

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Saad Dahleb Blida 1

Institut d'Architecture et d'Urbanisme

Laboratoire : Environnement et technologie pour l'architecture et le patrimoine ETAP



THÈSE
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE DOCTORAT D/LMD

Spécialité : Architecture, Patrimoine bâti et Environnement

Présentée par :
BENCHEIKH Darda

Sous la direction de :
BEDERINA Madani

TITRE

**EFFICIENCE ÉNERGÉTIQUE DES MATÉRIAUX DE
L'ARCHITECTURE VERNACULAIRE
CAS DE KSAR ZGAG EL-HADJAJ À LAGHOUAT**

Soutenue le 25 mars 2021 devant le jury composé de :

- Pr. ABDESSEMED-FOUFA Amina, Présidente, Université Saad Dahleb, Blida
- Pr. GUETTALA Salim, Examineur, Université Ziane Achour, Djelfa
- Dr. CHEIKH ZOUAOUI Mustapha, Examineur, Université Saad Dahleb, Blida
- Dr. NAIMI Meriem, Examinatrice, Université Saad Dahleb, Blida
- Pr. BEDERINA Madani, Rapporteur, Université Ammar Télidji, Laghouat

Année universitaire : 2020/2021

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Saad Dahleb Blida 1

Institut d'Architecture et d'Urbanisme

Laboratoire : Environnement et technologie pour l'architecture et le patrimoine ETAP



THÈSE

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE DOCTORAT D/LMD

Spécialité : Architecture, Patrimoine bâti et Environnement

Présentée par :

BENCHEIKH Darda

Sous la direction de :

BEDERINA Madani

TITRE

**EFFICIENCE ÉNERGÉTIQUE DES MATÉRIAUX DE
L'ARCHITECTURE VERNACULAIRE
CAS DE KSAR ZGAG EL-HADJAJ À LAGHOUAT**

Soutenue le 25 Mars 2021 devant le jury composé de :

- Pr. ABDESSEMED-FOUFA Amina, Présidente, Université Saad Dahleb, Blida
- Pr. GUETTALA Salim, Examineur, Université Ziane Achour, Djelfa
- Dr. CHEIKH ZOUAOUI Mustapha, Examineur, Université Saad Dahleb, Blida
- Dr. NAIMI Meriem, Examinatrice, Université Saad Dahleb, Blida
- Pr. BEDERINA Madani, Rapporteur, Université Ammar Téliidji, Laghouat

Année universitaire : 2020/2021

RÉSUMÉ

La réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) et de la consommation énergétique dans le secteur du bâtiment, notamment des ensembles résidentiels, est devenue un des enjeux majeurs pour les pays développés et en développement. Ce secteur est responsable de 36% de la consommation énergétique finale et de 40% des émissions de CO₂, sur l'échelle mondiale, et de 38% de la consommation énergétique globale, en Algérie.

L'attention portée sur ces recensements a donné un succès fulgurant à l'habitat vernaculaire, qui est devenu une source d'inspiration très prisée pour la construction des maisons confortables, énergétiquement performantes et à faible impact environnemental ; une trilogie résultant, principalement, de la mise en œuvre des stratégies bioclimatiques et de l'emploi des matériaux de construction locaux de caractère économique et écologique de premier plan, dont la brique d'adobe fait partie.

C'est dans ce contexte que s'inscrit la présente étude qui vise à mettre en relief l'incidence de la brique d'adobe sur le confort thermique en climat aride, comme critère d'évaluation de l'habitat vernaculaire de Ksar Zgag El-Hadjadj, le secteur sauvegardé de la ville de Laghouat. Ainsi, elle cherche à contribuer à la revalorisation de ce matériau à travers l'optimisation de ses caractéristiques finales, afin de motiver les acteurs de la construction à le réutiliser à nouveau, dans le but de réduire la consommation énergétique et les émissions CO₂ du secteur résidentiel.

Les résultats obtenus de l'approche adaptative du confort thermique, recommandée par ASHRAE 55 et basée sur l'enquête et les mesures in situ, ont révélé l'efficacité énergétique de la brique d'adobe. Ce matériau a permis, en absence quasi totale des stratégies passives, l'obtention d'un environnement hygrothermique confortable en période estivale et l'atténuation de la fluctuation de température extérieure en hiver, il a démontré un facteur d'amortissement de l'ordre de 0.26 et un déphasage thermique d'environ 9h. Les besoins énergétiques en

RÉSUMÉ

chauffages ont été estimés, par l'outil EnergyPlus, qui a révélé un pourcentage d'erreur de 3.40% en termes de température de l'air, à 46kW.

Par ailleurs, l'incorporation de la poudre de verre, issue de recyclage du verre blanc à vitrage post-consommation, dans le mélange de base, a permis d'améliorer significativement la résistance à la compression, l'absorption capillaire et la conductivité thermique de l'adobe. Les meilleurs résultats, sur le plan technique et environnemental, ont été obtenus dans le cas d'une teneur de 5% en poids, de cet additif minéral. En outre, les résultats de l'analyse d'impact environnemental, effectuée par l'outil SimaPro, ont démontré que, même à une teneur élevée de poudre de verre (20%), l'adobe reste bien plus écologique que la brique de terre cuite utilisée à nos jours.

Enfin, cette étude pourra contribuer à la réhabilitation de l'ancien Ksar de Laghouat qui présente, à nos jours, un état de dégradation très avancée menaçant la sécurité de ses habitants. Cette dégradation est, essentiellement, due à la sensibilité de la brique de terre crue à l'eau, qui a été réduite par l'usage de la poudre de verre.

Mots-clés : Habitat vernaculaire ; Climat aride ; Adobe ; Efficacité énergétique ; Stabilisation chimique ; Poudre de verre ; Propriétés thermomécaniques ; Absorption capillaire ; Impact environnemental.

ملخص

أصبح الحد من انبعاثات الغازات المسببة للإحتباس الحراري واستهلاك الطاقة في قطاع البناء، ولا سيما في المجمعات السكنية، أحد التحديات الرئيسية للبلدان المتقدمة والنامية، حيث ان هذا القطاع مسؤول عن 36% من الاستهلاك النهائي للطاقة و40% من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون على المستوى العالمي، و38% من إجمالي استهلاك الطاقة في الجزائر.

أدى الاهتمام بهذه الإحصائيات إلى نجاح هائل للعمارة العامية، التي أصبحت مصدر إلهام لبناء مساكن مريحة، موفرة للطاقة وذات تأثير بيئي منخفض؛ ثلاث خصائص ناتجة، بشكل أساسي، عن الاستراتيجيات البيومناخية المعتمدة، ومواد البناء المحلية ذات الطابع الاقتصادي والبيئي الرائد، والتي يعد الطوب أحدها.

بناء على ذلك، فإن الدراسة التي أجريت في هذه الأطروحة تهدف إلى تسليط الضوء على تأثير الطوب على الراحة الحرارية في المناخ الصحراوي، كمعيار لتقييم العمارة العامية لقصر زقاق الحجاج، القطاع المحمي لمدينة الأغواط، كما تسعى إلى المساهمة في ترقية هذه المادة المحلية من خلال تحسين خصائصها النهائية، من أجل تحفيز المختصين في مجال البناء على استخدامها، بهدف تقليل استهلاك الطاقة وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون في القطاع السكني .

كشفت النتائج المتحصل عليها من الطريقة التحليلية للراحة الحرارية بواسطة ASHRAE 55، والتي تتركز على الاستبيان والقياسات في الموقع، عن الكفاءة الطاقية للطوب، الذي مكن في ظل الغياب شبه التام للاستراتيجيات البيومناخية، من الحصول على بيئة حرارية مريحة في فترة الصيف، ومن التخفيف من تغيرات درجة الحرارة الخارجية في الشتاء، حيث أظهر معامل تخميد يقدر ب 0.26 وفارق طور حراري يساوي 9 ساعات، تم تقدير احتياجات الطاقة للتدفئة بواسطة برنامج المحاكات EnergyPlus ب 46 كيلو واط، حيث كشف هذا الأخير عن نسبة خطأ بلغت 3.40% من حيث درجة حرارة الهواء .

بالإضافة إلى ذلك، فقد أدى دمج مسحوق الزجاج الناتج عن إعادة تدوير زجاج النوافذ الأبيض، في الخليط الأساسي، لزيادة قوة الضغط وتقليل الامتصاص الشعري للماء والناقلية الحرارية للطوب، حيث تم الحصول على أفضل النتائج التقنية والبيئية بإضافة 5% (من حيث الوزن) من هاته المادة المعدنية، كما أظهرت نتائج تحليل الأثر البيئي، الذي أجري عن طريق المحاكات ببرنامج SimaPro،

أنه بالرغم من وجود نسبة عالية من مسحوق الزجاج (20٪)، فقد ظل الطوب المحلي المحسن الأقل تأثيراً على البيئة بالمقارنة مع الطوب الأحمر (الأجر) المستخدم حالياً.

وأخيراً، يمكن القول ان هذه الدراسة يمكن ان تساهم في إعادة تأهيل قصر الأغواط القديم، الذي يعاني حالياً من حالة تدهور متقدمة تهدد سلامة سكانه، وهذا راجع أساساً إلى حساسية الطوب للمياه، التي تم تقليلها بواسطة مسحوق الزجاج.

الكلمات المفتاحية: المسكن العامي، المناخ الصحراوي، الطوب، الكفاءة الطاقية، التعديل الكيميائي، مسحوق الزجاج، الخواص الحرارية الميكانيكية، الامتصاص الشعري، الأثر البيئي.

ABSTRACT

Reducing greenhouse gas (GHG) emissions and energy consumption in the building sector, particularly in residential complexes, has become one of the major challenges for developed and developing countries. This sector is responsible for 36% of final energy consumption and 40% of CO₂ emissions, on a world scale, and 38% of overall energy consumption in Algeria.

The attention paid to these censuses has given dazzling success of vernacular habitat, which has become a highly valued source of inspiration for the construction of comfortable, energy-efficient houses and with low environmental impact. This trilogy was resulted, mainly, from the implementation of bioclimatic strategies, and the use of local building materials of leading economic and ecological character, of which the adobe brick is one.

The present study takes place within this context, which aims to highlight the impact of adobe brick on thermal comfort in arid climate, as criteria for evaluating Ksar Zgag El-Hadjadj vernacular habitat; the preserved sector of Laghouat. Thus, it seeks to contribute to the upgrading of this material by optimizing its final characteristics, in order to motivate construction stakeholders to reuse it again, in order to reduce energy consumption and CO₂ emissions of the residential sector.

The results obtained from the adaptive analytical thermal comfort approach recommended by ASHRAE 55, based on the survey and site measurements, revealed the energy efficiency of the adobe brick. This building material made it possible, in the almost total absence of passive strategies, to obtain a comfortable hygrothermal environment during the summer period, and to reduce the outside temperature swing in winter, a 0.26 decrement factor and 9hours time lag were obtained using such a building material. The energy needs for heating were estimated, by simulation using EnergyPlus tool that revealed a percentage error of 3.40% in terms of air temperature, at 46kW.

In addition, the incorporation of the glass powder in the adobe, obtained from recycling post-consumer white glass, in the base mixture, made it possible to significantly improve the compressive strength, the capillary water absorption and

ABSTRACT

the thermal conductivity of adobe. The best technical and environmental results were obtained at a 5% of this mineral addition weight. The results of the environmental impact analysis, carried out by simulation using SimaPro tool, showed that even at a high content of glass powder (20%), the adobe remains much more ecological than the clay brick used nowadays.

Finally, this improvement could contribute in Laghouat old Ksar rehabilitation, which presents nowadays a very advanced state of degradation that threatens the safety of its inhabitants, and that essentially due to the adobe's sensitivity to water, which has been reduced by the glass powder.

Keywords: Vernacular habitat, Arid climate, Adobe, Energy efficiency, Chemical stabilization, Glass powder, Thermo-mechanical properties, Capillary absorption, Environmental impact.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier, en premier lieu, ma famille pour leur soutien constant et leurs encouragements qui sont les piliers fondateurs de ce travail.

J'adresse également mes remerciements et ma gratitude à mon directeur de thèse, Mr **BEDERINA Madani**, professeur au département de génie civil à l'université de Laghouat, pour la confiance qu'il m'a accordée en acceptant d'encadrer ce travail, pour sa disponibilité, sa patience, son orientation et surtout ses conseils judicieux qui ont contribué au succès de ce projet de recherche.

Je remercie Mr **MECHATTAH Lakhdar**, pour sa collaboration en me donnant accès à sa maison en temps voulu, et pour être et sa famille à ma disposition pour mener à bien ce travail de recherche.

J'exprime ma profonde gratitude à Mr **MEZAOUEKH Lakhdar**, et Mr **MOKDAD Bachir**, des enseignants au département de l'architecture à l'université de Laghouat, pour leurs encouragements et leur aide dans l'accomplissement de cette thèse.

Je tiens aussi à remercier tous les membres du laboratoire de génie civil de l'université de Laghouat, du laboratoire ETAP de l'université de Blida 1 et du laboratoire CETIM à Boumerdes, pour leurs conseils et leur précieuse collaboration dans le cadre de mes travaux.

Un remerciement tout particulier est adressé à l'ensemble des enseignants, en particulier Mme **ABDESSEMED-FOUFA Amina** et Mme **CHERGUI Samia**, professeures à l'institut d'architecture et d'urbanisme à l'université de Blida, qui ont contribué à ma formation, à tous mes amis et mes collègues, en particulier **BENSAYAH Amina**, **SAHEL Abde Naceur**, **MERZOUG Wissam**, **CHAOUI Lina**, **SLIMANI Yasmine** et **KHLEDJ Samir**, qui ont amplement contribué à faire de mon passage au doctorat l'expérience la plus marquante de ma vie.

Je remercie enfin l'ensemble des membres de jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant aimablement d'examiner cette thèse, je leur suis très reconnaissante de bien vouloir porter intérêt à ce travail.

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABRÉVIATIONS

M	: Activité métabolique, W/m ²
W	: Puissance fournie à l'extérieur, W/m ²
C	: Échanges de chaleur par convection, W/m ²
R	: Échanges de chaleur par rayonnement, W/m ²
K	: Échanges de chaleur par conduction, W/m ²
E_{SK}	: Échanges de chaleur par évaporation de la sueur, W/m ²
C_{RES}	: Échanges thermiques par la convection respiratoire, W/m ²
E_{RES}	: Échanges thermiques par l'évaporation respiratoire, W/m ²
S	: Chaleur stockée à la surface de la peau, W/m ²
C_b	: Capacité thermique du bâtiment, J/°C
T_b	: Température moyenne du bâtiment, °C
t	: Temps, s
P_{int}	: Puissance produite par les apports internes, W
P_{gc}	: Puissance produite par les systèmes du génie climatique, W
Φ_{sol}	: Apports solaires transférés à travers les vitrages, W
Φ_{env}	: Apports thermiques transférés à travers l'enveloppe, W
Φ_{air}	: Apports thermiques transférés liées au renouvellement d'air, W
P_v	: Pression partielle de vapeur d'eau, Pa
T_o	: Température opérative, °C
T_a	: Température de l'air, °C
T_r	: Température moyenne radiante des parois, °C
T_n	: Température neutre, °C
T_m	: Température moyenne mensuelle de l'air, °C
d	: Epaisseur du matériau, m
a	: Diffusivité thermique du matériau, m ² /s
λ	: Conductivité thermique du matériau, W/m.K
ρc_p	: Capacité thermique volumique du matériau, J/m ³ .K

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABRÉVIATIONS

C_p	: Capacité thermique massique du matériau, J/kg.K
W_{eq}	: Teneur en eau, kg/kg
I	: Indice d'aridité
P	: Précipitation moyenne annuelle, mm
T	: Température moyenne annuelle, °C
Q2	: Quotient pluviothermique d'EMBERGER.
M	: Température moyenne maximale du mois le plus chaud, °C
m	: Température moyenne minimale du mois le plus froid, °C
ET	: Température effective, °C
SET	: Température standard effective, °C
Ps	: Masse volumique absolue, kg/m ³
W_L	: Limite de liquidité
W_p	: Limite de plasticité
I_p	: Indice de plasticité
R_c	: Résistance à la compression, MPa
C_b	: Coefficient d'absorption capillaire, g/cm ² .mn
Φ	: Déphasage thermique, h
f	: Facteur d'amortissement
PMV	: Vote Moyen Prévisible
PPD	: Pourcentage des personnes insatisfaites
GES	: Gaz à effet de serre
ACV	: Analyse Cycle de vie
STD	: Simulation thermique dynamique
BSP	: Building performance simulation
PPSMVSS	: Plan Permanent de Sauvegarde et de Mise en Valeur des Secteurs Sauvegardés
CRAterre	: Centre internationale de la Construction en Terre
ASHRAE	: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
UNESCO	: Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture

TABLE DES MATIÈRES

RESUME

REMERCIEMENTS

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

TABLE DES MATIERES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ILLUSTRATIONS ET DES GRAPHIQUES

INTRODUCTION GENERALE..... 1

PARTIE I : L'ARCHITECTURE VERNACULAIRE ; UNE SOLUTION POUR UN FUTURE DURABLE

Introduction 11

CHAPITRE 1 :

COMPRENDRE L'ARCHITECTURE VERNACULAIRE

1. L'architecture vernaculaire : recherche d'une définition.....	14
2. L'architecture vernaculaire : brève histoire.....	19
3. L'architecture vernaculaire, une réponse aux besoins transcendants d'une communauté.....	22
3.1 Théorie de la forme vernaculaire.....	23
4. Conclusion.....	43

CHAPITRE 2 :

L'ASPECT BIOCLIMATIQUE DE L'HABITAT VERNACULAIRE

1. Qu'entend-on par le « bioclimatisme » ?.....	45
1.1 Le climat, un critère essentiel de bioclimatisme.....	46
1.2 Interaction entre le corps humain et l'environnement extérieur.....	47
1.3 Le bâtiment, la troisième peau de l'être humain.....	51
1.4 Notion du confort thermique de l'occupant.....	52
2. Redécouverte des stratégies bioclimatiques vernaculaires : leçons du passé.....	59
2.1 Climat aride (B).....	60
2.2 Climat tempéré chaud (C).....	65
2.3 Climat équatorial (A).....	68

TABLE DES MATIÈRES

2.4	Climat polaire (E)	70
2.5	Climat boréal (D)	72
3.	Outils d'aide à la conception bioclimatique	75
3.1	Diagramme d'OLGAY	75
3.2	Diagramme de GIVONI	76
3.3	Méthode de SZOKOLAY	79
3.4	Tableaux de MAHONEY	80
4.	Outils de simulation énergétique du bâtiment 'BPS'	83
5.	Conclusion	86

CHAPITRE 3 :

L'ADOBE, UN MATERIAU DE CHOIX POUR UNE ARCHITECTURE DE QUALITE

1.	La terre crue, une matière première	89
1.1	Les minéraux	89
1.2	Proportions et techniques	93
2.	L'Adobe, une technique néolithique	96
2.1	L'habitat vernaculaire d'adobe	98
3.	Efficacités énergétiques de l'habitat vernaculaire en adobe	109
3.1	Comprendre les qualités hygrothermiques d'adobe	112
4.	Impact environnemental du matériau adobe	124
4.1	Production et construction	124
4.2	Exploitation	125
4.3	Fin de vie	127
5.	Renouveau de l'adobe	128
5.1	Stabilisation chimique d'adobe	130
6.	Conclusion	134
	Conclusion : bilan des études bibliographiques et orientation d'étude	137

PARTIE II : L'HABITAT KSOURIEN DE LAGHOUAT ; UNE DEMARCHE VERS UN HABITAT CONTEMPORAIN DURABLE

Introduction	139
--------------------	-----

CHAPITRE 4 :

REGARD SUR L'HABITAT KSOURIEN DE ZGAG EL-HADJADJ

1.	Laghouat, la porte du désert	141
1.1	Synthèse historique de la ville de Laghouat	142
1.2	Climatologie de la ville de Laghouat	145

TABLE DES MATIÈRES

1.3	Patrimoine ksourien de la ville de Laghouat	159
2.	Ksar Zgag El-Hadjadj, un exemple d'architecture vernaculaire saharien	162
2.1	La configuration urbaine du Ksar.....	163
2.2	La typologie architecturale de l'habitat ksourien	167
2.3	Technique et matériaux de construction	172
2.4	Etat des lieux du Ksar Zgag El-Hadjadj.....	176
3.	Conclusion	178

