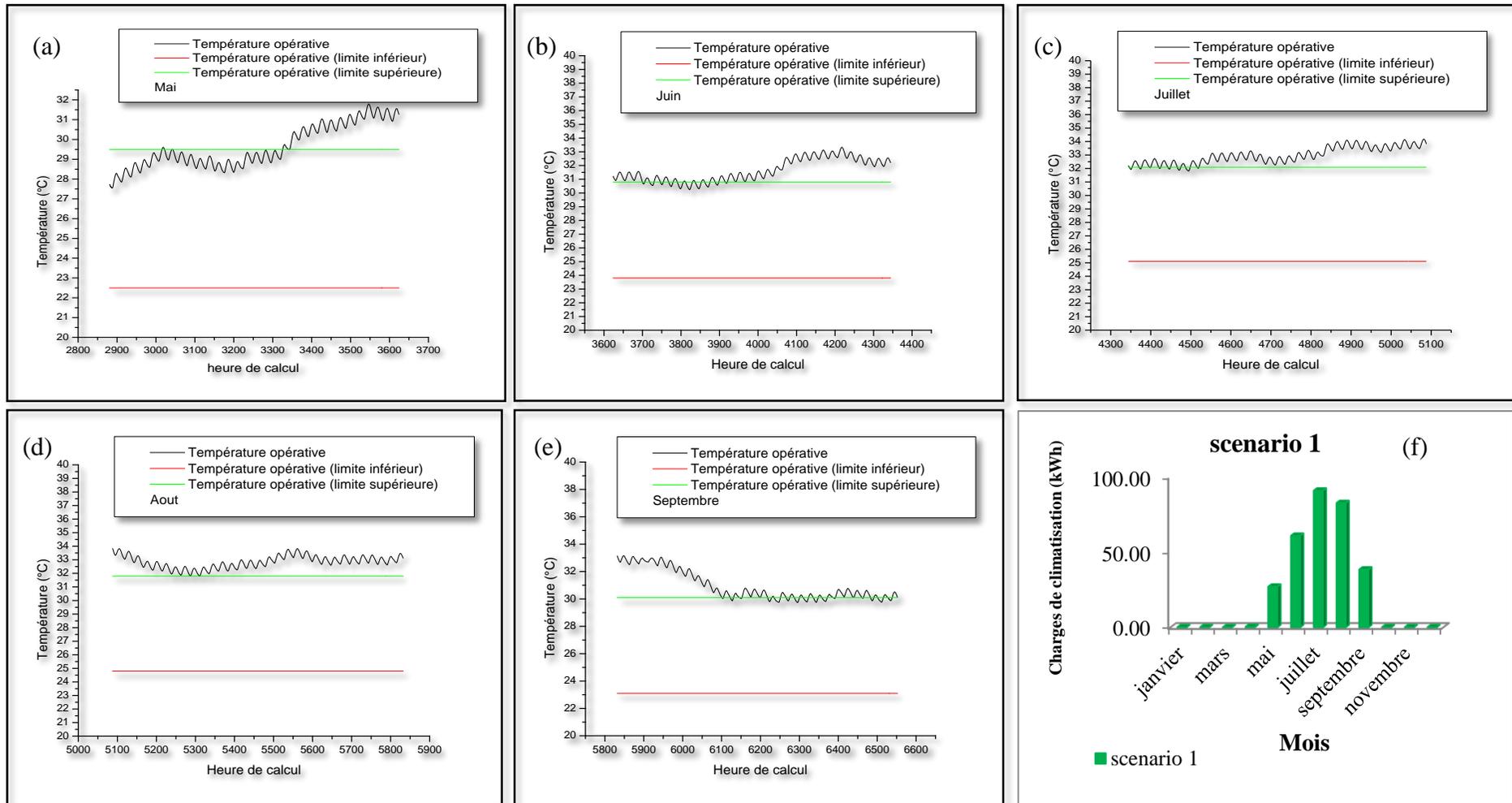
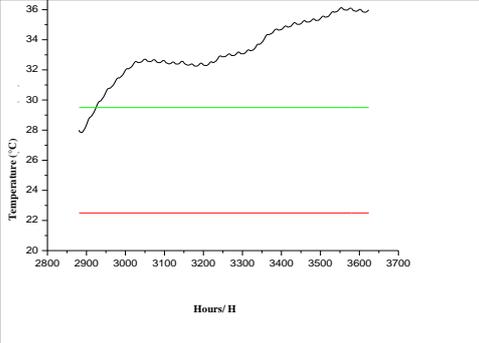
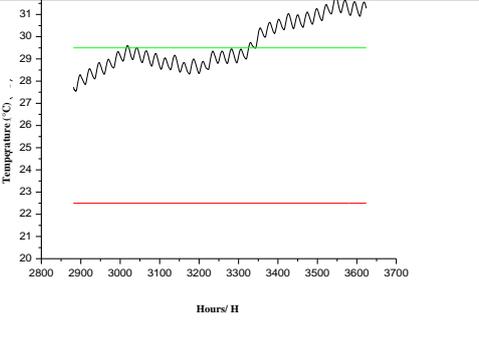
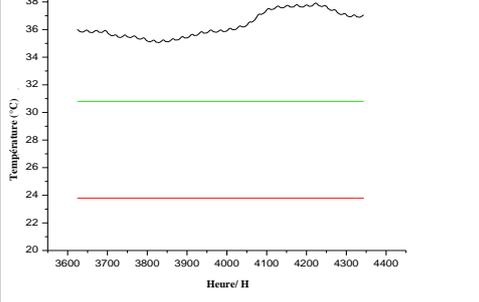
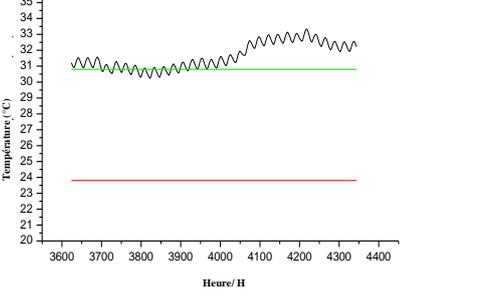
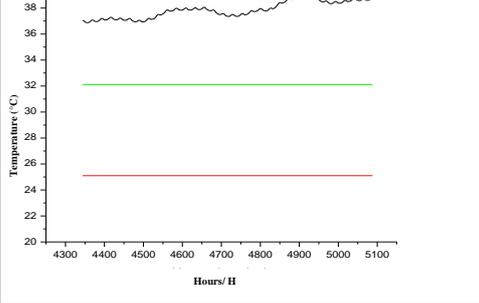
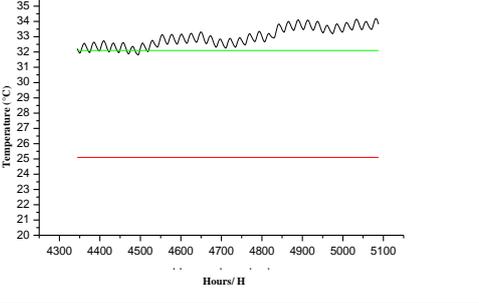
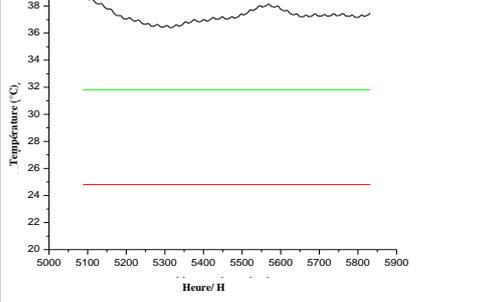
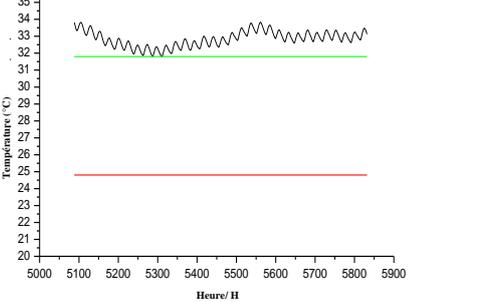
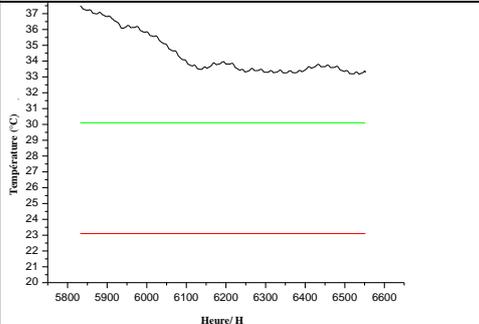
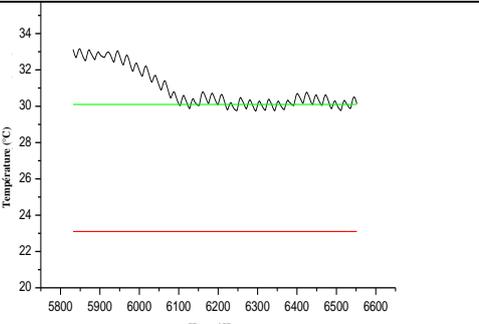


Figure VI.18 : Résultats des simulations de la température opérative dans le cas d'une toiture double peau couplée à une peinture thermo réfléchissante : (a) résultats du mois du mai, (b) mois du juin, (c) mois du juillet, (d) mois d'août, (e) mois du septembre, (f) résultats de consommation énergétique annuelle après amélioration

Tableau VI.9 : Comparaison des résultats de température opérative du cas existant et amélioré

Mois/Cas	Cas actuel	Cas amélioré
Mai		
Juin		
Juillet		
Août		
Septembre		

 Température opérative  
 Température opérative (limite supérieure)  
 Température opérative (limite inférieure)

Les figures VI.17 et VI.18 et les graphes présentés dans le tableau VI.9 représentent les résultats de la variation de température opérative par rapport aux heures de calcul journalières des mois d'été de mai à septembre pour le cas réel et après optimisation des performances thermiques de la toiture. Au cours du mois de mai, les valeurs de température opérative dans le cas existant varient entre 32°C et 36°C, tandis que la plage de confort varie entre 22,5°C et 28,5°C selon la norme ASHRAE 55. Alors, les valeurs de température sont au-delà de la plage de confort optimal, ce qui nécessite l'utilisation des systèmes de climatisation pour abaisser les températures intérieures de la maison simulée. Après optimisation de la performance thermique de la toiture, les résultats indiquent que la température opérative varie entre 27,5°C et 31°C où ces valeurs sont proches de la plage optimale de confort thermique. Les valeurs de température opérative dans le cas réel varient entre 36°C et 38°C au mois de juin, 37°C et 39°C pour les mois de juillet et août et atteignent parfois jusqu'à 37°C pour le mois de septembre. Par rapport aux limites de la plage de confort accordées, les valeurs de température opérative sont presque toujours en dehors de la plage de confort optimal qui varie entre 23,8°C à 30,8°C pour le mois de juin, 25,1°C à 32,1°C pour le mois de juillet, 24,8°C à 31,8°C pour le mois d'août et 23,10°C à 30,1°C pour le mois de septembre. Les valeurs de température opérative élevées à l'intérieur des maisons impliquent l'utilisation des systèmes de climatisation pour amortir la température intérieure et les charges de climatisation augmentent automatiquement. Après optimisation de la toiture, les valeurs de température intérieure opérative au mois de juin varient entre 30°C et 32°C qui sont très proches de la plage de confort accordée qui varie entre 23,8°C et 30,8°C. Les valeurs de température varient entre 32°C à 33°C, 32°C à 34°C et 30°C à 32°C pour les mois de juillet, août et septembre respectivement. On peut dire que les valeurs de températures intérieures opérative sont proches de la plage de confort thermique où le besoin d'utiliser des systèmes de climatisation est réduit. Au cours des mois de juillet et août, le cas optimisé, le besoin de climatisation est nécessaire pendant quelques jours et quelques heures de la journée pour atténuer les températures opératives à l'intérieur de la maison. Selon les résultats obtenus à partir de la simulation par TRNSYS pendant un an, les résultats montrent que l'utilisation d'un toit double peau avec peinture réfléchissante réduit les températures intérieures jusqu'à 5°C par rapport à l'état existant. Le modèle de toit double peau couplé à une peinture thermo réfléchissante permet de réduire la température opérative. Le vide d'air entre les deux couches agit comme un isolant qui minimise la température entrant par la terrasse. Aussi, la peinture thermo réfléchissante aide à réfléchir des quantités considérables de rayons solaires intenses

(Figure VI.19). Selon les résultats de la simulation sur la période d'un an, les charges de climatisation sont requises pendant 5 mois de mai à septembre (tableau VI.10).

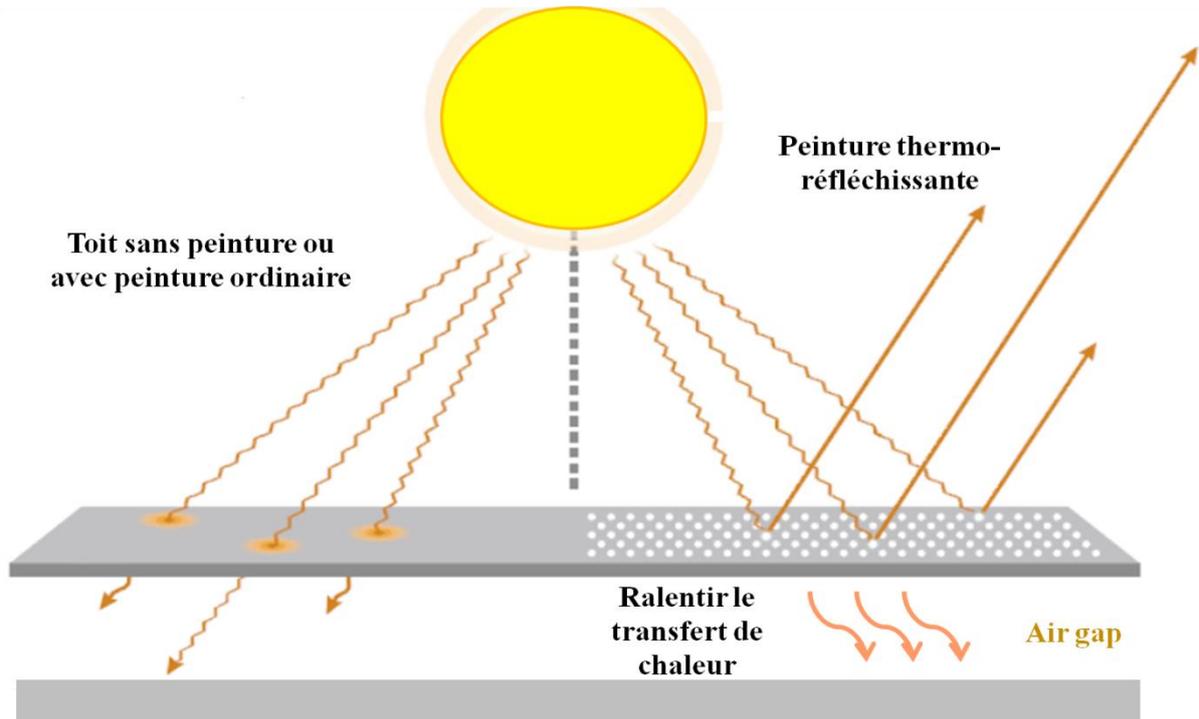


Figure VI.19 : La fonction thermique du modèle de toit proposé (Auteur, 2021)

#### VI.4.4. Consommation énergétique annuelle :

Le calcul des besoins de consommation d'énergie qui inclue les besoins de climatisation en été et les charges de chauffage en hiver sert à donner une idée sur les consommations d'énergie annuelle et saisonnière des maisons ksouriennes et avoir une idée sur les bilans des cas d'étude. Les charges élevées de climatisation entraînent des lourdes factures et même des problèmes gênants, laissant les résidents vivre dans des situations troublantes, surtout avec l'arrivée de l'été.

Tableau VI.10 : Récapitulatif de résultats des heures de confort calculées par pourcentage

	Mai (744h)	Juin (720h)	Juillet (744h)	Août (744h)	Septembre (720h)
Plage de confort (selon la norme ASHRAE 55)	$22.5 \leq T^{\circ} \leq 29.$ 5	$23.8 \leq T^{\circ} \leq 30.$ 8	$25.1 \leq T^{\circ} \leq 32.$ 1	$24.8 \leq T^{\circ} \leq 31.$ 8	$23.1 \leq T^{\circ} \leq 30.$ 1
Actuel	(45h) 6%	(0h) 0%	(0h) 0%	(0h) 0%	(0h) 0%
Scenario 1	(442h) 56%	(121h) 17%	(58h) 8%	(0h) 0%	(162h) 23%

Le tableau VI.10 présente un récapitulatif des résultats de calcul des heures de confort en pourcentage. Au mois de mai, seulement 6% des valeurs de température opérative sont dans la plage de confort qui varie entre 22,5°C et 29,50C selon la norme ASHRAE 55 pour le cas existant. Dans le cas amélioré, 56 % des valeurs se situent dans la plage de confort. Pour les mois de juin, juillet, août et septembre, toutes les valeurs de température opérative sont en dehors de la plage de confort dans le cas existant. Dans le cas amélioré, 17 % des valeurs se situent dans la plage de confort pour le mois de juin et 8 % pour le mois de juillet. Pour le mois d'août, les valeurs de température opérative sont proches de la zone de confort, mais la climatisation est nécessaire pour obtenir un confort agréable. En septembre, 23 % des valeurs se situent dans la plage de confort dans le cas amélioré. On peut dire que l'optimisation des propriétés thermiques du toit contribue à réduire la température opérative intérieure et réduit la consommation d'énergie pendant les mois les plus chauds de l'année.

La figure VI.20 montre les besoins de refroidissement pendant une année calculés en kWh. Après calcul des charges de climatisation par TRNSYS, les besoins de climatisation sont répartis sur 5 mois de l'année de mai à septembre. Au cours du mois de mai, la consommation d'énergie est égale à 133,40 kWh, mais après optimisation du toit, elle diminue à 27,11 kWh. Pour le mois de juin, la consommation d'énergie dans le cas existant est de 185,00 kWh et elle est de 90,96 kWh dans le cas optimisé. La consommation d'énergie durant le mois d'août est de 213,60 kWh pour le cas existant et de 82,72 kWh pour le cas optimisé. Pour le mois de septembre, la consommation d'énergie pour le cas réel est de 97,64 kWh et elle égale à 38,57 kWh pour le cas optimisé. Ainsi, la consommation d'énergie globale dans le cas existant est égale à 872 kWh et elle égale à 300 kWh dans le cas optimisé. On peut dire que pendant les mois de surchauffe, dans le cas actuel, une forte climatisation est nécessaire pour atteindre un confort thermique optimal. Après l'optimisation par une toiture double peau couplée à une peinture thermo-réfléchissante, les besoins en climatisation sont réduits. L'optimisation de la toiture permet de réduire la consommation d'énergie de 572 kWh (soit 66% d'économie d'énergie) (Figure VI.21).

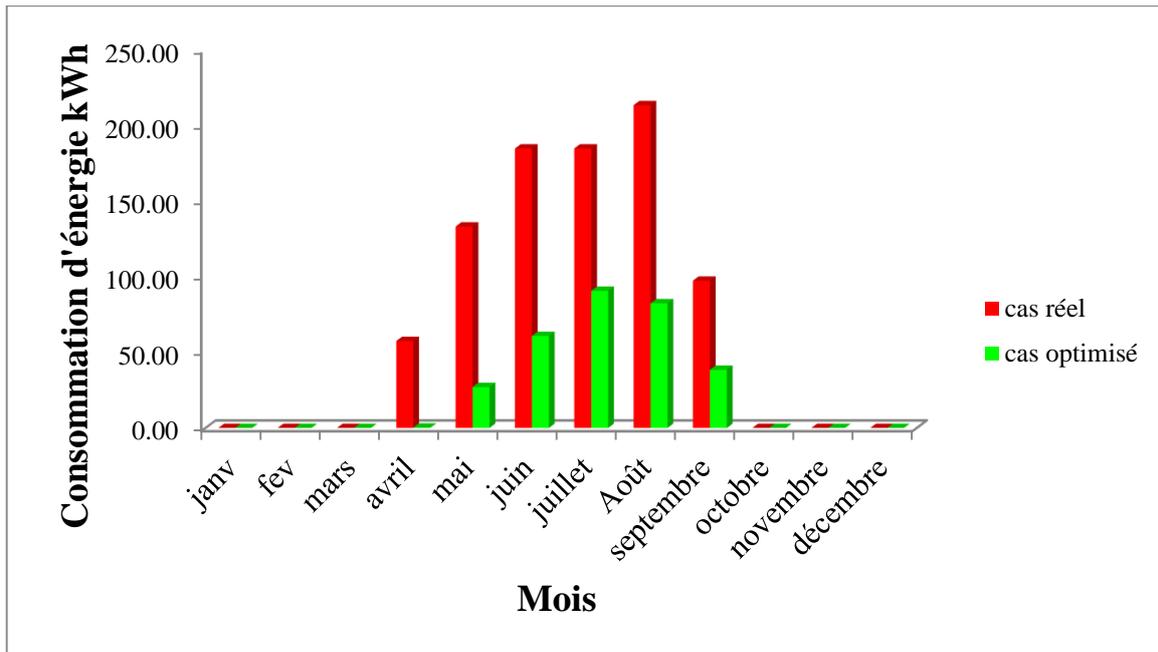


Figure VI.20 : Histogramme montrant la consommation d'énergie au cours des différents mois de l'année pour le cas existant et le cas optimisé (Besoins en climatisation)

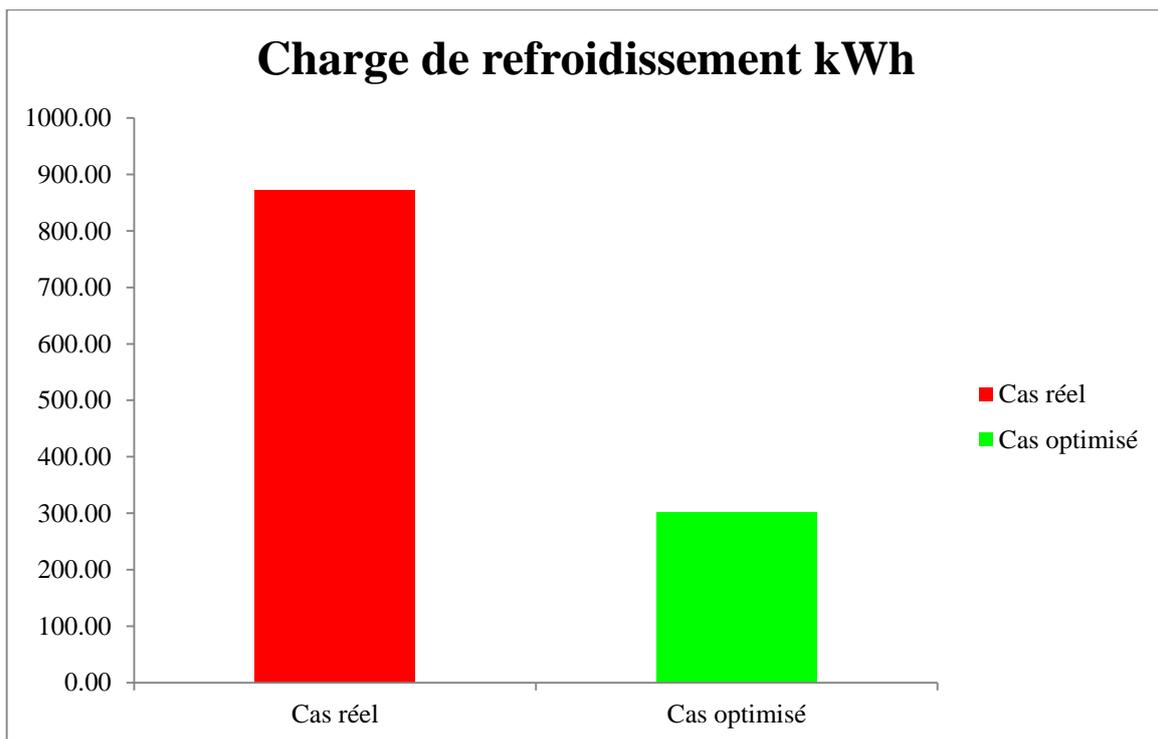


Figure VI.21 : Consommation d'énergie (besoins de refroidissement) annuelle des cas étudiés

#### VI.4.5. Justification des résultats après amélioration des propriétés thermiques de la toiture :

Les valeurs de consommation d'énergie mentionnées dans le travail représentent la consommation d'énergie globale sur une année sans division en surface.

La consommation d'énergie globale (annuelle) pour la période de refroidissement dans l'étude de cas existant mentionné dans le document est de 872 kWh. Sachant que le travail de simulation thermique a été réalisé sur une pièce de la maison à l'étage qui a une surface de 10 m<sup>2</sup>, donc si on calcule la consommation d'énergie par surface après division, les valeurs deviennent comme suit :

- ✓ La consommation énergétique globale pour le refroidissement dans le cas existant est de : 87,2kWh/m<sup>2</sup>/an
- ✓ La consommation énergétique globale après optimisation de la toiture: 30kWh/m<sup>2</sup>/an

Ainsi, la consommation globale d'énergie est réduite de 57.2 kWh/m<sup>2</sup>/an (i.e. 66%).

Dans le modèle proposé, la température opérative moyenne est réduite de 5°C et la consommation d'énergie annuelle est réduite de 572 kWh par rapport à la situation traditionnelle.

#### **Justification des raisons :**

Dans le cas existant, le toit traditionnel est construit de matériaux locaux. Comme les toits des maisons traditionnelles "Mozabites" sont des toits-terrasses plats, ils sont exposés pendant une longue durée aux rayons solaires agressifs pendant le jour de la période estivale. Cette toiture traditionnelle est épaisse avec une masse thermique élevée, mais elle reste un élément de chaleur transitoire du fait de son exposition au fort rayonnement solaire des jours d'été. Bien connaître ; que la face externe du toit traditionnel existant ne contienne pas d'éléments réfléchissants, ce qui permet à une grande quantité de rayonnement solaire incident d'être absorbée par la surface du toit. C'est pourquoi ; la maison traditionnelle typique "Mozabite" avec un toit traditionnel typique a été évaluée expérimentalement par des mesures in situ dans les conditions climatiques du Ksar de Béni Isguen. À cette fin, les valeurs obtenues à partir des mesures réelles indiquent que les températures intérieures sont toujours élevées et l'humidité relative est très faible pendant toutes les heures de la journée du matin à minuit des journées d'été typiques étudiées. Cela laisse les habitants indigènes occupant la terrasse la nuit pour dormir.

Par exemple, la température extérieure mesurée peut dépasser 44°C à 12h00 et 38°C dans la pièce à l'étage. Aussi, elle peut atteindre 38°C à 21h00 à l'extérieur et 37°C à l'intérieur. L'humidité relative à l'extérieur peut être inférieure à 10% à 12h00 et 15% à l'intérieur, ce qui représente une valeur très faible. De plus, elle peut être 35,7°C à minuit à l'extérieur et 35°C à

l'intérieur. La chaleur accumulée principalement par la surface du toit pendant la journée commence à être libérée après le coucher du soleil. Par conséquent, la nuit, des valeurs de température élevées sont enregistrées, ce qui rend les pièces inutilisables et la terrasse est devenu l'espace nocturne pour dormir. Les valeurs de température et d'humidité relative enregistrées restent toujours hors de la plage de confort selon la norme ASHRAE.

Bien que l'architecture traditionnelle offre des solutions locales pour contrôler la chaleur excessive transmise à l'intérieur depuis l'extérieur, mais les températures estivales extérieures élevées et les conditions climatiques rudes du climat chaud et aride du Ksar de Béni Isguen affectent gravement l'état de confort thermique intérieure.