CHAPITRE 5 :

EFFICACITE ENERGETIQUE DE L'HABITAT VERNACULAIRE DE KSAR ZGAG EL-HADJADJ

1.	La maison en question	181
1.1	La configuration spatiale de la maison	183
1.2	Matériaux et techniques de construction	186
2.	Espaces d'étude.....	188
2.1	La salle de séjour	189
2.2	La cour extérieure	191
3.	Performance thermique de l'habitat ksourien.....	192
3.1	Pré-enquête	192
3.2	Méthode qualitative subjective : enquête sociologique	194
3.3	Méthode quantitative objective : instrumentation in-situ.....	198
4.	Simulation thermique dynamique (STD)	237
4.1	Processus de simulation par EnergyPlus (version 1.2.2).....	238
4.2	Résultats et analyses	245
4.3	Discussion.....	249
5.	Conclusion	251

CHAPITRE 6 :

L'ADOBE : DE L'ECHELLE IN-SITU A L'ECHELLE DU LABORATOIRE

1.	Matières premières : origine, échantillonnage et caractérisation	256
1.1	Les terres.....	257
1.2	L'argile	268
1.3	La poudre de verre.....	272
1.4	L'eau de gâchage.....	274
2.	Production de l'adobe.....	275
2.1	Matériel spécifique	275
2.2	Mélanges	275
2.3	Processus de fabrication de l'adobe.....	277

TABLE DES MATIÈRES

2.4	Conditions de cure	279
3.	Caractérisation des adobes.....	279
3.1	Propriétés thermiques	280
3.2	Résistance à la compression sèche	280
3.3	Absorption d'eau capillaire	281
4.	Résultats et discussion.....	282
4.1	Effet de la poudre de verre sur les propriétés thermiques	282
4.2	Effet de la poudre de verre sur la résistance à la compression (R_c).....	285
4.3	Effet de la poudre de verre sur l'absorption capillaire (C_b).....	287
5.	Discussion.....	288
6.	Impact environnemental de l'adobe stabilisé à la poudre de verre.....	290
6.1	Modélisation avec SimaPro.....	291
6.2	Résultats et discussion.....	292
7.	Conclusion	295
	Conclusion : bilan de l'étude empirique	297

CONCLUSION GENERALE	299
----------------------------------	-----

REFERENCES

ANNEXES

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE 1 :

COMPRENDRE L'ARCHITECTURE VERNACULAIRE

Tableau 1.1 : Facteurs influents de l'architecture vernaculaire.....	18
---	----

CHAPITRE 2 :

L'ASPECT BIOCLIMATIQUE DE L'HABITAT VERNACULAIRE

Tableau 2.1 : Métabolisme du corps humain en fonction de l'activité physique	50
Tableau 2.2 : Intervalles des paramètres qui interviennent dans l'indice PMV.....	53
Tableau 2.3 : Classes de confort thermique en fonction de PPD et PMV.....	54
Tableau 2.4 : Relation entre l'indice SET et la sensation thermique	55
Tableau 2.5 : Algorithme du contrôle adaptatif développé par le SCATs	57
Tableau 2.6 : les intervalles des méthodes d'ASHRAE.....	59
Tableau 2.7 : Synthèse des Solutions bioclimatiques adoptées dans les exemples étudiés de l'habitat vernaculaire.	74
Tableau 2.8 : Groupe d'humidité en fonction d'humidité moyenne annuelle.....	80
Tableau 2.9 : Limites de confort en fonction d'humidité et de température moyenne annuelle TMA.....	81
Tableau 2.10 : Indicateurs d'humidité et d'aridité.....	81
Tableau 2.11 : Recommandations conceptuelles	82
Tableau 2.12: Caractéristiques thermiques recommandées par MAHONEY	83
Tableau 2.13 : Comparaison entre les outils de simulation énergétique.	85

CHAPITRE 3 :

L'ADOBE, UN MATERIAU DE CHOIX POUR UNE ARCHITECTURE DE QUALITE

Tableau 3.1 : Fractions granulaires de la terre.....	90
Tableau 3.2 : Occurrence des minéraux en fonction du climat.....	91
Tableau 3.3 : Caractéristique des Argiles	92
Tableau 3.4 : Proportion des composants dans les matériaux terre	94
Tableau 3.5 : Caractéristiques thermo-physiques et mécaniques des trois grandes familles de mise en œuvre de terre	95
Tableau 3.6 : Caractéristiques thermo-physique des adobes en études antérieures. ...	115

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.7 : Effet de l'érosion sur les caractéristiques physiques de l'adobe	122
Tableau 3.8 : Energie grise de différents matériaux de construction	125
Tableau 3.9 : Impacts environnementaux de la production d'adobe	125

CHAPITRE 4 :

REGARD SUR L'HABITAT KSOURIEN DE ZGAG EL-HADJADJ

Tableau 4.1 : Données climatiques de la ville de Laghouat entre 2008-2018.....	146
Tableau 4.2 : Classes d'aridité de DE MARTONNE.....	147
Tableau 4.3 : Temps correspondant aux stratégies architecturales recommandés.....	150
Tableau 4.4 : Résultats des tableaux de MAHONEY pour la ville de Laghouat.....	155
Tableau 4.5 : Limites des zones de contrôle de la ville de Laghouat	156
Tableau 4.6 : Caractéristiques des Ksour de la région de Laghouat	160
Tableau 4.7 : Principales pathologies des maisons	176

CHAPITRE 5 :

EFFICACITE ENERGETIQUE DE L'HABITAT VERNACULAIRE DE KSAR ZGAG EL-HADJADJ

Tableau 5.1 : Caractéristiques thermo-physiques des matériaux de construction de la maison objet d'étude	188
Tableau 5.2 : Isolation vestimentaire et métabolisme des personnes interrogées.....	195
Tableau 5.3 : Appréciation globale des ambiances thermiques	198
Tableau 5.4 : Conditions d'un environnement thermique acceptable	198
Tableau 5.5 : Comparaison entre exigences d'ASHRAE 55 et les caractéristiques des instruments de mesure	199
Tableau 5.6 : Limite d'asymétrie de la température radiante recommandé par ASHRAE 55	208
Tableau 5.7 : Asymétrie de températures radiantes des murs de séjour (période hivernale)	208
Tableau 5.8 : Synthèse des résultats de température surfacique des parois du séjour (période hivernale)	209
Tableau 5.9 : Asymétrie de la température radiante des murs de l'espace extérieur (période hivernale)	212
Tableau 5.10 : Synthèse des résultats de température surfacique des parois de la cour (période hivernale)	213
Tableau 5.11 : Fraction radiante en fonction de la vitesse de l'air	216
Tableau 5.12 : Limites de variation de température opérative en fonction du temps.....	217

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 5.13 : Asymétrie des températures radiantes des murs de séjour (période estivale)	225
Tableau 5.14 : Synthèse des résultats de la température surfacique des parois du séjour (période estivale).....	226
Tableau 5.15 : Asymétrie de la température radiante des murs de l'espace extérieur (période estivale).....	229
Tableau 5.16 : Eléments constructifs et matériaux de construction de la maison modélisée	240
Tableau 5.17 : Caractéristique thermo-physique des matériaux des ouvertures.	240
Tableau 5.18 : Comparaison des résultats de simulation et de mesures	250

CHAPITRE 6 :

L'ADOBE : DE L'ECHELLE IN-SITU A L'ECHELLE DU LABORATOIRE

Tableau 6.1 : Masse volumique absolue des échantillons de terre crue	260
Tableau 6.2 : Distribution de la taille des grains de terre A et B.....	263
Tableau 6.3 : Pourcentages des différentes familles de grain dans les échantillons de terre	264
Tableau 6.4 : Limites d'Atterberg des échantillons de terre.....	265
Tableau 6.5 : Valeurs au bleu de Méthylène des terres analysées.	265
Tableau 6.6 : Composition chimique des échantillons de terre (par Fluorescence X). ..	266
Tableau 6.7 : Composition chimique des échantillons de terre (par titration)	267
Tableau 6.8 : Masse volumique absolue de l'argile verte.....	269
Tableau 6.9 : Distribution de la taille des grains d'argile	270
Tableau 6.10 : Limites d'Atterberg d'argile.....	270
Tableau 6.11 : Potentiel de gonflement en fonction de l'indice de plasticité.....	271
Tableau 6.12 : Classification du sol en fonction de VBS.	271
Tableau 6.13 : Composition chimique de l'argile verte (par titration).....	272
Tableau 6.14 : Composition chimique de l'argile verte (par fluorescence X)	271
Tableau 6.15 : Distribution de la taille des grains de la poudre de verre.	273
Tableau 6.16 : Caractéristiques physiques de la poudre de verre.....	274
Tableau 6.17 : Composition chimique de la poudre de verre (par fluorescence X)	274
Tableau 6.18 : Composition chimique de la poudre de verre (par titration)	274
Tableau 6.19 : Composition chimique de l'eau	275
Tableau 6.20 : Compositions des mélanges étudiés.....	276
Tableau 6.21 : Codification des mélanges étudiés.....	277
Tableau 6.22 : Composition des échantillons à évaluer	292
Tableau 6.23 : Résultats d'analyse d'impact environnemental.....	293

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ILLUSTRATIONS ET DES GRAPHIQUES

INTRODUCTION GENERALE

Figure I.1 : Références de base de la partie théorique. 13

CHAPITRE 1 :

COMPRENDRE L'ARCHITECTURE VERNACULAIRE

Figure 1.1 : Edifice de la Banque de Montréal sur la rue Saint-Jacques. 15

Figure 1.2 : Exemples d'architecture vernaculaire.. 16

Figure 1.3 : Eglise construite en 1789 a Parinacota, Chili..... 17

Figure 1.4 : Plan et coupe de la maison noire d'Arnol, ile de Lewis, Scotland..... 23

Figure 1.5 : Village vernaculaire russe..... 24

Figure 1.6 : Igloo ; habitation traditionnelle d'Esquimau..... 24

Figure 1.7 : Maison Yaranga de la Séberie 25

Figure 1.8 : Saklya ; la maison Caucasienne..... 25

Figure 1.9 : Habitations construites en climat Méditerranéen. 27

Figure 1.10 : Tente d'été des esquimaux..... 29

Figure 1.11 : Trullo voué à la vinification 30

Figure 1.12 : Exemple d'habitat vernaculaire en France..... 31

Figure 1.13 : Coupe schématique de maison rurale thaïlandaise. 32

Figure 1.14 : Clan des iroquois..... 34

Figure 1.15 : Hogan ; habitation traditionnelle des indiens Navajos..... 35

Figure 1.16 : Tangkonan ; Maison de Torajs 36

Figure 1.17 : Maison colossale Tulou ; Plan, façade et coupe. 37

Figure 1.18 : Maison troglodyte de Matmata 38

Figure 1.19 : Maisons vernaculaires anglaises de Castle Combe..... 39

Figure 1.20 : Maison ruche de Harran. 40

Figure 1.21 : Maison de Batammariba le 'Tata Somba' 40

Figure 1.22 : Maison afghane..... 41

Figure 1.23 : Habitations vernaculaires des toffinoux 42

Figure 1.24 : Cité souterraine de Derinkuyu. 42

Figure 1.25 : Habitat troglodyte de Mesa Verde 43

CHAPITRE 2 :

L'ASPECT BIOCLIMATIQUE DE L'HABITAT VERNACULAIRE

LISTE DES ILLUSTRATIONS ET DES GRAPHIQUES

Figure 2.1 : Classification climatique de Köppen-Geiger	47
Figure 2.2 : Interaction thermique entre le corps humain et son environnement.....	48
Figure 2.3 : Echanges thermiques dans le bâtiment.....	52
Figure 2.4 : Echelle d'appréciation des conditions thermique d'ASHRAE.....	53
Figure 2.5 : Modèle adaptatif proposé par le projet RP-884, pour les bâtiments à ventilation mécanique centrale.....	56
Figure 2.6 : Modèle adaptatif proposé par le projet RP-884, pour les bâtiments à ventilation naturelle.....	56
Figure 2.7 : Diagramme psychrométrique d'ASHRAE Standard 55	58
Figure 2.8 : Diagramme adaptatif d'ASHRAE Standard 55.....	58
Figure 2.9 : Combinaison des données climatologiques fondamentales.....	59
Figure 2.10 : Plan de masse des villages d'habitat vernaculaire.....	60
Figure 2.11 : Exemple de maisons vernaculaires de climat aride.....	61
Figure 2.12 : Ventilation naturelle et éclairage par patio.....	62
Figure 2.13 : Schéma démonstratif du fonctionnement de moucharabieh	63
Figure 2.14 : Coupes schématiques des tours à vent.....	63
Figure 2.15 : Aspect bioclimatique de toiture en dôme	64
Figure 2.16 : Plancher traditionnel en troncs et branches de palmier	64
Figure 2.17 : Choix de couleur aux maisons vernaculaires.....	65
Figure 2.18 : Village de Santorin	66
Figure 2.19 : Système constructif des maisons Cyclades Grecques.....	66
Figure 2.20 : La maison troglodyte de Santorin.....	67
Figure 2.21 : Stratégies de ventilation et d'éclairage dans la maison troglodyte de Santorin	67
Figure 2.22 : Bâti vernaculaire du climat tempéré chaud.....	68
Figure 2.23 : Habitat traditionnel de Malay.....	69
Figure 2.24 : Ventilation naturelle dans la maison Malay.....	69
Figure 2.25 : Réponses climatiques de maison traditionnelle Malay.....	70
Figure 2.26 : Plan et élévation d'une hutte d'Angmagssalik.....	71
Figure 2.27 : Coupe de la maison vernaculaire d'Angmagssalik.....	71
Figure 2.28 : Modèles d'habitat vernaculaire du climat polaire	72
Figure 2.29 : Habitat vernaculaire de climat boréal.....	73
Figure 2.30 : Digramme bioclimatique d'OLGAY	76
Figure 2.31 : Diagramme bioclimatique de GIVONI.....	77
Figure 2.32 : Diagramme bioclimatique de GIVONI et MILNE	78

LISTE DES ILLUSTRATIONS ET DES GRAPHIQUES

Figure 2.33 : Analyse des données climatiques de la région de Buffalo, New-York par Climate consultante.....	78
Figure 2.34 : Diagramme psychrométrique de SZOKOLAY.....	79

CHAPITRE 3 :

L'ADOBE, UN MATERIAU DE CHOIX POUR UNE ARCHITECTURE DE QUALITE

Figure 3.1 : Architecture de terre dans le monde.....	89
Figure 3.2 : Granularité de la terre.....	90
Figure 3.3 : Techniques de construction en terre à l'état plastique..	93
Figure 3.4 : Techniques de construction en terre à l'état humide.....	94
Figure 3.5 : Fondations de maisons retrouvées à Tell es-Sultan, Jéricho.....	97
Figure 3.6 : Village Çatal Höyük, en Anatolie, Turquie.....	97
Figure 3.7 : Mise en œuvre d'adobe dans l'ancienne Egypte.....	98
Figure 3.8 : Pueblos de Taos	98
Figure 3.9 : Plan de masse de village Shibām.....	99
Figure 3.10 : Vue aérienne sur l'ancienne ville de Ghadamès.....	99
Figure 3.11 : Détail architectural et constructif des maisons Ghadamsies.....	100
Figure 3.12 : Habitat vernaculaire en adobe.....	101
Figure 3.13 : Village Dogon à Mali.....	101
Figure 3.14 : Grands parcours commerciaux transsahariens, entre VIII ^e et XVI ^e siècle	102
Figure 3.15 : Vues aériennes sur deux anciens ksour construits en adobe.....	103
Figure 3.16 : Diversité de morphologies urbaines Ksouriennes.....	104
Figure 3.17 : Ruelles des Ksour	105
Figure 3.18 : Plan d'une maison Ksourienne à Taghit	106
Figure 3.19 : Quatre cycles de mécanisme du patio.....	106
Figure 3.20 : Enveloppe du bâti ksourien..	107
Figure 3.21 : Nomadisme quotidien estival.....	107
Figure 3.22 : Maison traditionnelle à Mchounech, Biskra.....	108
Figure 3.23 : Le déphasage thermique et l'amortissement	113
Figure 3.24 : Transfert de chaleur en climat chaud.....	116
Figure 3.25 : Mécanismes de fixation d'eau dans les pores.....	118
Figure 3.26 : Isotherme d'adsorption	119
Figure 3.27 : Courbe montrant la porosité et l'adsorption d'un échantillon d'adobe en comparaison avec la brique cuite et l'argile utilisé pour leur fabrication.....	120
Figure 3.28 : Isotherme de sorption du matériau adobe	121

LISTE DES ILLUSTRATIONS ET DES GRAPHIQUES

Figure 3.29 : Phases de séchage du matériau hygroscopique	123
Figure 3.30 : Maison communautaire Cam Thanh, Veitnam	130

CHAPITRE 4 :

REGARD SUR L'HABITAT KSOURIEN DE ZGAG EL-HADJADJ

Figure 4.1 : Situation géographique de la wilaya de Laghouat.....	142
Figure 4.2 : Evolution urbaine de la ville de Laghouat.	143
Figure 4.3 : PDAU de la commune de Laghouat	145
Figure 4.4 : Projection de la wilaya de Laghouat sur la classification climatique de Köppen-Geiger.	145
Figure 4.5 : la précipitation annuelle de la ville de Laghouat entre 2008-2018.....	146
Figure 4.6 : Projection de la ville de Laghouat sur le Climagramme d'EMBERGER.....	148
Figure 4.7 : Rose du vent de la ville de Laghouat, modélisée par l'outil WRPLOT view 8.0.2.	148
Figure 4.8 : Diagramme psychrométrique d'ASHRAE 55 pour la ville de Laghouat, modélisé par Climate Consultant 6.0.	152
Figure 4.9 : Diagramme bioclimatique de GIVONI pour la ville de Laghouat (2008-2018).	153
Figure 4.10 : Diagramme psychrométrique de SZOKOLAY, pour la ville de Laghouat.	157
Figure 4.11 : Secteur sauvegardé de la ville de Laghouat.	160
Figure 4.12 : Explosion des caisses de cheddite en 1948	161
Figure 4.13 : Répartition de la population résidente dans le ksar, par quartier.....	161
Figure 4.14 : Limites naturelles de l'ancien Ksar de Laghouat - photo publiée en 1852.....	162
Figure 4.15 : Bâtiments construits pendant la période coloniale à l'ancien Ksar.....	163
Figure 4.16 : Plan de masse de Ksar Zgag-El-Hadjadj.	164
Figure 4.17 : Places du ksar.....	165
Figure 4.18 : Voies structurant du ksar.	165
Figure 4.19 : Distribution du rayonnement solaire au niveau du Ksar (Solstice d'été)...	166
Figure 4.20 : Ecoulement du vent dans le tissu compact de Ksar Zgag El-Hadjadj (modélisé par logiciel Autodesk Flow Design).....	166
Figure 4.21 : Typologie architecturale des maisons Ksourienne de Zgag El-Hadjadj....	167
Figure 4.22 : Plans des maisons vernaculaires de Ksar Zgag-El-Hadjadj.	168
Figure 4.23 : Patios de maisons Ksouriennes.....	168
Figure 4.24 : Maison vernaculaire type de Ksar Zgag-El-Hadjadj..	169
Figure 4.25 : Fête de mariage organisée dans le patio d'une maison Ksourienne rénovée.	170

LISTE DES ILLUSTRATIONS ET DES GRAPHIQUES

Figure 4.26 : Aspect climatique du patio.....	171
Figure 4.27 : Ouvertures aménagées dans les murs donnant sur le patio.	171
Figure 4.28 : Patio aménagé d'une maison vernaculaire de Zgag El-Hadjadj.	172
Figure 4.29 : Phases primaires de la construction d'habitat de Zgag El-Hadjadj.	173
Figure 4.30 : Détails de mur d'adobe.....	173
Figure 4.31 : Portes de petits locaux de commerces.	174
Figure 4.32 : Détails du plancher traditionnel.....	175
Figure 4.33 : Revêtement du sol de l'habitat Ksourien.....	175
Figure 4.34 : Réhabilitation guidée par les spécialistes du patrimoine.	177
Figure 4.35 : Réhabilitations guidées par les habitants.....	178