Dans les villes traditionnelles au climat chaud et aride, comme le Ksar de Béni Isguen, où l'organisation urbaine est basée sur un tissu compact, les ruelles sont étroites et l'ombre baigne les rues et les ruelles, ce qui minimise l'exposition des surfaces murales au soleil. Par conséquent, la toiture reste la partie la plus exposée au rayonnement solaire intense et à la chaleur excessive, surtout en été. De plus, les principales pertes thermiques se font par le toit. Les pièces situées sous les toits sont donc toujours plus inconfortables que les pièces des autres niveaux en raison du gain de chaleur supplémentaire par ce chemin.

Le toit, ou autrement appelé la cinquième façade, reçoit une quantité importante de rayonnement solaire pendant la journée et transmet une quantité importante de chaleur à l'intérieur de la maison. Pour cette raison, la protection de la toiture est une nécessité essentielle pour assurer le confort thermique intérieur. De plus, les performances thermiques du toit peuvent influencer de manière significative la consommation énergétique des bâtiments et la volonté de minimiser les températures intérieures. La performance thermique d'un bâtiment est directement liée à l'absorption d'une toiture (Figure VI.22 et VI.23).

Dans un ciel clair, il a été constaté que 20 à 95% du rayonnement solaire est absorbé par la surface du toit. Par conséquent, la quantité d'absorption dépend principalement de l'albédo du toit. Les températures estivales peuvent être réduites en augmentant l'albédo urbain. Cela peut réduire les économies d'énergie en réduisant les coûts de climatisation et en améliorant la qualité de l'air (Akbari, Menon, & Rosenfeld, 2009).

La base de la solution développée dans cette recherche est le traitement de la face externe du toit exposée directement aux rayons solaires agressifs et l'isolation thermique de la couche principale du toit. L'utilisation d'une peinture thermo réfléchissante à haut albédo de haute réflectance solaire de 0,8 réfléchit considérablement une grande quantité de rayons solaires, évitant l'absorption de ces fortes irradiations solaires par la face extérieure du toit, ce qui minimise la quantité de chaleur transmise à la couche principale du toit.

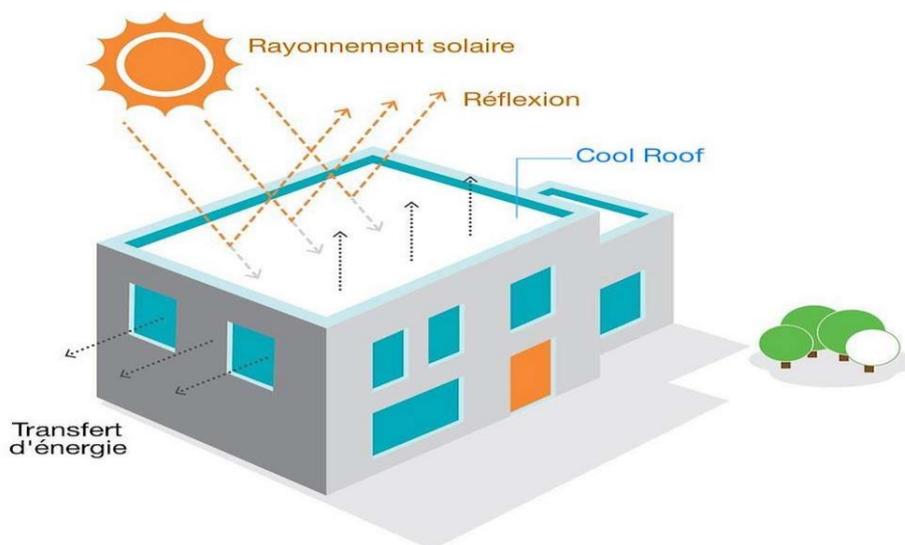


Figure VI.22 : Principe de fonctionnement d'une toiture froide (<https://www.coolroof-france.com/en/our-expertise/our-solutions/>)

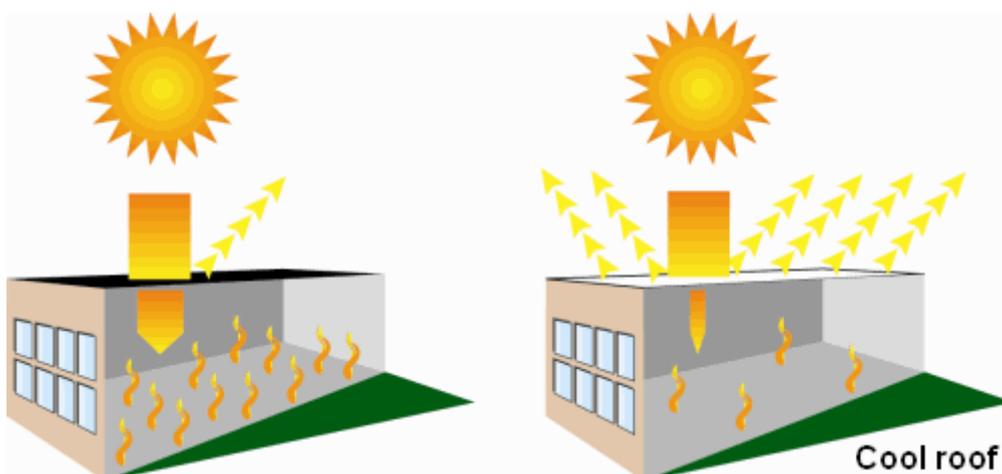


Figure VI.23 : Effet positif de toiture froide (<https://www.batirama.com/article/2638-derbigum-propose-les-cool-roofs-une-opportunite-de-gagner-de-l-argent.html>)

Aussi, la lame d'air entre les deux couches secondaire et principale de la toiture double-peau à faible conductivité thermique de  $0,047 \text{ W/m K}$  offre une isolation thermique forte, lorsqu'elle empêche le transfert de chaleur vers la couche principale de la toiture. Cela implique une réduction considérable de la température intérieure et par conséquent, implique une réduction de l'utilisation des systèmes de climatisation lorsque la consommation d'énergie dédiée au refroidissement est réduite. (Voir Annexe 04 sur les paramètres thermiques)

Cette combinaison contrôle la quantité de rayonnement solaire absorbée et la chaleur transmise à travers le toit pour maintenir la température à l'intérieur aussi basse que possible. Cela procure un confort thermique qui se traduit par une baisse des coûts énergétiques lorsque l'utilisation des systèmes de climatisation est réduite.

Le tableau VI.10 présente une comparaison entre les résultats de simulation du cas réel et du cas d'amélioration de la toiture en fonction des différentes heures des journées d'été typiques. On peut noter que les résultats des mesures ont été analysés et validés par un modèle de simulation thermique utilisant le logiciel TRNSYS (Transient System Simulation) fiable en science du bâtiment. Puis, comme les résultats de validation étaient très satisfaisants, le logiciel a été utilisé pour évaluer notre conception de toit proposée dans cette recherche et pour obtenir des résultats de températures et de consommation d'énergie.

Les résultats de la simulation thermique montrent qu'en période estivale (saison chaude), la valeur moyenne de la température opérative dans le cas existant varie entre 32°C et 36°C pendant les différents temps de calcul de la journée type du mois de mai, tandis que la valeur de la température opérative après amélioration de la toiture varie entre 27°C et 36°C. Les valeurs de température opérative dans le cas réel varient entre 36°C et 38°C au mois de juin, 37°C et 39°C pour les mois de juillet et août et atteignent parfois jusqu'à 37°C pour le mois de septembre. Par rapport aux limites de la plage de confort accordées, les valeurs de température opérative sont presque toujours en dehors de la plage de confort optimal qui varie entre 23,8°C à 30,8°C pour le mois de juin, 25,1°C à 32,1°C pour le mois de juillet, 24,8°C à 31,8°C pour le mois d'août et 23,10°C à 30,1°C pour le mois de septembre.

Après amélioration de la toiture, les valeurs de température opérative intérieure au mois de juin varient entre 30°C et 32°C ; qui sont très proche de la plage de confort accordée qui varie entre 23,8°C et 30,8°C. De plus, les valeurs de température opérative intérieure varient entre 32°C à 33°C, 32°C à 34°C et 30°C à 32°C pour les mois de juillet, août et septembre respectivement.

On déduit que la température opérative dans le cas amélioré est réduite de 5°C en moyenne pendant la période estivale (saison chaude).

Les résultats des simulations thermiques ont montré que l'application d'une peinture froide thermo réfléchissante associée à une toiture double peau a un impact positif significatif sur les températures intérieures et les charges de refroidissement.

Il réduit considérablement la température ambiante intérieure, ce qui entraîne une réduction significative de la consommation d'énergie annuelle. Les températures intérieures mesurées et simulées dans le cas existant dans la pièce à l'étage pendant les journées d'été typiques sont supérieures à 37°C, et elles sont abaissées à 32°C lorsque le toit est optimisé. De plus, la consommation énergétique annuelle est réduite de 57,2 kWh/m<sup>2</sup>/an soit 66% par rapport à l'état actuel.

## Plus de justification des raisons et des phénomènes radiatifs dans la toiture (le comportement thermique d'une toiture) :

Le comportement de la face externe du toit présente un paramètre important qui réagit sur le confort thermique intérieur, lorsqu'il présente la partie qui est en contact direct avec les conditions climatiques extérieures, en particulier les fortes irradiances solaires en été, surtout dans les régions chaudes et arides. La face externe de la surface du toit est un facteur clé qui doit être traité, aussi puisqu'il influe directement sur les gains intérieurs surtout dans les contextes traditionnels, le cas de notre étude.

Par conséquent, l'application d'une peinture froide offre une forte réduction de la température ambiante intérieure tout au long de la journée d'été, améliorant ainsi le confort thermique. Cette peinture est blanche en matériau local non toxique, contient des composants qui réfléchissent plus efficacement les rayons du soleil et ralentit considérablement le passage de la chaleur à travers le toit.

Ensuite, l'effet isolant supplémentaire de la toiture par le toit double peau assure une bonne isolation thermique contre les apports de chaleur, ce qui minimise la qualité de la chaleur accumulée pendant les heures de surchauffe de la journée et par la suite, la transmission de chaleur vers l'intérieur pendant la nuit.

De plus, la toiture double peau avec sa composition bicouche dont la couche extérieure est peinte en blanc avec une peinture thermo réfléchissante, protège la couche principale grâce à la lame d'air de bonne conductivité thermique qui empêche le transfert de chaleur vers la toiture principale.

L'association d'un toit double peau et d'une peinture thermo réfléchissante contribue considérablement à la régulation thermique à l'intérieur. Ainsi, les charges de refroidissement réduites ont beaucoup de sens lorsque la combinaison entre la peinture réfléchissant la chaleur et le toit à double peau : La lame d'air entre les deux couches qui composent la toiture double peau représente un très bon isolant avec une faible conductivité thermique qui permet d'isoler la maison des fortes irradiances solaires. La peinture avec sa haute réflectance solaire est un paramètre clé qui réfléchit considérablement les rayons solaires intenses. Il représente une solution pour minimiser le rayonnement solaire incident afin qu'il ne soit pas absorbé par la surface extérieure du toit (Figure VI.24).

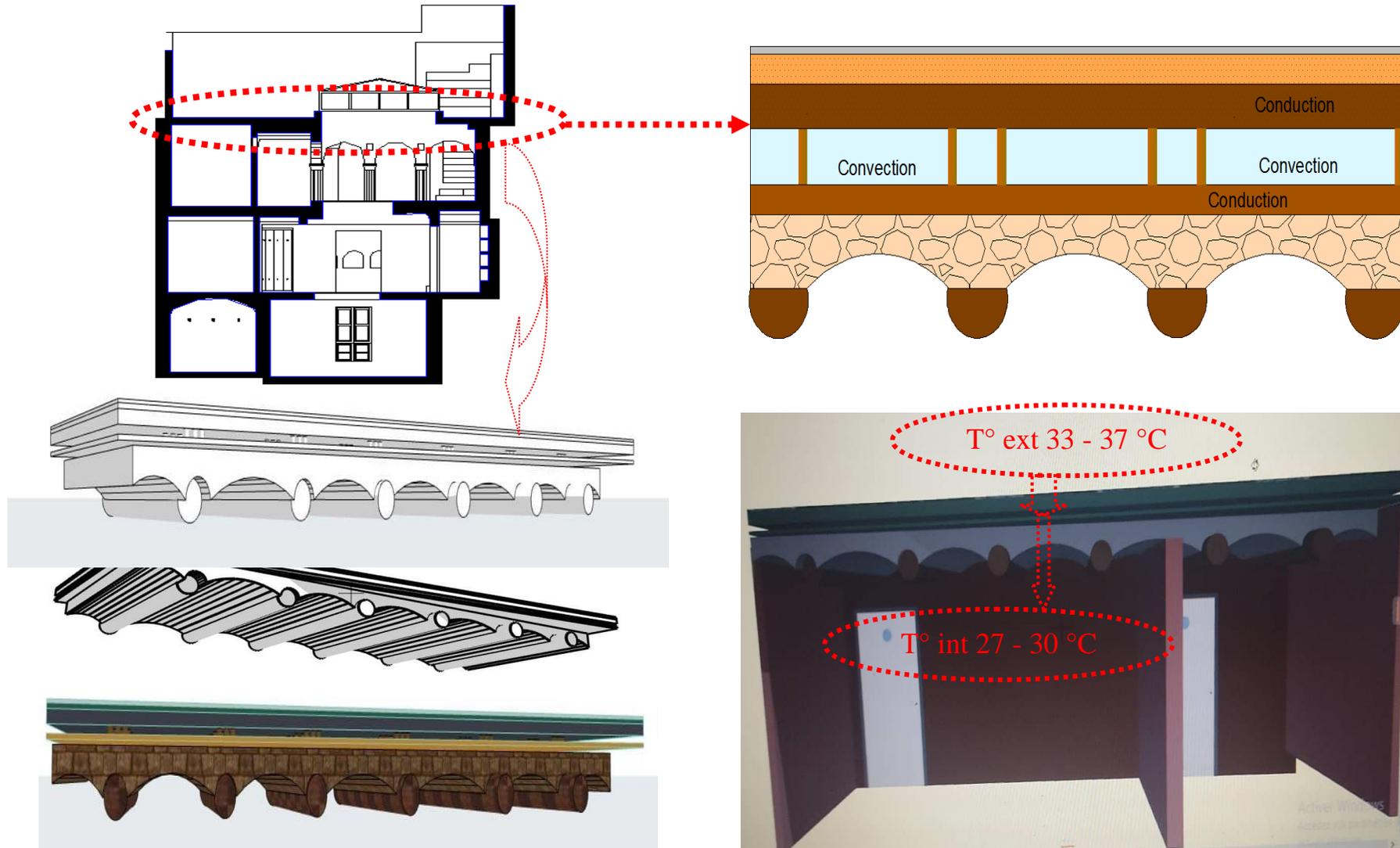


Figure VI.24 : Coupe représentant la toiture double peau combinée à la peinture thermo réfléchissante et l'effet sur la température intérieure

(Auteur, 2021)

#### VI.4.6. Résultat de la simulation thermique en période hivernale :

L'impact de cette contribution sur les performances thermiques dans la saison froide a été déterminé. Il a été constaté que la demande énergétique pour le chauffage est respectivement de 15,5 et 18,8 kWh/m<sup>2</sup>/an dans le cas existant et celui amélioré (Figure VI.25). L'augmentation maximale de cette contribution dans les charges annuelles de chauffage de cas d'étude en climat chaud et sec n'est que de 3,3 kWh/m<sup>2</sup>/an. Cette valeur est très faible par rapport à la réduction annuelle des charges de refroidissement.

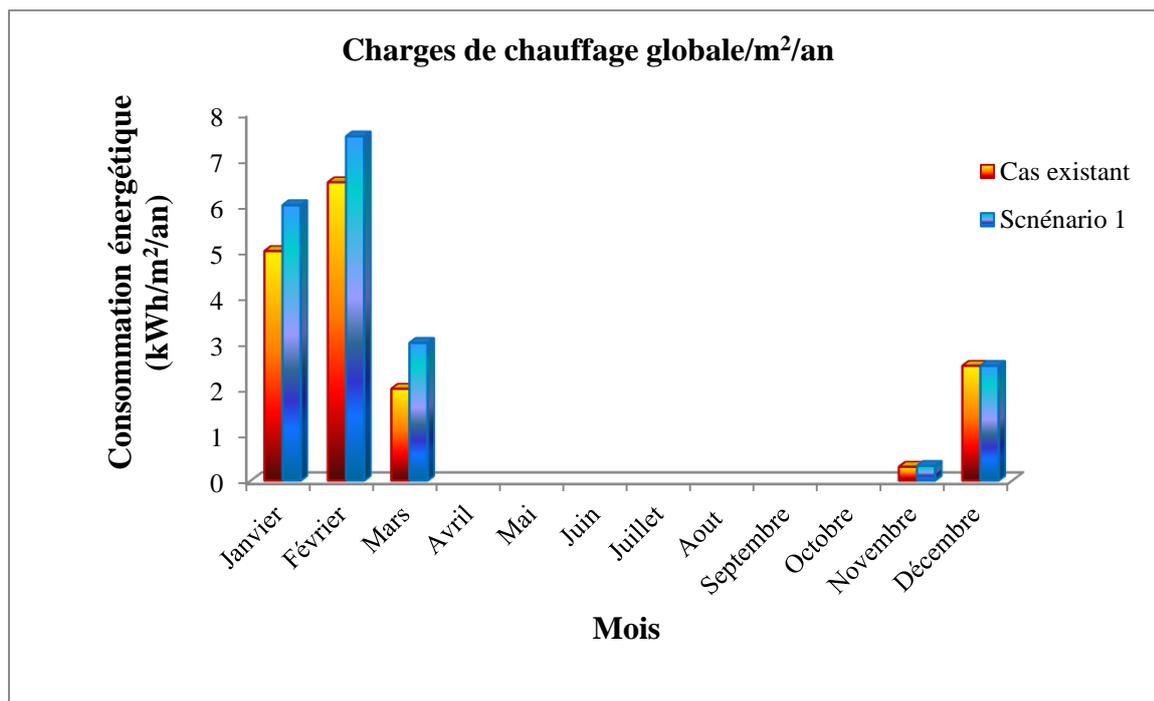


Figure VI.25 : Histogramme de consommation énergétique hivernale (besoins de chauffage)

#### Justification :

La majeure partie de la perte de chaleur se fait par le toit. Ainsi, l'isolation du toit est la plus rentable, car le potentiel d'économies d'énergie est important. Les avantages estivaux induits par la réflectivité accrue de la surface extérieure du toit l'emportent sur les inconvénients hivernaux. En effet, l'air chaud, plus léger, monte naturellement et vient en grande partie se loger sous le toit.

Dans le cas d'une toiture double peau, la lame d'air entre les couches de la toiture agit comme un très bon isolant qui empêche la perte des apports thermiques internes de la maison produite par les activités intérieures, en hiver. Ce qui fait que cet apport offre de bonnes économies d'énergie en été avec de très faibles pénalités en hiver. Par conséquent, cette combinaison est une solution de rénovation lorsqu'elle permet d'économiser considérablement les demandes de refroidissement en été avec une pénalité hivernale très réduite.

## VI.5. Comparaison des résultats de cette étude avec les résultats des études similaires :

Plusieurs études sont en cours de développement pour améliorer les températures intérieures et la consommation d'énergie grâce à des systèmes de refroidissement passifs dans le toit :

1. La recherche développée par (Algarni, 2019) pour les bâtiments résidentiels sur 13 sites principaux sélectionnés en Arabie saoudite visait à estimer les impacts de l'installation d'un toit froid sur les charges de refroidissement et de chauffage. Les résultats indiquent que l'utilisation d'un toit frais réduit la consommation d'énergie annuelle nécessaire au refroidissement des bâtiments de 110,3 à 181,9 kWh/m<sup>2</sup>, et l'augmentation maximale de la consommation d'énergie annuelle due au chauffage hivernal des bâtiments à toit frais dans les climats chauds et secs n'est que de 4,4 kWh/m<sup>2</sup>.

En comparant les résultats de cette recherche avec les résultats de notre recherche, nous remarquons que l'utilisation de « cool roof » réduit la consommation d'énergie pour le refroidissement des bâtiments de 110,3 à 181,9 kWh/m<sup>2</sup>.

Pour notre étude, la combinaison d'un toit double peau avec une peinture froide thermo réfléchissant réduit la consommation énergétique annuelle pour le refroidissement de 57,2 kWh/m<sup>2</sup>/an (66%). Ainsi, les résultats des charges de refroidissement réduites prennent tout leur sens lorsque l'association entre la peinture thermo réfléchissante et la toiture double peau dans le contexte étudié a montré une amélioration considérable, puisque le cas d'étude se situe au Ksar dans un climat chaud et aride. Les conditions climatiques en Arabie Saoudite sont un peu différentes de celle du Ksar de Béni Isguen dont les températures ambiantes extérieures sont plus élevées que le Ksar.

2. Par ailleurs, les travaux de (Shittu et al., 2020) présentent les résultats des économies d'énergie potentielles des toits froids pour les maisons existantes dans deux îles (Sicile et Jamaïque) sur la base de modèles thermiques validés. Les résultats de la simulation avec les modèles EnergyPlus montrent que les économies d'énergie potentielle sont de 21,7 kWh/m<sup>2</sup>/an pour la maison en Sicile et de 188 kWh/m<sup>2</sup>/an pour la Jamaïque. Cela montre les économies d'énergie potentielles du toit frais dans ces types de maisons.

Ainsi, l'économie d'énergie diffère selon les cas d'études étudiées et les conditions climatiques dans lesquelles se situent ces cas d'étude, le type de bâtiment, les composants de l'enveloppe et surtout les composants de la toiture.

3. Par ailleurs, l'étude menée par (Dabaieh et al., 2015), se concentre sur la réduction des demandes de refroidissement dans un climat chaud et sec de l'Égypte avec l'utilisation d'un "toit froid" passif comme moyen pour réduire les charges de refroidissement.

L'étude s'est basée sur une simulation des performances thermiques des toitures froides passives non isolées dans les bâtiments résidentiels. Les résultats indiquent que l'utilisation d'un toit voûté avec un revêtement à haut albédo réduit la consommation d'énergie de 826 kWh et réduit les heures d'inconfort de 53 % par rapport au cas de base d'un toit plat conventionnel non isolé dans un bâtiment typique à faible coût et à faible consommation.

Nous comparons les résultats de cette recherche avec les résultats de notre recherche:

Il est vrai que ces études sont faites en fonction des conditions climatiques du climat chaud et aride qui se caractérise par des températures élevées et une faible humidité, mais elles diffèrent en raison des microclimats locaux et des îlots de chaleur urbains.

- ✓ Les conditions climatiques chaudes et arides du Caire en Égypte à l'intérieur de la ville sont dues à l'îlot de chaleur urbain (les températures peuvent atteindre 38,5°C en été, et la moyenne mensuelle minimale est de 44% en mai. Selon le modèle de confort adaptatif ASHRAE Standard, les limites de confort thermique adaptatif selon le code égyptien utilisé dans cette recherche oscillent entre 21,8°C et 30°C lorsque les taux d'humidité oscillent entre 20% et 50%) sont similaires à celle du sud algérien lorsque les deux ont des températures estivales élevées et faibles humidités relatives, mais ils diffèrent selon les microclimats locaux. D'autre part, le revêtement de toit frais utilisé dans la recherche de "Dabaieh et al", est appliqué sur un toit voûté avec des matériaux conventionnels. Alors que, pour nos recherches, la peinture réfléchissante froide est appliquée sur une toiture plate double peau constituée de matériaux locaux.

Les économies d'énergie constatées dans chaque étude se diffèrent :

- D'une région à l'autre et d'un climat à l'autre, de plus, les conditions microclimatiques locales influent sur les paramètres climatiques d'être différents.
- La forme du toit, ses composants (ses matériaux de construction) et sa construction. Par exemple, la recherche de Dabaieh et al., est menée sur un toit voûté en matériaux conventionnels, alors que notre recherche est basée sur un toit traditionnel en matériaux locaux.
- De plus, nos recherches associent une toiture double peau à une peinture thermo réfléchissante, qui augmente l'isolation du bâtiment résidentiel et réagit

positivement sur le confort thermique, et améliore encore la consommation d'énergie.

- Le toit voûté repousse les rayons multidirectionnels plus qu'un toit plat, lorsque les toits voûtés minimisent la forte exposition au rayonnement solaire par rapport à un toit plat.

On peut dire que l'application d'une peinture thermo réfléchissante sur une toiture double peau (faite de matériaux locaux) permet d'économiser quantitativement et significativement la consommation d'énergie.

### Conclusion :

Les toitures des bâtiments jouent un rôle très important dans le bilan énergétique des bâtiments, surtout en été, lorsqu'ils sont frappés par un rayonnement solaire assez élevé. Selon le type de couche de finition, les toits peuvent absorber une grande quantité de chaleur et atteindre des températures assez élevées sur leur surface la plus externe, ce qui détermine une surchauffe importante des espaces. Ce chapitre a été pour objet d'étudier et évaluer l'impact d'optimisation de la performance thermique de la toiture dans les habitations ksouriennes sur le confort thermique et la consommation d'énergie à travers une simulation thermique.

La toiture double peau composée de deux couches séparées par le vide d'air présente une solution efficace. Puisque le vide d'air réagit comme un isolant pour protéger le toit principal et empêcher le transfert de chaleur vers la couche secondaire. D'autre part, la peinture réfléchissante avec ses performances de coefficient d'absorption de 0.8 et facteur de réflexion de 0.2 sert à réduire l'absorption des rayons solaires intense surtout en été et reflète jusqu'au 80% des rayons incidents. Elle permet à diminuer la quantité de chaleur stockée dans la toiture.

Les résultats de la simulation numérique ont montré que dans des conditions estivales, la conception d'une toiture double peau couplée avec une peinture thermo réfléchissante sur l'extérieur contribue considérablement à optimiser la performance thermique de la toiture et par conséquent, le confort thermique intérieur des habitations. Elle contribue à réduire la température avec une valeur moyenne de 5°C par rapport à l'état actuel. De plus, elle réduit la consommation d'énergie d'ordre de 572kW/h par rapport à l'état existant avec une toiture ordinaire.

# Conclusion Générale

## Conclusion Générale

---

Les pratiques traditionnelles d'adaptation urbaine et architecturale offrent des solutions locales pour contrôler la chaleur excessive transmise à l'intérieur depuis l'extérieur. Néanmoins, les températures extérieures estivales élevées et les conditions climatiques sévères du climat chaud et aride du Ksar de Béni Isguen affectent gravement l'état de confort thermique intérieur. Le toit traditionnel est épais avec une masse thermique élevée, mais il reste un élément de chaleur transitoire en raison de leur exposition à la forte irradiation solaire des jours d'été. Alors, le traitement de cet élément est essentiel. Aussi, la recherche s'intéresse principalement au développement et à l'évaluation des performances thermiques d'un modèle de toiture double peau associée à une peinture thermo réfléchissante par simulation numérique à l'aide du logiciel TRNSYS.

À cette fin, les résultats obtenus à partir de ces mesures indiquent que les températures sont toujours élevées et les humidités relatives sont très basses pendant toutes les heures de la journée, du matin à minuit durant les jours d'été typiques étudiés. Ces valeurs dépassent les 37°C pour la température opérative et inférieure à 20% pour l'humidité relative. Cela pousse les habitants à occuper les terrasses pendant la nuit pour sommeiller.

Les résultats des simulations thermiques ont montré que l'application d'une peinture froide thermo réfléchissante associée à une toiture à double peau a un impact positif significatif sur les températures intérieures et les charges de refroidissement. Cette combinaison réduit considérablement la température ambiante intérieure, ce qui entraîne une réduction significative de la consommation d'énergie annuelle. Les températures mesurées et simulées dans le cas existant pendant les journées typiques d'été sont supérieures à 37°C, et elles sont abaissées jusqu'à 32°C lorsque la toiture est optimisée. De plus, la consommation énergétique annuelle est réduite de 572 kWh par rapport à l'état actuel.

Le comportement de la face externe du toit présente un paramètre important qui impacte les ambiances thermiques intérieures, lorsqu'il présente la partie qui est en contact direct avec les conditions climatiques extérieures, en particulier les fortes irradiances solaires en été, surtout dans les régions chaudes et arides. La face externe de la surface du toit est un facteur clé qui doit être traité, aussi puisqu'elle influe directement sur les gains intérieurs surtout dans les contextes traditionnels, le cas de notre étude. Par conséquent, l'application d'une peinture froide offre une forte réduction de la température ambiante intérieure et de fonctionnement tout au long des jours de saison chaude, améliorant ainsi le confort thermique.