CHAPITRE 5 :

EFFICACITE ENERGETIQUE DE L'HABITAT VERNACULAIRE DE KSAR ZGAG EL-HADJADJ

Figure 5.1 : Maison objet d'étude..	182
Figure 5.2 : Plans de la maison objet d'étude.....	183
Figure 5.3 : Accès à la maison vernaculaire étudiée.....	184
Figure 5.4 : Détails de la cage d'escalier..	184
Figure 5.5 : Chambre à coucher.	185
Figure 5.6 : Four à bois en brique.....	185
Figure 5.7 : Coupe schématique de la maison d'étude.	186
Figure 5.8 : Planchers de la maison d'étude.....	187
Figure 5.9 : Revêtement du sol.....	187
Figure 5.10 : Portes de la maison.....	187
Figure 5.11 : Position de la pièce de vie par rapport aux autres espaces de la maison.	189
Figure 5.12 : Détails de séjour objet d'étude.....	189
Figure 5.13 : Vues de l'extérieur et de l'intérieur sur la fenêtre du séjour.....	190
Figure 5.14 : Pièce de vie (séjour).....	190
Figure 5.15 : Détail de la cour étudiée.....	191
Figure 5.16 : Instruments de mesures..	199
Figure 5.17 : Position des thermo-hygrographes.....	200
Figure 5.18 : Variations de température de l'air intérieur et extérieur des deux espaces témoins en période hivernale.	202
Figure 5.19 : Variations de la température radiante des parois verticales du séjour, en comparaison avec la température de l'air extérieur (période hivernale).....	205

LISTE DES ILLUSTRATIONS ET DES GRAPHIQUES

Figure 5.20 : Variations de la température radiante des parois horizontales du séjour, en comparaison avec la température de l'air extérieur (période hivernale).	206
Figure 5.21 : Variations de température moyenne radiante du séjour, en comparaison avec la température ambiante de même espace, et la température de l'air extérieur (période hivernale).	210
Figure 5.22 : Variations de température radiante des parois de la cour, en comparaison avec la température de l'air extérieur (période hivernale).	210
Figure 5.23 : Variations de la température moyenne radiante de la cour, en comparaison avec les températures ambiantes intérieures et extérieures (période hivernale).....	213
Figure 5.24 : Variations de l'humidité relative de l'air des deux espaces témoins en période hivernale, en comparaison avec l'hygrométrie extérieure.	214
Figure 5.25 : Variations de la température opérative hivernale de deux espaces évalués, en comparaison avec la température de l'air extérieur.	215
Figure 5.26 : Variations de la température de l'air intérieur et extérieur des deux espaces témoins en période estivale.....	219
Figure 5.27 : Variations de la température radiante des parois verticales du séjour, en comparaison avec la température de l'air extérieur (période estivale).	222
Figure 5.28 : Variations de température radiante des parois horizontales du séjour, en comparaison avec la température de l'air extérieur (période estivale).	223
Figure 5.29 : Variations de la température moyenne radiante du séjour, en comparaison avec la température ambiante du même espace, et la température de l'air extérieur (période estivale).....	226
Figure 5.30 : Variations de la température radiante des parois de la cour, en comparaison avec la température de l'air extérieur (période estivale).	227
Figure 5.31 : Variations de la température moyenne radiante de la cour, en comparaison avec la température ambiante du même espace, et la température de l'air extérieur (période estivale).....	229
Figure 5.32 : Variations de l'humidité relative de l'air des espaces témoins, en comparaison avec l'hygrométrie extérieure (période estivale).	230
Figure 5.33 : Variations de la température opérative estivale des espaces évalués, en comparaison avec la température de l'air extérieur.	232
Figure 5.34 : Comparaison des températures opératives obtenues aux espaces évaluées avec la plage de confort thermique définie selon ASHRAE 55.	233
Figure 5.35 : Introduction des éléments constructifs de modèle numérique.....	238
Figure 5.36 : Résultat de la modélisation géométrique de l'objet d'étude par EnergyPlus.	239
Figure 5.37 : Introduction des matériaux de construction sur EnergyPlus.....	241

LISTE DES ILLUSTRATIONS ET DES GRAPHIQUES

Figure 5.38 : Programmation de ventilation naturelle sur EnergyPlus.....	241
Figure 5.39 : Introduction du fichier météo de Laghouat.....	242
Figure 5.40 : Introduction des données climatiques de la période de simulation.....	242
Figure 5.41 : Variations de la température de l'air simulée, en hiver.....	245
Figure 5.42 : Comparaison de la température de l'air mesurée et celle simulée, en période hivernale.	246
Figure 5.43 : Variations de la température de l'air simulée, en été.	247
Figure 5.44 : Comparaison de la température de l'air mesurée et celle simulée, en période estivale.....	248
Figure 5.45 : Le modèle numérique de la maison.....	249

CHAPITRE 6 :

L'ADOBE : DE L'ECHELLE IN-SITU A L'ECHELLE DU LABORATOIRE

Figure 6.1 : Localisation du gisement de terre par rapport au Ksar.....	257
Figure 6.2 : Essai de cigare	258
Figure 6.3 : Lieu d'extraction des adobes à recycler.....	258
Figure 6.4 : Broyage et tamisage des adobes.	259
Figure 6.5 : Méthode du Voluménomètre le Chatelier.....	260
Figure 6.6 : Essai d'analyse granulométrique par tamisage.....	261
Figure 6.7 : Granulomètre laser Mastersizer 2000.....	261
Figure 6.8 : Analyse granulométrique par tamisage des échantillons de terre.	262
Figure 6.9 : Analyse granulométrique par laser de la terre A.	262
Figure 6.10 : Analyse granulométrique par laser de la terre B.	263
Figure 6.11 : Analyse granulométrique des deux échantillons de terre étudiés.....	263
Figure 6.12 : Essai des limites d'Atterberg.	264
Figure 6.13 : Classification des échantillons de terre sur l'abaque de Casagrande.....	265
Figure 6.14 : Méthodes traditionnelles d'analyse chimique.....	267
Figure 6.15 : Analyse minéralogique de la terre A.	267
Figure 6.16 : Analyse minéralogique de la terre B.	268
Figure 6.17 : Localisation du gisement naturel d'argile.	269
Figure 6.18 : Argile verte provenant du gisement de Boukhanfous.....	269
Figure 6.19 : Analyse granulométrique d'argile.....	270
Figure 6.20 : Essai des limites d'Atterberg d'argile.	270
Figure 6.21 : Classification de l'argile sur l'abaque de Casagrande.....	271
Figure 6.22 : Analyse minéralogique de l'argile.	272

LISTE DES ILLUSTRATIONS ET DES GRAPHIQUES

Figure 6.23 : Broyage du verre blanc à vitrage.	273
Figure 6.24 : Analyse granulométrique de la poudre verre.	273
Figure 6.25 : Mélange des compositions à sec.	277
Figure 6.26 : Malaxage traditionnel à petite échelle.	278
Figure 6.27 : Identification des adobes.	278
Figure 6.28 : Echantillons d'adobe après le séchage.	279
Figure 6.29 : Appareillage de la méthode de la Sande Plane Transitoire (TPS).	280
Figure 6.30 : Essai d'écrasement des éprouvettes d'adobe.	281
Figure 6.31 : Principe de l'essai d'absorption capillaire.	282
Figure 6.32 : Influence des différentes teneurs en poudre de verre sur la conductivité thermique de l'adobe.	283
Figure 6.33 : Influence des différentes teneurs en poudre de verre sur la chaleur spécifique de l'adobe.	284
Figure 6.34 : Influence des différentes teneurs en poudre de verre sur la diffusivité thermique de l'adobe.	285
Figure 6.35 : Influence des différentes teneurs en poudre de verre sur la résistance à la compression de l'adobe.	286
Figure 6.36 : Influence des différentes teneurs en poudre de verre sur le coefficient de l'absorption capillaire de l'adobe.	287
Figure 6.37 : Concepts de l'outil SimaPro.	290
Figure 6.38 : Etapes d'ACV de l'outil SimaPro.	291
Figure 6.39 : Introduction des données du matériau sur SimaPro.	292
Figure 6.40 : Résultats d'analyse d'impact environnemental (méthode IMPACT 2002+).	294

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

1. Questionnement préliminaire et problématique

L'architecture vernaculaire peut être, succinctement, définie comme étant une réponse simple à la quadrilogie, géographie, climat, matériaux locaux et culture sociale. Selon RUDOLFSKY [1], un bâtiment peut être à l'image de l'architecture vernaculaire pour les conditions morphogénèses qu'il en présente. Également, pour sa symbolisation de la culture et la tradition savante de son temps et de ses créateurs, il soit l'identité de sa société, dit OLIVER [2]. Quant pour FREY [3], le bâtiment vernaculaire est celui qui illustre des pratiques appuyées sur des critères humains sociaux, c'est un lieu de vie convoquant des références culturelles, rajoutant PARENT [4] et HUYGEN [5].

Cette production populaire est, selon GODFRAIN [6], le type d'architecture qui permet aux usagers d'agir librement sur leur bâtiment, contrairement au type standardisé. Cependant, ses formes sont dictées par un ensemble de processus de morphogénèse et influencées par un ensemble de facteurs, qui sont regroupés, d'après GUINDANI [7], en trois familles, homme, site et matériau ; et qui sont classés, selon RAPOPORT [8], en deux pôles de référence : homme et site ; dont les matériaux font partie du deuxième pôle (site).

En effet, nombreuses sont les alternatives écologiques qui s'inscrivent derrière ce savoir-faire et qui favorisent l'engagement des chercheurs dans cette architecture qui est devenue un domaine de recherche visant à surmonter les problèmes environnementaux par le recours à l'ancien. Ces problèmes sont causés, en fait, par la révolution et l'idéologie industrielle ; la première sert à répondre aux besoins de l'homme en privilégiant les systèmes actifs et la technologie, tandis que la deuxième traduit la simplicité constructive en pauvreté sociale et la modestie technologique en infériorité.

Par ailleurs, cette industrialisation a conduit à une surconsommation d'énergie, notamment de gaz et d'électricité, et par conséquent, à la dégradation de l'environnement et l'épuisement des ressources naturelles. À l'échelle mondiale, le secteur des bâtiments, notamment celui résidentiel, est responsable de 36% de

INTRODUCTION GENERALE

cette consommation, ainsi de 40% des émissions de CO₂ (842 millions tonnes par an), près de deux tiers des hydrocarbures, et de 25 à 33% des émissions de carbone noir [9]. En Algérie, ce secteur est responsable de 38% de la consommation énergétique globale [10].

L'attention portée à ces recensements a donné un succès fulgurant à l'expression de développement durable qui a été intégré dans les pratiques architecturales afin d'équilibrer le rapport entre l'homme, l'espace et l'environnement. Cette intégration a remis en scène l'architecture vernaculaire et a donné naissance à une architecture tenant compte de l'environnement, une architecture dite durable.

Cette architecture englobe les aspects à la fois bioclimatiques et écologiques, elle vise à adapter l'habitat à son environnement, en tirant partie les caractéristiques de lieu (climat, topographie, etc.), afin d'assurer le confort thermique de l'utilisateur de la manière la plus naturelle possible, et d'éviter le recours au chauffage et à la climatisation active [11]. Ainsi, elle implique la prise en compte de l'empreinte carbone, la mise en œuvre des technologies propres et la réduction de la production des déchets (l'emploi des produits non polluants recyclables), afin de garantir une efficacité énergétique du bâtiment sur le long terme [12].

De ce fait, elle propose des solutions, des stratégies et de techniques architecturales passives permettant la création du microclimat à l'intérieur de l'habitat, et par conséquent, la réduction de sa consommation énergétique, et ses émissions de gaz à effet de serre. Ces solutions existent, depuis toujours, dans l'habitat vernaculaire, elles sont issues d'une longue expérience et d'un savoir-faire transmis et amélioré de génération en génération.

D'après ALEXENDRE [13], nombreuses sont les leçons inspirées de cet habitat, elles peuvent être classées en trois familles ; ville, bâtiment et construction. Ces leçons résultaient, essentiellement, de la diversité climatique dans l'espace et dans le temps ; le climat chaud nécessitait la mise en œuvre des solutions réduisant l'absorption de chaleur, amortissant les fluctuations de température et assurant une certaine humidification de l'air, tandis que des techniques, permettant l'optimisation des gains de chaleur et la réduction de ses pertes, sont sollicitées au climat froid.

INTRODUCTION GENERALE

Le choix d'un matériau de construction caractérisé par une forte inertie thermique est l'une des règles qui conduisent à la création du confort thermique, dans ces différents types de climats, ce dernier présente la base des échanges thermiques entre le bâtiment et son environnement. Au passé, le choix était porté sur la terre, la pierre ou le bois, néanmoins, la terre était le plus ancien et le principal matériau utilisé dans le monde entier ; selon L'UNESCO, 27% des architectures vernaculaires sont fondées sur l'emploi privilégié de ce dernier, également 15% des biens inscrits sur la liste du patrimoine mondial [14, 15].

En effet, ce matériau naturel offre une variété de techniques constructives, dont l'adobe est la plus ancienne de celles-ci, ses œuvres architecturales présentent aujourd'hui 50% des biens, bâtis en terre et inscrits sur la liste du patrimoine [14]. Ce matériau est plus présent, en particulier, dans l'habitat vernaculaire des zones arides, qui s'organisent pour s'insérer dans des villes-oasis, des cités sahariennes, et des établissements humains connus sous le nom de Ksar.

Ces ensembles d'habitations compactes diffusées dans les régions sahariennes, déterminent autant de formes et des typologies architecturales qui présentent des critères d'authenticité et d'intégrité, régissant leur inscription sur la liste du patrimoine mondial. Néanmoins, des milliers sont les Ksour dignes d'être conservés, mais non classés.

Ainsi, la plupart de ces derniers ont fait l'objet des lectures et des interprétations, mettant en valeur leurs particularités, aussi bien techniques et environnementales que culturelles, dont le matériau adobe fait partie ; en plus d'assurer le confort hygrothermique et des économies d'énergie drastiques dans l'habitat vernaculaire ksourien, ce matériau présente un faible impact environnemental [16].

En abordant la potentialité environnementale de ces ensembles d'habitation vernaculaire, à travers l'analyse de leurs processus de construction, leurs pratiques de l'espace et leurs éléments formels, il s'est avéré qu'ils se trouvent dans un état d'altération avancée, qui semble induite par plusieurs facteurs. Il s'agit des changements climatiques, du manque d'entretien, et de l'abondance qui les ont mis gravement en péril. Toutefois, c'est au niveau du matériau de construction que la dégradation est véritablement spectaculaire :

- **Cela signifie-t-il que ces architectures vernaculaires ont perdu leur aspect économique et environnemental ?**
- **Quel est l'impact de la brique d'adobe sur les performances thermiques et l'efficacité énergétique de ce patrimoine ksourien ?**

En effet, selon GUILLAUD et HOUBEN [17], ce matériau à base de terre présente des faiblesses aux sollicitations mécaniques et hydriques, nécessitant sa stabilisation, par l'intermédiaire de certains ajouts. C'est à la base de ce constat que le laboratoire CRAterre, l'un des plus influant dans le domaine de construction en terre depuis plus de 40 ans, a piloté des projets permettant une nouvelle vitalité des matériaux terre et la valorisation du choix d'un tel matériau dans les constructions modernes, à travers l'amélioration de leurs propriétés finales [18].

Ce processus traditionnel [19] n'est obligatoire que lorsque le matériau est exposé à l'eau, ou a besoin d'être amélioré mécaniquement. Il peut être fait chimiquement, physiquement ou mécaniquement [17]. En effet, nombreuses sont les études cherchant à améliorer la résistance mécanique et la durabilité de l'adobe, elles sont, essentiellement basées, sur la stabilisation chimique, dont une palette de stabilisants chimiques a été déterminée, ces additifs sont classés selon leurs origines : naturels, minéraux et synthétiques [17].

Or, la stabilisation du matériau terre aux minéraux est, actuellement, le procédé le plus répandu dans la littérature [20], et ce pour le principal objectif de réhabiliter le bâti ancien et d'encourager les acteurs de construction à l'utilisation de cet éco-matériau. Le choix de substitution s'est généralement porté sur le ciment, la chaux, et le plâtre ; l'usage de ces ajouts minéraux a permis l'augmentation de la résistance à la compression des adobes et la réduction de leur absorption capillaire de l'eau, mais, parfois, la réduction de ses performances thermiques [21, 22, 23] ; celle-ci dépend, essentiellement, des teneurs considérées. Le questionnement est, alors, de nature semblable :

- **Quel est l'effet de la poudre de verre sur la résistance en compression, l'absorption capillaire et la conductivité thermique de la brique d'adobe ?**

Toutefois, l'utilisation de stabilisant de nature minérale peut remettre en question le caractère écologique du matériau [17]. Or, une étude d'impact

environnemental s'avère indispensable, c'est-à-dire qu'il faut prendre en considération ses impacts négatifs sur le climat, l'écosystème, la santé humaine, etc. De ce point de vue :

- **Quel est l'impact de la production de l'adobe stabilisé par ajout de la poudre de verre issue de recyclage du verre post-consommation sur l'environnement ?**

2. Objectifs et hypothèses d'étude

C'est, justement, pour répondre à ces questions de recherche que le présent travail a été entrepris. Il s'interroge sur un aspect important de l'architecture vernaculaire ; le confort thermique et l'effet de la poudre de verre sur les propriétés thermiques, hydriques et mécaniques de l'adobe, ainsi que son impact environnemental.

L'objectif principal de cette recherche est de mettre en relief l'incidence de la brique d'adobe sur le confort thermique, comme critère d'évaluation de l'habitat vernaculaire faisant partie du patrimoine bâti. Pour ce faire, il s'agit, d'abord, de mettre en exergue les potentialités environnementales tirées de l'usage de ce matériau dans le patrimoine Ksourien, une telle entreprise nécessite la compréhension de la qualité hygrothermique de ce dernier, mais également l'identification des modalités de son usage.

D'un autre côté, ce travail cherche à contribuer à la revalorisation de la plus ancienne des techniques de construction en terre, afin de motiver les professionnels à construire en terre crue dans le but de réduire la consommation énergétique et les émissions CO₂ du secteur résidentiel, tout en assurant une qualité satisfaisante des ambiances intérieures. Pour que cela se fasse, on doit optimiser les caractéristiques du matériau pour se rapprocher davantage des exigences techniques actuelles (résistance mécanique et durabilité). En effet, cette contribution à la revalorisation de matériau local nécessite, également, l'étude de l'effet de la substitution choisie sur son comportement thermique et son impact environnemental, afin d'assurer que cette solution s'inscrit dans une gestion environnementale de l'habitat sur le long terme.

En outre, et comme une partie importante des architectures vernaculaires se trouvent, actuellement, dans un état de dégradation avancée, qui est,

principalement, guidé par le vieillissement du matériau et/ou par sa sensibilité à l'eau, cette optimisation pourrait être l'occasion de s'accorder sur la réhabilitation du patrimoine bâti en terre et de le faire vivre à nouveau, tout en assurant une bonne durabilité.

Alors, deux niveaux de lecture sont ciblés : l'efficacité énergétique du matériau de l'architecture vernaculaire, notamment la brique de terre crue, et son comportement mécanique et hydrique. Les hypothèses principales envisagées dans ce travail relèvent d'une conviction que :

- Le confort thermique de l'habitat vernaculaire Ksourien ne se limite pas au matériau de construction, il peut être assuré simplement par les stratégies et les techniques passives qui permettent de réduire les gains de chaleur en été et de les favoriser en hiver, tout en assurant une température ambiante satisfaisante, sans recours aux systèmes actifs.

- Le matériau de construction adobe est un facteur déterminant de la sensation du bien-être dans les maisons vernaculaires, sa dégradation peut influencer négativement leur comportement thermique, ce qui rend nécessaire, au préalable, une stabilisation chimique améliorant sa résistance aux sollicitations hydriques et conservant ses propriétés thermiques et son aspect environnemental.

- La stabilisation de l'adobe par la poudre de verre post-consommation permet de réduire sa porosité, et par conséquent, optimiser sa résistance mécanique et hydrique. Néanmoins, une teneur importante de cet additif de nature minérale peut entraîner une diminution de ses performances thermiques et sa qualité environnementale.