En outre, la peinture thermo réfléchissante réduit non seulement l'absorption des rayonnements solaires intenses en été, mais réfléchit également une grande partie de ces rayonnements. Ainsi, la quantité de chaleur stockée dans le toit est réduite.

## Conclusion Générale

---

Ensuite, l'effet isolant supplémentaire de la toiture par le toit double peau assure une bonne isolation thermique contre les apports de chaleur, ce qui minimise la qualité de la chaleur accumulée pendant les heures de surchauffe de la journée et par la suite, la transmission de la chaleur vers l'intérieur pendant la nuit.

De plus, la couche extérieure du toit à double peau qui est peinte avec une peinture thermo réfléchissante protège la couche principale, car la lame d'air a une bonne conductivité thermique qui empêche le transfert de chaleur vers le toit principal.

L'adoption d'un système de toiture double peau combinée à une peinture thermo réfléchissante présente une solution prometteuse et émergente dans les habitations de ce type de climat chaud et aride.

- En résumé, une description des résultats conclut :

Les résultats obtenus à partir de mesures in situ de la température intérieure moyenne de l'air ambiant pendant la période d'enquête ; qui ont eu lieu pendant trois journées représentatives de surchauffe en juillet 2018 sont supérieurs à 37°C dans les espaces à l'étage pendant les différentes heures de la journée de 6h00 du matin, jusqu'à 00h00 minuit.

Aussi, les températures radiantes moyennes des surfaces dépassaient 39°C pour la surface du toit et 38°C pour les surfaces des murs et des sols mesurées aux différentes heures des jours représentatifs de la période étudiée. Ces valeurs sont hors de la plage de confort selon la norme ASHRAE.

De plus, les valeurs d'humidité relative moyennes mesurées obtenues sont très faibles, pouvant atteindre moins de 20% à l'intérieur à certaines heures de la journée (surtout l'après-midi et la nuit) dans les espaces du premier étage qui est en contact avec le toit. Cela entraîne une sensation d'inconfort thermique.

Le travail de validation montre la cohérence entre les valeurs de température d'air ambiant mesurées et simulées d'un côté, et la cohérence entre les valeurs de température opérative mesurées et simulées de l'autre côté.

Les résultats de la simulation thermique réalisée sur une période d'une année montrent que les besoins en refroidissement pour le cas d'étude s'étalent sur cinq mois de la période de surchauffe de l'année de mai à août.

Dans le cas présent, pendant la période de surchauffe qui court de mai à août, seuls 6% des valeurs de température opérative obtenues en pourcentage sont dans la plage de confort thermique, ce qui nécessite l'utilisation de systèmes de climatisation sur toute

## Conclusion Générale

---

la période de surchauffe de l'année (de mai à septembre). Il en résulte une lourde facture de consommation d'énergie pour la climatisation.

Alors que, pour le cas optimisé, les valeurs de température opérative sont améliorées et abaissées, minimisant et économisant ainsi les besoins en climatisation ; ce qui réduit et économise la facture annuelle.

Le calcul des charges de refroidissement sur une période d'un an fait que la consommation globale d'énergie dans le cas existant est égale à 872 kWh/an et elles sont égales à 300 kWh/an dans le cas amélioré ; c'est-à-dire que les charges de climatisation sont réduites de 66 %.

- Dans l'étude de cas existant, le toit traditionnel est fait de matériaux locaux et puisque les toits des maisons traditionnelles "Mozabite" sont des terrasses à toit plat, ils sont exposés pendant une longue période aux rayons solaires agressifs pendant les jours de la période estivale. Cette toiture traditionnelle est épaisse avec une masse thermique élevée, mais elle reste un élément de chaleur transitoire du fait de son exposition au fort rayonnement solaire des jours d'été. Bien connaître ; que la face externe du toit traditionnel existant ne contienne pas d'éléments réfléchissants, ce qui permet à une grande quantité de rayonnement solaire incident d'être absorbée par la surface du toit. C'est pourquoi ; la maison traditionnelle typique "Mozabite" avec un toit traditionnel typique a été évaluée expérimentalement par des mesures in situ dans les conditions climatiques du Ksar de Béni Isguen. À cette fin, les valeurs obtenues à partir des mesures réelles indiquent que les températures intérieures sont toujours élevées et l'humidité relative est très faible pendant toutes les heures de la journée du matin à minuit des journées d'été typiques étudiées.
- Dans les villes traditionnelles au climat chaud et aride, comme le Ksar de Béni Isguen, où l'organisation urbaine est basée sur un tissu compact, les ruelles sont étroites et l'ombre baigne les rues et ruelles, ce qui minimise l'exposition des surfaces murales au soleil. Par conséquent, la toiture reste la partie la plus exposée au rayonnement solaire intense et à la chaleur excessive, surtout en été. De plus, les principales pertes thermiques se font par le toit. Les pièces situées sous les toits sont donc toujours plus inconfortables que les pièces des autres niveaux en raison du gain de chaleur supplémentaire par ce chemin.

Pour cette raison, la protection de la toiture est une nécessité essentielle pour assurer le confort thermique intérieur. De plus, les performances thermiques du toit peuvent

## Conclusion Générale

---

influencer de manière significative la consommation énergétique des bâtiments et la volonté de minimiser les températures intérieures.

La base de la solution développée dans cette recherche est le traitement de la face externe du toit exposée directement aux rayons solaires agressifs et l'isolation thermique de la couche principale du toit. L'utilisation d'une peinture thermo réfléchissante à haut albédo de haute réflectance solaire de 0,8 réfléchit considérablement une grande quantité de rayons solaires, évitant l'absorption de ces fortes irradiations solaires par la face extérieure du toit, ce qui minimise la quantité de chaleur transmise à la couche principale du toit.

Aussi, la lame d'air entre les deux couches secondaire et principale de la toiture double peau à faible conductivité thermique de 0,047 W/mK offre une forte isolation thermique, lorsqu'elle empêche le transfert de chaleur vers la couche principale de la toiture. Cela implique une réduction considérable de la température intérieure et par conséquent, implique une réduction de l'utilisation des systèmes de climatisation lorsque la consommation d'énergie dédiée au refroidissement est réduite.

Cette combinaison contrôle la quantité de rayonnement solaire absorbée et la chaleur transmise à travers le toit pour maintenir la température à l'intérieur aussi basse que possible. Cela procure un confort thermique qui se traduit par une baisse des coûts énergétiques lorsque l'utilisation des systèmes de climatisation est réduite.

- Le travail de validation montre la cohérence entre les valeurs de température d'air ambiant mesurées et simulées d'un côté, et la cohérence entre les valeurs de température opérative mesurées et simulées d'un autre côté.
- Les résultats de la simulation thermique réalisée sur une période de l'année montrent que les besoins en refroidissement pour le cas d'étude s'étalent sur cinq mois de la période de surchauffe de l'année de mai à août.
- Dans le cas présent, pendant la période de surchauffe qui va de mai à août, seuls 6% des valeurs de température opérative obtenues en pourcentage sont dans la plage de confort thermique, ce qui nécessite l'utilisation de systèmes de climatisation sur toute la période de surchauffe de l'année (de mai à septembre). Il en résulte une lourde facture de consommation d'énergie pour la climatisation.
- Alors que, pour le cas optimisé, les valeurs de température opérative sont améliorées et abaissées, minimisant et économisant ainsi les besoins de climatisation.

## Conclusion Générale

---

On peut conclure que la combinaison d'une toiture à double peau avec une peinture réfléchissante est une solution de rénovation intéressante pour réduire la demande énergétique dans les bâtiments résidentiels traditionnels des Ksour dans les régions chaudes et arides, offrant également un impact environnemental réduit. L'encouragement de l'utilisation d'une toiture double peau couplée à une peinture froide à base d'albédo élevé avec des constituants naturels est une approche totalement inédite en Algérie, notamment dans les maisons traditionnelles du Ksar de Béni Isguen dans la vallée du M'Zab, au Sahara.

## Conclusion Générale

---

### Les limites de la recherche :

- La combinaison entre la toiture double peau et la peinture thermo réfléchissante est une bonne solution qui a montré son efficacité thermique et énergétique, mais on doit équiper la maison par une ventilation nocturne pour mieux améliorer l'état de confort thermique pendant les jours de pointe en été.

#### Explication :

Les résultats ont montré que la combinaison entre ces deux stratégies passives contribue considérablement dans la régulation thermique intérieure, lorsque la température se diminue par 5 °C, mais elle reste proche de la limite de la zone de confort. Par exemple dans quelques heures de quelques jours de pointe du mois de juillet et août, quand la chaleur externe journalière est très haute, les températures intérieures mêmes sont améliorées, mais la climatisation reste nécessaire pour atteindre un confort thermique satisfaisant. Donc, Il est préférable d'équiper une ventilation nocturne pour abaisser encore plus les températures intérieures après le coucher du soleil et évacuer la chaleur stockée par les parois.

- Les résultats obtenus dans cette recherche sont recommandés spécialement dans les habitations à faible coût avec toiture plate traditionnelle des climats chaud et aride similaire à Béni Isguen. Lorsque les conditions de limites utilisées à travers cette étude prennent en considération les données climatiques spéciales au climat chaud et aride des Ksour du Sud algérien. Donc, on ne peut pas généraliser ces résultats sur d'autres types de climats (comme le climat froid). Dans les climats froids, on est besoin de gain de chaleur, mais la peinture thermo réfléchissante permet de réfléchir hautement les rayons solaires, donc elle n'est pas conseillée dans d'autres types du climat qui ont d'autres caractéristiques climatiques qui se différent des conditions climatiques chaudes et arides sévères du Ksar de Béni Isguen. Tandis que, la méthode développée dans cette recherche peut être appliquée dans d'autres recherches avec d'autres conditions climatiques.
- La dégradation physico-chimique des propriétés thermiques de la peinture thermo réfléchissante avec le temps, conjugué par les hautes températures agressives de quelques périodes d'été peut entraîner une réduction de leur performance thermique et leurs impacts positifs sur les températures intérieures et par conséquent les besoins en climatisation ; c'est-à-dire réduire leur capacité à économiser l'énergie.

## Conclusion Générale

---

- Les bonnes performances thermiques et énergétiques de la toiture double peau peinte en blanc avec une peinture thermo réfléchissante peuvent se diminuer avec le temps, en raison de l'accumulation des poussières. Ses performances sont réduites si elle n'est pas nettoyée ou renouvelée. Donc, l'entretien de la peinture est obligatoire pour assurer un rendement thermique et énergétique favorable.
- Pour la toiture double peau, le vide d'air doit être bien conçu et bien isolé d'une façon qu'on assure sa stabilité, pour donner de bons résultats. Donc, la mise en œuvre et la technique de construction doivent être bien maîtrisées et réalisées pour donner les bons résultats.

### Recommandations pour futures recherches :

- Lorsque la peinture thermo réfléchissante reflète une grande quantité de rayons solaires, on propose pour les futures analyses de mieux gérer les besoins en chauffage pendant la période hivernale. Cependant, dans le cas d'étude traité dans cette recherche, pour les données climatiques de la période hivernale, l'hiver est doux avec des températures supportables par rapport à l'été qui est marqué par de hautes températures et de faibles humidités. Par exemple, l'étude de l'effet de l'ajout de dispositifs rétractable pour capter les rayons solaires en hiver et les enlève en été est peut être intéressante.
- C'est intéressant d'étudier l'effet de l'ajout de facteur « Ombre » à cette contribution de toiture double peau couplée à une peinture thermo réfléchissante sur le rendement thermique et énergétique des bâtiments résidentiels des villes traditionnelles des régions chaudes et arides.

On propose d'étudier l'effet de couplage d'autres stratégies de refroidissement passif sur l'état de confort thermique, comme « l'ombre », surtout que dans les villes traditionnelles compactes des régions chaudes, d'où la forte exposition des rayons solaires est dirigée vers les surfaces de la toiture. Alors, il faut bien maîtriser la chaleur transmise par la toiture. L'ajout des dispositifs mobiles comme des couvertures construites par des matériaux naturels (comme des couvertures en peau de chameau qui est une matière disponible largement dans les Ksour) qui sert à couvrir les terrasses spécialement dans les heures de pointe de midi et d'après-midi des étés chauds. C'est dispositifs peuvent être ajouté dans la journée et enlever la nuit.

- On peut élargir la fonction de la toiture pour améliorer les autres types de confort. Par exemple, pour le confort visuel on propose l'ajout des dispositifs dans le toiture pour mieux régler le problème d'éclairage naturel comme des dispositifs qui fonctionnent avec le principe de « moucharabieh » dans la toiture.
- On propose aussi, l'élargissement de l'utilisation d'autres stratégies passives avec la contribution proposée comme l'isolation des murs, l'optimisation de l'enveloppe de bâtiment avec l'ajout des isolants à base naturelle et locale à moindre coût (comme limaille de palmier dont la matière première est disponible largement à Béni Isguen), la favorisation de la ventilation naturelle et nocturne qui sont tous des paramètres qu'ils doivent être prendre en considération pour améliorer la performance thermique et énergétique globale d'un bâtiment.

## Conclusion Générale

---

- On propose dans des futures analyses l'utilisation d'une autre méthodologie pour étudier l'effet de cette contribution comme la réalisation de prototype (cellule) dans le contexte étudié et les contextes qui ont les conditions climatiques similaires au Ksar de Béni Isguen et élargir les résultats par suivre les variations de tous les paramètres microclimatiques au cours de l'année pour valider les résultats.
- On propose vivement que l'application d'une toiture thermo réfléchissante doit être recommandée dans le code algérien pour les zones arides lorsque la consommation de l'énergie dédiée à la climatisation est très grande en Algérie, dont 2/3 de la surface de l'Algérie représente le désert avec un climat chaud et sec.
- On propose également des études approfondies sur l'amélioration des composants des peintures thermo réfléchissantes afin d'améliorer encore plus leurs propriétés thermiques pour une utilisation plus large.

# Références

## Références

---

- Abaas, Z. R. (2020).** Impact of development on Baghdad's urban microclimate and human thermal comfort. *Alexandria Engineering Journal*, 59(1), 275-290.
- Abdulkareem, H. A. (2016).** Thermal comfort through the microclimates of the courtyard. A critical review of the middle-eastern courtyard house as a climatic response. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 216, 662-674.
- Aboulnaga, M., & Mostafa, M. (2019).** Sustainability Principles and Features Learned from Vernacular Architecture: Guidelines for Future Developments Globally and in Egypt. *Sustainable Vernacular Architecture: How the Past Can Enrich the Future*, 293.
- Abuorf, H., & Wafi, S. (2020).** A Critical Regionalism in the Golf Architecture: Masdar's 'Eco-city Project'. *Journal of Architectural Research and Development*, 4(3).
- Adad, M. C., & MAZOUZ, M. T. (2013a).** LES ANCIENS ET NOUVEAUX KSOUR: ETUDE COMPARATIVE. CAS DU M'ZAB. *Courrier du savoir*, 16, 77-87.
- Ahmed, R. (2014).** *Lessons learnt from the vernacular architecture of bedouins in Siwa oasis, Egypt.* Paper presented at the ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction.
- Ahriz, A., Zemmouri, N., & Fezzai, S. (2017).** Ksour of the SAHARA Desert as A Great Lesson of Sustainable Urban Design in Hot Desert Oases. *Journal Impact Factor*, 3, 110.
- Akbari, H., Bretz, S., Kurn, D. M., & Hanford, J. (1997).** Peak power and cooling energy savings of high-albedo roofs. *Energy and Buildings*, 25(2), 117-126.
- Akbari, H., Levinson, R., Miller, W., & Berdahl, P. (2005).** Cool colored roofs to save energy and improve air quality.
- Akbari, H., Menon, S., & Rosenfeld, A. (2009).** Global cooling: increasing world-wide urban albedos to offset CO 2. *Climatic change*, 94(3), 275-286.
- Al-Obaidi, K. M., Ismail, M., & Rahman, A. M. A. (2014).** Passive cooling techniques through reflective and radiative roofs in tropical houses in Southeast Asia: A literature review. *Frontiers of Architectural Research*, 3(3), 283-297.
- Al-Sallal, K. A. (2016).** Passive and low energy cooling *Low Energy Low Carbon Architecture* (pp. 57-102): CRC Press.
- Al-Sallal, K. A., & AbouElhamd, A. R. (2018).** Natural ventilation in hot seaside urban environments *Seaside Building Design: Principles and Practice* (pp. 27-41): Springer.
- Al-Sallal, K. A., & Al-Rais, L. (2012).** Outdoor airflow analysis and potential for passive cooling in the modern urban context of Dubai. *Renewable Energy*, 38(1), 40-49.

## Références

---

- Al-Sallal, K. A., & Rahmani, M. (2019).** Vernacular architecture in the MENA region: Review of bioclimatic strategies and analysis of case studies. *Sustainable Vernacular Architecture*, 23-53.
- Al-Sanea, S. A. (2002).** Thermal performance of building roof elements. *Building and environment*, 37(7), 665-675.
- Al-Zubaidi, M. S. (2002).** *The Efficiency of Thermal Performance of the Desert Buildings—The Traditional House of Ghadames/Libya*. Paper presented at the Annual Conference of the Canadian Society for Civil Engineering, Montréal, Québec, Canada.
- Alexandri, E., & Jones, P. (2008).** Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and environment*, 43(4), 480-493.
- Algarni, S. (2019).** Potential for cooling load reduction in residential buildings using cool roofs in the harsh climate of Saudi Arabia. *Energy & Environment*, 30(2), 235-253.
- Alkhalidi, A. (2013).** Sustainable application of interior spaces in traditional houses of the United Arab Emirates. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 102, 288-299.
- Almatarneh, R. T. (2013).** Sustainability lessons learnt from traditional architecture: a case study of the old city of As-Salt, Jordan. *IOSR-JESTFT*, 5(3), 100-109.
- ALMI, K. (2018).** *Développement et caractérisation de matériaux à base du bois de palmier dattier adaptés aux applications de développement durable en Algérie*. UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA.
- Almusaed, A. (2011).** Vernacular Architecture from Hot Regions (Basrah, Iraq) *Biophilic and Bioclimatic Architecture* (pp. 233-249): Springer.
- Alp, A. V. (1991).** Vernacular climate control in desert architecture. *Energy and Buildings*, 16(3-4), 809-815.
- Amarilla, B. C. (1992).** Influence of compactness on housing sound insulation costs. *Applied Acoustics*, 35(3), 203-219.
- Amraoui, K., Sriti, L., Di Turi, S., Ruggiero, F., & Kaihoul, A. (2021).** *Exploring building's envelope thermal behavior of the neo-vernacular residential architecture in a hot and dry climate region of Algeria*. Paper presented at the Building Simulation.
- Arumugam, R. S., Garg, V., Ram, V. V., & Bhatia, A. (2015).** Optimizing roof insulation for roofs with high albedo coating and radiant barriers in India. *Journal of Building Engineering*, 2, 52-58.
- ASHRAE, A. G. (2002).** Guideline 14-2002: Measurement of Energy and Demand Savings. *ASHRAE, Atlanta*.

## Références

---

- Ashrafi, M. (2008).** *Architecture troglodytique, approches et sauvegarde*. Thèse de doctorat, Genève.
- Attia, A. S. (2020).** Traditional multi-story house (Tower House) in Sana'a City, Yemen. An example of sustainable architecture. *Alexandria Engineering Journal*, 59(1), 381-387.
- Ayata, T., Tabares-Velasco, P. C., & Srebric, J. (2011).** An investigation of sensible heat fluxes at a green roof in a laboratory setup. *Building and environment*, 46(9), 1851-1861.
- Ayoub, M., & Elseragy, A. (2018).** Parameterization of traditional domed-roofs insulation in hot-arid climates in Aswan, Egypt. *Energy & Environment*, 29(1), 109-130.
- Azil, C., Djebri, B., & Rovero, L. (2018).** *Desert rose: building material of cupolas in the Souf in Algeria*. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Bagasi, A. A., & Calautit, J. K. (2020).** Experimental field study of the integration of passive and evaporative cooling techniques with Mashrabiya in hot climates. *Energy and Buildings*, 225, 110325.
- Bagasi, A. A., Calautit, J. K., & Karban, A. S. (2021).** Evaluation of the Integration of the Traditional Architectural Element Mashrabiya into the Ventilation Strategy for Buildings in Hot Climates. *Energies*, 14(3), 530.
- Bahadori, M., & Haghghat, F. (1985).** Passive cooling in hot, arid regions in developing countries by employing domed roofs and reducing the temperature of internal surfaces. *Building and environment*, 20(2), 103-113.
- Bakarman, M. A., & Chang, J. D. (2015).** The influence of height/width ratio on urban heat island in hot-arid climates. *Procedia Engineering*, 118, 101-108.
- Balalou, Z. (2008).** *Revitalisation urbaine pour la sauvegarde du patrimoine, cas de la vallée du M<sup>o</sup> Zab*. Paper presented at the actes du colloque international „Réhabilitation et revitalisation urbaine“, tenu à Oran du.
- Bates, A. J., Sadler, J. P., & Mackay, R. (2013).** Vegetation development over four years on two green roofs in the UK. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12(1), 98-108.
- Baudoui, R., & Potié, P. (2003).** *André Ravéreau l'atelier du désert: Parenthèses*.
- Bayoumi, O. A. M. (2018).** Nubian Vernacular architecture & contemporary Aswan buildings' enhancement. *Alexandria Engineering Journal*, 57(2), 875-883.
- Bekkouche, S., Benouaz, T., Cherier, M., Hamdani, M., Yaiche, M., & Benamrane, N. (2013).** Influence of the compactness index to increase the internal temperature of a building in Saharan climate. *Energy and Buildings*, 66, 678-687.

## Références

---

- Bekkouche, S., Benouaz, T., Hamdani, M., Cherier, M., Yaiche, M., & Benamrane, N. (2015).** Judicious choice of the building compactness to improve thermo-aeraulic comfort in hot climate. *Journal of Building Engineering*, 1, 42-52.
- Bekleyen, A., & Dalkiliccedil, N. (2011).** The influence of climate and privacy on indigenous courtyard houses in Diyarbakır, Turkey. *Scientific Research and Essays*, 6(4), 908-922.
- Bencheikh, H. (2007).** *Etude et réalisation d'un système de refroidissement passif en utilisant une toiture radio-évaporative dans les climats chauds et arides.*
- Bensalah, I., Yousfi, B., Mena, N., & Bougattoucha, Z. (2018).** Urbanisation de la vallée du M'zab et mitage de la palmeraie de Ghardaïa (Algérie): un patrimoine oasien menacé. *Belgeo. Revue belge de géographie*(2).
- Bensayah, A., Bencheikh, H., & Abdessemed, A. (2019).** *Mzabite Heritage in Southern Algeria: What Bioclimatic Lessons can Be Learned to Optimize Thermal Comfort?* Paper presented at the MATEC Web of Conferences.
- Benslimane, N., & Biara, R. W. (2017).** *Stratagems of popular homes in the desertic climate... now, in the process of perdition.* Paper presented at the AIP Conference Proceedings.
- Benyoucef, B. (1986).** Le M'Zab: les pratiques de l'espace: Entreprise nationale du livre.
- Benyoucef, B. (1988).** Le M'zab, vie quotidienne dans la vallée des cinq cités-jardins. Paper presented at the L'eau et le Maghreb: un aperçu sur le présent, l'héritage et l'avenir.
- Benyoucef, B. (1992).** Le Mzab: espace et société: Verlag nicht ermittelbar.
- Benyoucef, B. (2018).** Le M'Zab: regards d'urbanisme et de sociologie: Librinova.
- Bélaïd, F., & Youssef, M. (2017).** Environmental degradation, renewable and non-renewable electricity consumption, and economic growth: Assessing the evidence from Algeria. *Energy policy*, 102, 277-287.
- Biara, R. W., & Belmili, H. (2017).** The Saharan Setting facing future climate. *Energy Procedia*, 136, 481-487.
- Biradar, V. K., & Mama, S. (2017).** Vernacular Architecture: A Sustainable Approach *Understanding Built Environment* (pp. 125-137): Springer.
- Bouchair, A. (1989).** *Solar induced ventilation in the Algerian and similar climates.* Doctoral thesis, University of Leeds.
- Bouchair, A. (2015).** Vernacular architecture: hot arid climate control *Encyclopedia of energy engineering and technology* (Vol. 4, pp. 2342): Taylors & Francis Group USA.

## Références

---

- Bouchair, A., & Dupagne, A. (2003).** Building traditions of Mزاب facing the challenges of re-shaping of its built form and society. *Building and Environment*, 38(11), 1345-1364.
- Bouchair, A., Tebbouche, H., Hammouni, A., Lehtihet, M., & Blibli, M. (2013).** Compact cities as a response to the challenging local environmental constraints in hot arid lands of Algeria. *Energy Procedia*, 42, 493-502.
- Bowman, N., Lomas, K., Cook, M., Eppel, H., Ford, B., Hewitt, M., . . . Gonzalez, R. (1997).** Application of passive downdraught evaporative cooling (PDEC) to non-domestic buildings. *Renewable Energy*, 10(2-3), 191-196.
- Cantuaria, G. (2019).** Vegetation and Environmental Comfort *Bioclimatic Architecture in Warm Climates* (pp. 155-191): Springer.
- Casanovas Boixereu, F. X. (2012).** Patrimoine et participation: vers un nouveau cadre de gouvernance au Maghreb: Col·legi d'Aparelladors, Arquitectes Tècnics i Enginyers d'Edificació.
- Cascone, S. (2019).** Green roof design: State of the art on technology and materials. *Sustainability*, 11(11), 3020.
- Castleton, H. F., Stovin, V., Beck, S. B., & Davison, J. B. (2010).** Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and Buildings*, 42(10), 1582-1591.
- Chabi, M. (2009).** *Etude bioclimatique du logement socio-participatif de la vallée du M'زاب: cas du ksar Tafilelt.*
- Chabi, M., & Dahli, M. (2011).** Une nouvelle ville saharienne sur les traces de l'architecture traditionnelle: Communication-Rouen, ksour.
- Chabi M, D. M. (2011).** Le Ksar de Tafilelt dans la vallée du Mزاب : Une expérience urbaine entre tradition et modernité.
- Chandel, S., Sharma, V., & Marwah, B. M. (2016).** Review of energy efficient features in vernacular architecture for improving indoor thermal comfort conditions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 459-477.
- Chang, P.-C., Chiang, C.-M., & Lai, C.-M. (2008).** Development and preliminary evaluation of double roof prototypes incorporating RBS (radiant barrier system). *Energy and Buildings*, 40(2), 140-147.
- Chávez, U., del Pozo, C. E., Haro, E. T., & Rodríguez, J. M. (2016).** A thermal assessment for an innovative passive cooling system designed for flat roofs in tropical climates. *Energy Procedia*, 91, 284-293.