3. Cadre d'étude

Le terrain d'étude a, délibérément, été circonscrit sur Ksar Zgag El-Hadjadj, le secteur sauvegardé de Laghouat ; une ville sud algérienne caractérisée par un climat désertique froid et faisant partie d'une zone énergétique marquée par un secteur résidentiel très énergivore ; il pèse 35% de la consommation énergétique globale.

Cette aire d'étude date de l'an 1704, c'est un exemple d'architecture vernaculaire démontrant la mise en œuvre des stratégies bioclimatiques et des

techniques passives telles que : la compacité du tissu urbain et de la forme architecturale, l'orientation sur l'axe Nord-Sud, la réduction des dimensions des ouvertures, l'aménagement d'un espace extérieur permettant la ventilation naturelle (patio), et l'usage de matériau de construction à forte inertie thermique, comme l'adobe.

En effet, Ksar Zgag El-Hadjadj est pertinent pour le thème abordé dans ce travail, il présente un état d'altération très avancée, qui a conduit certaines de ses habitations à l'effondrement partiel, et parfois total. Cet état de lieux permet, en fait, d'agir sur l'effet de la dégradation de l'adobe sur le comportement thermique de ce patrimoine bâti, afin de penser à son éventuelle réhabilitation.

4. Méthodologie de recherche

Ce travail de thèse s'intéresse à l'efficacité énergétique de l'architecture vernaculaire en terre à Laghouat, il s'oriente vers l'approfondissement des connaissances sur le matériau adobe, ses qualités thermiques et environnementales, ainsi que sa stabilisation par les liants minéraux, notamment la poudre de verre issu du recyclage de verre blanc à vitrage post-consommation. Il se base sur une méthodologie descriptive adoptant une approche mixte qui allie une méthode à la fois qualitative et quantitative.

En effet, la première méthode est celle qualitative qui repose sur l'observation conçue en fonction du cadre théorique, elle permet la bonne compréhension des différentes notions théoriques relatives au thème de recherche et la formulation d'un état de l'art sur la trilogie ancestrale : architecture vernaculaire, bioclimatisme et confort thermique, et matériau de construction néolithique Adobe. Elle repose sur la lecture approfondie et le critique des références bibliographiques collectées ; ouvrages, thèses, articles scientifiques, et récits portant sur cette trilogie.

Cependant, la méthode quantitative implique un recueil de valeurs, elle repose sur un travail expérimental dédié à l'évaluation de comportement thermique d'une maison vernaculaire ksourienne, ensuite à l'identification des caractéristiques de l'adobe, le principal composant de son enveloppe, puis à sa stabilisation par la poudre de verre, et enfin à l'évaluation de l'effet de cette substitution sur sa résistance en compression, son absorption capillaire, sa conductivité thermique et son impact environnemental.

INTRODUCTION GENERALE

L'évaluation de comportement thermique de la maison vernaculaire est faite selon l'approche adaptative, recommandée par la norme internationale ASHRAE 55 [24], qui est basée sur la méthode qualitative subjective, et celle quantitative objective.

La méthode qualitative est basée sur une enquête réalisée auprès des occupants de la maison étudiée, afin de persuader leur appréciation globale du confort thermique. Elle est basée sur un questionnaire proposé par la norme elle-même [24], permettant d'établir le vote moyen prévisible (PMV) ; un indice prévenant l'appréciation moyenne du confort, et le pourcentage de personnes insatisfaites (PPD).

Par ailleurs, la méthode quantitative consiste à effectuer une campagne de mesure qui permet de déterminer les paramètres environnementaux du confort thermique à savoir ; la température ambiante, la température radiante et l'humidité relative. Les mesures de ces facteurs physiques sont effectuées pendant trois jours de janvier ; le mois le plus critique de la période hivernale, et de juillet ; le mois le plus critique de la période estivale.

En effet, les mesures de température et de l'humidité relative de l'air intérieur sont effectuées simultanément à l'aide de thermo-hygrographe ThiesClima 1.0665.00.005, tandis que les températures radiantes sont mesurées à l'aide d'un pyromètre infrarouge IRTEC P500. Ces instruments sont fournis par le laboratoire de Matériaux et Réhabilitation de Structures (SREML) de l'université AMMAR TELIDJI de Laghouat. Ensuite, les relevés horaires de température et d'humidité relative de l'air extérieur ont été obtenus, pour la période d'étude, de la station météorologique de la ville de Laghouat. Ces mesures permettent de calculer la température opérative (selon la norme ASHRAE 55), sur la base de laquelle, la situation de confort thermique de l'espace étudié peut être définie.

L'étape suivante consiste à estimer les besoins énergétiques en chauffage, de l'espace intérieur en question. Pour ce faire, une simulation thermique dynamique est effectuée à l'aide de l'outil le plus répandu au plan international ; EnergyPlus (version 2.2.1), ce dernier est librement disponible (open source).

Ensuite, la deuxième partie de ce travail expérimental consiste, en premier lieu, à identifier les matières premières utilisées pour la production de l'adobe, ainsi

l'additif. Pour que cela se fasse, une série de normes est considérée, permettant la caractérisation physique, géotechnique et chimique de produits, le choix de norme est essentiellement basé sur la nature de produit. Par ailleurs, la production des adobes est faite par la technique traditionnelle, une fois prêts, les adobes à différentes teneurs en poudre de verre, ainsi un échantillon extrait de ksar sont caractérisés, afin de déterminer leurs propriétés thermomécaniques et hydriques.

Enfin, la dernière étape de cette étude est celle de l'analyse d'impact environnemental, elle est effectuée par l'outil commercial SimaPro (version 9.1.0.7), dédié à l'analyse de cycle de vie (ACV) de produits. Ce dernier est développé par l'entreprise Pré Consultant, qui nous a offert une licence (FFL SaadD 001) pour le délai d'un an.

5. Structure de la thèse

Le travail de recherche rapporté dans ce manuscrit se présente en deux parties comportant chacune trois chapitres, soit en tout, six chapitres. La première partie est théorique dressant un état de l'art sur la trilogie ; architecture vernaculaire, confort thermique et matériau « adobe ». La deuxième partie est empirique, dont chaque chapitre présente un volet de l'étude effectuée selon trois échelles ; in situ, simulation et laboratoire.

La première partie est préliminaire, elle est consacrée au développement de la problématique, à la formulation des hypothèses et des objectifs et à la présentation de la méthodologie suivie dans cette recherche.

Le premier chapitre de ce document correspond à une recherche bibliographique sur l'architecture vernaculaire, et la théorie de la forme d'habitat vernaculaire, en considérant l'aspect climatique, socioculturel, économique, ainsi que celui défensif. Il comporte des études de cas de maisons vernaculaires à travers le monde, basées sur l'observation et l'analyse fonctionnelle.

Le deuxième chapitre aborde la question de confort thermique dans l'habitat vernaculaire, il définit les notions théoriques relatives à ce champ ; bioclimatisme, climat, bilan thermique de corps humain, etc. Il développe, en outre, les approches et les outils d'évaluation de confort thermique et ses réglementations. Également, il donne un aperçu sur les stratégies passives relatives à chaque zone climatique (chaud, équatoriale, polaire, etc.).

INTRODUCTION GENERALE

Le troisième chapitre s'intéresse aux techniques de construction en terre, en particulier la brique d'adobe, et à la compréhension de son comportement hygrothermique et les potentiels tirés de son usage dans l'habitat vernaculaire, sur le plan thermique, énergétique et environnemental. Il dresse, également, un état de connaissance sur l'effet des stabilisants chimiques, plus particulièrement, ceux minéraux, sur les propriétés thermiques et mécaniques de l'adobe, ainsi que sur son comportement hydrique.

Le chapitre suivant définit le cadre urbain et architectural qui permet de contextualiser l'étude. La ville de Laghouat est, d'abord, présentée d'un point de vue géographique, historique, et climatique. Son patrimoine architectural Ksourien est, ensuite, soumis à l'analyse, afin de dégager ses particularités climatiques sur l'échelle urbaine et architecturale, ainsi son état des lieux.

Le cinquième chapitre est centré sur l'analyse de l'habitat vernaculaire de Ksar Laghouat, qui est saisi à travers sa particularité formelle. Il décrit, en outre, les procédures de l'enquête et de l'analyse élaborées, pour évaluer son comportement thermique. Les résultats obtenus à l'issue de l'approche analytique du confort thermique sont discutés, afin de déterminer la situation thermique des espaces étudiés. La simulation thermique dynamique de la maison vernaculaire fait l'objet de la seconde partie de ce chapitre, cette dernière aborde la validation de modèle numérique, et l'estimation des besoins énergétiques.

Le dernier chapitre présente les résultats de caractérisation des matériaux utilisés dans les différentes compositions étudiées. Il aborde, ensuite, le processus de fabrication de l'adobe et la démarche expérimentale et les techniques permettant la caractérisation de ce dernier. La seconde partie de ce chapitre est consacrée à la présentation et la discussion des résultats de caractérisation des échantillons produits, puis à l'analyse de leurs impacts environnementaux en phase de production.

Enfin, ce manuscrit se termine par une conclusion synthétisant les principaux résultats de ce travail de recherche et esquissant les perspectives et les nouveaux axes de recherche possibles pour la poursuite de l'étude.

PARTIE I

L'ARCHITECTURE VERNACULAIRE ;

UNE SOLUTION POUR UN FUTURE

DURABLE

Introduction

Au milieu de sombres perspectives d'épuisement des ressources naturelles et la dégradation alarmante de l'environnement, le développement durable (un concept considérablement popularisé depuis la parution du rapport Brundtland 1987) est devenu l'un des fondements constitutionnels des politiques publiques, il constitue un élément clé de tout programme destiné à la préservation de l'environnement et la gestion des ressources naturelles.

Face à ces défis environnementaux, plusieurs projets politiques, qui visent à orienter normativement les rapports entre la société et l'environnement, ont été mis en œuvre, portés par l'idée de la réduction du gaz à effet de serre (GES) et de la consommation énergétique. Ces projets introduisent un changement radical dans la manière d'habiter, de se déplacer, de produire et de consommer, ce qu'interroge le mode de développement économique, politique et social.

Au regard de cette vision globale, l'architecture se trouve devant un choix crucial, qui s'intéressera à la façon dont s'intègrent les impératifs de développement durable dans l'architecture. En effet, le secteur des bâtiments, notamment l'ensemble résidentiel et tertiaire, présente aujourd'hui l'un des grands dévoreurs des ressources naturelles et d'énergies, il est responsable de 36 % de la consommation mondiale en énergie, et de 40 % des émissions de gaz à effet de serre [25].

L'idée de concilier l'équité sociale, l'efficacité économique et la qualité environnementale dans le secteur résidentiel a favorisé, en fait, l'architecture vernaculaire, qui s'inscrit dans une démarche d'urbanisme et d'architecture durable fondée sur *“une économie de moyens compatibles avec un développement local équilibré en circuit court, et sur une mise en œuvre solidaire”* [26, p. 76]. Ce sont les caractéristiques de lieu (condition climatique, topographie, etc.), les ressources locales disponibles sur site et l'identité socioculturelle qui commandent les formes architecturales, les techniques et les matériaux de construction.

“L'habitat vernaculaire est l'expression des valeurs de la culture populaire que chaque pays a investies dans l'habitation et ses prolongements. Il a été lentement élaboré au cours des siècles, exécuté avec des techniques et des moyens locaux exprimant des fonctions précises, satisfaisant des besoins sociaux, culturels et

économiques. Par le caractère, 'originalité et invention', il façonne l'environnement et s'y intègre naturellement. Précisons que le terme « vernaculaire » est consacré à l'usage dans le sens de « propre au lieu », synonyme d'architecture dite sans architectes, spontanée, indigène, rurale, primitive, anonyme” [27, p. 165].

Cette architecture fait, ces dernières années, l'objet d'une grande vigilance, aux pays développés, de la part des acteurs de construction, notamment les architectes. Cependant, nombreux d'entre eux rejettent l'idée de construire d'une manière vernaculaire, parce qu'elle leur signifie l'application de formes primitives et l'utilisation des matériaux traditionnels locaux, ce qui donne une image pauvre aux bâtiments contemporains à l'époque de l'industrialisation et des avancées technologiques et scientifiques qui sont, désormais, sur la plus juste réponse à apporter aux dégradations environnementales.

Néanmoins, l'habitat vernaculaire devient une source d'inspiration très prisée actuellement pour la construction des maisons confortables, performantes et à faible impact environnemental. Cette trilogie résulte certainement de la mise en œuvre des principes bioclimatiques adaptant l'habitat au contexte dans lequel il s'insère, et l'emploi des matériaux de construction locaux de caractère économique et écologique de premier plan.

La terre crue est l'un de ces matériaux, elle a été utilisée dans la construction depuis plus de onze millénaires, et reste omniprésente jusqu'à aujourd'hui, elle abrite environ la moitié de la population mondiale actuelle, selon l'Organisation des Nations Unies. Ce matériau a, en fait, doté ses architectures d'un confort hygrothermique sans aucun recours au système actif de chauffage ou de climatisation, grâce à ses caractéristiques thermiques et hydriques intéressantes.

L'emploi de cette matière première, à caractère recyclable et non polluant, permet une variété de techniques constructives ; l'adobe est la plus ancienne de ces techniques, ses œuvres présentent aujourd'hui 50% des biens bâtis en terre inscrits sur la liste du patrimoine mondial. Ce matériau a de nombreux avantages environnementaux qui peuvent le placer dans la position d'un matériau de choix pour répondre aux enjeux de durabilité et de transition écologique.

Cette partie de travail dresse un état de l'art sur l'aspect de confort thermique dans l'habitat vernaculaire, notamment celui construit en adobe. Elle passe

premièrement en revue l'architecture vernaculaire, afin de comprendre l'origine de ses formes par l'interprétation de différents modèles de maisons vernaculaires à travers le monde. Puis, elle met l'accent sur le bioclimatisme et le confort thermique (deux notions associées au concept de bâti vernaculaire), tout en faisant ressortir les stratégies passives relatives à ce type de confort, par l'analyse de quelques exemples d'habitat vernaculaire, faisant partie de différentes zones climatiques. Ainsi, elle porte une attention toute particulière aux approches de confort thermique, ses normes et les outils permettant son évaluation. Enfin, elle aborde le matériau de construction adobe, afin d'assimiler les potentiels tirés de son utilisation au passé, et de déterminer les améliorations proposées pour encourager les acteurs de construction à le réutiliser dans l'habitat moderne au future.

En outre, la constitution de cet état de l'art est basée sur la lecture approfondie et le critique de références bibliographiques collectées, qui portent essentiellement sur la trilogie étudiée ; architecture vernaculaire, confort thermique, et le matériau de construction « adobe ». Le schéma ci-dessous présente les références de base de chaque chapitre constituant cette partie.

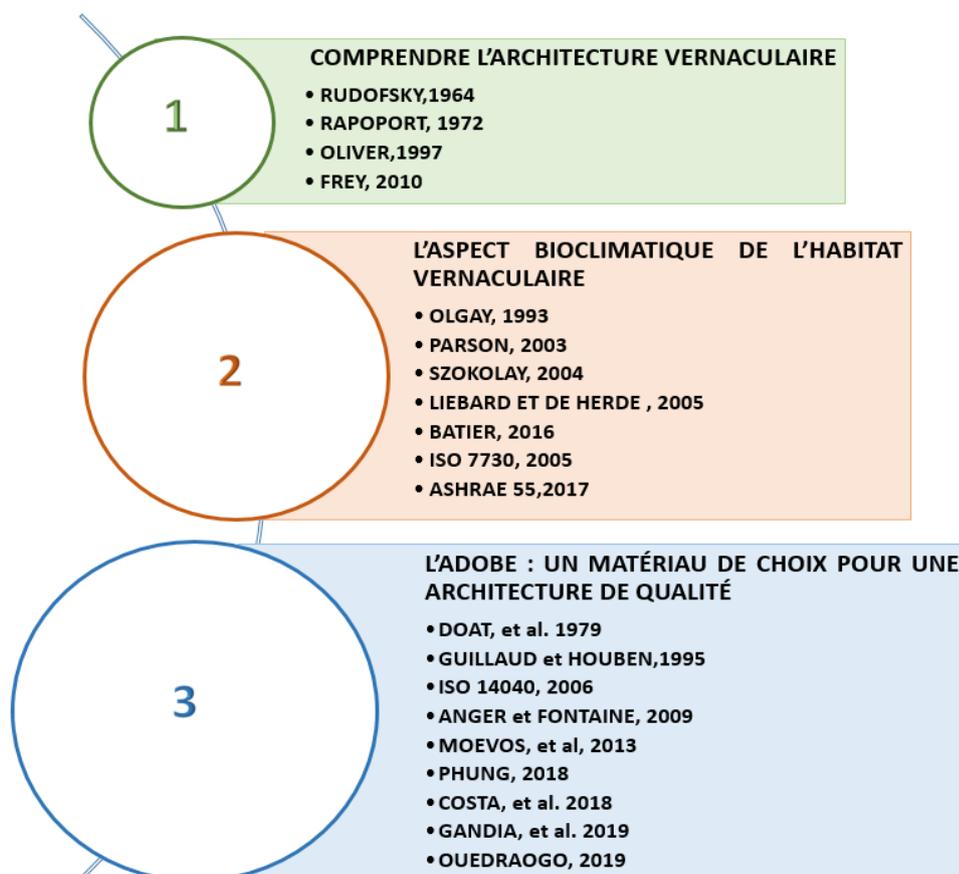


Figure I.1 : Références de base de la partie théorique.

CHAPITRE 1
COMPRENDRE L'ARCHITECTURE
VERNACULAIRE

CHAPITRE 1 :

COMPRENDRE L'ARCHITECTURE VERNACULAIRE

Ce chapitre passe en revue les théories ayant cours dans l'étude de l'architecture vernaculaire. Il couvre le terme 'Architecture vernaculaire' tout en apercevant ses différentes définitions, son évolution et son regain d'intérêt dans l'optique de la résolution des problèmes environnementaux actuels par le retour à l'ancien.

Il correspond également à un aperçu général de différentes formes de maisons vernaculaires à travers le monde ainsi qu'à leur diversité géographique, climatique et socioculturelle, tout en mettant l'accent sur l'identification des fonctions remplies par la forme architecturale qui peuvent répondre tant à des besoins locaux.

1. L'architecture vernaculaire : recherche d'une définition

L'architecture vernaculaire est une expression datant de la fin du XX^e siècle, où plusieurs auteurs se sont interrogés sur la définition de cette architecture, qui est décrite comme une architecture anonyme ou sans architecte, architecture non conventionnelle et non classée [1], architecture de peuple [28], architecture des gens [29], architecture pour les pauvres [30]. Ce type d'architecture n'est justement pas définie par ses qualités propres, ses définitions sont bien différentes de celles que l'on peut trouver, par exemple, pour l'architecture néoclassique, dont la définition est faite par description, en énonçant ses attributs et ses caractéristiques en détail.

“Le néoclassicisme s'est défini à partir de quatre éléments ; l'archéologie, les sources imprimées, le romantisme et la pureté des structures. Les édifices grecs et romains anciens furent étudiés avec la rigueur archéologique. Des recueils de gravures les décrivent comme des ruines romantiques ; et la simplicité des structures grecques suggéra des projets dont l'ornementation fut supprimée ou réduite. Les cinq ordres étaient les éléments fondamentaux de l'architecture classique” [31, p. 284].

En effet, l'architecture néoclassique se caractérise par l'ordonnance, la sobriété et la symétrie. Elle possède une régularité, tant dans ses plans quant à ses façades. Il est fréquent qu'elle présente une division tripartite : soubassement, corps

de façade, entablement, et prétend avoir recours aux formes et aux éléments gréco-romains : colonnade classique, fronton, portique, pierre de taille, etc. (Figure 1.1).



Figure 1.1 : Edifice de la Banque de Montréal sur la rue Saint-Jacques [32].

Pour autant, la définition, que proposent les chercheurs, ne contient pas de descriptif (les caractéristiques matérielles ne sont pas énumérées). L'architecture vernaculaire correspond à un type d'architecture qui possède une réponse simple à l'équation de la géographie, du climat, des matériaux locaux et de la culture sociale. La définition se détache, alors, de l'objet en caractérisant l'intention avec laquelle l'architecture vernaculaire est élaborée, plutôt que l'architecture elle-même. Elle n'est donc réductible à aucun style, aucun mouvement, aucune époque, ni aire géographique.