## Références

---

- Cheikh, H. B., & Bouchair, A. (2004).** Passive cooling by evapo-reflective roof for hot dry climates. *Renewable energy*, 29(11), 1877-1886.
- Chen, J., & Lu, L. (2021).** Comprehensive evaluation of thermal and energy performance of radiative roof cooling in buildings. *Journal of Building Engineering*, 33, 101631.
- Cheng, V., Ng, E., & Givoni, B. (2005).** Effect of envelope colour and thermal mass on indoor temperatures in hot humid climate. *Solar Energy*, 78(4), 528-534.
- Chiesa, G. (2019).** Early design strategies for passive cooling of buildings: lesson learned from Italian archetypes. *Sustainable vernacular architecture. How the past can enrich the future*. Springer, Cham, 377-408.
- Ching, F. D., Onouye, B. S., & Zuberbuhler, D. (2013).** *Building Structures Illustrated: Patterns, Systems, and Design*: John Wiley & Sons.
- Chua, K., & Chou, S. (2011).** A performance-based method for energy efficiency improvement of buildings. *Energy Conversion and Management*, 52(4), 1829-1839.
- Costanzo, V., Evola, G., & Marletta, L. (2013).** Cool roofs for passive cooling: performance in different climates and for different insulation levels in Italy. *Advances in building energy research*, 7(2), 155-169.
- Costanzo, V., Evola, G., & Marletta, L. (2016).** Energy savings in buildings or UHI mitigation? Comparison between green roofs and cool roofs. *Energy and Buildings*, 114, 247-255.
- Côte, M. (2021).** Living in Deserts. *Mankind and Deserts 3: Wind in Deserts and Civilizations*, 107-156.
- Côte, M. (2006).** Si le Souf m'était conté: comment se fait et se défait un paysage: Saïd Hannachi.
- Côte, M. (2002).** Une ville remplit sa vallée: Ghardaïa (Note). *Méditerranée*, 99(3), 107-110.
- Côte, M. (2005).** La ville et le désert: le Bas-Sahara algérien: Karthala Éditions.
- Côte, M. (2017).** Cultural Heritages of Water: The cultural heritages of water in the Middle East and Maghreb/Les patrimoines culturels de l'eau: Les patrimoines culturels de l'eau au Moyen-Orient et au Maghreb: ICOMOS International.
- Dabaieh, M., Wanas, O., Hegazy, M. A., & Johansson, E. (2015).** Reducing cooling demands in a hot dry climate: A simulation study for non-insulated passive cool roof thermal performance in residential buildings. *Energy and Buildings*, 89, 142-152.
- Daoudi, N. S., Mestoul, D., Lamraoui, S., Boussoualim, A., Adolphe, L., & Bensalem, R. (2019).** Vernacular Architecture in Arid Climates: Adaptation to Climate Change *Bioclimatic Architecture in Warm Climates* (pp. 119-154): Springer.

## Références

---

- De Schiller, S., & Evans, J. M. (2002).** Urban climate and compact cities in developing countries *Compact Cities* (pp. 129-136): Routledge.
- De Xuan, A. A. A. S., & Zhe, L. (2016).** Traditional solutions in climate adaptation and low energy buildings of hot and arid regions in west Asia *Urban development studies* 23.
- DeNardo, J., Jarrett, A., Manbeck, H., Beattie, D., & Berghage, R. (2005).** Stormwater mitigation and surface temperature reduction by green roofs. *Transactions of the ASAE*, 48(4), 1491-1496.
- Deng, J.-Y., & Wong, N. H. (2020).** Impact of urban canyon geometries on outdoor thermal comfort in central business districts. *Sustainable Cities and Society*, 53, 101966.
- Didillon, H., & Donnadieu, C. (1977).** *Habiter le désert: les maisons mozabites: recherches sur un type d'architecture traditionnelle pré-saharienne* (Vol. 6): Editions Mardaga.
- Driss, H. (2017).** EVOLUTION OF THE RELATIONSHIP OF TROGLODYTIC DWELLINGS TO THE EARTH (From excavation to vegetated envelope).
- DTR3.2. (2011).** thermal regulation of residential buildings. from CNERIB,
- Dusza, Y. (2017).** *Toitures végétalisées et services écosystémiques: favoriser la multifonctionnalité via les interactions sols-plantes et la diversité végétale*. Paris 6.
- Dzou-Tsanga, R. (2016).** Architecture et identités techniques au Cameroun. *e-Phaïstos. Revue d'histoire des techniques/Journal of the history of technology*, 2, 36-48.
- Edwards, B., Sibley, M., Land, P., & Hakmi, M. (2006).** *Courtyard housing: past, present and future*: Taylor & Francis.
- El Hozayen, A. (2013).** *Le traitement des espaces urbains dans les villes au climat chaud et sec pour diminuer leurs problèmes climatiques. Étude de cas: la ville du Caire*. Alexandria Construction Co., Elmabna el edary no. 2, RI Rehab city, Nouveau ...
- Encyclopédie libre, W. (2016).** Toit-terrasse.
- Engin, N., Vural, N., Vural, S., & Sumerkan, M. (2007).** Climatic effect in the formation of vernacular houses in the Eastern Black Sea region. *Building and environment*, 42(2), 960-969.
- Faghih, A. K., & Bahadori, M. N. (2009).** Solar radiation on domed roofs. *Energy and Buildings*, 41(11), 1238-1245.
- Faghih, A. K., & Bahadori, M. N. (2011).** Thermal performance evaluation of domed roofs. *Energy and Buildings*, 43(6), 1254-1263.
- Fahed, J. (2018).** *Etude numérique du potentiel de rafraîchissement des techniques de réduction des îlots de chaleur urbain (ICU) sous climat méditerranéen*. Toulouse, INSA.

## Références

---

- Fantucci, S., & Serra, V. (2019).** Investigating the performance of reflective insulation and low emissivity paints for the energy retrofit of roof attics. *Energy and Buildings*, 182, 300-310.
- Fathy, H. (2010).** *Architecture for the poor: an experiment in rural Egypt*: University of Chicago press.
- Finocchiaro, L. (2019).** Enhancing Environmental Performance of Vernacular Architecture. A Case Study *Sustainable Vernacular Architecture* (pp. 257-273): Springer, Cham.
- Gaffin, S. R., Khanbilvardi, R., & Rosenzweig, C. (2009).** Development of a green roof environmental monitoring and meteorological network in New York City. *Sensors*, 9(4), 2647-2660.
- Gagliano, A., Detommaso, M., Nocera, F., & Evola, G. (2015).** A multi-criteria methodology for comparing the energy and environmental behavior of cool, green and traditional roofs. *Building and environment*, 90, 71-81.
- Geetha, N., & Velraj, R. (2012).** Passive cooling methods for energy efficient buildings with and without thermal energy storage—A review. *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*, 29(2), 913-946.
- Ghaemmaghami, P., & Mahmoudi, M. (2005).** *Wind tower a natural cooling system in Iranian traditional architecture*. Paper presented at the International Conference “Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment.
- Givoni, B. (1992).** Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy and Buildings*, 18(1), 11-23.
- Givoni, B. (1994).** *Passive low energy cooling of buildings*: John Wiley & Sons.
- Givoni, B. (1998a).** *Climate considerations in building and urban design*: John Wiley & Sons.
- Givoni, B. (1998b).** Effectiveness of mass and night ventilation in lowering the indoor daytime temperatures. Part I: 1993 experimental periods. *Energy and Buildings*, 28(1), 25-32.
- Givoni, B., & Izard, J.-L. (1978).** *L'homme, l'architecture et le climat*: Editions du moniteur Paris.
- Golany, G. (1988).** *Earth-sheltered dwellings in Tunisia: ancient lessons for modern design*: University of Delaware Press.
- Goldin, A., Jongeward, A., Scammell, L., Wise, C., & Assessment, A. L. C. (2009).** HEYDAR ALIYEV CULTURAL CENTER.

## Références

---

- Granier, T., Kaye, A., Ravier, J., & Sillou, D. (2006).** *The Nubian Vault: Earth roofs in the Sahel*. Paper presented at the Proceedings of the conference Living in Deserts: Is a sustainable urban design still possible in Arid and hot regions.
- Guechhati, R., Moussaoui, M., Mezrhah, A., & Mezrhah, A. (2010a).** Simulation de l'effet de l'isolation thermique des bâtiments Cas du centre psychopédagogique SAFAA à Oujda. *Journal of Renewable Energies*, 13(2), 223–232-223–232.
- Guechhati, R., Moussaoui, M., Mezrhah, A., & Mezrhah, A. (2010b).** Simulation de l'effet de l'isolation thermique des bâtiments Cas du centre psychopédagogique SAFAA à Oujda. *Revue des Energies Renouvelables*, 13(2), 223-232.
- Guide. (2015).** Toiture plate, from <https://www.guidebatimentdurable.brussels/fr/toiture-plate.html?IDC=9164>
- Guide pratique pour les architectes, G. (2013).** L'isolation thermique de la toiture plate
- Gul, Y., Hafiz, D., & El-Basel, M. (2021).** A Comparative Analysis Of Old And New Sustainable Developments In Middle Eastern Countries. *Design Engineering*, 1554-1571.
- Haberl, J. S., Claridge, D. E., & Culp, C. (2005).** ASHRAE's Guideline 14-2002 for Measurement of Energy and Demand Savings: How to Determine what was really saved by the retrofit.
- Hadhramaut, W. (2016).** Rehabilitation of the City of Shibam.
- Haghighi Poshtiri, A., Bahar, S., & Jafari, A. (2016).** Passive cooling of a stand-alone building with domed roof in hot and arid climate assisted by solar adsorption chiller. *Modares Mechanical Engineering*, 16(6), 17-28.
- Hamadou, I. Y. A. (2021).** Matériaux et réponses traditionnelles à la durabilité au nord Cameroun. *African and Mediterranean Journal of Architecture and Urbanism*, 3(1).
- Han, R., Xu, Z., & Qing, Y. (2017).** Study of passive evaporative cooling technique on water-retaining roof brick. *Procedia Engineering*, 180, 986-992.
- Hartig, T., Mitchell, R., De Vries, S., & Frumkin, H. (2014).** Nature and health. *Annual review of public health*, 35, 207-228.
- Hashem, A., Berdahl, P., Wiel, S., Miller, W., Desjarlais, A., & Levinson, R. (2006).** Cool-Color Roofing Material PIER Final Project Report.
- Hashemi, F. (2018).** *Adapting vernacular strategies for the design of an energy efficient residential building in a hot and arid climate: City of Yazd, Iran*. Iowa State University.

## Références

---

- Hauglustaine, J.-M., Simon, F., Buysel, F., Kezimana, M.-F., Huberty, C., & Monfils, S. (2018).** L'isolation thermique des toitures. [Guide pratique pour les architectes]. *Wallonie*.
- Hobbs, J. J. (2017).** Heritage in the lived environment of the United Arab Emirates and the Gulf region. *ArchNet-IJAR: International Journal of Architectural Research*, 11(2), 55.
- Hopkins, G., & Goodwin, C. (2011).** *Living architecture: Green roofs and walls*: Csiro Publishing.
- Hosseini, M., Lee, B., & Vakilinia, S. (2017).** Energy performance of cool roofs under the impact of actual weather data. *Energy and Buildings*, 145, 284-292.
- Houda, D. (2017).** *Etude typo-morphologique et syntactique d'une architecture entre le sol et le sous-sol (Les habitations traditionnelles du site troglodytique de Béni Zelten*. Thèse de doctorat en architecture, Ecole nationale d'architecture et d'urbanisme (ENAU), Tunis.
- Huang, K.-T., & Li, Y.-J. (2017).** Impact of street canyon typology on building's peak cooling energy demand: A parametric analysis using orthogonal experiment. *Energy and Buildings*, 154, 448-464.
- Huerto-Cardenas, H., Leonforte, F., Aste, N., Del Pero, C., Evola, G., Costanzo, V., & Lucchi, E. (2020).** Validation of dynamic hygrothermal simulation models for historical buildings: State of the art, research challenges and recommendations. *Building and environment*, 180, 107081.
- Hughes, B. R., Calautit, J. K., & Ghani, S. A. (2012).** The development of commercial wind towers for natural ventilation: A review. *Applied energy*, 92, 606-627.
- Hussein, M. H. (2012).** *Investigation sur la qualité des ambiances hygrothermiques et lumineuses des habitats palestiniens: la cour: contribution environnementale et socioculturelle*. Université Bordeaux 1, France.
- Hwaish, A. N. A. (2015).** Impact of heat exchange on building envelope in the hot climates. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 5(2), 47-57.
- Hyde, R. (2012).** *Bioclimatic housing: innovative designs for warm climates*: Routledge.
- Jaffal, I., Ouldboukhite, S.-E., & Belarbi, R. (2012).** A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renewable Energy*, 43, 157-164.

## Références

---

- Jenks, M. J., Burgess, M. J. R., Acioly, C., Allen, A., Barter, P. A., & Brand, P. (2000).** *Compact cities: Sustainable urban forms for developing countries*: Taylor & Francis.
- Johansson, E. (2006).** Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco. *Building and environment*, 41(10), 1326-1338.
- Jomehzadeh, F., Nejat, P., Calautit, J. K., Yusof, M. B. M., Zaki, S. A., Hughes, B. R., & Yazid, M. N. A. W. M. (2017).** A review on windcatcher for passive cooling and natural ventilation in buildings, Part 1: Indoor air quality and thermal comfort assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 736-756.
- Kachkouch, S., Ait-Nouh, F., Benhamou, B., & Limam, K. (2018).** Experimental assessment of thermal performance of three passive cooling techniques for roofs in a semi-arid climate. *Energy and Buildings*, 164, 153-164.
- Kafafy, N. A. (2009).** Thinking out of the Box: Approaches for Facing the Under-Supplied Green Spaces in Over-Urbanized Compact Cities, with Application on Cairo City. *Urban Design Research: Method and Application*, 3, 165.
- Kamal, M. A. (2012).** An overview of passive cooling techniques in buildings: design concepts and architectural interventions. *Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture*, 55(1), 84-97.
- Kansara, T. (2016).** Transitional zone design in the desert Environment of Abu Dhabi: Vernacular vs. modern. *Sustainable Cities and Society*, 23, 59-67.
- Karimi, A. Z., & Hosseini, B. (2012).** *The influence of Iranian Islamic Architecture on traditional houses of Kashan*. Paper presented at the Second International Conference, Mukogowa Women's Univ, Nishinomiya, Japan.
- Keshtkaran, P. (2011).** Harmonization between climate and architecture in vernacular heritage: a case study in Yazd, Iran. *Procedia Engineering*, 21, 428-438.
- Khalili, M., & Amindeldar, S. (2014).** Traditional solutions in low energy buildings of hot-arid regions of Iran. *Sustainable Cities and Society*, 13, 171-181.
- Khan, A. (2015).** *L'habitat durable en Arabie Saoudite: dimension climatique et socio-culturelle: cas d'étude: la ville de Djeddah*. Bordeaux.
- Khare, V. R., Vajpai, A., & Gupta, D. (2021).** A big picture of urban heat island mitigation strategies and recommendation for India. *Urban Climate*, 37, 100845.
- Konya, A. (2013).** *Design primer for hot climates*: Elsevier.
- La Roche, P., & Berardi, U. (2014).** Comfort and energy savings with active green roofs. *Energy and Buildings*, 82, 492-504.

## Références

---

- Laafer, A., Semmar, D., Hamid, A., & Bourouis, M. (2021).** Thermal and Surface Radiosity Analysis of an Underfloor Heating System in a Bioclimatic Habitat. *Energies*, 14(13), 3880.
- Lamprakos, M. (2016).** *Building a world heritage city: Sanaa, Yemen*: Routledge.
- Lamrhari, M. E. H. D. (2018).** *Comportement thermique et économie d'énergie dans un appartement avec différentes mesures d'efficacité énergétique dans les six zones climatiques du Maroc*. Université Cadi Ayyad Marrakech (Maroc).
- Lavaf Pour, Y., & Surat, M. (2012).** Towards new approaches for converting principles of vernacular architecture into energy efficient buildings in hot and dry climates. *Journal of Building Performance*.
- Lavigne, P. (1998).** La perméabilité au soleil des enveloppes d'édifices, un concept pour juger de leur qualité de confort d'été *actes de la conférence EPIC'98*. Lyon, France.
- Lavoie, F., Boeuf, F., & Thellier, F. (2015).** Qualité des ambiances dans les bâtiments Le confort thermique de l'Habitant.
- Lee, K. E., Williams, K. J., Sargent, L. D., Williams, N. S., & Johnson, K. A. (2015).** 40-second green roof views sustain attention: The role of micro-breaks in attention restoration. *Journal of Environmental Psychology*, 42, 182-189.
- Lehtihet, M., & Bouchair, A. (2018).** *The impact of extensive green roofs on the improvement of thermal performance for urban areas in Mediterranean climate with reference to the city of Jijel in Algeria*. Paper presented at the AIP Conference Proceedings.
- Lehtihet, M. C. (2018).** *Amélioration des microclimats des villes par la prolifération des terrasses et toitures végétalisées en zones aride et méditerranéenne*.
- Lepik, A. (2010).** *Small scale, big change: new architectures of social engagement: The Museum of Modern Art*.
- Li, D., Zheng, Y., Liu, C., Qi, H., & Liu, X. (2016).** Numerical analysis on thermal performance of naturally ventilated roofs with different influencing parameters. *Sustainable cities and society*, 22, 86-93.
- Li, W. C., & Yeung, K. K. A. (2014).** A comprehensive study of green roof performance from environmental perspective. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 3(1), 127-134.
- Lopez-Besora, J., Coch, H., & Pardal, C. (2019).** Contemporary roof design concepts: learning from vernacular architecture *Sustainable Vernacular Architecture* (pp. 357-376): Springer.

## Références

---

- Lucero-Álvarez, J., Martin-Dominguez, I. R., Rubín-Zacarías, F., Ledezma-Gallegos, A., & Alarcón-Herrera, M. (2011).** *Experimental comparison of heat flow through concrete roofing flagstones with different coatings.* Paper presented at the ISES Solar World Congress. Kassel, Alemania.
- Mahdavinejad, M., & Javanroodi, K. (2014).** Efficient roof shapes through wind flow and indoor temperature, case studies: Flat roofs and domed roofs. *Armanshahr Architecture & Urban Development*, 7(12), 55-68.
- Mahmoud, R. A. (2016).** Old Gourna: The complexity of vernacular architecture/urbanism and cultural heritage. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 225, 200-215.
- Maile, T., Bazjanac, V., & Fischer, M. (2012).** A method to compare simulated and measured data to assess building energy performance. *Building and environment*, 56, 241-251.
- Maleki, B. A. (2011).** Traditional sustainable solutions in Iranian desert architecture to solve the energy problem. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE)*, 6, 84-91.
- Mardaljevic, J. (2004).** Spatio-temporal dynamics of solar shading for a parametrically defined roof system. *Energy and Buildings*, 36(8), 815-823.
- Marseillaise, A. l. d. l. é. e. d. c. M.** Amélioration du confort estival, réduction de l'inconfort estival France.
- Martilli, A. (2014).** An idealized study of city structure, urban climate, energy consumption, and air quality. *Urban Climate*, 10, 430-446.
- Mattocchia, A., Bevilacqua, M. G., Leccese, F., Rocca, M., & Rubio, R. (2016).** 'Folded Wooden Responsive Houses in Hot Arid Climate'. Paper presented at the Proceedings of 7th Symposium on Simulation for Architecture and Urban Design (simAUD).
- Mazouz, S. (2013).** aspects énergétique en architecture et urbanisme *Cours d'étude* (pp. 56).
- Mazzeo, D., & Kontoleon, K. J. (2020).** The role of inclination and orientation of different building roof typologies on indoor and outdoor environment thermal comfort in Italy and Greece. *Sustainable Cities and Society*, 60, 102111.
- Momtaz, R. I., Feisal, Z., & El, A. (2012).** *Sustainable features of vernacular architecture: a case study of climatic controls in hot arid climate.* Paper presented at the Proceedings of the XXXVIII International Association for Housing Science IAHS World Congress: vision for the future of housing: mega cities.

## Références

---

- Monshizade, A. (2008).** *The desert city as an ancient living example of ecocity*. Paper presented at the Ecocity World Summit 2008. 7th International Ecocity Conference. Academic and Talent Scouting Sessions. San Francisco: Berkeley, 22-23 april 2008.
- Moradi, S. (2005).** Environmental control system. *Ashiyan: Tehran, Iran*, pp.128.
- Moreno Santamaria, B., del Ama Gonzalo, F., Pinette, D., Gonzalez-Lezcano, R. A., Lauret Aguirregabiria, B., & Hernandez Ramos, J. A. (2020).** Application and validation of a dynamic energy simulation tool: A case study with water flow glazing envelope. *Energies*, 13(12), 3203.
- Moustafa, W. (2014).** Vernacular architecture approach to achieve sustainability in informal settlements. *Proceeding of Word SB*, 14, 200-207.
- Muselli, M. (2010).** Passive cooling for air-conditioning energy savings with new radiative low-cost coatings. *Energy and Buildings*, 42(6), 945-954.
- Nagay, S., & Prieto, V. (2019).** CIAV NEWSLETTER: Ksar Ait Ben Haddou: patrimoine mondial générateur d'un développement durable.
- Nayak, J., Srivastava, A., Singh, U., & Sodha, M. (1982).** The relative performance of different approaches to the passive cooling of roofs. *Building and environment*, 17(2), 145-161.
- Nemunaitis-Berry, K. L., Klein, P. M., Basara, J. B., & Fedorovich, E. (2017).** Sensitivity of predictions of the urban surface energy balance and heat island to variations of urban canopy parameters in simulations with the WRF Model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56(3), 573-595.
- Olgyay, V. (2015).** *Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism-new and expanded edition*: Princeton university press.
- Oliver, P. (2003).** *Technology transfer—a vernacular view*: Wiley: Hoboken, NJ.
- Omar, M. W. F. (2015).** Nubian vernacular architecture technique to enhance Eco-Tourism in Egypt. *Journal of Emerging Trends in Economics and Management Sciences*, 6(3), 169-176.
- Ooreka. (2021).** Le guide de la peinture. France: Ootravaux CGU.
- OPVM. (2013).** Planchers des constructions traditionnelles dans la vallée du M'zab. *brochure*. Retrieved from [www.opvm.dz](http://www.opvm.dz) website:
- OPVM. (2018).** collecte d'informations et de données réelles suite à la demande de l'auteur, *Office de protection de la vallée du M'zab*. Rue ELdjazair, Ghardaia.
- OPVM, o. d. p. d. l. v. d. M. z. (2018).** patrimoine matériel et immatériel de la vallée du M'zab.

## Références

---

- Osma, G., Ordóñez, G., Hernández, E., Quintero, L., & Torres, M. (2016).** The impact of height installation on the performance of PV panels integrated into a green roof in tropical conditions. *Energy Production and Management in the 21st Century II: The Quest for Sustainable Energy*, 205, 147.
- Ouldboukhitine, S.-E., Belarbi, R., & Djedjig, R. (2012).** Characterization of green roof components: measurements of thermal and hydrological properties. *Building and environment*, 56, 78-85.
- Ouldboukhitine, S.-E., Belarbi, R., Jaffal, I., & Trabelsi, A. (2011).** Assessment of green roof thermal behavior: A coupled heat and mass transfer model. *Building and environment*, 46(12), 2624-2631.
- Paanchal, J. B., & Mehta, N. (2017).** "Passive Down Draft Evaporative Cooling. *IJARIIIE-ISSN (O)*, 3, 2395-4396.
- Pallasmaa, J. (2005).** The eyes of the skin. *Architecture and the Senses*. Chichester.
- Pandey, S., Hindoliya, D., & Mod, R. (2012).** Artificial neural networks for predicting indoor temperature using roof passive cooling techniques in buildings in different climatic conditions. *Applied Soft Computing*, 12(3), 1214-1226.
- Parizotto, S., & Lamberts, R. (2011).** Investigation of green roof thermal performance in temperate climate: A case study of an experimental building in Florianópolis city, Southern Brazil. *Energy and Buildings*, 43(7), 1712-1722.
- Piselli, C., Pisello, A. L., Saffari, M., de Gracia, A., Cotana, F., & Cabeza, L. F. (2019).** Cool roof impact on building energy need: The role of thermal insulation with varying climate conditions. *Energies*, 12(17), 3354.
- Pisello, A. L., Piselli, C., & Cotana, F. (2015).** Thermal-physics and energy performance of an innovative green roof system: The Cool-Green Roof. *Solar Energy*, 116, 337-356.
- Pisello, A. L., Santamouris, M., & Cotana, F. (2013).** Active cool roof effect: impact of cool roofs on cooling system efficiency. *Advances in building energy research*, 7(2), 209-221.
- Rachmat Rhamdhani Fauzi, Y. L. (2015).** Materials in Vernacular Architectures: Validation of Sustainability Assignment 2, Part 2 (Group Project). *SUSD0002 – Resources, Materials and Sustainability UNSW, Sydney*
- Raffenel, Y. (2008).** *Optimisation du contrôle thermique dans une habitation multi sources*. Ecully, Ecole centrale de Lyon.
- Ragette, F. (2003).** *Traditional domestic architecture of the Arab Region*. Stuttgart: Edition Axel Menges.

## Références

---

- Ragette, F. (2003).** *Traditional domestic architecture of the Arab region*: Edition Axel Menges.
- Ravéreau, A., Roche, M., & Fathy, H. (1981).** *Le M'Zab, une leçon d'architecture*: Sindbad Paris.
- Rawat, M., & Singh, R. (2021a).** Performance evaluation of a cool roof model in composite climate. *Materials Today: Proceedings*, 44, 4956-4960.
- Rawat, M., & Singh, R. (2021b).** A study on the comparative review of cool roof thermal performance in various regions. *Energy and Built Environment*.
- Raydan, D., Ratti, C., & Steemers, K. (2004).** Courtyards: a bioclimatic form? *Courtyard Housing* (pp. 214-229): Taylor & Francis.
- Robinette, G. O. (1983).** *Landscape planning for energy conservation*. New York: Van Nostrand Reinhold Company.
- Romeo, C., & Zinzi, M. (2013).** Impact of a cool roof application on the energy and comfort performance in an existing non-residential building. A Sicilian case study. *Energy and Buildings*, 67, 647-657.
- Roslan, Q., Ibrahim, S. H., Affandi, R., Nawi, M. N. M., & Baharun, A. (2016).** A literature review on the improvement strategies of passive design for the roofing system of the modern house in a hot and humid climate region. *Frontiers of Architectural Research*, 5(1), 126-133.
- Rüegg, A. (2016).** La toiture *Le Corbusier & Pierre Jeanneret-Restauration de l'Immeuble Clarté*, Genève (pp. 82-89): Birkhäuser.
- Russo, A., & Cirella, G. T. (2018).** Modern compact cities: how much greenery do we need? *International journal of environmental research and public health*, 15(10), 2180.
- Saadatian, O., Haw, L. C., Sopian, K., & Sulaiman, M. Y. (2012).** Review of windcatcher technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1477-1495.
- Sabzi, D., Haseli, P., Jafarian, M., Karimi, G., & Taheri, M. (2015).** Investigation of cooling load reduction in buildings by passive cooling options applied on roof. *Energy and Buildings*, 109, 135-142.
- Sadeghi, N. H. (2018).** Conservation and safety assessment of vaulted Adobe Architecture in Yazd, Iran.
- Sadineni, S. B., Madala, S., & Boehm, R. F. (2011).** Passive building energy savings: A review of building envelope components. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3617-3631.

## Références

---

- Sahebzadeh, S., Heidari, A., Kamelnia, H., & Baghbani, A. (2017).** Sustainability features of Iran's vernacular architecture: a comparative study between the architecture of hot–arid and hot–arid–windy regions. *Sustainability*, 9(5), 749.
- Sailor, D. J., Elley, T. B., & Gibson, M. (2012).** Exploring the building energy impacts of green roof design decisions—a modeling study of buildings in four distinct climates. *Journal of Building Physics*, 35(4), 372-391.
- Saljoughinejad, S., & Sharifabad, S. R. (2015).** Classification of climatic strategies, used in Iranian vernacular residences based on spatial constituent elements. *Building and environment*, 92, 475-493.
- Salkini, H., Greco, L., & Lucente, R. (2017).** Towards adaptive residential buildings traditional and contemporary scenarios in bioclimatic design (the case of Aleppo). *Procedia Engineering*, 180, 1083-1092.
- Santamouris, M., & Asimakopoulos, D. (1996).** *Passive cooling of buildings*: Earthscan.
- Santamouris, M., Pavlou, K., Synnefa, A., Niachou, K., & Kolokotsa, D. (2007).** Recent progress on passive cooling techniques: Advanced technological developments to improve survivability levels in low-income households. *Energy and Buildings*, 39(7), 859-866.
- Santamouris, M., Synnefa, A., & Karlessi, T. (2011).** Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy*, 85(12), 3085-3102.
- Santo, P. (2016).** Flat roofs *Inspections and Reports on Dwellings* (pp. 130-152): Routledge.
- Sanusi, R., Johnstone, D., May, P., & Livesley, S. J. (2016).** Street orientation and side of the street greatly influence the microclimatic benefits street trees can provide in summer. *Journal of Environmental Quality*, 45(1), 167-174.
- Sayigh, A. (2019).** *Sustainable Vernacular Architecture: How the Past Can Enrich the Future*: Springer.
- Sebti, M., Alkama, D., & Bouchair, A. (2013).** Assessment of the effect of modern transformation on the traditional settlement 'Ksar' of Ouargla in southern Algeria. *Frontiers of Architectural Research*, 2(3), 322-337.
- Sellami-Kaaniche, E. (2014).** *Conception pluridisciplinaire d'une méthode générale d'évaluation des flux de contaminants issus des ruissellements des matériaux de toitures à l'échelle urbaine. Développement et illustration à partir du cas du zinc à Créteil*. Ecole des Ponts Paris Tech, Paris-France.

## Références

---

- Shaheen, M. (1975).** Hassan Fathy, Architecture for the Poor: An Experiment in Rural Egypt (Chicago and London, University of Chicago Press, 1973). Pp. 232 text, 132 illustrations, 6 appendices and a glossary of terms. \$10.95. *International Journal of Middle East Studies*, 6(4), 511-514.
- Shariah, A., Shalabi, B., Rousan, A., & Tashtoush, B. (1998).** Effects of absorptance of external surfaces on heating and cooling loads of residential buildings in Jordan. *Energy Conversion and Management*, 39(3-4), 273-284.
- Sharifi, A., & Yamagata, Y. (2015).** Roof ponds as passive heating and cooling systems: A systematic review. *Applied energy*, 160, 336-357.
- Shemirani, S. M. M., & Moztarzadeh, H. (2013).** Physical criteria codification of urban sustainable communities (emphasized on Iran hot and arid climate). *American Journal of Scientific Research*, 86, 1227.
- Shen, H., Tan, H., & Tzempelikos, A. (2011).** The effect of reflective coatings on building surface temperatures, indoor environment and energy consumption—An experimental study. *Energy and Buildings*, 43(2-3), 573-580.
- Shi, D., Zhuang, C., Lin, C., Zhao, X., Chen, D., Gao, Y., & Levinson, R. (2019).** Effects of natural soiling and weathering on cool roof energy savings for dormitory buildings in Chinese cities with hot summers. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 200, 110016.
- Shibub, M. M. (2016).** THE MODERN AND TRADITIONAL HOUSES IN LIBYA. *International Journal of Arts & Sciences*, 9(4), 511.
- Shibub, M. M. (2017).** Sustainable Architecture: Learned scientific lessons from Ghadames, a Traditional Libyan City. *INTERNATIONAL TRANSACTION JOURNAL OF ENGINEERING MANAGEMENT & APPLIED SCIENCES & TECHNOLOGIES*, 8(4), 233-241.
- Shittu, E., Stojceska, V., Gratton, P., & Kolokotroni, M. (2020).** Environmental impact of cool roof paint: case-study of house retrofit in two hot islands. *Energy and Buildings*, 217, 110007.
- Simmons, M. T., Gardiner, B., Windhager, S., & Tinsley, J. (2008).** Green roofs are not created equal: the hydrologic and thermal performance of six different extensive green roofs and reflective and non-reflective roofs in a sub-tropical climate. *Urban Ecosystems*, 11(4), 339-348.
- Simonsson, C. (2001).** Terrace roof constructions.

## Références

---

- Singh, R. P. (2019).** Continuing culture and meeting modernity: The World Heritage villages of Shirakawa-Gō and Gokayama, Japan *Routledge Companion to Global Heritage Conservation* (pp. 128-151): Routledge.
- Soflaei, F., Shokouhian, M., & Soflaei, A. (2017).** Traditional courtyard houses as a model for sustainable design: A case study on BWhs mesoclimate of Iran. *Frontiers of Architectural Research*, 6(3), 329-345.
- Song, Y.-I., Darani, K. S., Khdair, A. I., Abu-Rumman, G., & Kalbasi, R. (2021).** A review on conventional passive cooling methods applicable to arid and warm climates considering economic cost and efficiency analysis in resource-based cities. *Energy Reports*, 7, 2784-2820.
- St Clair, P. (2009).** Low-energy design in the United Arab Emirates—Building design principles. *Environment Design Guide*, 1-10.
- Stefanizzi, P., Fato, I., & Di Turi, S. (2016).** Energy and environmental performance of Trullo stone building. An experimental and numerical survey. *International Journal of Heat and Technology*, 34(Special Issue 2), S396-402.
- Sun, S., Xu, X., Lao, Z., Liu, W., Li, Z., García, E. H., Zhu, J. (2017).** Evaluating the impact of urban green space and landscape design parameters on thermal comfort in hot summer by numerical simulation. *Building and environment*, 123, 277-288.
- SV, X. S. (1980).** Environmental Science Handbook for Architects and Builders: The Construction press, Ltd. Landcaster England.
- Szalapaj, P. (2014).** *Contemporary architecture and the digital design process*: Routledge.
- Taleghani, M., Tenpierik, M., & van den Dobbelsteen, A. (2012).** Environmental impact of courtyards—a review and comparison of residential courtyard buildings in different climates. *Journal of Green Building*, 7(2), 113-136.
- Tatartchenko, V. A., Smirnov, P. V., & Jin, H. (2014).** First Order Phase Transitions as Radiation Processes, Part Two. *Optics and Photonics Journal*, 2014.
- Theodosiou, T. (2012).** Green Roofs in Buildings: Thermal and Environmental Behaviour *Advances in Building Energy Research* (pp. 277-294): Routledge.
- Thomas, L., & Baird, G. (2006).** Post-occupancy evaluation of passive downdraft evaporative cooling and air conditioned buildings at the Torrent Research Centre, Ahmedabad, India. *Environment Design Guide*, 1-10.
- Tiraoui L, (1996).** L’ambiance du patio entre l’air et le soleil, influences des proportions du patio sur les ambiances. DEA, Archives ENSAN.

## Références

---

- Todisco, L., Sanitate, G., & Lacorte, G. (2017).** Geometry and proportions of the traditional trulli of alberobello. *Nexus Network Journal*, 19(3), 701-721.
- Toe, D. H. C., & Kubota, T. (2015).** Comparative assessment of vernacular passive cooling techniques for improving indoor thermal comfort of modern terraced houses in hot-humid climate of Malaysia. *Solar Energy*, 114, 229-258.
- Trombadore, A., & Visone, F. (2019).** Vernacular architecture as model to design a prototype for affordable housing in mosul *Sustainable Vernacular Architecture* (pp. 181-205): Springer.
- Turenne, P. (2013).** Toitures-terrasses: Une étanchéité à soigner.
- Uemoto, K. L., Sato, N. M., & John, V. M. (2010).** Estimating thermal performance of cool colored paints. *Energy and Buildings*, 42(1), 17-22.
- Urban, B., & Roth, K. (2010).** Guidelines for Selecting Cool Roofs. U.S.Department of Energy Building Technologies Program and Oak Ridge National Laboratory. doi: [http://www.moldcompaniesnearme.com/Images/Pdf/coolroofguide\\_0.pdf](http://www.moldcompaniesnearme.com/Images/Pdf/coolroofguide_0.pdf)
- Vijayaraghavan, K. (2016).** Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 740-752.
- Wang, P., Liu, Z., & Zhang, L. (2021).** Sustainability of compact cities: A review of Inter-Building Effect on building energy and solar energy use. *Sustainable Cities and Society*, 103035.
- Wang, Y., Wang, D., & Liu, Y. (2017).** Study on comprehensive energy-saving of shading and photovoltaics of roof added PV module. *Energy Procedia*, 132, 598-603.
- Weber, W., & Yannas, S. (2013).** *Lessons from vernacular architecture*: Routledge.
- Wendland, D. (2007).** Traditional vault construction without formwork: Masonry pattern and vault shape in the historical technical literature and in experimental studies. *International Journal of Architectural Heritage*, 1(4), 311-365.
- Wikipédia. (2021a).** Anciens ksour de Ouadane, Chinguetti, Tichitt et Oualata *Encyclopédie libre*.
- Wikipédia. (2021b).** Liste des ksour au Maroc.
- Wilkinson, S. J., & Dixon, T. (2016).** *Green Roof Retrofit: building urban resilience*: John Wiley & Sons.
- Williams, K. J., Lee, K. E., Sargent, L., Johnson, K. A., Rayner, J., Farrell, C., . . . Williams, N. S. (2019).** Appraising the psychological benefits of green roofs for city residents and workers. *Urban Forestry & Urban Greening*, 44, 126399.

## Références

---

- Xu, X., Liu, S., Sun, S., Zhang, W., Liu, Y., Lao, Z., . . . Liu, W. (2019).** Evaluation of energy saving potential of an urban green space and its water bodies. *Energy and Buildings*, 188, 58-70.
- Yew, M., Sulong, N. R., Chong, W., Poh, S., Ang, B., & Tan, K. (2013).** Integration of thermal insulation coating and moving-air-cavity in a cool roof system for attic temperature reduction. *Energy Conversion and Management*, 75, 241-248.
- Yun, J. (2014).** Construction of the world design capital: Detournement of spectacle in Dongdaemun Design Park & Plaza in Seoul. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 13(1), 17-24.
- Zarandi, M. M. (2009).** Analysis on Iranian wind catcher and its effect on natural ventilation as a solution towards sustainable architecture (Case Study: Yazd). *Eng Technol*, 54, 574-579.
- Zhang, G., He, B.-J., Zhu, Z., & Dewancker, B. J. (2019).** Impact of morphological characteristics of green roofs on pedestrian cooling in subtropical climates. *International journal of environmental research and public health*, 16(2), 179.
- Zhen, M., Dong, Q., Xu, M., Liu, Y., Zhang, H., Jia, Y., & Yang, B. (2021).** Thermal benefit of igloos in extremely cold conditions in Harbin, China. *Building and environment*, 190, 107546.
- Zingre, K. T., Wan, M. P., Tong, S., Li, H., Chang, V. W.-C., Wong, S. K., . . . Lee, I. Y. L. (2015).** Modeling of cool roof heat transfer in tropical climate. *Renewable Energy*, 75, 210-223.
- Zingre, K. T., Wan, M. P., Wong, S. K., Toh, W. B. T., & Lee, I. Y. L. (2015).** Modelling of cool roof performance for double-skin roofs in tropical climate. *Energy*, 82, 813-826.
- Zinzi, M. (2008).** *Optical properties and influence of reflective coatings on the energy demand and thermal comfort in dwellings at Mediterranean latitudes*. Paper presented at the 25th International Conference on Passive and Low Energy Architecture: Towards Zero Energy Building, PLEA 2008.
- Zinzi, M., & Agnoli, S. (2012).** Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region. *Energy and Buildings*, 55, 66-76.
- Znidi, M. (2018).** *Habiter la grotte à Tataouine (sud tunisien): de la maison creusée à la maison construite*. Aix-Marseille.

## Références

---

**Zoma, F., Toguyeni, D. Y., Kiemtoré, B. J., & Ouedraogo, E.** Valorization of Local Construction and Technique: Hygrothermal Behavior, Thermal and Visual Comfort of a Nubian Vaulted Construction in Sahelian Climate of Ouagadougou.

### Site internet :

**Mike Gadd.** (2006). Ghadamès, Libya. <https://www.flickr.com/photos/mikegadd/289734187> (consulté Juillet 2021)

**Guide voyage Tunisie.** (2021). Le village côtier de Sidi Bou Said. <https://guide-voyage-tunisie.com/sidi-bou-said> (consulté Juillet 2021)

**Development Workshop Digital Archive (DWDA).** (2021). Vaulted roof with cross windows; Yazd city. <https://dwarchive.com/archive/vaulted-roof-cross-windows-yazd-city> (consulté Juillet 2021)

**Bouaroua, N.** (2017) .La maison traditionnelle Mozabite. <https://b-nour.jimdofree.com/la-maison-traditionnelle-mozabite/> (consulté Août 2018)

**Guide de Construction BILP SARL.** (2017). Une toiture terrasse. <https://toiture.bilp.fr/toiture-terrasse-12/mise-en-oeuvre/structure-bois/toiture-chaude-froide> (consulté Septembre 2021)

**Guide de Construction BILP SARL.** (2017). Toiture chaude VS toiture froide Avantages et inconvénients. <https://toiture.bilp.fr/toiture-terrasse-12/mise-en-oeuvre/structure-bois/toiture-chaude-froide> (consulté Septembre 2021)

**Guide pratique Energie+.** (2021). Toiture chaude. <https://energieplus-lesite.be/techniques/enveloppe7/techniques-d-isolation/toiture-plate4/toiture-chaude/> (consulté Septembre 2021)

**Mobic-auto construction.** (2020). Quel type d'isolation pour une toiture plate en auto construction. <https://mobic-autoconstruction.fr/2017/05/02/isoler-sa-toiture-plate/> (Consulté Septembre 2021)

**Guide Bâtiment durable.** (2015). Isolation d'une toiture plate. <https://www.guidebatimentdurable.brussels/fr/isolation-d-une-toiture-plate.html?IDC=2214> (Consulté Septembre 2021)

**Cupa Pizarras Group.** (2015). 10 maisons contemporaines avec des toits en pente. <https://www.cupapizarras.com/fr/actualite/10-maisons-contemporaines-toits-en-pente/> (consulté Août 2021)

<http://izreal.eu/2014/11/20/syrias-beehive-shaped-architecture/>

## Références

---

- Pinterest.** (2020). With Dirt And A Vision, Palestinian Architects Break The Mold. <https://www.pinterest.com/pin/86553624063937774/> (consulté en 2021)
- Guide Douce Cahute.** (2014). La case obus du peuple mousgoum. <https://maison-monde.com/la-case-obus-du-peuple-mousgoum/> (consulté en 2021)
- Guide Douce Cahute.** (2014). Voûte nubienne. <https://maison-monde.com/technique-voûte-nubienne/>. (Consulté en 2021)
- Morgane Olès.** 2021. Un revêtement de toit qui régule la température des maisons toute l'année. <https://trustmyscience.com/revetement-toit-capable-reguler-temperature-maisons-toute-annee/>. (Consulté en 2021)
- Wikipedia l'encyclopédie libre.** 2014. Mzab. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Mzab>. (Consulté en 2021)
- MapCarta.** (2018). Carte de Béni Isguen. <https://mapcarta.com/fr/17355002/Carte> (Consulté en 2020)
- Hypotheses.** (2016). Qu'est-ce qu'un ksar pour un Mozabite ?. <https://cjb.hypotheses.org/698> (Consulté en 2018)
- Charte psychrométrique. (2018).** Diagramme bioclimatique du Ksar de Béni Isguen dessiné par l'auteur à partir du site internet : <https://www.psych-chart.com/>
- Docteur Peinture.** (2020). La composition de la peinture. <https://www.docteurpeinture.com/post/la-composition-de-la-peinture>. (Consulté en 2020)  
<https://www.coolroof-france.com/en/our-expertise/our-solutions/>
- GPCR (Guide Pratique de Peinture froide).** (2018). Cool Roof. <https://www.batirama.com/article/2638-derbigum-propose-les-cool-roofs-une-opportunite-de-gagner-de-l-argent.html> (Consulté en 2020)
- Google image.** (2018). Situation du Ksar de Béni Isguen. <https://www.institut-numerique.org/411presentation-de-la-zone-detude-4fec1d4d9181e>. (Consulté en 2018)
- Google image.** (2019). Photo montrant le tissu urbain compact du ksar. <https://www.pinterest.fr/pin/388083692863781254/>. (Consulté en 2019)
- Google Earth.** (2020). Vue satellite de localisation du Ksar de Béni Isguen. <https://mapcarta.com/fr/17355002/Carte>. (Consulté en 2020)

# Annexes

## Annexe 01 : Récapitulatif de revue de littérature

Tableau III.1 : Récapitulatif des études réalisées sur l'optimisation de la performance thermique des toitures

Optimisation de la performance thermique des toitures par « Évaporation »				
L'étude/référence	Méthode	Thème/Cas d'étude	Résultats	Critique
(Al-Hemiddi, 1995)	Mesures/Calcul et modèle statistique du système de bassin d'eau	Étude d'un étang de toit en eau dans les bâtiments de la ville de Riyad en AS pour assurer un refroidissement passif	Le toit avec un étang d'eau réduit la température moyenne intérieure avec 5°C par rapport à la température extérieure en été	-Le refroidissement évaporatif consomme beaucoup d'eau. -l'eau fraîche coute cher dans le Sud algérien. -l'utilisation de l'eau grise à la place de l'eau fraîche.
(Sabzi et al., 2015)	Réalisation de Modèle expérimental typique et modèle mathématique	Étude de trois options de refroidissement passif appliquées sur le toit /Bâtiment typique à Shiraz, en Iran	le bassin d'eau présente les meilleures performances par rapport aux deux autres systèmes	-Les fuites dans les bassins d'eau/l'inefficacité de la main-d'œuvre en Algérie. -Entretien régulier/maintenance.
(Han et al., 2017)	Réalisation d'un modèle expérimental/Mesures des paramètres thermique	Évaluation de brique de toiture à rétention d'eau/ Mianyang, en Chine	un toit avec brique de rétention d'eau abaisse la température intérieure de 1,9°C en été par rapport à un toit plat classique	- La prise en considération des charges supplémentaires des systèmes des étangs d'eau : problème de structure.

## Annexe 01 : Récapitulatif de revue de littérature

(Sharifi & Yamagata, 2015)	Revue systématique/ recherche documentaire avec une analyse détaillée	Évaluation des étangs d'eau sur le toit et leur effet sur le chauffage et le refroidissement passif des bâtiments	les étangs de toit avec des sacs de jute humides, étangs de toit ombragés, étangs de toit ventilés et étangs de toit à isolation sont les plus efficaces	-Technique très limitée en hiver. -Problème de structure.
<b>Optimisation de la performance thermique des toitures par « Radio-Évaporation »</b>				
L'étude/référence	Méthode	Thème/Cas d'étude	Résultats	Critique
(Cheikh & Bouchair, 2004)	Cellule test/modèle mathématique numérique	Évaluation d'un prototype avec un système de toit radio-évaporatif/ Laghouat dans Sud algérien	Réduction de température de l'air intérieure journalière de la cellule con jusqu'à 8 °C.	-Pas de généralisation des résultats lorsque concerne une cellule réduite -Résultats selon les conditions climatiques tropicales
(Chávez et al., 2016)	Prototype avec un toit SHETRE / Simulations par CFD	Évaluation du système de refroidissement de toit innovant (SHETRE)/ Université de Colima en Mexique	Réduction de la température intérieure avec 8°C	- Exigence du temps, technologie et grands moyens financiers pour les réaliser -Consommation d'eau

## Annexe 01 : Récapitulatif de revue de littérature

### Optimisation de la performance thermique des toitures par « Inertie des matériaux »

L'étude/référence	Méthode	Thème/Cas d'étude	Résultats	Critique
(Moreno Santamaria et al., 2020)	Prototypes test/ développement d'un modèle mathématique d'un outil de logiciel	L'évaluation de WFG et ses performances de refroidissement, avec validation de simulation énergétique dynamique	L'utilisation de WFG peut réduire les charges de refroidissement en été. La consommation d'énergie est de 11,39 KWh dans 3,5 m2 de WFG. Réduction de 70% des émissions de CO2	-Technique inadéquate dans les cas d'un climat chaud et aride : Le vitrage et tous matériaux transparents sont déconseillés dans les déserts (problème de surchauffe et incendie). - WFG besoin de l'énergie ce qui augmente la facture de l'électricité.

### Optimisation de la performance thermique des toitures par « Isolation »

L'étude/référence	Méthode	Thème/Cas d'étude	Résultats	Critique
(Chang et al., 2008)	Réalisation de prototype	l'évaluation de prototypes de double toit intégrant un système de barrière radiante (RBS)/ Taiwan.	la structure à double toit avec RBS réduit le gain de chaleur avec bonnes performances thermique.	-L'isolation des toitures a montré leur efficacité à améliorer l'état de confort thermique à l'intérieur des espaces

## Annexe 01 : Récapitulatif de revue de littérature

(Zingre, Wan, Wong, et al., 2015)	Développement du modèle CRHT (Cool Roof Heat Transfer)	Évaluation de performance des « Cool Roof » pour les toits double paroi pour tester l'efficacité de ce type de toitures/ Singapour	le toit double paroi avec revêtement de Cool Roof réduit la température intérieure de 2.4°C et le gain de chaleur par 0.21 kWh / m <sup>2</sup> (ou 51%) par temps ensoleillé	-L'isolation des toitures présente une technique efficace à entreprendre dans le contexte des climats aride.
<b>Optimisation de la performance thermique des toitures par « Ombrage »</b>				
L'étude/référence	Méthode	Thème/Cas d'étude	Résultats	Critique
(Nayak et al., 1982)	Modèle analytique (Fourier coefficient admittance)	Évaluation de cinq méthodes de refroidissement passif/New Delhi	Toiture ombragée avec une pergola végétale avec un film d'eau réduit le flux de chaleur	-La combinaison d'une toiture ombragée avec d'autres systèmes de refroidissement passif de toiture donne d'amélioration.
(Mardaljevic, 2004)	« Spatio-temporal irradiation mapping » (STIMAP)	Évaluation de l'efficacité des dispositifs d'ombrage complexe/ Terminal 3 de l'aéroport de « Changi » en Chine	l'irradiation solaire annuelle totale d'une variante sur toute la surface du toit était de 46 kWh/m <sup>2</sup>	-L'ombrage d'une toiture donne de faibles performances en comparant avec d'autres méthodes d'optimisation.

## Annexe 01 : Récapitulatif de revue de littérature

		Impact des modules PV intégrés sur le toit sur la consommation d'énergie et l'ombrage du bâtiment/Chine	Réduction de la charge quotidienne des toits avec PV a de 77,4 % toit plat/ 69,4 % pour toit incliné	-PV une technique inadéquate dans le cas des Ksour du Sud algérien lorsque la terrasse est un espace utilisable
<b>Optimisation de la performance thermique des toitures par « Ventilation »</b>				
L'étude/référence	Méthode	Thème/Cas d'étude	Résultats	Critique
(D. Li et al., 2016)	Méthode numérique : dynamique des fluides computationnelle (CFD)	Évaluation de la performance thermique des toits ventilés sous l'influence de différents paramètres/ nord-est de la Chine	Le toit ventilé réduit les charges de refroidissement durant la période estivale. Le temps de retard est faible et long	-Plusieurs paramètres doivent être pris en compte pour garantir l'efficacité de ce système. -Ces résultats peuvent être changés quand les conditions météorologiques se diffèrent. -La fermeture de la couche d'air résulte un bon isolant pour isoler le toit et retarder la T° ; ce qui se voit plus adéquat à notre

## Annexe 01 : Récapitulatif de revue de littérature

cas d'étude.

### Optimisation de la performance thermique des toitures par « Réflexion »

L'étude/référence	Méthode	Thème/Cas d'étude	Résultats	Critique
(Algarni, 2019)	Simulation thermique par « eQuest 3.65 » software	Estimation des impacts de l'installation d'un toit froid sur les charges de refroidissement et de chauffage/13 sites en Arabie Saoudite : climat chaud et sec similaire au climat du Ksar.	Réduction de la consommation d'énergie annuelle de <b>110,3 à 181,9 kWh / m<sup>2</sup></b> pour refroidissement et <b>4,4kWh/m<sup>2</sup></b> . Pour chauffage avec l'installation d'un toit froid.	-L'installation d'un toit froid améliore le confort en été avec une pénalité acceptable en hiver.
(Shittu et al., 2020)	Simulation thermique et énergétique par « EnergyPlus ».	Évaluation des économies d'énergie des toits froids des maisons/02 îles (Sicile et Jamaïque).	Économies d'énergie avec <b>21,7 kWh/m<sup>2</sup>/an</b> pour la maison en Sicile et <b>188 kWh/m<sup>2</sup>/an</b> pour la Jamaïque.	

## Annexe 01 : Récapitulatif de revue de littérature

---

(Dabaieh et al., 2015)	Simulation thermique des toitures froides passives non isolées par « DesignBuilder » software.	Réduction des demandes de refroidissement avec l'utilisation de « toit froid » passif/Bâtiments du Caire en Égypte : climat chaud et sec similaire au climat du Ksar de Béni Isguen.	Réduction des consommations d'énergie de 826 kWh et avec 53% des heures d'inconfort avec l'utilisation d'un toit froid de forme de voûte.	
(Muselli, 2010)	Calcul mathématique /Simulation du prototype	Étude et estimation de nouveaux matériaux radiatifs passifs à faible cout (1 €/m <sup>2</sup> ) en toitures/ France	-Réduction des températures de surface des matériaux avec revêtements blancs : TCT et PSS : 18% FC : 25% CS : 34%. - Économie d'énergie électrique de climatisation de 26% à 46% pour les toits réfléchissants blancs.	Un bon rendement thermique et énergétique des toits froids et des revêtements réfléchissants

---

## Annexe 01 : Récapitulatif de revue de littérature

---

---

(Zinzi & Agnoli, 2012)	Simulations énergétiques/Mesure des propriétés optiques	Influence des revêtements réfléchissants sur le confort thermique et la demande énergétique/ habitations aux latitudes méditerranéennes.	Réduction des charges de climatisation et la demande d'énergie par l'application des revêtements réfléchissants	Bonne performance/ Économique/ Facilité d'exécution
(Rawat & Singh, 2021a)	Prototype/modèle mathématique	Évaluation d'un toit froid/climat composite de l'Inde (à Madhya Pradesh)	Réduction des températures intérieures et extérieures avec 4,1°C et 9,2°C.	