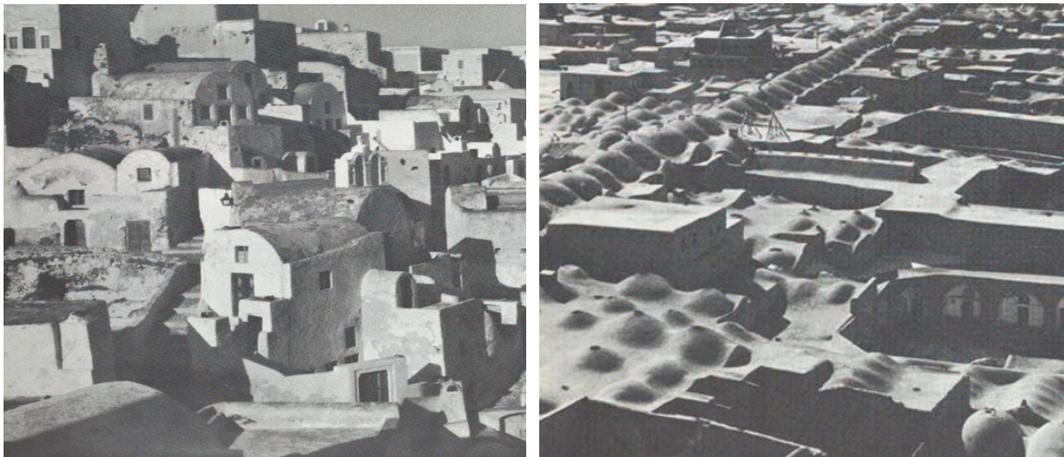
Inspiré de l'étude de MERCER [33]¹, la première tentative de définition de l'architecture vernaculaire a été dévoilée dans les années 1980, par le centre d'étude et de recherche sur l'architecture vernaculaire (CERAV), en contribuant à démontrer les mythes d'élaboration d'un bâtiment vernaculaire :

“Un bâtiment vernaculaire appartient à un ensemble de bâtiments surgis lors d'un même mouvement de construction ou de reconstruction affectant une ou plusieurs régions (voire des aires géographiques encore plus vastes) et s'inscrivant dans une période variant d'une région à une autre selon des décalages de quelques

¹ “Vernacular buildings are those which belong to a type that is common in a given area at a given time. It follows that a kind of building may at any one time be 'vernacular' in one area, and 'non-vernacular' in another, and in any one area may change in the course of time from 'non-vernacular' to 'vernacular'. In other words, no building is or is not 'vernacular' for its own qualities but is so by virtue of those, which it shares with many others, and the identification of 'vernacular' buildings is very much a matter of relative numbers” [33, p. 1].

décennies à un siècle et plus. Reflet de changements économiques, un type vernaculaire est caractéristique non seulement d'une époque donnée, mais aussi de la classe sociale qui l'a fait construire et l'a utilisé. Concernant de vastes aires géographiques, l'architecture vernaculaire est soumise à la diffusion de plans, de techniques de construction et de décors stylistiques transcendant le cadre de la «région», parfois même débordant des limites nationales.” [34, p. 114].

En écart d'une quinzaine d'années, dans son ouvrage 'Architecture without architect (1964)' consacré à l'architecture vernaculaire, l'architecte Bernard RUDOLFSKY présente 58 exemples d'architecture vernaculaire à travers le monde, illustrés en photographie (Figure 1.2). Ces exemples permettent de constater que chacune de ces architectures satisfait à la définition donnée, et d'admettre qu'à une même manière de s'élaborer, peuvent correspondre des aspects très différents. En effet, une architecture peut présenter n'importe quel aspect, n'importe quel style, n'importe quelle époque et n'importe quelle localisation, et être à l'image de l'architecture vernaculaire pour les conditions morphogénèse qu'elle en présente.



(a)

(b)

Figure 1.2 : Exemples d'architecture vernaculaire. (a) : Le village d'Apanomeria, Grèce, (b) : Le caravansérail de la ville de Qum, Téhéran [1].

Ce point est ainsi abordé par Paul OLIVER dans son ouvrage 'Encyclopedia of vernacular architecture of the world' paru en 1997, où l'architecture vernaculaire est définie comme étant tout bâtiment construit pour répondre aux besoins bien spécifiques d'une région donnée en tenant compte de son environnement, ses ressources, son mode de vie et ses traditions, et adapté à son époque en termes de technologie, norme, etc. (Figure 1.3). Cependant, cette définition suggère le processus de la 'tradition' ; ce processus implique que les communautés perpétuent

leurs traditions d'une génération à une autre à travers l'espace ; autrement dit, l'architecture vernaculaire est enracinée dans la tradition, son évolution implique, par ailleurs, des transformations sociologiques majeures [35]. Elle est issue d'une transmission culturelle et d'une expérience d'innombrables générations. Cela explicite que l'architecture vernaculaire est, avant tout, une expression des besoins de l'homme pour une identité culturelle, c'est "*l'ensemble des valeurs constituant la tradition qui tient lieu d'architecture*" [36, p. 39].

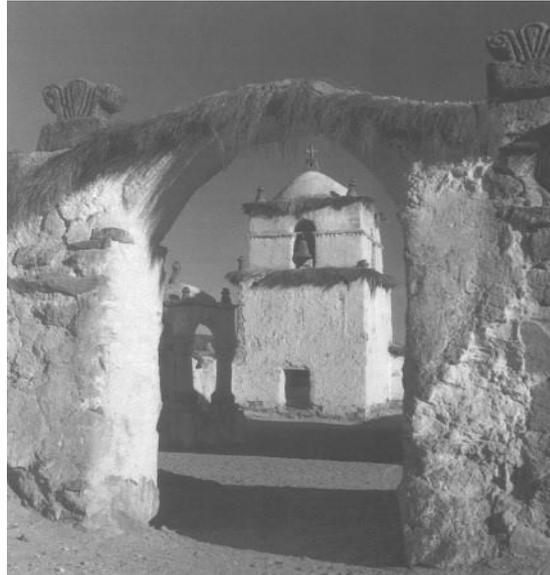


Figure 1.3 : Eglise construite en 1789 à Parínacota, Chili [2].

En effet, quand on commence à s'interroger sur la manière dont l'identité s'est exprimée, véhiculée et transmise par les générations antérieures, l'architecture vernaculaire se révèle un dispositif agissant qui symbolise la culture et la tradition savante de son temps et de ses créateurs, soit l'identité de sa société. Quant à l'historien de l'art Pierre FREY, il a apporté une vision sociale à l'architecture vernaculaire "*C'est l'autre force de l'architecture vernaculaire : elle induit des conséquences économiques et sociales, et se révèle donc très pragmatique*" [6], où il a rappelé sagement que cette architecture illustre des pratiques qui s'appuient sur des critères humains sociaux.

L'architecture indigène et domestique, dit PARENT [4], est l'architecture spontanée comme la décrit HUYGEN [5] ; il s'agit de la création d'un lieu de vie qui convoque des références culturelles, par l'utilisation des matériaux locaux qui s'adaptent au lieu et au climat. Cette classification est ainsi signalée par NASR [37] en traitant la courte définition proposée par RUDOLFSKY qu'il en propose en

introduction, en ajoutant l'adaptation aux traditions. Cette définition a fait l'objet de plusieurs lectures, dont l'architecture vernaculaire bénéficie d'une quantité de terminologies différentes; populaire, indigène, domestique, sauvage, primitive, spontanée, traditionnelle, fantastique, douce ou même de non-architecture [38], qui révèlent qu'elle est le résultat d'une combinaison de facteurs physiques (site, climat, matériaux) et immatériels (culture, mode de vie, savoir-faire, besoins sociaux, psychologie, etc.). L'architecture vernaculaire est donc le contraire de l'architecture standardisée, elle permet aux gens d'agir sur leur habitat, dit le sociologue GODFRAIN [6]. De cette combinaison résulte, en fait, un ensemble de critères, qui sont présentés dans la charte du patrimoine bâti vernaculaire [39].

Au-delà de ces définitions issues d'ouvrages parus de 1960 à nos jours, il serait difficile d'établir une description physique de l'architecture vernaculaire, mais il est possible de déterminer l'ensemble des processus de morphogénèse qui dictent la forme du bâtiment vernaculaire et les facteurs influents, qui sont dans le corps de la plupart des définitions. Ils sont composés, selon GUINDANI & DEOPPER [7] parlant de causes et non de facteurs, et se basant sur des études locales de l'architecture paysanne suisse, de trois pôles de référence : l'homme, le site, les matériaux, et classé par RAPOPORT [8] en deux parties : l'homme et le site (Tableau 1.1) où les matériaux faisant partie de deuxième pôle « site ». Selon RAPOPORT, l'habitat vernaculaire diffère selon des facteurs naturels : climat et géographie, ou sociaux : rite et organisation sociale. En employant ces facteurs, plusieurs architectures peuvent en résulter, ayant en commun la manière de s'élaborer, mais pas nécessairement les caractères physiques [1].

Tableau 1.1 : Facteurs influents de l'architecture vernaculaire [8].

Homme	Nature, aspiration, organisation sociale, mode de vie, besoins sociologiques et psychologiques, besoins individuels et sociales, ressources économiques, attitude à la nature, personnalité, mode, vision du monde, besoins physiques, techniques disponibles.
Site	Aspects physiques (ex. climat), site, matériaux, lois structurelles, aspects visuels (ex. paysage).

L'architecture vernaculaire est donc un type d'architecture qui nous impose l'obligation de répondre à cinq questions : quoi ?, pour qui ?, pourquoi ?, par qui ?,

où ?, et comment ?, pour s'identifier [7], dont les réponses sont résumées par OLIVER dans l'expression suivante :

“Vernacular architecture comprises the dwellings and all other building of the people. Related to their environmental contexts and available resources, they are customarily owner-or community-built, utilizing traditional technologies. All forms of vernacular architecture are built to meet specific needs, accommodating them values, economies and ways of living of the cultures that produce them” [2, p. 111].

2. L'architecture vernaculaire : brève histoire

« Architecture vernaculaire », derrière cette expression, qui semble être le résultat d'une expérience étendue et d'un savoir-faire transmis et amélioré de génération en génération, s'écrivent des pratiques alternatives qui ouvrent la voie à une pensée écologique, en évoquant plusieurs questions ; le remploi des matériaux locaux, la prise en compte du milieu ; géographie et climat, et le respect de l'identité culturelle, d'où vient l'idée de «construire d'une manière vernaculaire» pour répondre aux problématiques environnementales actuelles.

C'est dans cette optique de résolution des problèmes par 'le retour à l'ancien', qui est souvent considéré comme un *“fruit de longs processus d'essais, d'erreurs et de corrections dans des circonstances variées”* [40, p. 11], et qui apparaît comme un moyen efficace pour s'approcher de l'idée de perfection, que l'architecture vernaculaire est devenue un domaine de recherche important. Nombreux sont les architectes qui se sont engagés dans cette discipline, favorisant les expériences et les savoir-faire vernaculaires afin de surmonter le problème de l'épuisement des ressources naturelles et de changements climatiques. Parmi eux, on cite : RUDOFISKY [1], BRUNSKILL [41], RAPOPORT [8], GLASSIE [42], UPTON [43], et OLIVER [2], les urbanistes, les anthropologues ; LOW [44]; LAWRENCE-ZUNIGA [45], les archéologues ; KENT [46], KOWALSKI [47], MOORE [48, 49], SAMSON [50] et WILK [51, 52], et les historiens comme FREY [3]. En outre, cette architecture est considérée ainsi essentielle par ces chercheurs dans l'étude des formes de bâtiments, l'analyse fonctionnelle des espaces et de leur intimité, et plusieurs d'autres facteurs associés à l'environnement bâti.

Bien que le bâti vernaculaire soit un type de construction qui fait appel aux ressources et aux matériaux localement disponibles (pierre, terre, bois) pour

répondre aux besoins des occupants, qui sont à la fois les bâtisseurs, dans un contexte environnemental caractérisé par une géographie (désert, forêt, montagne, etc.), un climat (aride, continentale, tropicale, etc.), une culture et une tradition donnée, il existe plusieurs approches à appliquer. Ces approches permettent la compréhension du bâti traditionnel, d'un point de vue environnemental, socio-économique et socioculturel. Ces trois facteurs représentent donc la base solide sur laquelle l'humanité s'est appuyée pour construire des bâtiments à la fois sains, confortables, durables, économes en énergie, beaux et socialement acceptables. La compréhension de cette trilogie mène, en fait, au concept de développement durable (une notion qui est apparue, pour la première fois, dans le rapport de Brundtland, 1987 -Notre avenir à tous- publié par la Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement ; *“le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs.”* [53, p. 40]). Elle rappelle, en effet, ces trois piliers : équité sociale, préservation de l'environnement et efficacité économique.

En effet, les principes de l'architecture vernaculaire sont mis de côté pendant que la révolution industrielle avait progressivement touché tous les aspects du quotidien. La technologie s'avère répondre à tous les besoins de l'homme en privilégiant les systèmes actifs, puisque la qualité des bâtiments est de plus en plus basée sur leur résistance et leur durabilité et de moins en moins sur d'autres questions, telles que la consommation énergétique, le confort, l'écologie, etc. A cela s'ajoute l'idéologie industrielle qui traduit la simplicité constructive en pauvreté sociale et justifie la modestie technologique par le retard et l'infériorité.

Mais suite à la crise énergétique, à l'évolution dramatique du réchauffement climatique et à l'épuisement progressif des ressources naturelles, la notion de développement durable s'est imposée comme légitime à toutes les échelles, afin d'équilibrer le rapport entre l'homme, l'espace et la nature. Ce concept reconnaît aux hommes le droit au développement sans accentuer les déséquilibres qui menacent la nature ; d'ailleurs, l'environnement apparaît comme un patrimoine mondial essentiel qui doit être préservé puis transmis, de génération en génération.

Dans les sociétés primitives, l'homme n'avait pas accès à l'énergie fossile (électricité, gaz) et l'environnement était quelque chose de sacré pour lui dont il

inclue responsabilité ; quant à l'heure actuelle *“les hommes ont désormais les moyens techniques d'altérer puis de détruire de manière irréversible et définitive leur environnement”* [54, p. 23], l'environnement est considéré comme un luxe de la croissance. Dans les pays développés – le monde industrialisé- c'est parce que les industries consomment des quantités colossales d'énergie, et les populations consomment de plus en plus d'électricité et de gaz dans leur quotidien, que l'environnement se dégrade et les ressources naturelles s'épuisent. Cependant, dans les pays du tiers monde et les pays en voie de développement, c'est la population qui est responsable des atteintes contre l'environnement, où de nouveaux espaces se sont défrichés pour loger les familles nombreuses (qui sont un atout contre la pauvreté) donnant la priorité à l'homme, et réduisant les étendues plantées (40% des forêts auront été rasées). En outre, cette urbanisation anarchique est causée par l'industrialisation et la pauvreté qui pousse à l'exode rural. L'attention portée par les institutions internationales sur ces problèmes donnait un succès fulgurant à l'expression de développement durable, qui répond aux défis mondiaux, notamment ceux liés à la pauvreté, au climat, à la dégradation de l'environnement, à la prospérité, à la paix et à la justice [55].

En vue de contribuer à remédier à cette situation, plusieurs tentatives d'intégration de la notion de développement durable dans la pratique architecturale ont été envisagées dans le domaine d'architecture. Ces dernières ont, en effet, remis en scène l'architecture vernaculaire et ont même donné naissance à l'architecture contemporaine vernaculaire, qui s'inspire des anciennes constructions et qui rentre dans la démarche de respect des traditions (habitudes constructives, et matériaux locaux) même avec des formes et des styles architecturaux contemporains. De plus, nombreuses sont les leçons inspirées de l'architecture vernaculaire. ALEXANDRE [13] les présente en 253 prototypes de conception hiérarchisés selon trois familles : ville, bâtiment et construction. Il considère l'architecture vernaculaire un processus de production contemporain, d'où résultent des bâtiments dits néo-vernaculaires. Selon FREY, ces bâtiments font recours aux quatre arguments : les compétences des spécialistes de construction, les matériaux locaux à faible coût, les savoir-faire vernaculaires et l'interrogation profonde de la place des femmes dans leurs sociétés [3].

Les pratiques alternatives vernaculaires font apparaître d'autres termes déterminant l'architecture qui tient compte de l'environnement : bioclimatique, écologique, verte. Le terme bioclimatique désigne l'exploitation des caractéristiques de l'environnement dans la conception architecturale, en profitant au maximum des apports solaires en été et réduisant leurs effets en hiver, en diminuant la déperdition de chaleur ou de fraîcheur et en se protégeant des vents, pour assurer le confort d'une manière passive, et par conséquent, réduire la consommation énergétique. Cependant, plusieurs considérations sont apportées à la signification de l'architecture écologique (appelée également l'architecture verte). Celle-ci implique la prise en compte de l'empreinte carbone, la mise en œuvre des technologies propres (photovoltaïque, éolienne, biomasse, etc.), la minimisation de la production des déchets (l'emploi des produits non polluants recyclables), afin d'assurer une efficacité énergétique du bâtiment sur le long terme [12, 56]. Elle privilégie également la santé des occupants et place le respect de la nature au centre des préoccupations. Par ailleurs, l'intérêt renouvelé du bâti vernaculaire permet d'introduire une architecture respectueuse des principes de développement durable, une architecture qui englobe les aspects à la fois bioclimatiques et écologiques, autrement dit 'une architecture durable'.

3. L'architecture vernaculaire, une réponse aux besoins transcendants d'une communauté

L'allure de l'architecture vernaculaire propose des modèles qui sont issus de toutes les époques et tous les lieux et correspondent à de différentes modes de vie, culturelle et traditionnelle, comme l'a déclaré RAPOPORT :

“Mon hypothèse de base est donc que la forme de la maison n'est pas simplement le résultat de forces physiques ou de tout autre facteur causal unique, mais que c'est la conséquence de toute une série de facteurs socioculturels considérés dans leur extension la plus large. La forme, à son tour, est modifiée par les conditions climatiques (l'environnement physique qui rend certaines choses impossibles et qui en favorise d'autres), par les méthodes de construction, les matériaux disponibles et la technologie (les outils nécessaires pour réaliser l'environnement désiré). J'appellerai primaires les forces socioculturelles et secondaires ou modifiantes les autres.” [8, p. 65].

Du fait, l'interprétation de ces modèles est loin d'être normative, elle est fondée sur l'étude de chaque architecture et chaque situation particulière.

3.1 Théorie de la forme vernaculaire

La forme des bâtiments vernaculaires n'était pas conçue par des architectes professionnels, ni par des acteurs de construction, elle s'appuyait, seulement, sur les compétences et les traditions des constructeurs locaux, tout en prenant en considération les exigences du lieu mentionnées auparavant.

Les maisons vernaculaires de Scotland (appelées les maisons noires) prennent une forme ovale longue et étroite qui joue le rôle d'un brise-vent, avec des murs doublés en pierre, des toitures nichées en chaume de roseau ou de seigle et un sol en terre (Figure 1.4). Ce choix de matériaux permet l'évacuation de fumée [57] et par conséquent, le noircissement de toiture (ce que justifie le choix de la dénomination de ce type de maison). Cependant, l'Izba (l'habitat vernaculaire russe) est construite en bois (murs et plancher) sous forme de cabane, avec un toit de chaume à deux versants et deux fenêtres (Figure 1.5). Cette maison a une seule grande pièce avec un grand poêle en brique 'Istopit' qui est considéré comme un point central responsable du confort thermique à l'intérieur de l'Izba [58].

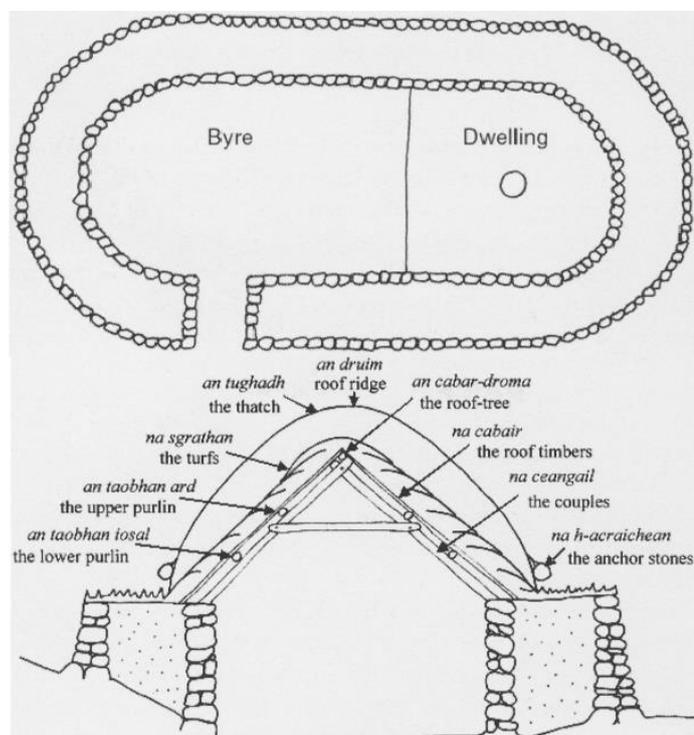


Figure 1.4 : Plan et coupe de la maison noire d'Arnol, île de Lewis, Scotland [57].



Figure 1.5 : Village vernaculaire russe [59].

Parlant de la diversité des formes, la Russie abrite de nombreuses cultures et traditions, ce qui a conduit à de nombreux types de demeures vernaculaires, parmi lesquels l'izba (présentée auparavant) qui constitue la principale maison type des russes. On y trouve également l'Igloo (Figure 1.6), une maison traditionnelle esquimau (allant jusqu'à quatre mètres de diamètre et deux mètres de hauteur) construite en blocs de glace sous forme d'un dôme, dont le sol (et parfois toute la surface intérieure) est couvert par les peaux d'animaux (la peau de bêtes). Ce type d'habitation peut contribuer au confort thermique dans les conditions climatiques très défavorables de la région, en conservant l'air chaud fourni par l'huile brûlante (graisse de baleine) à l'intérieur de l'abri, et en débarrassant le dioxyde de carbone de l'entrée qui se situe au niveau le plus bas possible (par rapport au sol) pour se protéger du vent et pour éviter la perte de chaleur lors de l'ouverture de la porte.

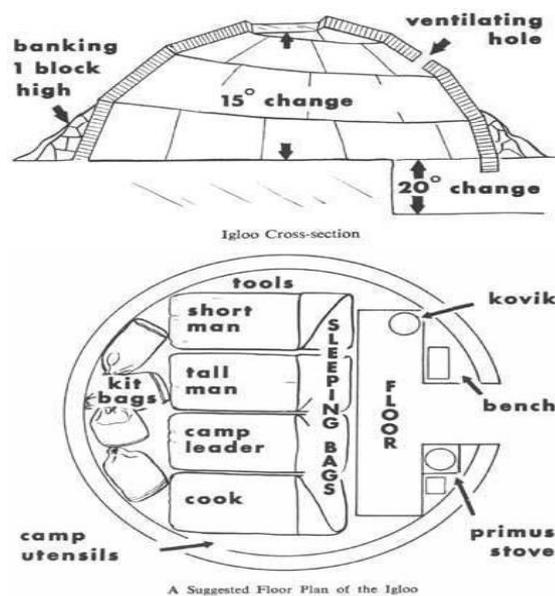


Figure 1.6 : Igloo ; habitation traditionnelle d'Esquimau [60].

C'est sous cette même forme de tente (arrondie) que les peuples sibériens (tels que les Tchouktches) construisent leurs habitations portatives traditionnelles. Quant au type 'Yaranga', il est construit avec poteaux en bois disposés en cercle (cadre), et recouverts de peaux de rennes (Figure 1.7). Les Yourtes et les Tchoums sont également des maisons portatives similaires aux Yarangas. Elles sont fabriquées à l'aide de bois (structure), de peaux d'animaux, de poils et de laines ; des matériaux qui permettent aux nomades de Sibérie de supporter les températures basses de leur région, allant de -50°C à -40°C .



Figure 1.7 : Maison Yaranga de la Sibérie [61].

Au nord du pays, notamment en montagnes de Caucase du Nord (la Ciscaucasie), les maisons familiales, dites les Saklyas, sont construites de la terre cuite, recouverte par l'argile [62], avec un soubassement en pierre. Ces cabanes sont d'une seule pièce rectangulaire, sans fenestrations, avec un sol couvert en plancher de bois, et une toiture plate (pour se protéger des vents violents) faite du bois et d'une couche de chaume de gazon (Figure 1.8).



Figure 1.8 : Saklya ; la maison caucasienne [63].

L'étude de ces différentes formes de maisons traditionnelles qui se trouvent dans le même périmètre (Russie) montre que l'essentiel souci de l'homme primitif était de s'abriter pour se protéger contre les rigueurs du climat (chaleur, vent, froid, etc.) ; alors, le climat présente le processus primaire de la création de la forme d'abri [8].

3.1.1 Le climat, un paradigme pour l'architecture vernaculaire

Le lien de causalité entre le climat et l'architecture vernaculaire est souvent abordé par les architectes, aussi bien par les sociologues et par les anthropologistes. En ne faisant référence à aucune forme urbaine ou architecturale, l'architecte romain VITRUVÉ (qui vécut au 1^{er} siècle) se focalisait sur les vents. Pour lui, l'idée de construire est toujours liée au besoin de vivre à l'abri des vents [64]. Or, ALBERTI [65] notait que l'espace ne peut pas être conçu indépendamment des objets qui l'entourent, il a veillé sur tous les 'défauts du climat' afin qu'il acquiert que ces défauts peuvent être corrigés par les interventions de l'homme et les transformations de son environnement.

Sortant du domaine d'architecture, et allant vers la sociologie et l'anthropologie, dans son ouvrage l'esprit des lois, livre XIX, publié en 1748, le philosophe MONTESQUIEU, qui eut culminé le point de la 'théorie du climat', caractérise les populations selon leurs environnements, en disant que le climat est le responsable des caractéristiques physiques de l'homme et de sa personnalité [66]. Ceci a été traduit par d'autres chercheurs (qui étudient l'effet de la personnalité de l'être humain sur son interaction avec l'environnement) par la diversité des formes architecturales et la différence de créativité entre l'homme saharien et celui du climat froid. MOLLER [67] montre également que l'architecture peut être définie comme l'interaction dynamique de l'espace et de personnalité de son habitant. COOPER [68] aussi ajoute, en faisant référence à JUNG [69], que l'espace est l'expression de la personnalité et de l'inspiration de l'homme ; en effet, les gens satisfaits préfèrent les formes rondes, ceux créatifs et organisés apprécient les formes ovoïdes et les gens lucides utilisent toujours la forme carrée [70]. En outre, JANSSENS [71] trouve que les bâtiments hauts et massifs sont jugés désagréables et complexes par les personnalités anxieuses, contrairement aux personnes calmes [72, 73].

L'exploration de ces liens introduit l'influence significative du climat sur la nature de l'homme, et par conséquent sur son environnement. Désormais, la forme de la maison est considérée comme une stratégie de protection face aux conditions climatiques hostiles d'une région donnée. Elle répond efficacement aux besoins de confort de l'homme.

Une question plus importante est de savoir pourquoi tant de formes de maison ont été produites dans des climats similaires, comme le montre la comparaison de la maison Pueblo (États-Unis), et le Trullo (Italie), deux types totalement différents (Figure 1.9) construits dans le climat méditerranéen. Dans le premier exemple, il s'agit d'une construction à plan carrée à plusieurs niveaux couverts d'un toit plat, cependant, le deuxième est un bâtiment à base rectangulaire surmontée d'un toit conique de diverses hauteurs et de différentes tailles [74, 75] dont son modèle original (antérieur au XVII^e siècle) était un cône reposant sur une base cylindrique. Désormais, cette différence ignore le fait que la forme de la maison vernaculaire se détermine par le climat, quoiqu'il soit un paramètre fondamental, le mode vie mène à des solutions irrationnelles par rapport au climat dans certains cas.

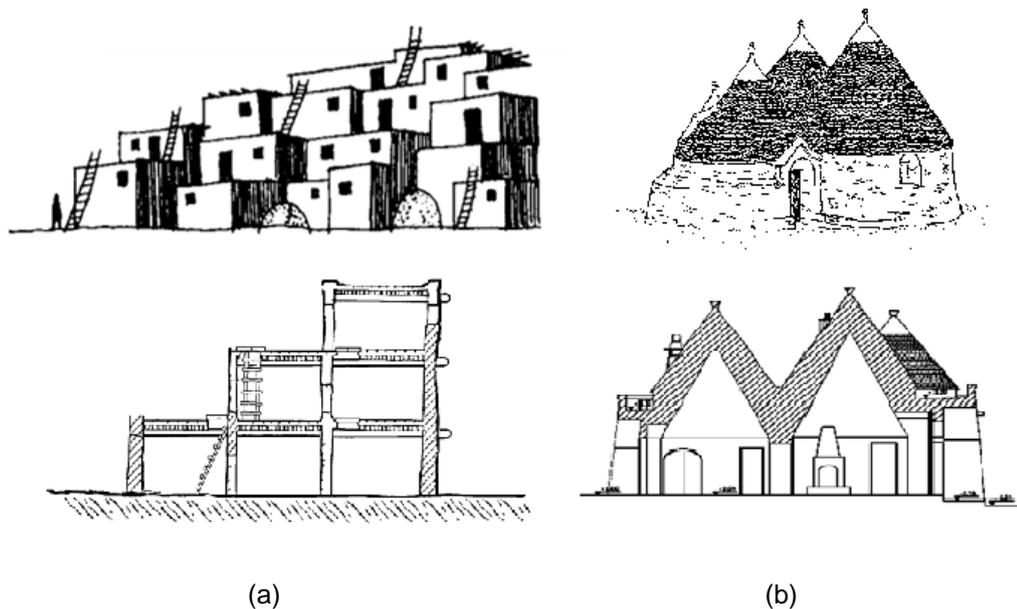


Figure 1.9 : Habitations construites en climat méditerranéen. (a) : Pueblos, (b) : Trullo [8, 76, 77].

Le Pueblo (terme archéologique ; un bloc de chambres) est composé de cinq à 10 pièces pour résider plusieurs familles, dont les pièces de rez-de-chaussée sont consacrées au stockage des grains et des légumes, alors que celles d'étages sont des chambres. Les maisons peuvent être modifiées, en ajoutant, à chaque fois, une pièce pour faire installer un jeune couple [78]. La pièce ajoutée doit être reculée

pour que les toits des unités inférieures forment des terrasses pour celles du dessus. Cette solution influe sur les performances thermiques de la maison, puisqu'elle perd sa compacité. En revanche, le Trullo est construit individuellement, et il n'est jamais fait pour loger plus d'une famille, le jeune couple doit construire une nouvelle bâtisse pour s'installer [75]. Ce type de maison primitive est généralement composé de deux cellules qui communiquent entre elles par une baie ménagée dans la cloison.

Revenons à la question de la diversité de formes dans un climat similaire ; en réduisant l'échelle de l'analyse, l'occupation de maison Trullo est, dans certaines régions, saisonnière, l'absence des ouvertures provoque l'accumulation de l'humidité à l'intérieur pendant la période hivernale, en obligeant les habitants à ouvrir la porte, ce qui influe négativement le confort thermique, et par conséquent, rend l'occupation du Trullo impossible. En outre, le Trullo a de petites pièces qui imposent aux habitants la réalisation de toutes tâches ménagères à l'extérieur.

Cela permet de confirmer que la forme de ce type de maison n'est pas choisie uniquement pour corriger les défauts du climat, le choix est lié à d'autres facteurs, comme par exemple l'activité économique. Le trullo temporaire est généralement construit dans les terres agricoles pour ne se faire occuper que pendant la période de moisson et de vendange [79].

3.1.2 La maison vernaculaire, une expression de l'activité économique productive

Dans une opération architecturale, le mode de vie et l'activité économique, se présentent comme des données qui sont nécessairement prises en compte dans la synthèse de la forme. Ce facteur se reflète fortement dans la maison vernaculaire rurale [27], dont les habitations doivent nécessairement être en relation avec les cultures, les greniers, et les enclos de bétail [8]. Elles sont liées à la fonction du travail rural dans les terres agricoles et les surfaces forestières, contrairement, aux zones où le régime alimentaire est basé principalement sur la chasse et la pêche ; dans ces zones, l'habitat est tributaire de la disponibilité des ressources alimentaires locales.

Depuis l'époque de la préhistoire, les habitations des Inuits (Esquimaux), en particulier celles de la Sibérie, ont été marquées par leur diversité, qui dépendait, principalement, de leur base économique et leur mode de vie. Pendant la période

hivernale (où la nourriture était basée sur les mammifères marins), il était nécessaire de construire des maisons temporaires (Igloo) pour abriter les pêcheurs qui s'absentaient pendant de longues périodes. De l'hiver à l'été, l'abri des Esquimaux changeait ; le régime traditionnel était basé sur les rennes, les caribous, les oiseaux de mer et les renards. Pour éviter de bâtir des maisons temporaires d'été, les chasseurs transportaient avec eux les peaux de phoque ou de morse, qui permettaient de facilement mettre en place des tentes (composées de perches en forme de cône, couvertes par les peaux attachées au sol par de grosses pierres) là où la nourriture se trouvait (Figure 1.10) [80].



Figure 1.10 : Tente d'été des Esquimaux [81].

Dans les zones rurales, où l'activité économique repose essentiellement sur les produits d'agriculture, comme par exemple en Italie, la forme de certains Trullo temporaires dans la vallée d'Itria, n'a pu servir que de vinification, cette maison n'était occupée que pendant la période de vendange [79, 75]. La forme de sa toiture est choisie pour la récupération de l'eau pluviale et le séchage des fruits. Au-delà, la première pièce est un séjour dans lequel se trouvent une kitchenette et une alcôve, cependant, la deuxième consiste en un espace réservé au pressage de raisin, qui se recueillait dans des citernes (bâche à eau) sous-sol (Figure 1.11). Ce modèle de Trullo est "*simultanément une machine à habiter et à produire*" [4, p. 1].

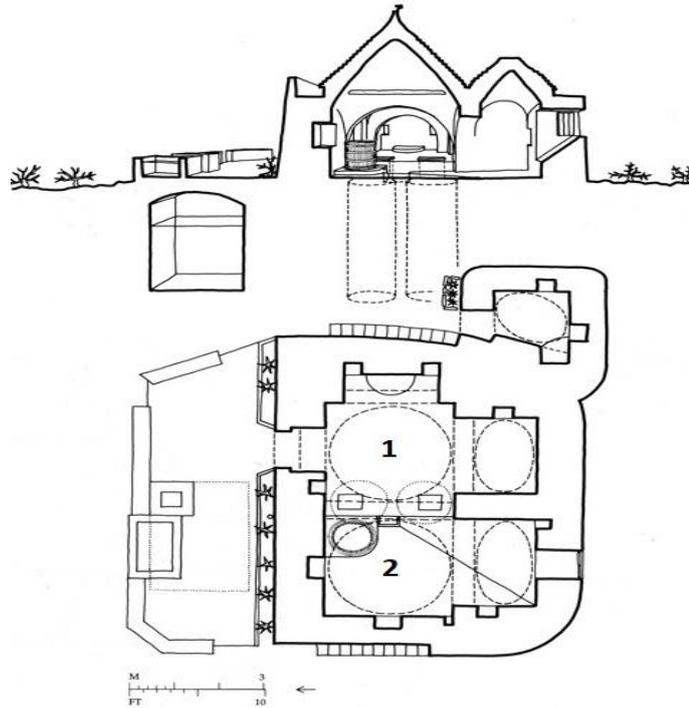


Figure 1.11 : Trullo voué à la vinification [75].

En France, particulièrement, au village des bories, la production d'huile d'olive était l'activité économique essentielle, cependant, le régime alimentaire était basé sur des activités complémentaires, à savoir : l'élevage de petit bétail, l'apiculture et la culture séchée : mûrier, céréale, amandier, fourrage. La Borie est un habitat rural provisoire (Figure 1.12.a), elle est construite pour des usages agricoles, pastoraux et d'habitat. Cette maison pouvait servir de grenier, d'entrepôts pour l'outillage des paysans, ou de loges à cochons ; certaines Bories étaient des aiguières qui recueillent l'eau de ruissellement et le protéger de l'évaporation. Chacune de ces bories avait des dimensions précises qui dépendaient de sa fonctionnalité.

La maison borie est développée sous une forme de ruche (tour conique) construite sur un plan circulaire, et parfois rectangulaire, avec une voûte d'encorbellement (Figure 1.12.a). Les modèles récents des bories se composaient de plusieurs cellules, dont leurs dimensions dépendaient essentiellement de leurs usages, cependant, leur nombre est lié à l'activité économique de leurs occupants (Figure 1.12.b). Ceci permet de constater que, plus la forme, l'activité économique productive influe sur la taille de la maison ainsi que sur le nombre et la distribution de ces espaces.

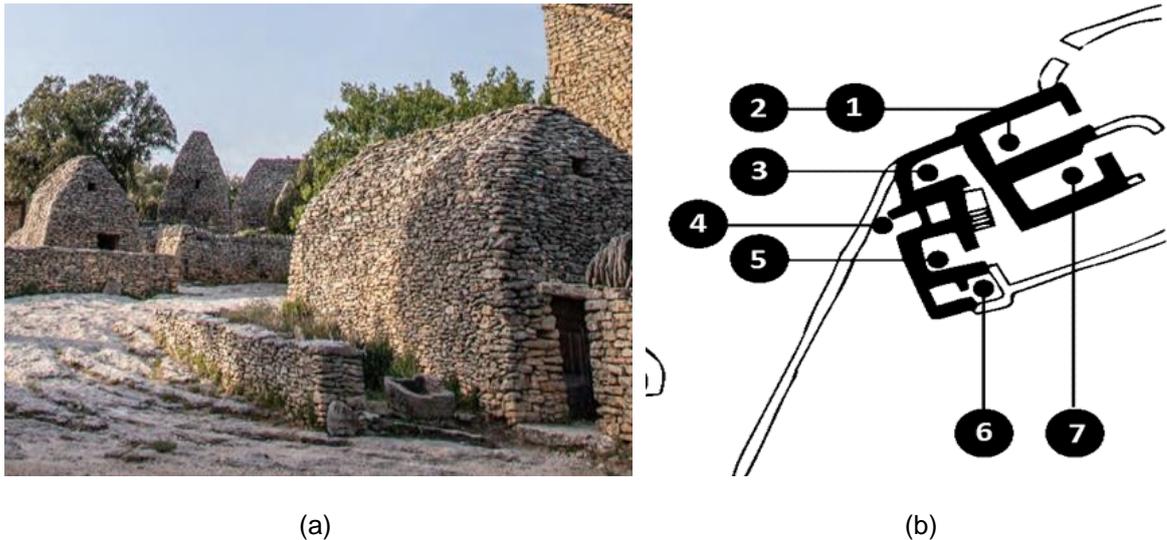


Figure 1.12 : Exemple d'habitat vernaculaire en France. (a) : le village des bories, (b) : Plan d'une maison Borie ; 1 : Grange, 2 : Magnanerie, 3 : Resserre, 4 : Cuve a vint et foulair, 5 : Chevière, 6 : Soue, 7 : habitation [82].

C'est pour la même activité productive (agriculture) que le peuple thaïlandais construisait ses refuges temporaires. La maison rurale thaïlandaise est une structure pignon avec un toit de forme galbé, construite sur pilotis en plan carré (Figure 1.13), cette architecture convient à la culture de riz, elle inclut des granges d'entrepôt des grains, des loges pour chevaux et bétail. Contrairement au Borie, les greniers et les écuries étaient des unités isolées de la maison. La partie abritée sous la maison (sous pilotis) était souvent utilisée pour faire les travaux d'artisanat et pour interposer l'outillage. Cette dissimilitude se traduit par la différence culturelle entre les deux sociétés (italienne et française), dont l'organisation des activités économiques du peuple thaïlandais s'était traduite dans la séparation des unités dans leurs maisons (Figure 1.13). Cette analyse conduit à un nouveau facteur déterminant de la forme de maison vernaculaire et de sa typologie : le facteur socioculturel.