---

Annexe 02 : Données climatiques du Ksar de Béni Isguen fournies par la station météorologique « Noumret » selon la demande de Kadri Meryem (30/07/2018)

An	mois	°TMini	°T Max	M.M.°t	Qt.rr	evapo	insol	VX-ddff	gelé	MMU
2013	Jan	26	250	127	4,0	122	268	x	0	32
	Fév	27	252	126	nt	146	261	x	0	39
	Mars	48	310	187	5,3	202	273	320/28	0	36
	Avril	79	359	215	2,9	208	290	170/24	0	35
	Mai	136	408	256	0,4	211	345	230/29	0	31
	Juin	222	437	300	nt	340	354	xxx/20	0	28
	Juill	222	257	346	trace	397	329	340/26	0	25
	Août	222	420	321	2,7	308	335	270/29	0	31
	Sept	195	422	295	4,7	365	287	300/23	0	40
	Oct	146	382	269	2,4	214	290	340/20	0	36
	Nov	40	290	165	14,9	131	250	180/17	0	46
	Déc	30	220	105	30,3	48	196	050/20	0	66

An	mois	°TMini	°T Max	M.M.°t	Qt.rr	evapo	insol	VX-ddff	MMU	gelé
2014	Jan	28	219	123	1,8	80	250	220/24	49	0
	Fév	44	264	144	12,4	112	245	270/22	38	0
	Mars	70	274	158	0,2	172	266	300/24	33	0
	Avril	96	384	227	nt	232	329	330/20	22	0
	Mai	148	415	268	14,6	308	339	060/19	24	0
	Juin	158	440	301	7,3	323	340	210/24	22	0
	Juill	244	460	355	1	417	306	310/24	13	0
	Août	253	466	356	0,3	361	321	280/21	17	0
	Sept	197	428	314	2,9	296	247	240/27	26	0
	Oct	140	380	244	0,1	232	292	340/21	28	0
	Nov	85	286	175	4,3	131	223	210/24	43	0
	Déc	33	201	114	1,9	87	246	010/20	51	0

An	mois	°TMini	°T Max	M.M.°t	Qt.rr	evapo	insol	VX-ddff	gelé	MMU
2015	Jan	54	165	110	4	88	247	///22	0	43
	Fév	65	166	115	11	110	216	360/28	0	42
	Mars	110	227	164	nt	161	316	300/24	0	31
	Avril	160	299	230	nt	332	288	300/25	0	24
	Mai	209	348	279	nt	312	358	260/26	0	20
	Juin	241	372	306	nt	322	344	180/34	0	22
	Juill	268	401	334	nt	316	387	050/16	0	19
	Août	274	399	337	15	304	275	350/23	0	28
	Sept	234	352	293	13	210	244	240/27	0	35
	Oct	181	292	237	5	164	274	330/20	0	40
	Nov	114	215	164	5	85	272	110/17	0	51
	Déc	68	181	124	nt	62	263	070/10	0	54

Annexe 02 : Données climatiques du Ksar de Béni Isguen fournies par la station météorologique « Noumret » selon la demande de Kadri Meryem (30/07/2018)

An	mois	°TMini	°T Max	M.M.°t	Qt.rr	evapo	insol	VX-ddff	gelé	MMU
2016	Jan	80	197	138	nt	120	271	350/21	0	40
	Fév	90	204	147	0,2	130	238	280/20	0	36
	Mars	107	233	170	nt	191	311	300/23	0	27
	Avril	158	297	227	7	221	296	310/25	0	30
	Mai	203	333	268	2	314	323	330/30	0	22
	Juin	244	382	313	nt	317	350	200/23	0	21
	Juill	278	406	342	nt	339	368	270/23	0	20
	Août	271	389	33	1	345	343	040/30	0	25
	Sept	234	352	293	13	210	244	240/27	0	35
	Oct	191	313	252	traces	201	279	210/25	0	38
	Nov	111	220	166	4	115	259	240/24	0	45
	Déc	80	172	126	3	66	213	040/17	0	65

An	mois	°TMini	°T Max	M.M.°t	Qt.rr	evapo	insol	VX-ddff	gelé	MMU
2017	Jan	48	149	98	1	86	271	240/21	0	32
	Fév	88	206	147	0	129	220	150/19	0	39
	Mars	120	243	181	1	165	292	140/27	0	12
	Avril	149	277	213	0	220	284	210/26	0	29
	Mai	221	349	285	nt	309	331	220/23	0	23
	Juin	251	377	314	2	300	335	340/22	0	23
	Juill	274	405	339	nt	347	368	30/19	0	17
	Août	270	403	337	nt	340	357	90/17	0	34
	Sept	217	345	281	16	251	301	40/24	0	32
	Oct	162	275	218	8	161	310	330/20	0	42
	Nov	100	221	160	6	134	254	360/20	0	40
	Déc	62	167	115	0	95	236	320/21	0	49

### Légende

°T Mini	Température minimale du mois en 1/10 de °C			
°T Max	Température maximale du mois en 1/10 de °C			
MM°T	Moyenne mensuelle de température en 1/10 de °C			
Qtt.rr	Quantité mensuelle de pluie en mm			
NJrr	Nombre de jour de pluie pendant le mois			
VX-dddff	Direction et force du vent fort du mois.ddd en degré et ff en m/s			
Moy -vnt	Moyenne mensuelle du vent en m/s			
MMU	Moyenne Mensuelle d'Humidité en %			
nt	NEANT			
TRC	Pluie non mesurable			
evapo	évaporation mensuelle en mm			
insol	durée mensuelle d'insolation en Heures			

Annexe 02 : Données climatiques du Ksar de Béni Isguen fournies par la station météorologique « Noumret » selon la demande de Kadri Meryem (30/07/2018)

Les diagrammes climatiques de « Meteoblue » se basent sur 30 ans de simulations horaires de modèles météorologiques et sont disponibles pour chaque endroit sur la terre. Ils donnent de bonnes indications sur les schémas climatiques typiques et les conditions attendues (température, précipitations, ensoleillement et vent).

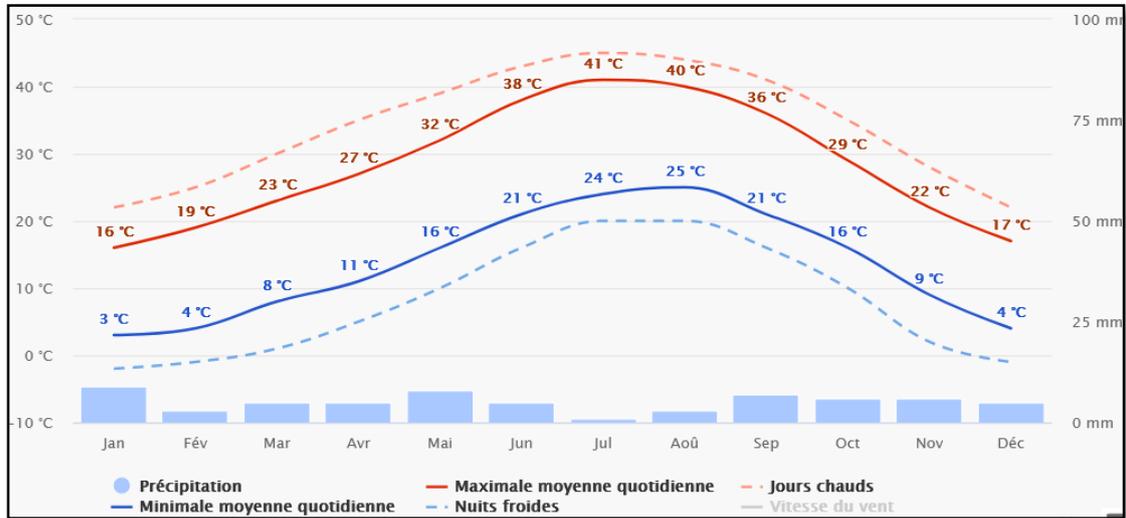


Figure 02.1 : Températures et précipitations moyennes des 30 dernières années

La "maximale moyenne quotidienne" (ligne rouge continue) montre la température maximale moyenne d'un jour pour chaque mois pour Béni Isguen. De même, «minimale moyenne quotidienne" (ligne bleu continue) montre la moyenne de la température minimale. Les jours chauds et les nuits froides (lignes bleues et rouges en pointillé) montrent la moyenne de la plus chaude journée et la plus froide nuit de chaque mois des 30 dernières années.

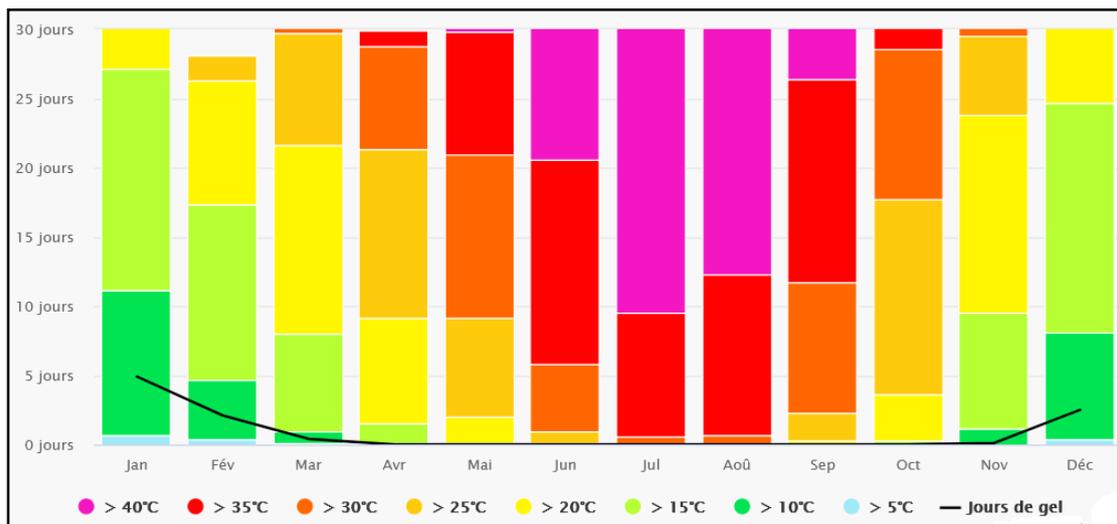


Figure 02.2 : Températures maximales à Béni Isguen

Le diagramme de la température maximale à Béni Isguen montre le nombre de jours par mois qui atteignent certaines températures.

Annexe 02 : Données climatiques du Ksar de Béni Isguen fournies par la station météorologique « Noumret » selon la demande de Kadri Meryem (30/07/2018)

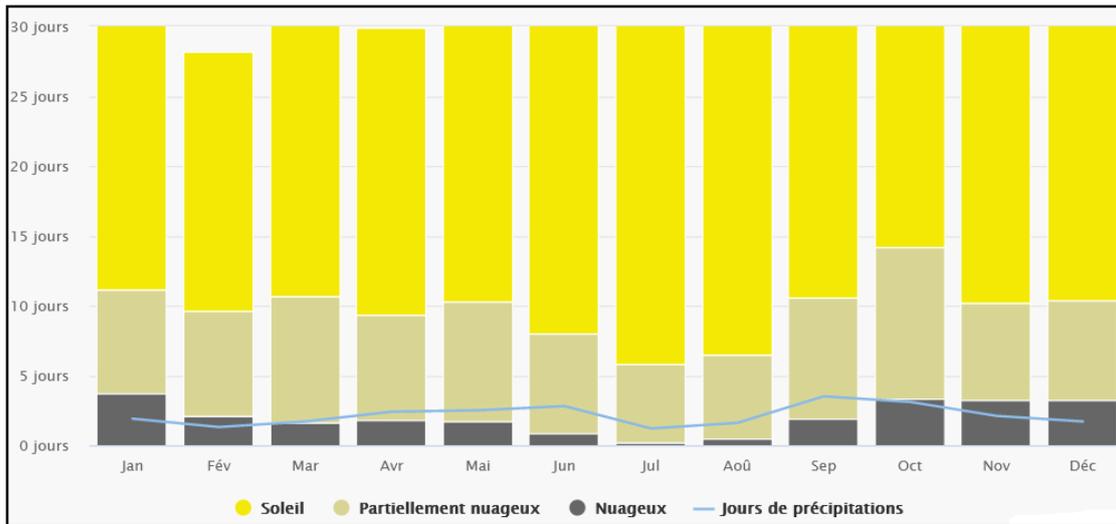


Figure 02.3 : Ciel nuageux, soleil et jours de précipitations à Béni Isguen

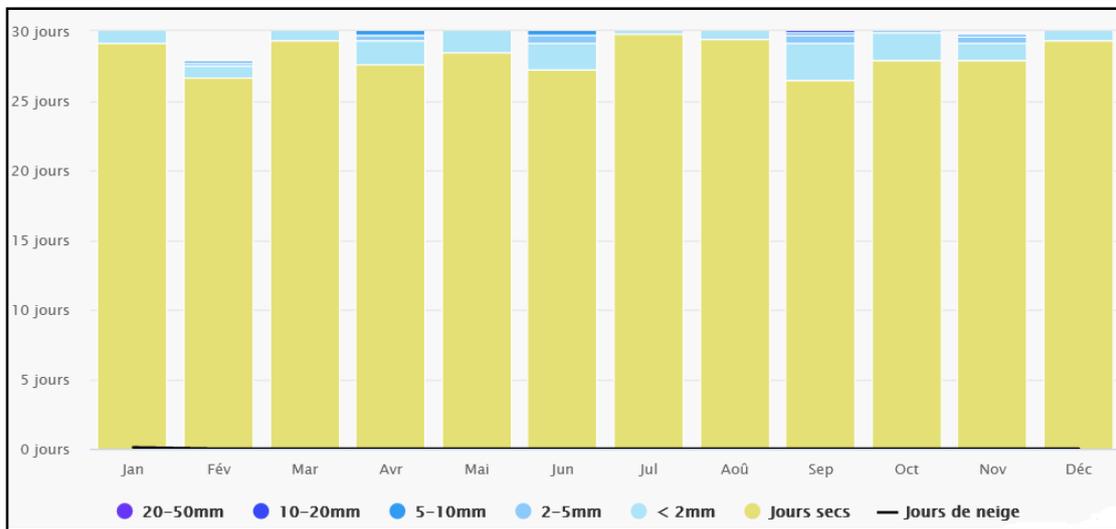


Figure 02.4 : Quantité de précipitations à Béni Isguen

Le diagramme de la précipitation pour Béni Isguen indique depuis combien de jours par mois, une certaine quantité de précipitations est atteinte.

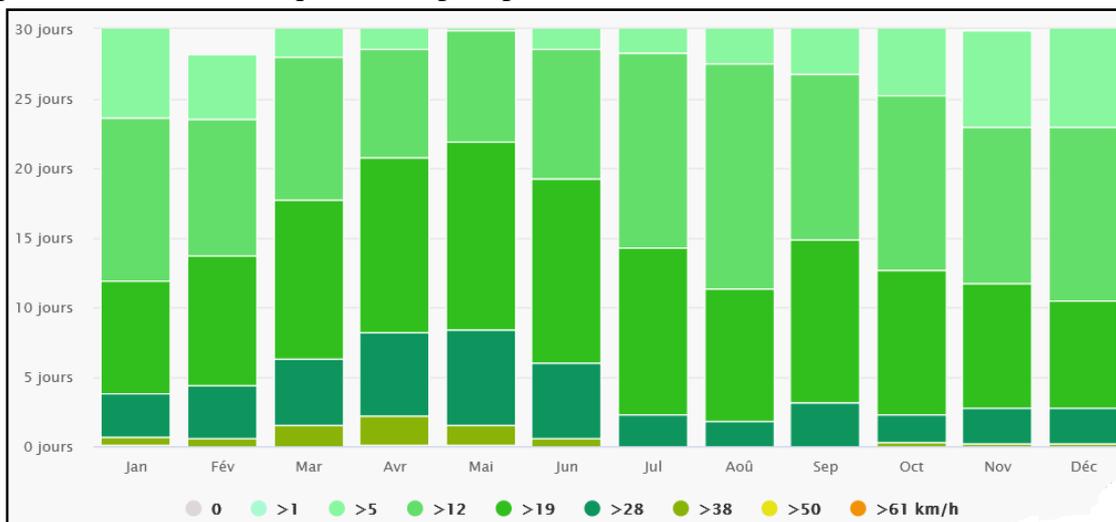


Figure 02.5 : Vitesse du vent à Béni Isguen

Le diagramme de Béni Isguen montre les jours par mois, pendant lesquels le vent atteint une certaine vitesse.

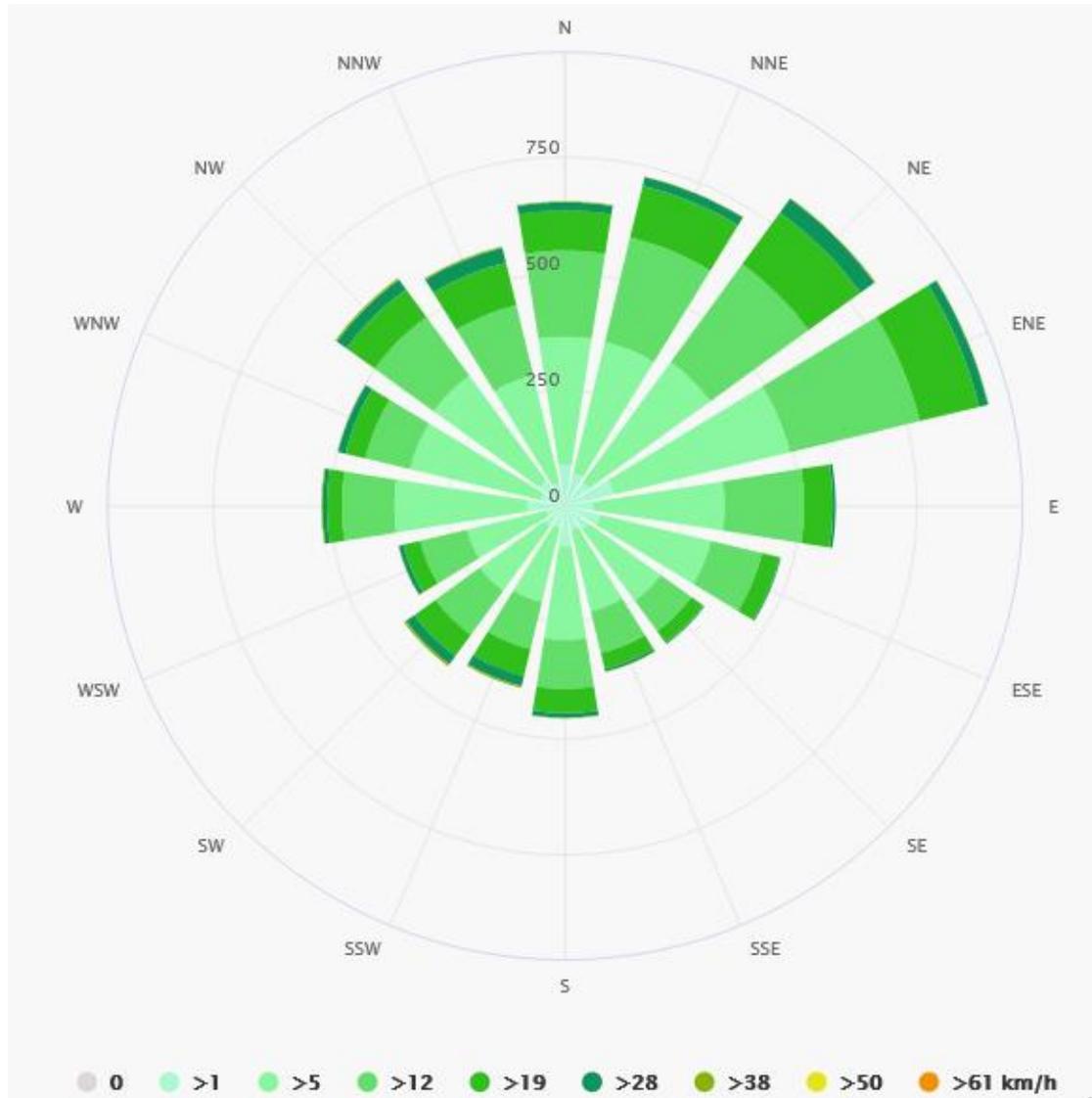


Figure 02.6 : Rose des vents de Béni Isguen

La Rose des Vents pour Béni Isguen montre combien d'heures par an le vent souffle dans la direction indiquée. Exemple SO : Le vent souffle du sud-ouest (SO) au nord-est (NE).

Ces données présentent : **Simulation de données climatiques et météorologiques historiques pour Béni Isguen prise à partir du site officiel de « Meteoblue » :**  
**[https://www.meteoblue.com/fr/meteo/historyclimate/climatemodelled/beni-iguen\\_alg%C3%A9rie\\_2504662](https://www.meteoblue.com/fr/meteo/historyclimate/climatemodelled/beni-iguen_alg%C3%A9rie_2504662)**

Annexe 03 : Carte climatique mondiale

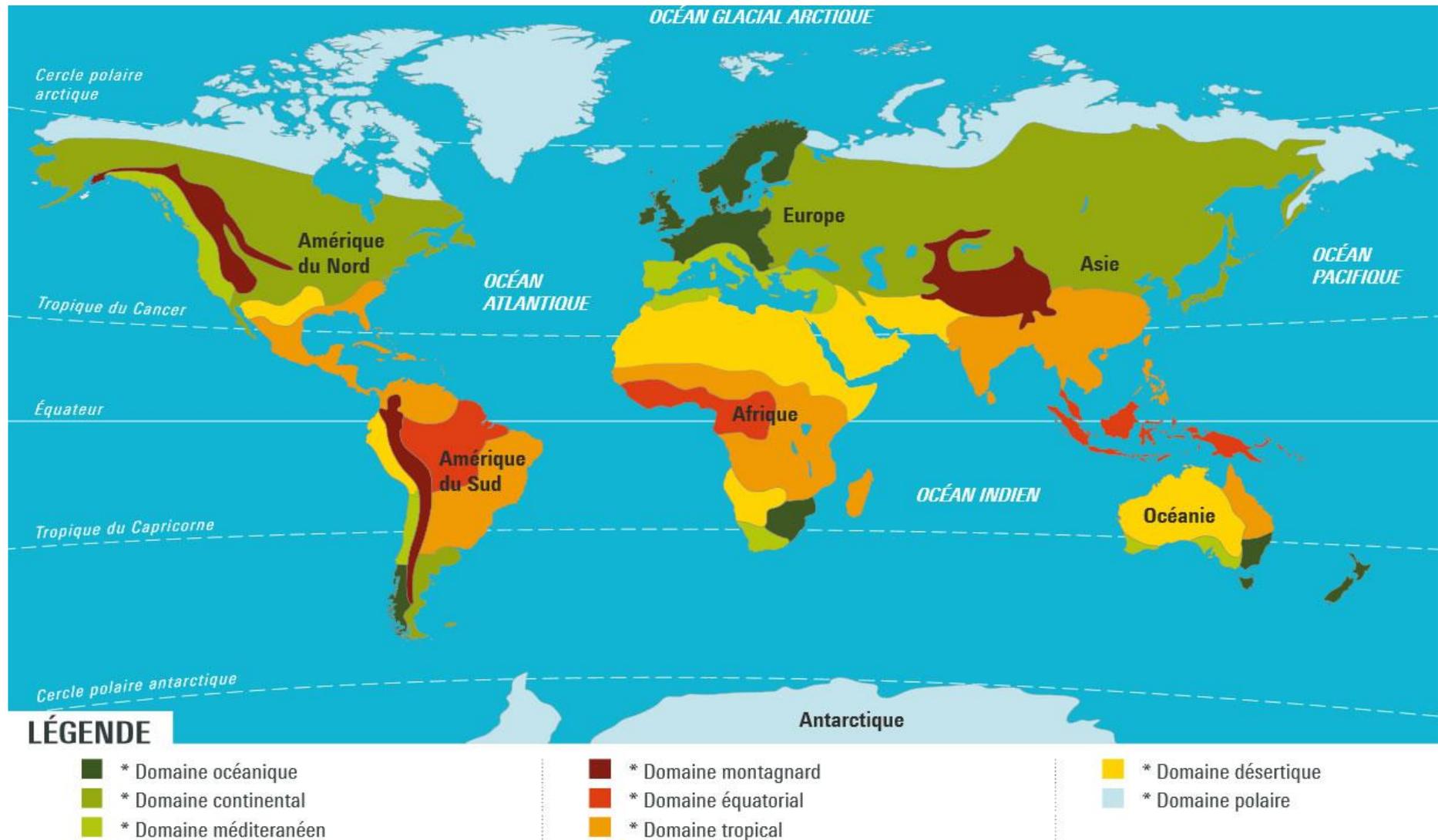


Figure 03.1 : Carte climatique mondiale (www.carte-du-monde.net)

## Paramètres Thermiques

### Conductivité thermique / Résistance thermique

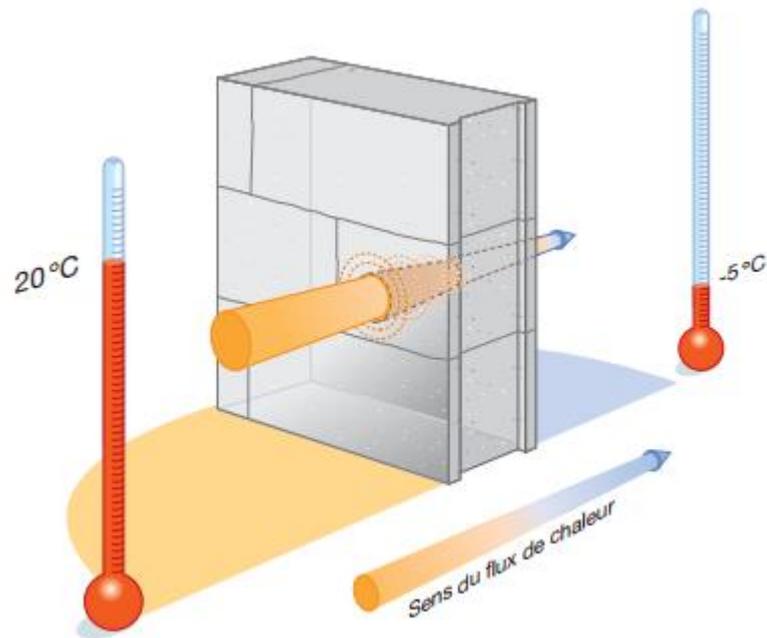


Figure 04.1 : Plus la conductivité est faible plus le matériau est isolant  
(<https://materiaux-namur.com/magazine/322/La-conductivite-thermique-des-isolants>)

Tableau 04.1 : Inertie thermique de quelques matériaux (Guide pratique, 2015)

Matériaux	Inertie thermique Wh/m <sup>3</sup> .k
Bois lourd (chêne, hêtre)	600
Béton plein	597
Pierre	526
Brique pleine	514
Bois léger	360
Laine de mouton	16
Polystyrène expansé	7

Temps de “Déphasage thermique”

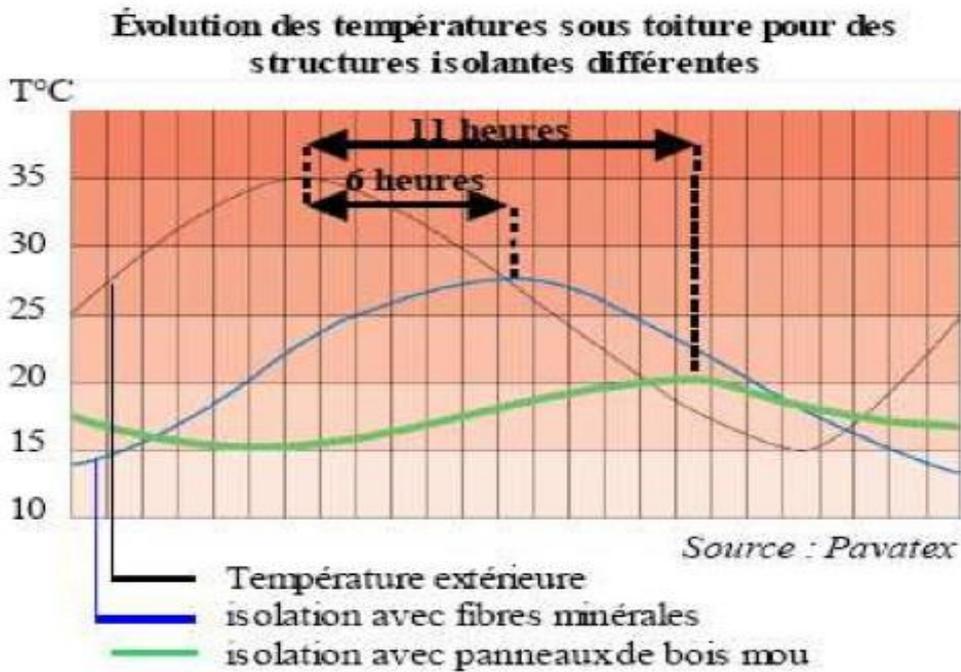


Figure 04.2 : Si la paroi est correctement dimensionnée, elle peut présenter un déphasage de 12H