Pour le peuple thaïlandais, la maison est un abri matériel et spirituel, l'acte de bâtir était fortement influencé par les croyances et les superstitions qui ont traversé les siècles, dont la répartition et l'aménagement des unités de la maison était liée à l'idée de 'la chance suivie de la ruine'. Selon les croyances thaïlandaises, la construction de la maison devait être accordée par les génies fonciers (les fantômes qui étaient les premiers occupants de lieu) qui assuraient la protection, la santé et la fertilité du sol et la pluie aux occupants et qui ont une maison (dite maison aux esprits) édifiée à proximité de chaque habitation, orientée nord ou sud. Cette

orientation était faite pour la protéger de l'ombrage de bâtiment d'habitation. En effet, l'attention portée à ces mythes permet de constater que les Thaïlandais vivaient dans des maisons bien adaptées à leur culture, un facteur qui pouvait influencer même l'orientation (un paramètre indispensable pour le confort thermique), en connotant l'ouest à la mort [83].

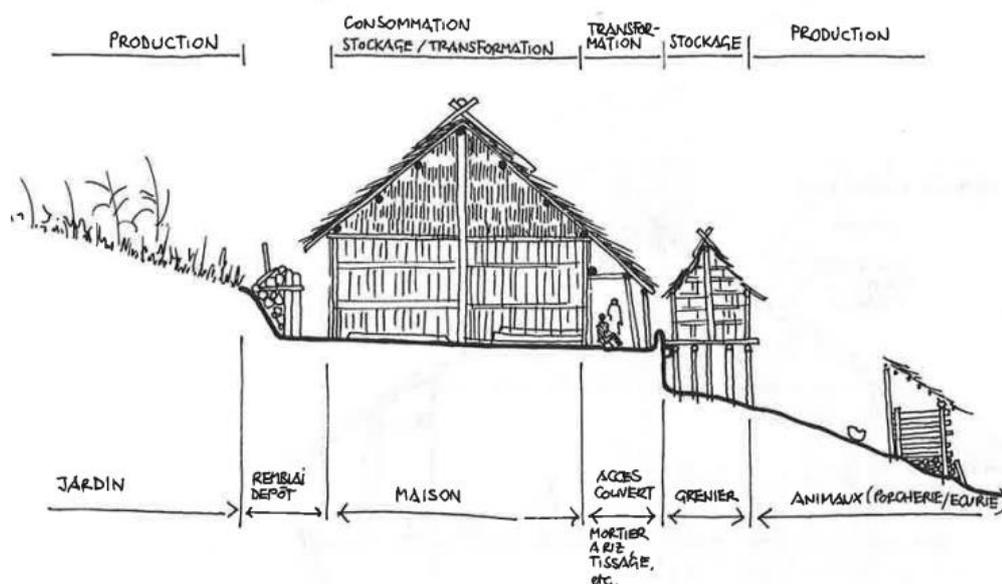


Figure 1.13 : Coupe schématique de maison rurale thaïlandaise [76].

3.1.3 La théorie socioculturelle de la forme

Selon RAPOPORT [8], le facteur socioculturel affecte fortement la forme, *“Comme la construction d'une maison est un phénomène culturel, sa forme et son aménagement sont fortement influencés par le milieu culturel à laquelle elle appartient”* [8, p. 64], dont la maison présente pour lui une réponse aux besoins culturels. Cette contribution à l'étude des maisons vernaculaires était l'une des premières tentatives associant la forme et la culture. En s'inspirant de cette tentative, KENT [84] considérait que la forme de l'habitat dépendait essentiellement des caractéristiques sociodémographiques et de la situation socio-économique de ses occupants et l'interprétation de l'acte de bâtir découle de la compréhension de la relation entre les habitudes socioculturelles et économiques des occupants et l'organisation spatiale et matérielle de leurs espaces habités.

Ce facteur a fait l'objet d'une classification en sous-domaines, dont ; RAGLAN [85] et DEFFONTAINES [86] ont attribué la forme aux pratiques religieuses et aux

croyanances ; OLIVER [87] l'a attribué aux mythes et aux rites ; d'autres écrivains l'ont attribué au développement spirituel et social de la communauté et à la tradition.

3.1.3.1 La maison vernaculaire en tant que phénomène social

Faisant référence aux anthropologies pionnières [88, 89, 90, 91], la maison longue des Iroquois est considérée comme l'image idéale de l'intégration sociale ; elle présente la technique par laquelle le peuple iroquoien (indien de l'Amérique) formait sa communauté durable. Cette maison est sédentaire, elle est composée d'une pièce unique rectangulaire, longue et étroite, construite pour loger plusieurs familles (allant jusqu'à 60 personnes) liées du côté maternel (Figure 1.14). Cet abri faisait généralement sept mètres de largeur, sur cinq à sept mètres de hauteur, cependant, sa longueur pouvait atteindre les 100 mètres (modifiable en fonction de nombre de famille qui y habitait).

Les Iroquoiens vivaient généralement dans un clan qui regroupait 3 à 5 maisons entourées d'une palissade (Figure 1.14) ; le regroupement des clans formait un village avec une capacité maximale de 20000 personnes. Cette organisation était faite pour assurer la sécurité tout en consolidant la solidarité au sein de la tribu. L'habitat iroquoien a été considéré comme un symbole de domestication de la société, et un élément unificateur réunissant l'ensemble de la communauté, étant le centre de toutes les activités (vie, production, stockage, etc.).

Les maisons longues étaient faites d'une structure en bois reliée et couverte d'écorce, avec deux portes, et une à deux ouvertures aménagées en toiture pour permettre aux fumées (du chauffage, et de cuisson) de s'échapper (Figure 1.14). L'absence des fenêtres dans un tel immense abri posait des problèmes d'aération, ainsi que d'éclairage, et par conséquent, des problèmes de santé aux habitants [92]. En outre, le taux de renouvellement d'air bas dans cette habitation (à pollution spécifique) générait une mauvaise qualité d'air intérieur qui était à l'origine des affections oculaires, d'irritation du nez, de la gorge et de la peau, d'allergies, et d'asthme. Sans compter qu'il pouvait se traduire par un inconfort thermique pendant la période chaude et une dégradation du bâti (humidité et moisissure), cela justifie la durée de vie très courte de la maison longue qui était limitée entre 10 et 15 ans.

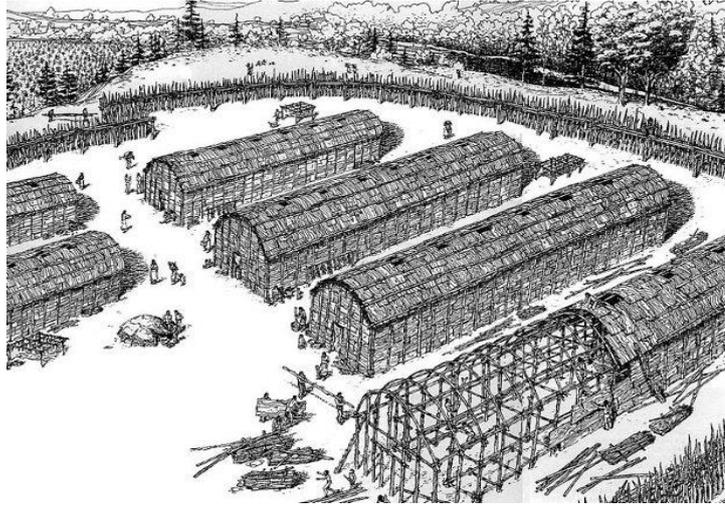


Figure 1.14 : Clan des Iroquois [93].

L'étude de cet exemple de maison permet de constater que dans certain cas, la forme n'a été choisie que pour répondre aux besoins sociaux de la communauté ; ceci pouvait mener à des solutions irrationnelles du point de vue confort, durabilité de bâti et santé humaine.

3.1.3.2 Attribution de la forme aux mythes et aux rituels religieux

À l'Inde ancienne (nord-est Arizona, États-Unis), une région à fortes croyances, l'homme semblait s'inspirer, d'une façon ou d'une autre, de ses pensées mythiques religieuses. Cela s'illustre tout particulièrement dans la forme de sa maison. Ce point a été largement exprimé par RAGLAN [85] et DESFONTAINES [86] qui trouvaient que la religion et les croyances sont, dans certaines civilisations, des facteurs déterminants de la forme de l'abri.

La maison dite Hogan, est un exemple d'habitat primitif vernaculaire qui fait fortement appel à la religion traditionnelle des Indiens Navajos. Elle était construite en plan circulaire (forme du soleil) qui symbolise l'éternité, avec une porte orientée à l'est pour recevoir le soleil du matin (le commencement de la vie) et la bonne bénédiction (Figure 1.15). Cette forme de dôme était ainsi associée à une représentation des mythes qui racontait l'histoire de la construction de premier Hogan à l'aide de coyote (que les Indiens Navajos considéraient comme un dieu) en utilisant l'épi de maïs. Les Hogans étaient généralement construites avec des poteaux en bois et des murs en pierre (et parfois en bois) recouverts avec de la

terre. Ce choix symbolisait le Navajas dont les quatre poteaux représentaient la montagne sacrée, le sol était la mère terre, et le dôme désignait le ciel père.



Figure 1.15 : Hogan ; habitation traditionnelle des Indiens Navajos [94].

En Indonésie orientale, le pays de la communauté spirituelle, les Torajas 'peuple de hautes terres' résidaient essentiellement dans des maisons appelées 'Tongkonan' (Figure 1.16). Ces habitations sont remarquables par leur long toit élancé, orienté vers le Nord-sud (la direction d'où les ancêtres étaient venus - direction de dieu et de vie), et leur disposition sur deux rangs tout le long d'une allée. La forme attirante de toiture était à l'origine des règles ancestrales, elle désignait le lien entre les ancêtres et la vie future. Cette forme était ainsi associée aux mythes, elle évoquait les bateaux par lesquels les ancêtres avaient traversé les mers pour s'installer dans leur terre actuelle [95].

Les Tongkanon étaient construits sur pilotis, dont l'accès à la maison se faisait par escalier. Selon MANURUNG [96], ce choix était fait pour maintenir l'équilibre entre les trois éléments de pouvoir ; le dieu au ciel (espace sacré), le dieu sur terre (espace d'habitation), et le dieu au monde souterrain (espace de contrôle de mauvais esprits dit royaume des démons).

L'orientation Nord-Sud de la maison Torajas (qui était choisie pour suivre la direction de vie, de dieu et d'ancêtres) a influé sur la distribution des espaces horizontalement, dont la partie nord était considérée comme espace respecté et sacré 'Pollo Ulannalino', et la partie sud, dite Queue du monde, présentait un espace sale 'Pollo Nalino' [96].



Figure 1.16 : Tangkonan ; maison de Torajs [97].

Sur le plan des croyances, les façades des Tongkonan étaient décorées avec des têtes de buffles, en croyant que cet animal accompagne le défunt au pays des morts, et l'aide à tenir son grade dans l'au-delà. Ces façades sont colorées en noir (la mort), rouge (le sang), blanc (la pureté) et en jaune (le pouvoir, l'approbation des dieux) [95].

L'observation de ces deux exemples d'habitat vernaculaire permet de constater que les mythes, les croyances et les religions n'étaient pas les paramètres déterminants de la forme seulement, mais également de la typologie, l'orientation et la façade de la maison.

3.1.3.3 Le caractère défensif de l'habitat vernaculaire

La discussion sur l'aspect sociologique de la maison longue des Iroquois conduit à penser que la forme vernaculaire était également une réponse au besoin de sécurité, du moment que les Iroquois construisaient des clôtures pour protéger leur clan des invasions. Cet aspect se reflétait dans d'autres régions du monde, à travers les formes de leurs maisons, la répartition de leurs espaces intérieurs et leurs orientations.

Situé à Fujian (sud de Chine), le Tulou est un exemple d'habitat vernaculaire exceptionnel à caractère auto-défensif, construit par le peuple Hakka. Cette maison colossale est caractérisée par sa forme circulaire ou quadrangulaire monumentale (disposant généralement une entrée unique) qui exprime la structure clanique massive de la société.

Le fort Hakka est un habitat communautaire abritant de nombreuses familles (jusqu'à 800 habitants), selon le diamètre (entre 50 et 80m) et le nombre d'étages qu'il possédait (3 à 4 étages), dont le rez-de-chaussée était réservé aux activités productives (bétail, stockage de nourriture, cuisine, etc.), le premier étage aux réserves d'armes, tandis que les étages supérieurs étaient des unités d'habitation qui s'organisaient autour d'une cour centrale à ciel ouvert suivant un plan axial (Figure 1.17) [98].

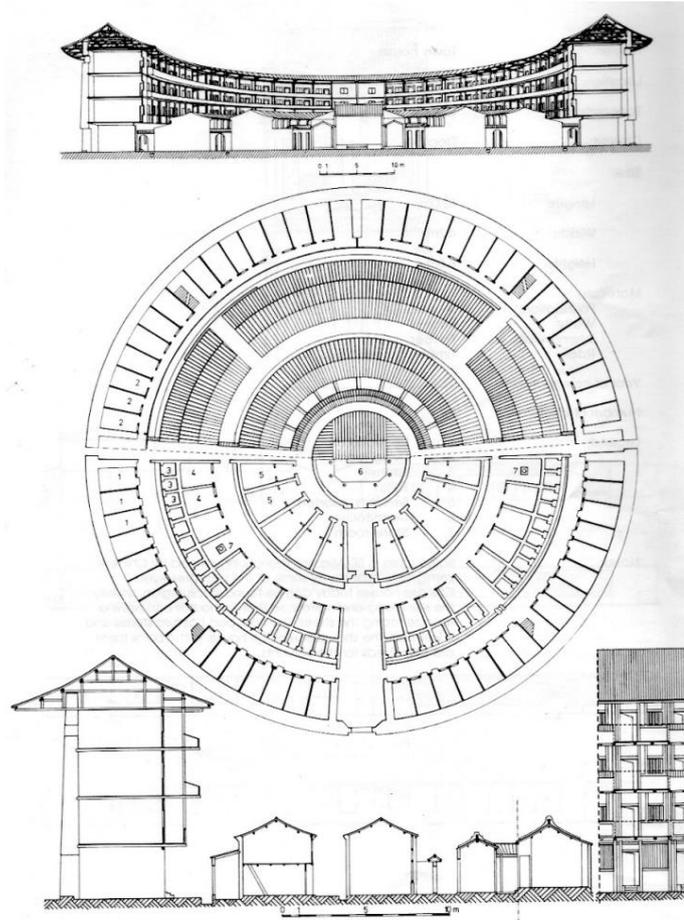


Figure 1.17 : Maison colossale Tulou ; Plan, façade et coupe [99].

Construite en pisé (l'une des techniques de construction en terre), cette enceinte défensive a des murs faisant jusqu'à deux mètres d'épaisseur et plus de 15 mètres de hauteur (allant jusqu'à occuper quatre à cinq hectares), qui étaient construits sous l'idée de destruction de l'habitat pendant les guerres ; alors que le peuple Hakka voulait préserver ses édifices, en les rendant massifs introvertis et inaccessibles. C'est également pour cette raison que les unités d'habitation étaient les seules à posséder des fenêtres ouvertes sur l'extérieur. Ce modèle d'habitat vernaculaire a été classé sur la liste du patrimoine mondial, en le considérant

comme un exemple exceptionnel de maisons traditionnelles d'ordre sécuritaire [100]

C'est avec le même principe que les Matmatis (les Berbères du Sud tunisien) ont construit leurs habitations troglodytes fousseurs afin de faire face aux invasions romaines et aux soldats égyptiens que connaît la région. Des maisons souterraines (difficilement percevables à l'œil nu) circulaires, creusées en profondeur dans les grottes autour d'un puits formant un patio [101] (Figure 1.18).

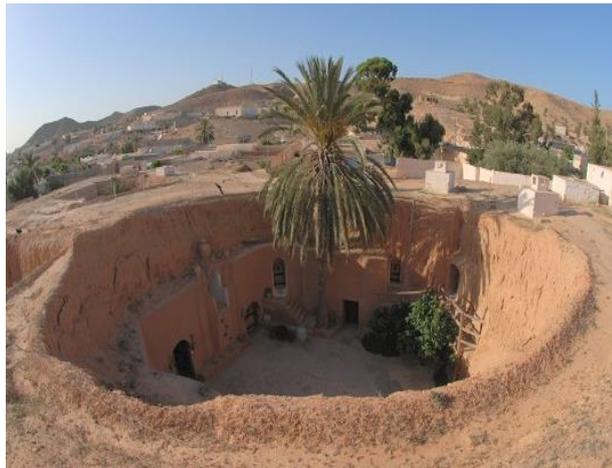


Figure 1.18 : Maison troglodyte de Matmata [102].

L'étude de ces exemples a permis de relever que dans deux régions, deux climats et deux cultures différentes s'étaient produites une forme, une typologie, et une organisation spatiale analogues. En effet, le point de vue défensif conduisait à choisir une forme circulaire introvertie, construite en hauteur ou en profondeur, autour d'un patio central, qui constituait l'unique source de lumière pour les différentes pièces qui s'organisaient autour. En revanche, la maison colossale et celle troglodyte montraient une certaine dissimilitude, qui se résume dans le site et les choix de matériaux et des techniques de construction, dont l'acte de bâtir était lié à la prédominance des grottes argilo-gypseuses et la carence de l'eau dans la maison troglodyte, ainsi que la présence de terre, d'argile, de bois et de l'eau dans la maison Tulou.

3.1.4 Matériaux et techniques de construction ; paramètres fondamentaux de la forme vernaculaire

Les ressources naturelles avaient un rôle primordial dans la conception vernaculaire. Le matériau de construction était l'une de ces ressources fournies par

l'environnement local, il a été considéré comme un facteur déterminant de la forme par BRUNSKILL [103] et ALEC [104], et modifiant par RAPOPORT [8]. Ce fait fondamental a permis de créer une diversité formelle étonnante d'une région à une autre.

Tout en s'adaptant à l'ensemble des facteurs signalés auparavant, le bâti vernaculaire s'est développé, plus souvent, en trois matériaux essentiels ; pierre, terre et bois ; les régions forestières riches en arbres sont caractérisées par l'usage intensif du bois ; en revanche, l'utilisation de la pierre et de la terre est observable dans les régions pauvres en arbre, ou le bois servait uniquement à soutenir les toits, les planchers, les escaliers, les arcs et les balcons [105].

Néanmoins, dans les milieux primitifs et paysans, l'abri, particulièrement la tente, était essentiellement fait des matériaux organiques, d'origine animale ou végétale (peaux, tissées, fibres, os, etc.). Or, le choix de ces différents matériaux de construction était lié également à d'autres motifs puissants ; climat (forces physiques et mécaniques), religion, culture, société.

En Angleterre, notamment au village de Castle Combe à Wiltshire, les maisons vernaculaires sont construites en pierre (Figure 1.19), quoique la région soit riche en deux matériaux bois et pierre. Ceci se traduit par la capacité de la pierre (matériau lourd) à stocker l'énergie thermique, contrairement à l'ossature bois. En outre, la région de Wiltshire est caractérisée par un climat océanique avec été tempéré, dont les précipitations sont en moyenne de 745 mm sur l'année, ce que rend l'utilisation d'un matériau à forte capacité hygroscopique indispensable, afin d'assurer la durabilité des habitations.



Figure 1.19 : Maisons vernaculaires anglaises de Castle Combe [106].

C'est, en effet, pour les mêmes motifs (disponibilité du matériau sur le site même et climat) que le peuple turc de Harran a choisi le matériau terre pour construire ses maisons traditionnelles. La maison ruche de Harran (sud-est Turquie) est un exemple d'architecture vernaculaire de terre (Figure 1.20), elle est caractérisée par des murs épais d'adobe, surmontés de dômes en forme de ruches ; ces éléments constructifs lui permettaient de résister aux contraintes climatiques (chaleur, pluie torrentielle, vent) qui caractérisent la région [107].



Figure 1.20 : Maison ruche de Harran [108].

Concernant l'architecture de terre, le Tata Somba (appelée aussi le Takyenta) est également l'un de ses modèles ; une maison à deux étages (Figure 1.21), construite en banco (pisé) sous forme de cases rondes, dans les montagnes d'Atacora à Bénin.