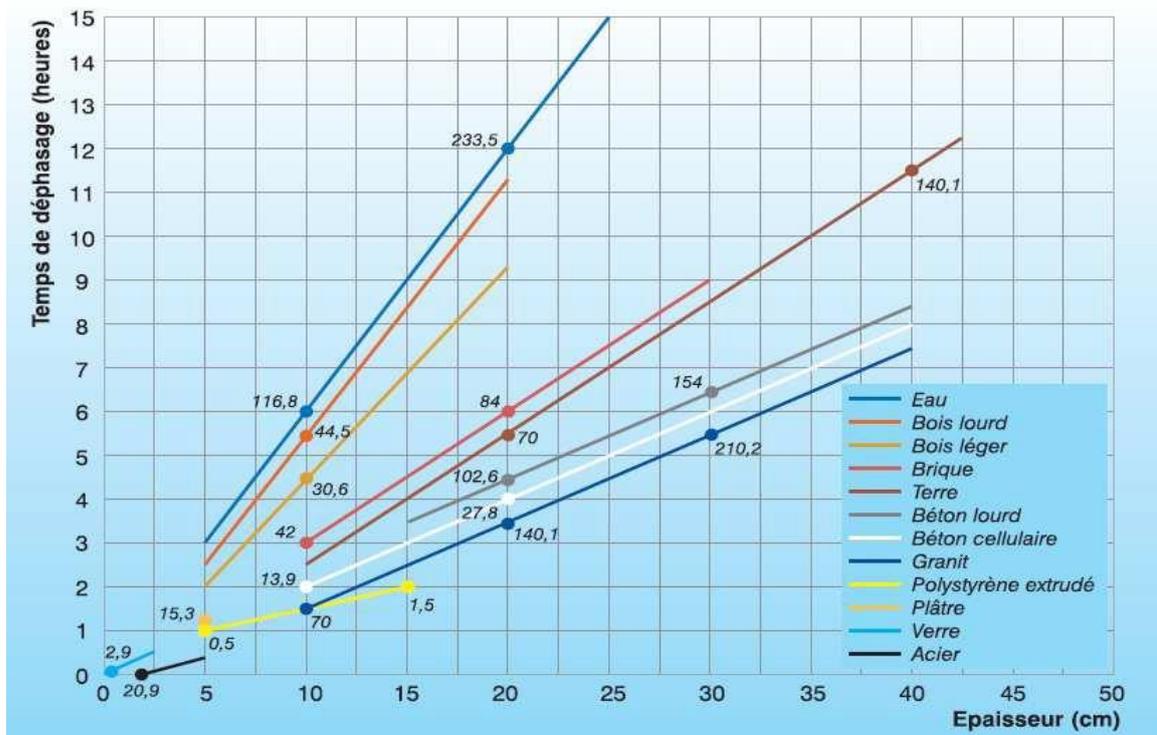
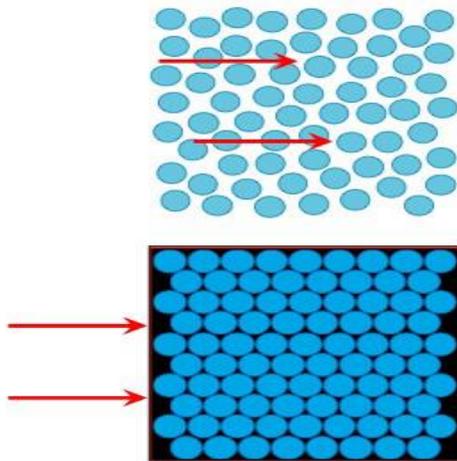


Figure 04.3 : Temps de déphasage de plusieurs matériaux suivant leurs épaisseurs ([https://www.m-habitat.fr/isolation/materiaux-isolants/dephasage-thermique-des-isolants-5013\\_A](https://www.m-habitat.fr/isolation/materiaux-isolants/dephasage-thermique-des-isolants-5013_A))

### Isolation Thermique

L'isolation thermique réduit le flux de chaleur qui transite à travers une paroi de l'ambiance la plus chaude vers la plus froide



**Isolation thermique**  
 = **air renfermé dans des poches / des pores**

**Mouvement de l'air**  
 = **transport de chaleur**

**Seules les poches d'air protégées du mouvement d'air ont un effet isolant.**

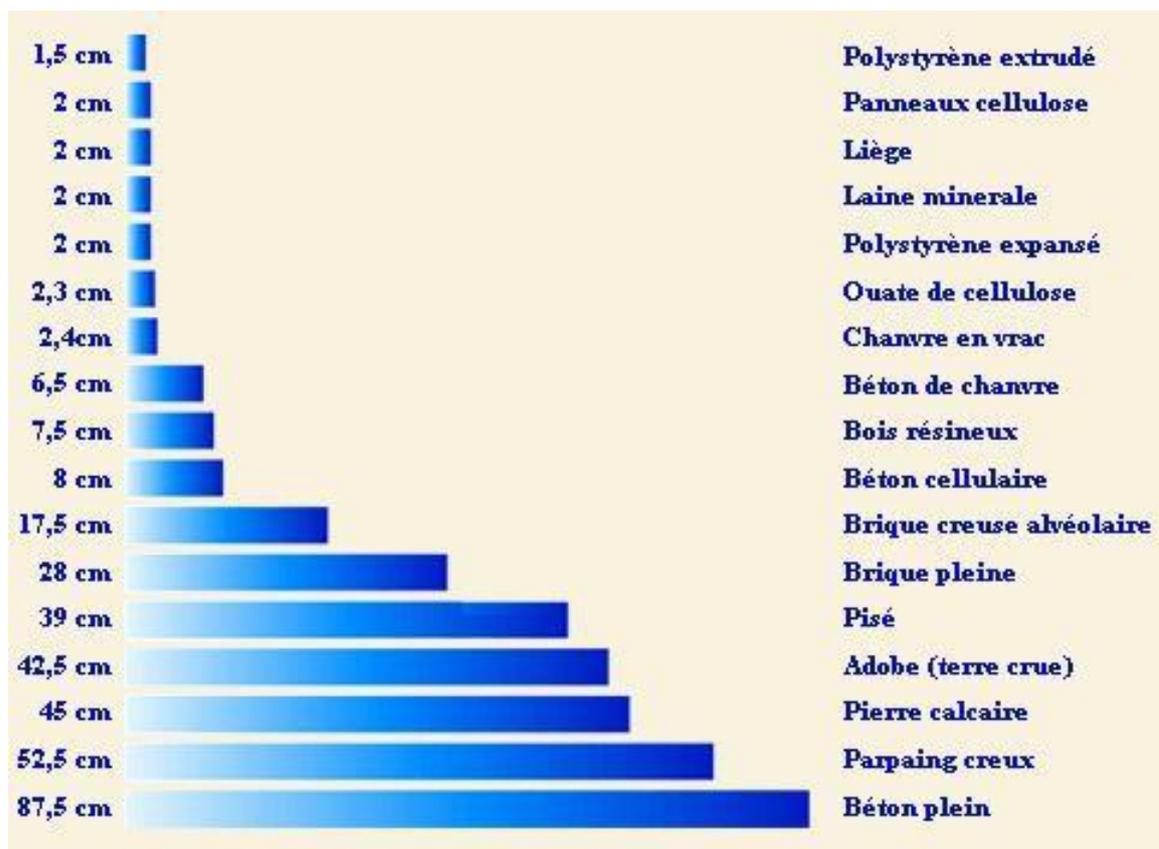


Figure 04.4 : Épaisseur de différents matériaux pour un même pouvoir isolant  
 ([http://jpblandine.lescigales.org/isolation\\_thermique.html](http://jpblandine.lescigales.org/isolation_thermique.html))

La date : le 9 Février 2019

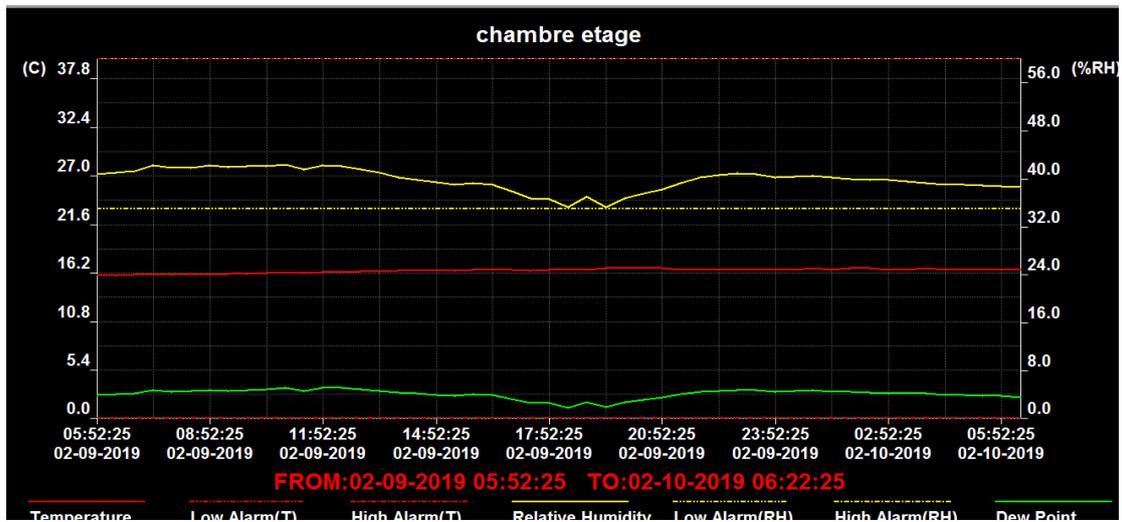


Figure 05.1 : Graphe de variation de température et d'humidité relative dans la chambre d'étage (le 9 février) (Source : FI 84ED)

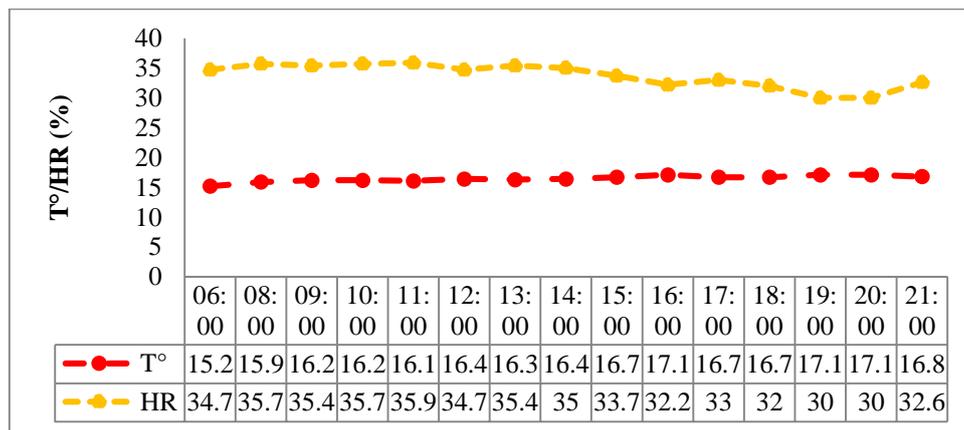


Figure 05.2 : Graphe de variation de température et d'humidité relative dans la chambre d'étage (le 9 février) (Source : FI 84ED traité par Excel)

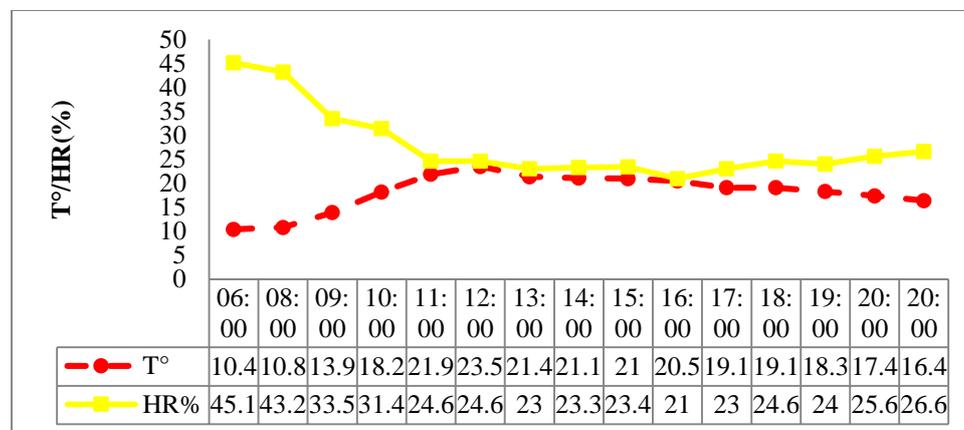


Figure 05.3 : Graphe de variation de température et d'humidité relative dans la terrasse (9 février) (S : FI 84ED, traité par Excel)

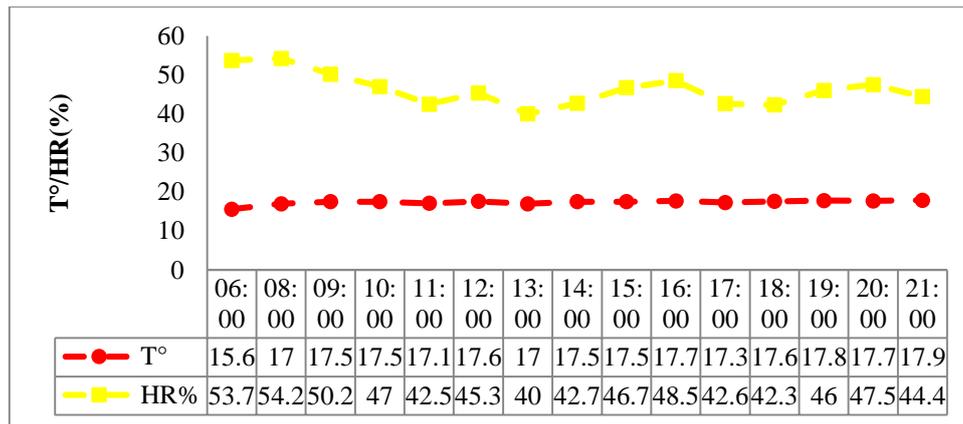


Figure 05.4 : Graphe de variation de température et d'humidité relative de la chambre de RDC (9 Février) (Source : FI 84ED traité par Excel)

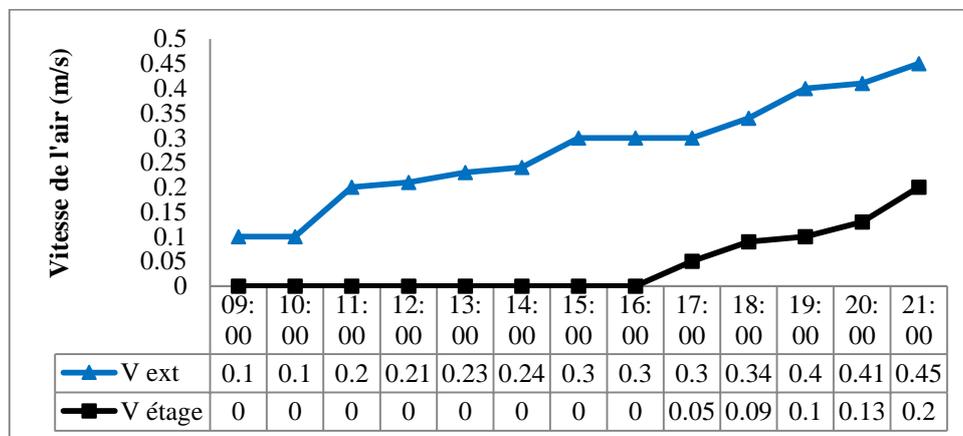


Figure 05.5 : Graphe de variation de vitesse de l'air de la chambre d'étage (9 Février) (Source : BA 16, traité par Excel)

Tableau 05.1 : Températures surfacique des parois de la chambre de RDC (9 février 2019)

Heure/ T°	T toit	T sol	T1	T2	T3	T4
6 :00	18.1	17.6	17.8	18.6	18.7	17.4
8 :00	18.1	17.7	17.7	18.6	18.6	17.4
9 :00	18	17.7	17.9	18.7	18.5	17.3
10 :00	17.8	17.6	17.8	18.6	18.6	17.4
11 :00	18	17.8	17.7	18.8	18.7	17.3
12 :00	17.9	17.8	17.9	18.6	18.7	17.3
13 :00	18.1	17.8	17.6	18.6	18.7	17.4
14 :00	17.9	17.8	17.9	18.7	18.7	17.4
15 :00	18.1	17.9	17.8	18.8	18.8	17.6
16 :00	18.1	18.1	17.9	18.7	18.8	17.6
17 :00	18.3	18.1	17.9	18.8	18.8	17.6
18 :00	18.1	18.2	18	19	18.8	17.7
19 :00	18.1	18.2	18.1	18.9	18.9	17.8
20 :00	18.1	18.3	18.1	19	19.1	17.7
21 :00	18.3	18.1	17.9	18.7	19	17.7

La date : 10 Février 2019

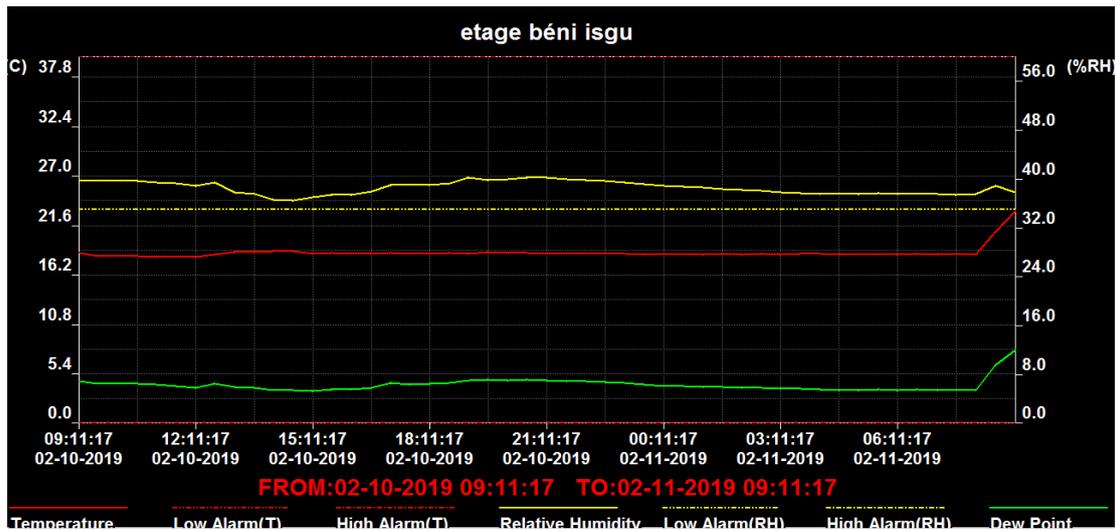


Figure 05.6 : Graphe de variation de température et d'humidité relative dans la chambre d'étage (10 février) (S : FI 84 ED)

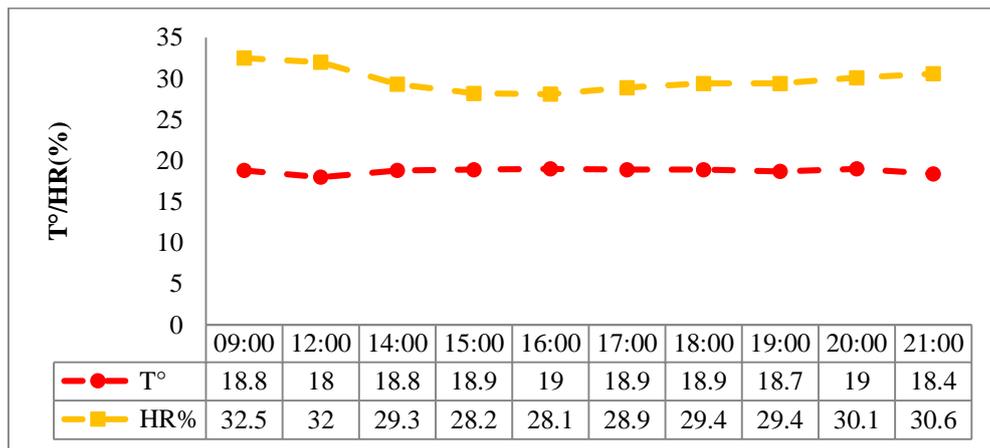


Figure 05.7 : Graphe de variation de température et d'humidité relative de la chambre d'étage (10 février) (S : FI 84 ED, traité par Excel)

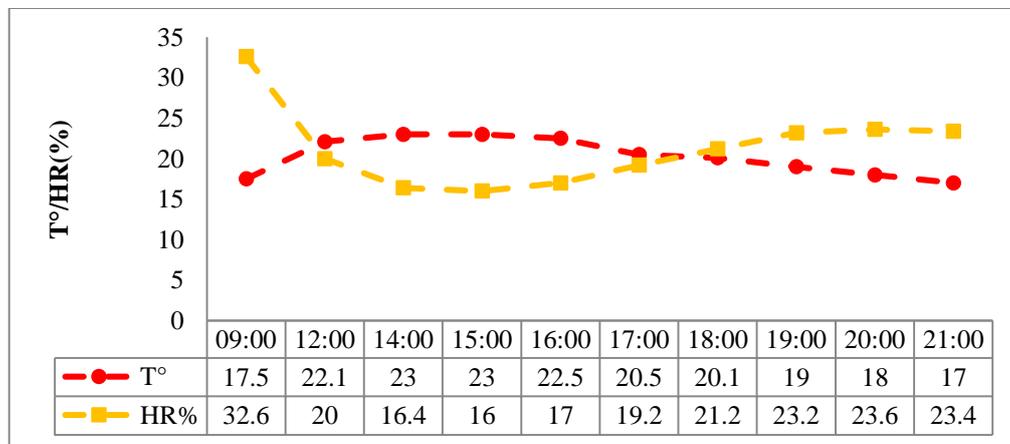


Figure 05.8 : Graphe de variation de température et d'humidité relative de la terrasse (le 10 Février) (S : FI 84 ED, traité par Excel)

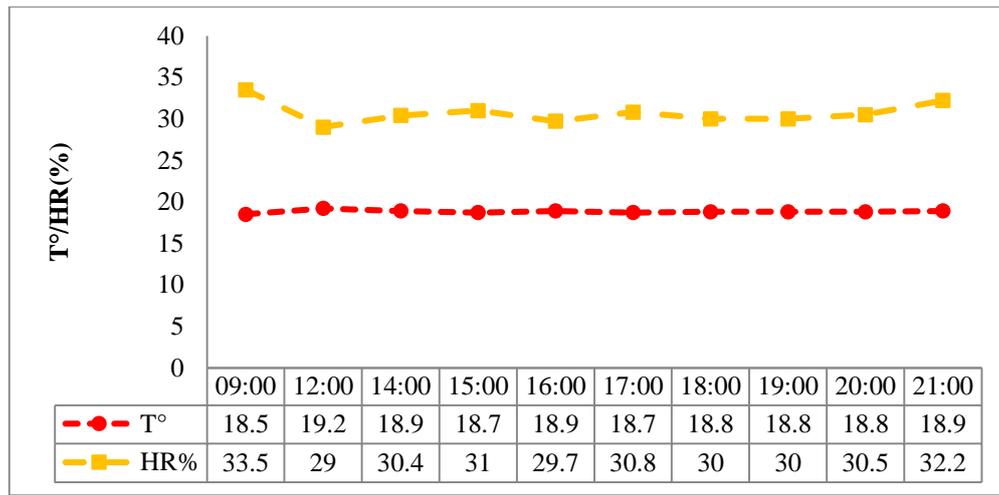


Figure 05.9 : Graphe de variation de température et d’humidité relative au RDC (10 Février) (S : FI 84 ED, traité par Excel)

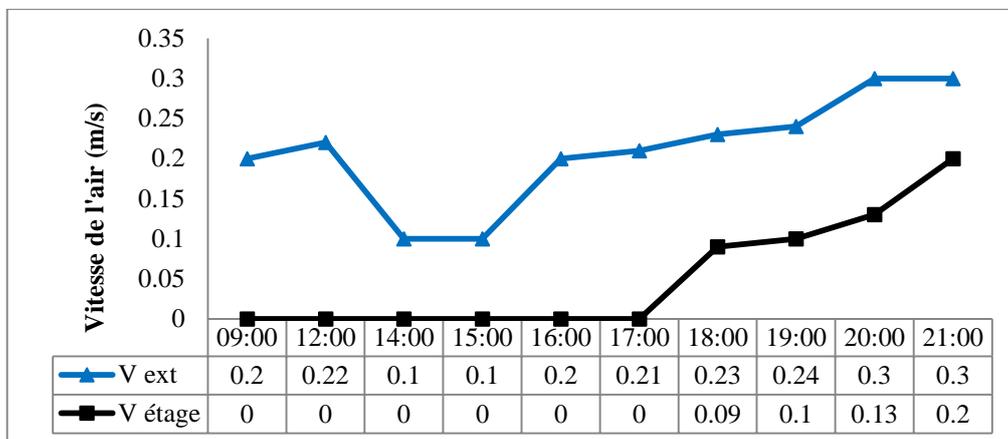


Figure 05.10 : Graphe de variation de vitesse de l’air de la chambre d’étage (10 Février) (Source : BA 16, traité par Excel)

Tableau 05.2 : Températures surfacique des parois de la chambre de RDC. S : A

Heure/T°	T toit	T sol	T1 <sup>4</sup>	T2	T3	T4
9 :00	19.3	19.2	18.9	19.9	19.6	19.3
12 :00	19.6	19.4	19.9	19.9	19	19.2
14 :00	19.6	19.7	19.9	19.9	18.9	19.2
15 :00	19.9	19.9	19.9	20.1	19.2	19.6
16 :00	19.9	19.3	19.8	20	19.2	19.3
17 :00	19.7	19.7	19.9	19.9	19	19.3
18 :00	19.4	19.3	19.6	19.9	18.9	19.2
19 :00	19.2	18.9	19.3	19.3	19.6	18.6
20 :00	19.4	19.2	19.6	19.7	18.8	19.2
21 :00	19.5	19.4	19.6	19.9	18.8	18.9

<sup>4</sup> Ts1, Ts2, Ts3, et Ts4 : sont les températures des surfaces des murs.

La date 11 Février 2019

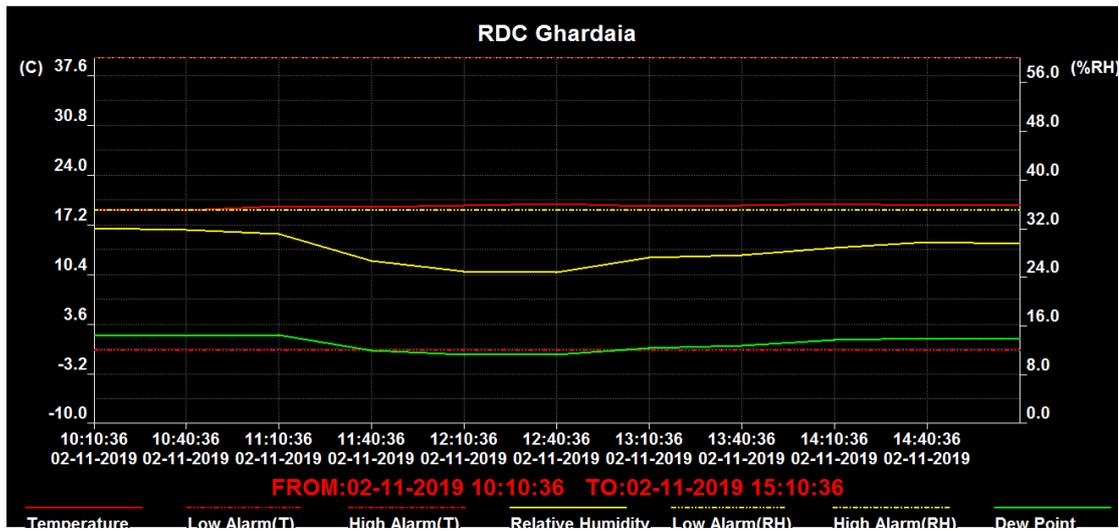


Figure 05.11 : Graphe de variation de température et d'humidité relative dans la chambre de RDC (11 Février) (S : FI 84ED)

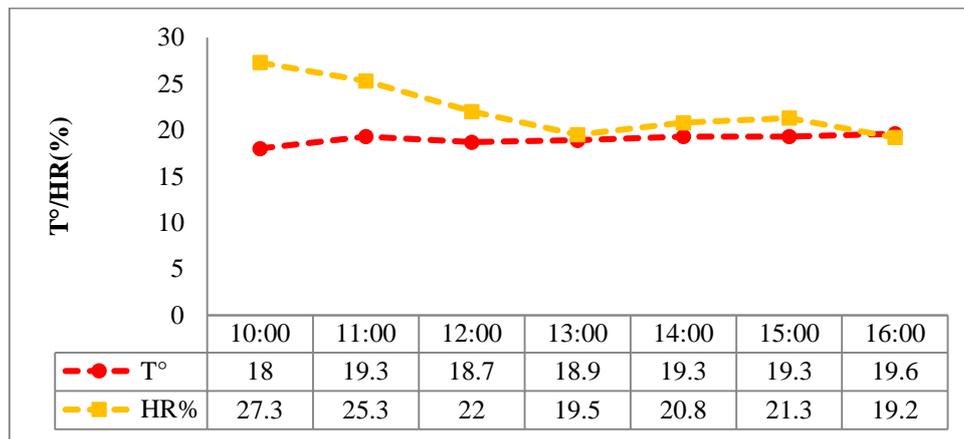


Figure 05.12 : Graphe de variation de température et d'humidité relative de la chambre de RDC (11 février) (S : FI 84 ED, traité par Excel)

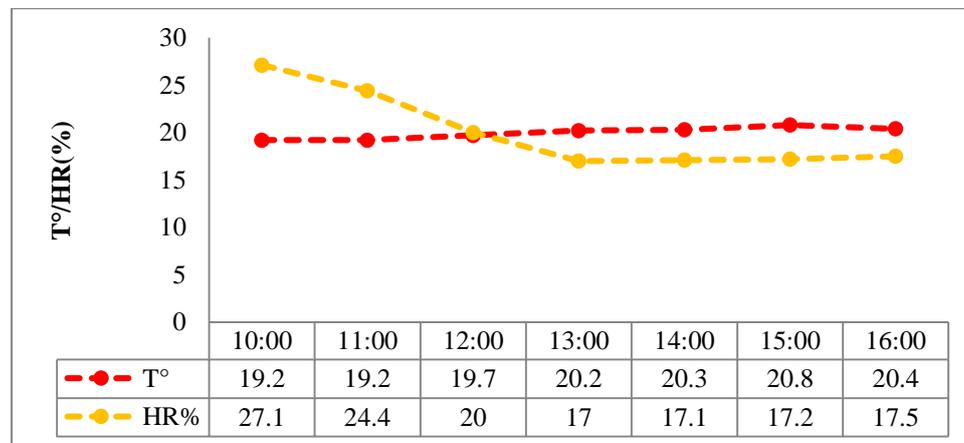


Figure 05.13 : Graphe de température et d'humidité relative de la chambre d'étage (11 février) (S : FI 84 ED, traité par Excel)

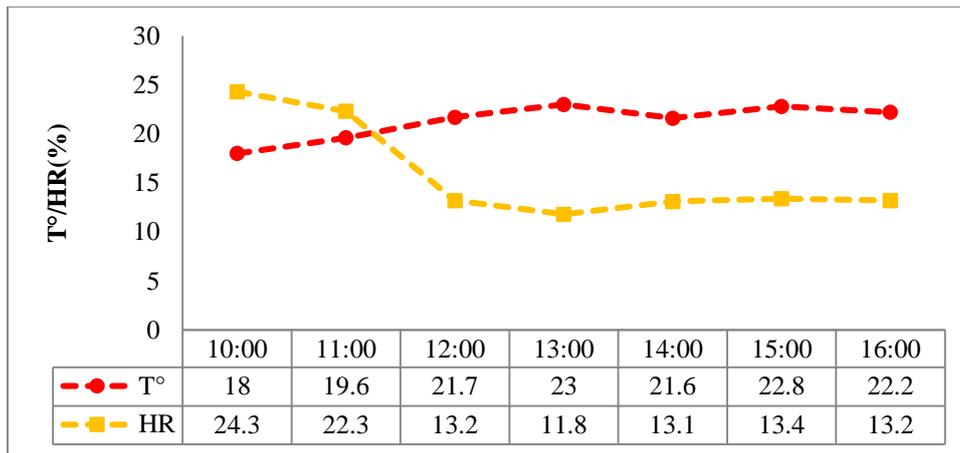


Figure 05.14 : Graphe de variation de température et d'humidité relative de la terrasse (11 Février) (S : FI 84 ED, traité par Excel)

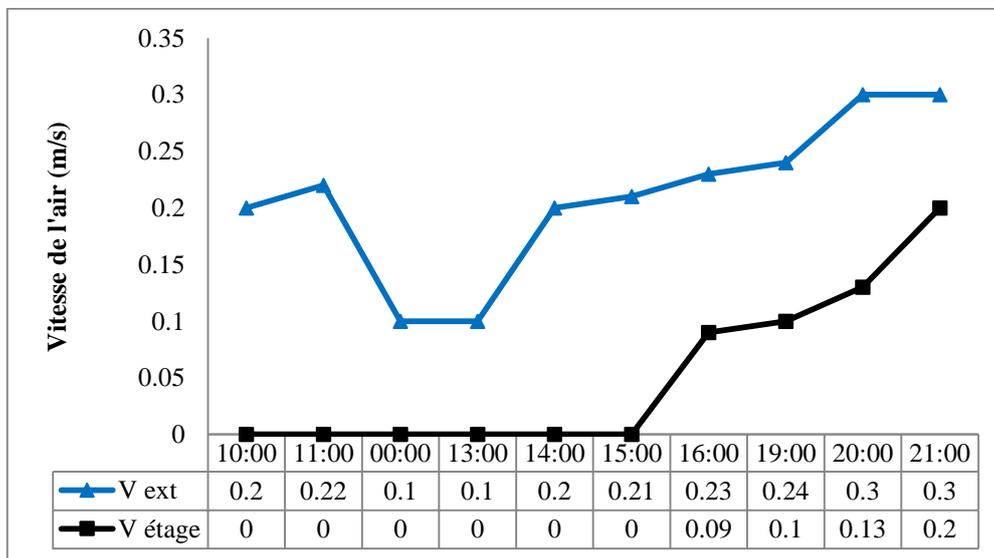


Figure 05.15 : Graphe de variation de vitesse de l'air de la chambre d'étage (11 Février) (Source : BA 16, traité par Excel)

La date : 12 Février 2019

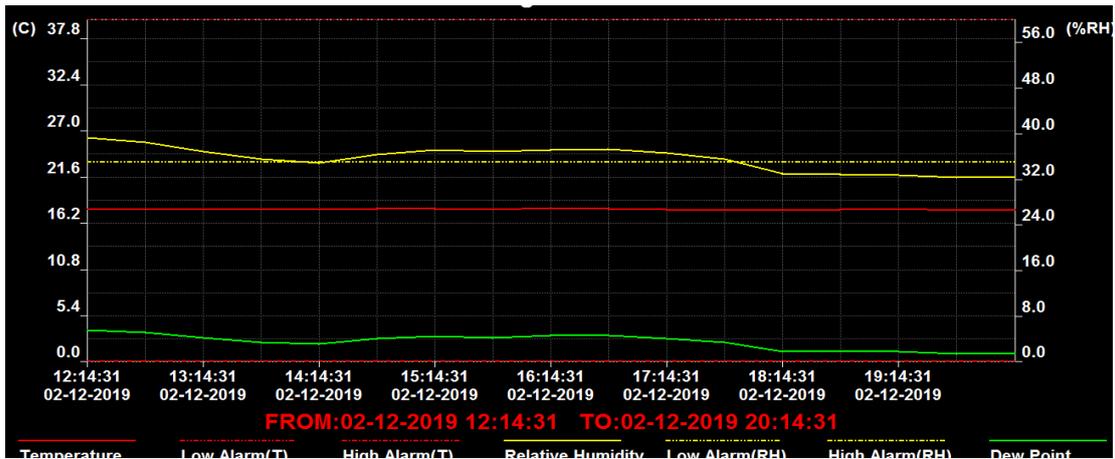


Figure 05.16 : Graphe de variation de température et d'humidité relative de la chambre d'étage (12 Février) (S : FI 84 ED)

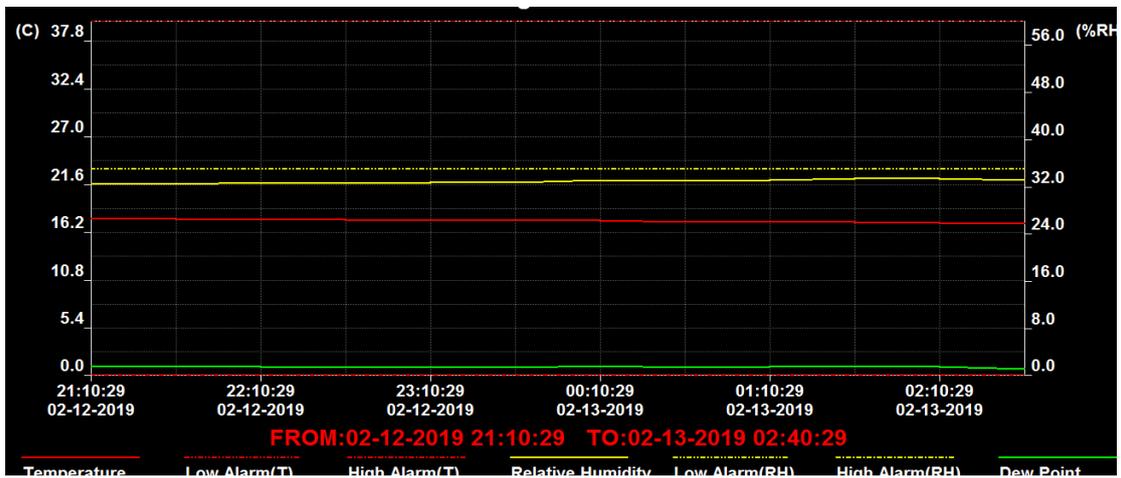


Figure 05.17 : Graphe de variation de température et d'humidité relative au RDC (12 février) (S : FI 84 ED)

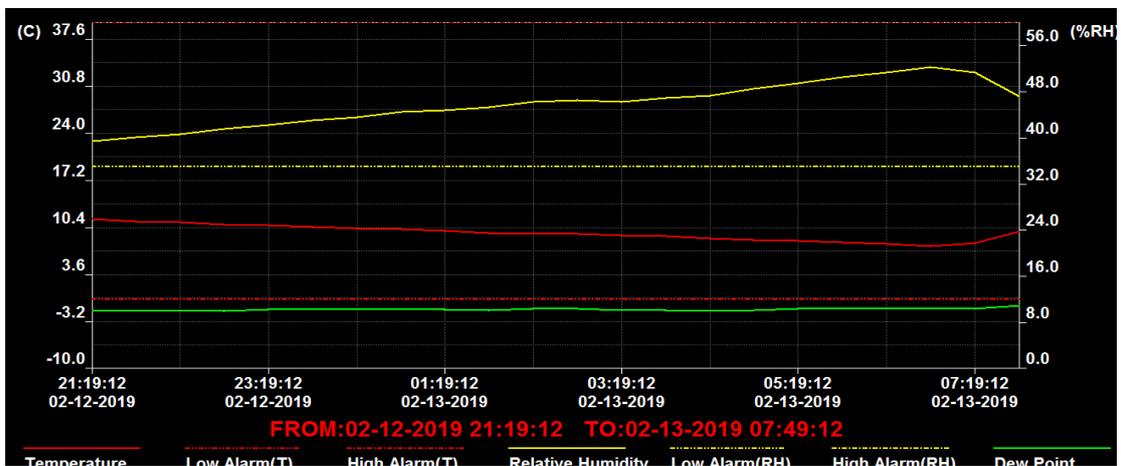


Figure 05.18 : Graphe de variation de température et d'humidité relative de la terrasse (12 février) (S : FI 84 ED)

La date : le 12 Février 2019

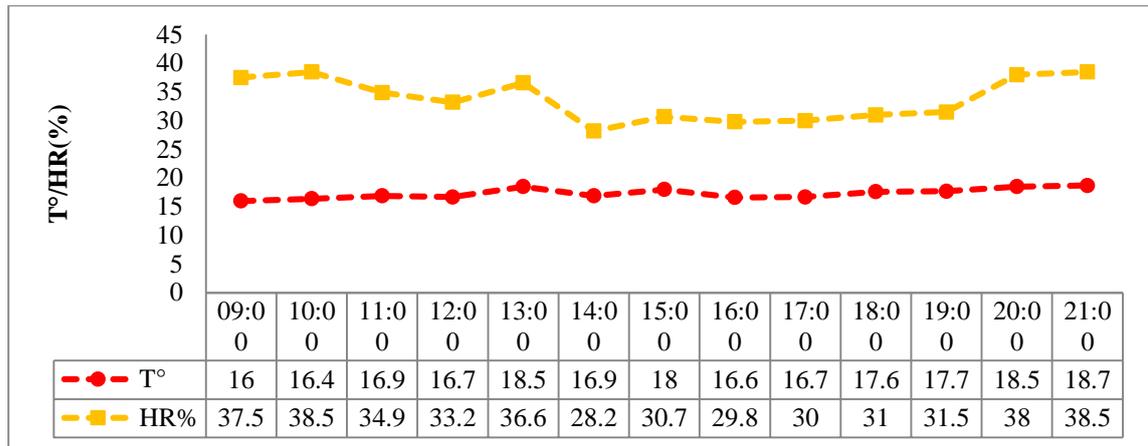


Figure 05.19 : Graphe de variation de température et d'humidité relative de la chambre de RDC (12 février) (S : FI 84 ED, traité par Excel)

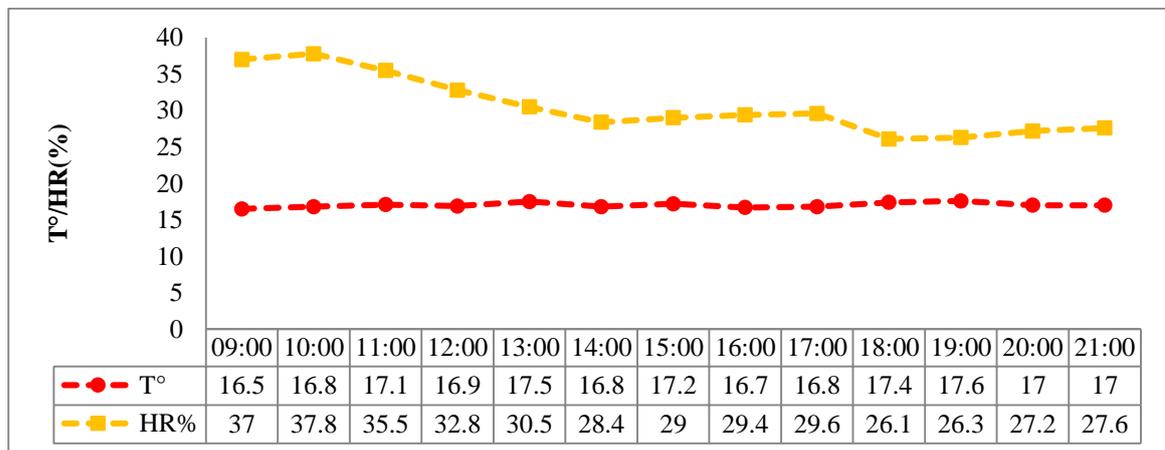


Figure 05.20 : Graphe de variation de température et d'humidité relative de la chambre d'étage (12 Février) (S : FI 84 ED, traité par Excel)

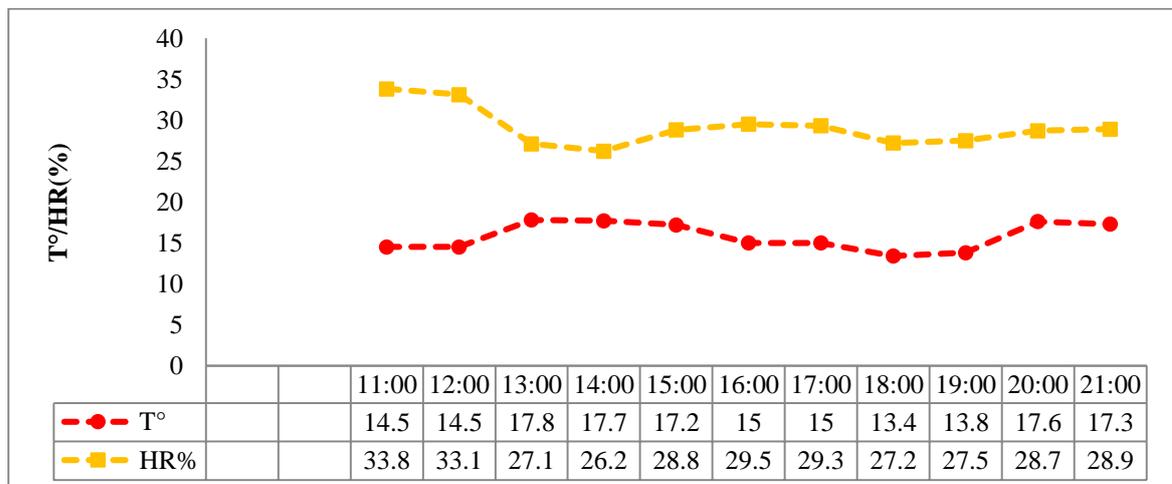


Figure 05.21 : Graphe de variation de température et d'humidité relative de la terrasse (12 Février) (S : FI 84 ED, traité par Excel)

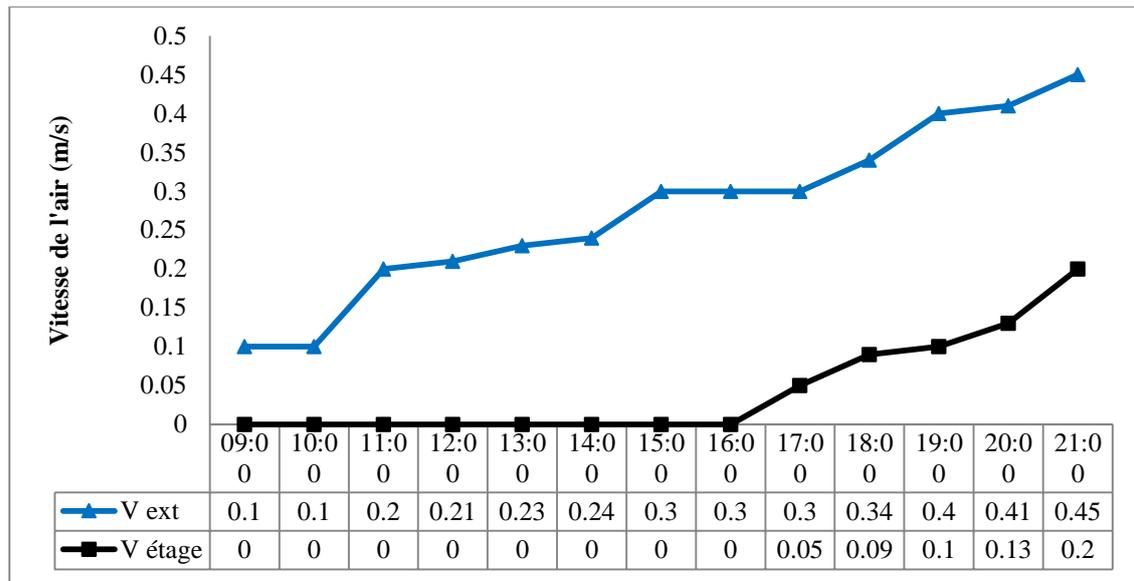


Figure 05.22 : Graphe de variation de vitesse de l'air de la chambre d'étage (12 Février) (Source : BA 16, traité par Excel)

Tableau 05.3 : Températures surfacique des parois de la chambre de RDC

Heure/T°	T toit	T sol	T1	T2	T3	T4
10 :00	18.9	17.9	18.1	19.3	18.8	17.7
11 :00	18.5	18.2	18	19	19.2	17.8
12 :00	18.8	18.2	18	17.9	17.7	17.7
13 :00	18.5	18.4	18.1	18	18.1	18.2
14 :00	18.6	18.1	17.6	17.5	17.4	17.2
15 :00	18.1	18	18.1	19.1	19.2	17.6
16 :00	18	17.9	18	18.8	19	18.1

## Annexe 06 : Simulation numérique avec TRNSYS

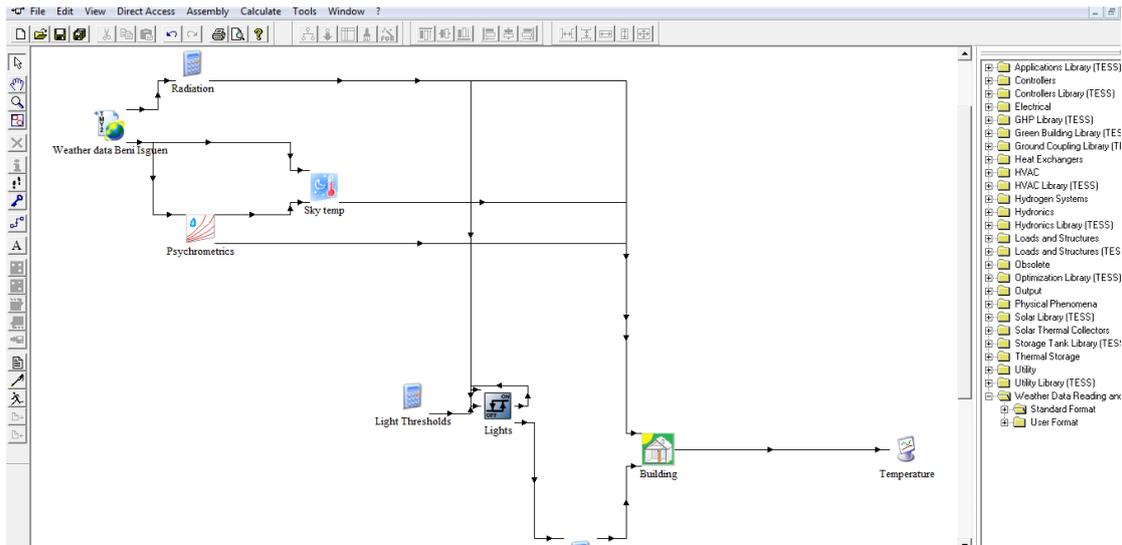


Figure 06.1 : Les types et les connexions utilisés dans la simulation

No.	Layer	Thickness	Type
1	STONE	0.400	massive
2	MORTIER	0.001	massive

Figure 06.2 : Les matériaux utilisés dans la simulation (les murs)

No.	Layer	Thickness	Type
1	PALM	0.200	massive
2	STONE2	0.150	massive
3	EARTH	0.140	massive
4	TIMCHEMT	0.001	massive
5	MORTAR	0.080	massive

Figure 06.3 : Les couches/matériaux de toit

## Annexe 06 : Simulation numérique avec TRNSYS

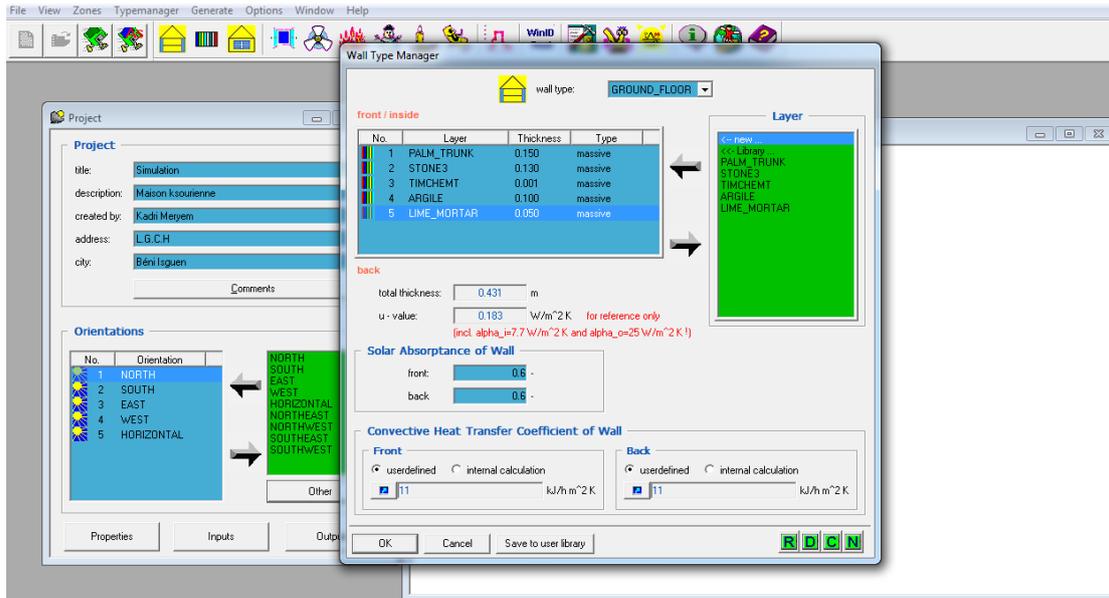


Figure 06.4 : les couches/matériaux du sol

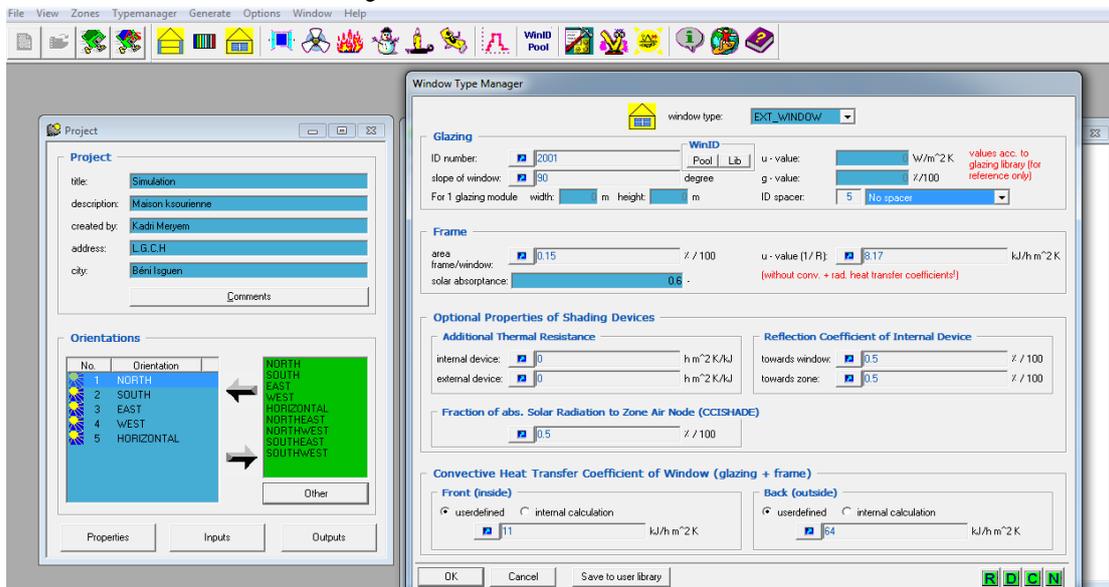


Figure 06.5 : Les caractéristiques des ouvertures

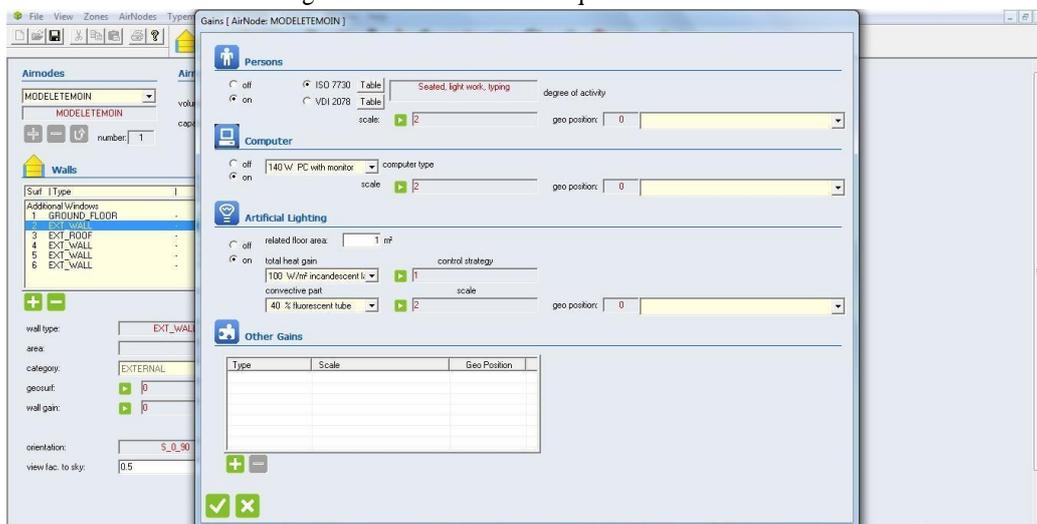


Figure 06.6 : les gains internes