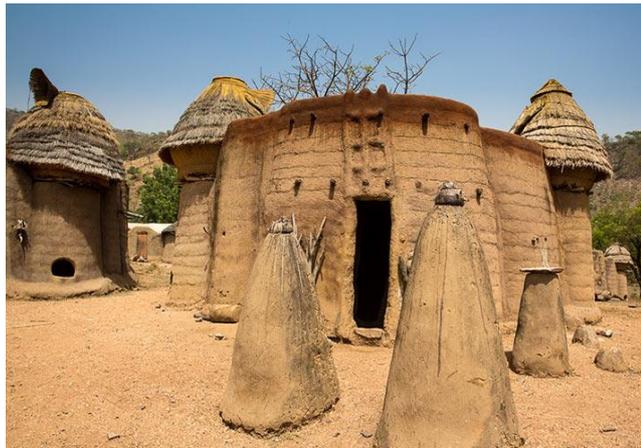


Figure 1.21 : Maison de Batammariba le 'Tata Somba' [109].

Dans cette société, dite Batammariba, la maison devait se confronter aux formes traditionnelles qui symbolisaient la fertilité, et qui reflétaient sa cosmologie, sa religion, sa philosophie et son mode de vie. En effet, le matériau et la technique

de construction choisis dans cette région peuvent offrir une grande variété de formes, ce que facilitait aux Batammaribas la réalisation de leurs maisons circulaires fortifiées [110].

Contrairement à ce cas, la forme rectangulaire ou carrée de la maison afghane pouvait être construite avec n'importe quels matériaux, sachant que la région était rocheuse, riche en argile et en pierre. Néanmoins, la décision d'utiliser un matériau de construction quelconque était basée essentiellement sur les pratiques traditionnelles, la facilité de mise en œuvre et le climat. En effet, c'est pour ces raisons-là, que les habitations ont été construites en brique de terre crue, avec un soubassement en pierre et un toit plat recouvert de paille et de boue (Figure 1.22).

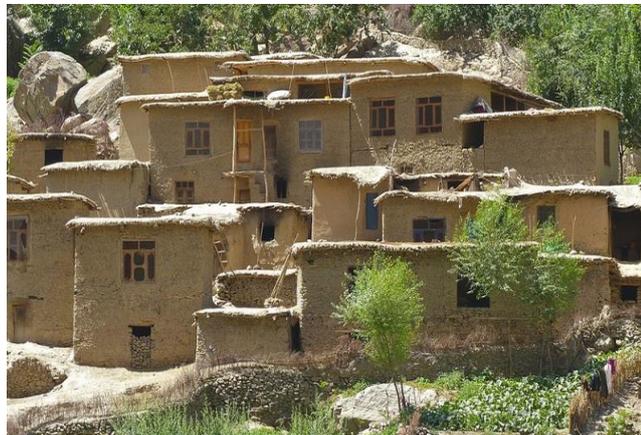


Figure 1.22 : Maison afghane [111].

Il est entendu, de ces exemples, qu'un seul matériau de construction pouvait produire des formes très différentes construites par la même technique. Ces formes dépendaient, dans certains cas, de ces matériaux et techniques de construction, tandis qu'elles les déterminaient dans plusieurs d'autres.

3.1.5 La forme de la maison vernaculaire et l'adaptation au site

Il est bien établi, à partir des études antérieures sur l'architecture vernaculaire, que le site constitue un facteur qui entre en jeu lors de la création de l'abri [1, 8, 7, 2]. Il a été considéré comme le paramètre le plus déterminant dans l'élaboration formelle de la maison. En effet, la forme de la maison vernaculaire est une réponse aux contraintes de site ; de plus, les bâtisseurs primitifs étaient attachés à leur terre, en s'y adaptant, même si elle devenait contraignante.

La considération du site et du milieu géographique a permis de produire plusieurs modes de construction (édification, excavation, creusement, enfouissement,

etc.). Pour l'édification de leurs maisons sur le lac Nokoué, les Toffinoux (habitants de Ganvié à Bénin, appelés aussi, les hommes de l'eau) ont exploité le bois de bambou, afin de dresser leurs habitations sur pilotis, tout en les convenant au milieu dans lequel elles étaient implantées (Figure 1.23).



Figure 1.23 : Habitations vernaculaires des Toffinoux [112].

En Turquie et plus précisément à Cappadoce, la cité souterraine Derinkuyu (signifie puits profond) a été enfiée en profondeur (Figure 1.24). Elle était creusée dans une roche volcanique, ce qui facilitait l'excavation. Cette cité était dotée d'une rivière afin de subvenir les besoins en eau, des puits qui permettaient d'assurer le renouvellement de l'air, des tunnels menant aux autres cités et reliant les différentes unités de la cité, avec de grandes pierres circulaires faisant office de portes. Derinkuyu comportait tous les espaces de vie nécessaires ; logements, cuisines, étables, dépôts, réfectoires, etc.

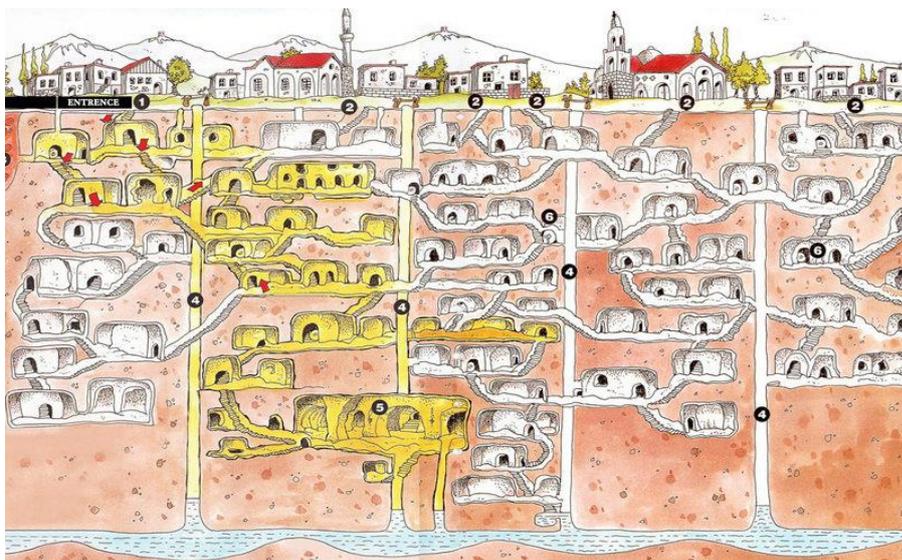


Figure 1.24 : Cité souterraine de Derinkuyu [113].

L'habitat troglodyte des Indiens Anasazis à Mesa Verde (sud-est Colorado), est un autre exemple de maisons perchées aux alcôves de falaises rocheuses (Figure 1.25). La maison des Anasazis était construite en pierre, sous forme d'unités développées autour d'une Kiva ; une salle circulaire souterraine couverte en bois. Cette cité comportait environ 150 pièces développées autour de plus de 20 Kivas.

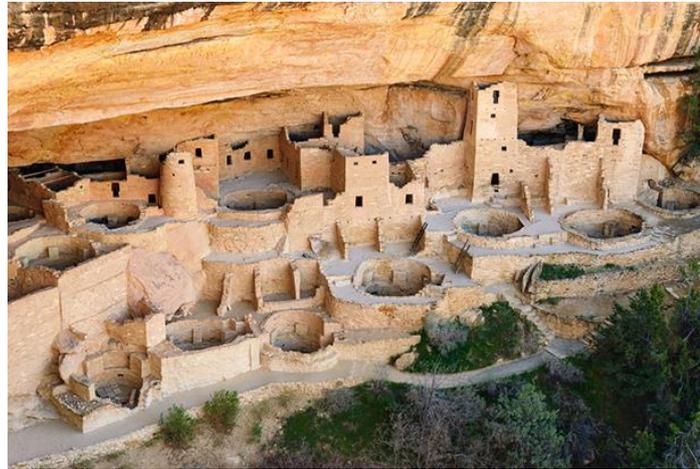


Figure 1.25 : Habitat troglodyte de Mesa Verde [114].

Ces exemples montrent l'aptitude de l'homme primitif à s'adapter à son site. Même s'ils leur semblaient être comme des obstacles, les bâtisseurs de ces habitations ont réussi à tirer les avantages de leurs milieux afin de concevoir leurs espaces de vie. Néanmoins, le site n'était pas le seul paramètre justifiant le choix de ces formes, puisque la maison des Toffinoux a été édifée sur le lac pour se protéger des négriers de Fon, qui n'étaient pas, selon leur religion, autorisés d'entrer dans l'eau. Une raison qui a également poussé le peuple cappadocien et les Anasazis d'excaver la cité troglodyte de Derinkuyu et celle de Mesa Verde.

4. Conclusion

Il ressort de ce chapitre que la recherche d'une définition unique, autrement dit, une description physique précise (en nombre ou en genre) de l'architecture vernaculaire est impossible, pour la simple raison qu'elle peut réunir des bâtiments n'ayant que très peu de caractéristiques en commun. L'exploration des différentes définitions de l'architecture vernaculaire a permis de constater que ce type d'architecture est issu d'une synthèse d'un ensemble de paramètres et de facteurs qui résultaient des bâtiments ayant en commun la manière de s'élaborer, mais pas nécessairement les caractères physiques. Ces bâtiments ont été identifiés par

plusieurs dénominations différentes (primitif, indigène, domestique, rural, populaire ... etc.).

En effet, la définition de l'architecture vernaculaire s'avérait intéressante, pour les architectes, ainsi que pour les ethnologues, les historiens, les sociologues et les archéologues. Le recours à ces compétences diverses a permis d'établir les processus de morphogenèses qui dictent la forme du bâti vernaculaire, tout en les classant en trois familles ; homme, site, et matériau, qui ont été présentés dans la charte du patrimoine bâti vernaculaire.

L'interprétation de plusieurs modèles différents de maisons vernaculaires à travers le monde, par l'étude de chaque architecture et chaque situation particulière a permis de comprendre le rôle des facteurs qui entraînent en jeu lors de la création de la forme architecturale vernaculaire. Or, certains facteurs semblaient déterminants d'une forme et modifiants d'une autre. Toutefois, la prise en considération de chaque facteur a apporté des solutions types à des problèmes donnés et a répondu nécessairement aux besoins transcendants des communautés dans leurs environnements.

Ces problèmes ont permis la création des pratiques alternatives évoquant trois facteurs (le remploi des matériaux locaux, la prise en compte du milieu ; géographie et climat, et le respect de l'identité culturelle), qui font appel aux piliers de développement durable ; l'équité sociale, la préservation de l'environnement et efficacité économique. Dans un recueil sur ces pratiques vernaculaires, un terme dit 'bioclimatique' est apparu, déterminant l'architecture qui tient compte l'environnement. Ce terme porte une attention particulière sur l'exploitation des caractéristiques de l'environnement dans la conception architecturale.

En considérant ces constats, le chapitre suivant visera à étudier les solutions environnementales de la conception vernaculaire, afin de comprendre en profondeur les différentes applications techniques développées par l'homme primitive en réponse à son climat local.

CHAPITRE 2
L'ASPECT BIOCLIMATIQUE DE
L'HABITAT VERNACULAIRE

CHAPITRE 2 :

L'ASPECT BIOCLIMATIQUE DE L'HABITAT VERNACULAIRE

Ce chapitre s'attache, tout d'abord, à mettre en évidence le concept de bioclimatisme, tout en apercevant ses paramètres. Il apporte certaines connaissances permettant l'intégration de l'habitat dans son milieu et la réduction de son impact sur l'environnement, afin de comprendre ses interactions avec le climat et le corps humain, notamment celles thermiques.

Une attention toute particulière est portée sur l'objectif principal de ce concept ; le confort thermique. Ce chapitre couvre ce terme, en déterminant ses approches, ses normes et réglementations, afin de faire ressortir ses stratégies passives fondamentales, par l'analyse des exemples d'habitat vernaculaire, faisant partie de différentes zones climatiques.

De nos jours, ces stratégies font l'objet des outils d'aide à la prise de décision, pouvant servir de supports pour la conception des bâtiments à haute efficacité énergétique. Or, ce 2^{ème} chapitre présente un aperçu général sur ces outils en mettant davantage l'accent sur les principes sur lesquels reposent leurs performances et leurs limites.

1. Qu'entend-on par le « bioclimatisme » ?

Le bioclimatisme a été défini, pour la première fois, par Victor OLGAY, dans son ouvrage 'Design with climate : a bioclimatic approach to architectural regionalism' paru en 1963², en tentant de rétablir un rapport, entre le bâtiment et son environnement naturel, notamment le climat, la lumière, le son, l'espace et l'animation qui sont des paramètres qui peuvent influencer directement sur le corps humain [11]. Ce terme désigne la conception d'un bâtiment qui s'inscrit pleinement dans son environnement, en tenant compte de plusieurs facteurs : la topographie, la végétation, les étendues d'eau (lac, mer, etc.), le vent et la course du soleil [11, 115, 116]. L'objectif principal de cette approche est d'améliorer le confort de

²Le bioclimatisme est "un principe de conception architecturale visant à utiliser, au moyen de l'architecture elle-même, les éléments favorables du climat en vue de la satisfaction des exigences du confort thermique". [366, p. 119].

l'occupant, de la manière la plus naturelle possible, et de minimiser, voire d'éviter, le recours aux systèmes actifs de chauffage, de ventilation et de climatisation, autrement dit, la consommation énergétique, en s'adaptant, aux mieux, aux caractéristiques du lieu et en utilisant ses potentiels.

En bref, cette approche propose des solutions, des stratégies et des techniques architecturales passives qui tiennent compte des interactions entre le climat et l'écosystème. Ces solutions permettent de chauffer, rafraîchir et de ventiler la maison, autrement dit, de créer un microclimat intérieur respectant davantage le confort thermique des occupants, qui dépend essentiellement des apports et des contraintes de l'environnement, ainsi que des régulations thermiques du corps humain.

1.1 Le climat, un critère essentiel de bioclimatisme

En effet, chaque région du monde est caractérisée par un ensemble des circonstances atmosphériques qui se déterminent par l'interaction de plusieurs éléments météorologiques [117]. Par souci de simplification et selon la terminologie, les scientifiques employaient le terme 'climat' pour désigner ces circonstances.

LIEBARD et DE HERDE [115] ont considéré le climat comme un élément critique dans la création de l'habitat bioclimatique. La température, l'humidité, les précipitations, la vitesse du vent, l'ensoleillement et la pression atmosphérique, constituent les principaux éléments du climat, contribuant à la détermination de l'environnement physique que l'homme vise à corriger par la construction. C'est également selon ces éléments, que la classification climatique mondiale a été faite ; l'interaction entre la température et l'humidité a permis, selon OLIVER [118], de diviser le globe terrestre en neuf zones climatiques. Cependant, selon LIEBARD et DE HERDE [115], l'interaction entre ces deux éléments a permis d'identifier cinq types de climats ; tropical, sec, tempéré chaud, tempéré froid et climat froid. D'autres grands types de climats différents ont également été identifiés par l'interaction entre la précipitation et la température : équatorial, aride, tempéré chaud, boréal et climat polaire (Figure 2.1) [119].

Cette diversité climatique dans l'espace (lieu géographique) et dans le temps (période de l'année) a permis, en fait, la création de dizaines de stratégies architectoniques pour maintenir, à la fois, l'équilibre entre le corps humain, le

bâtiment et son environnement. D'ailleurs, dans les climats arides, le but était de diminuer la pénétration et l'absorption de chaleur et d'amortir les fluctuations non désirées de température. En revanche, l'optimisation des gains de chaleur et la réduction de sa déperdition étaient les objectifs les plus visés dans les milieux froids. En outre, la régulation et l'évacuation de l'humidité à l'intérieur du bâtiment présentaient le premier souci dans les zones humides, contrairement, aux régions sèches, où l'humidification de l'air s'avérait indispensable, pour obtenir un taux d'humidité plus ou moins adéquat dans le bâtiment.

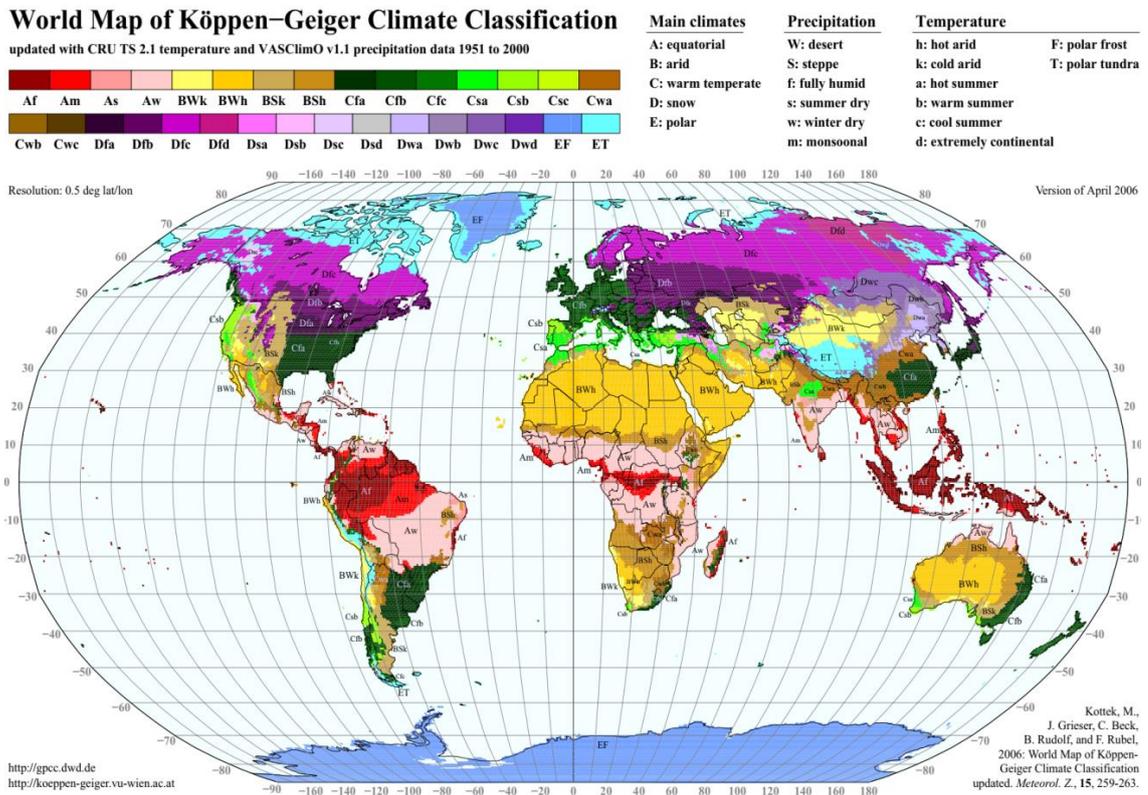


Figure 2.1 : Classification climatique de Köppen-Geiger [119].

1.2 Interaction entre le corps humain et l'environnement extérieur

Le corps humain est composé d'un système largement ouvert échangeant de l'énergie (sous forme de chaleur) avec le milieu extérieur. Sa température interne doit toujours être de l'ordre de 37°C, afin d'assurer le bon fonctionnement de l'organisme [120]. L'épiderme (la couche superficielle de la peau) constitue la première barrière qui permet de limiter cet échange, afin de maintenir le corps à une température constante d'une manière physiologique grâce à la thermorégulation. La température de ce tissu cutané est comprise entre 30 et 33°C [121], dont chaque écart de température peut être ressenti par des thermorécepteurs (terminaisons

nerveuses sensibles aux variations de température extérieure) qui se répartissent sur toute la surface de la peau. Ces thermorécepteurs sont responsables de la transmission des signaux nerveux au cerveau qui les traite, par la suite, et réagit pour maintenir l'homéothermie du corps [122].

En effet, l'échange thermique de l'organisme avec l'environnement se fait par plusieurs phénomènes physiques. Au niveau de l'épiderme, l'échange peut se faire par convection, conduction, évaporation (cutanée et respiratoire) et rayonnement (Figure 2.2). La température ressentie peut varier en fonction du climat (température de l'air, température de rayonnement, humidité relative et vitesse de l'air), des vêtements qui sont considérés comme une seconde peau, et de l'activité métabolique (l'état thermique dans lequel l'individu se trouve).

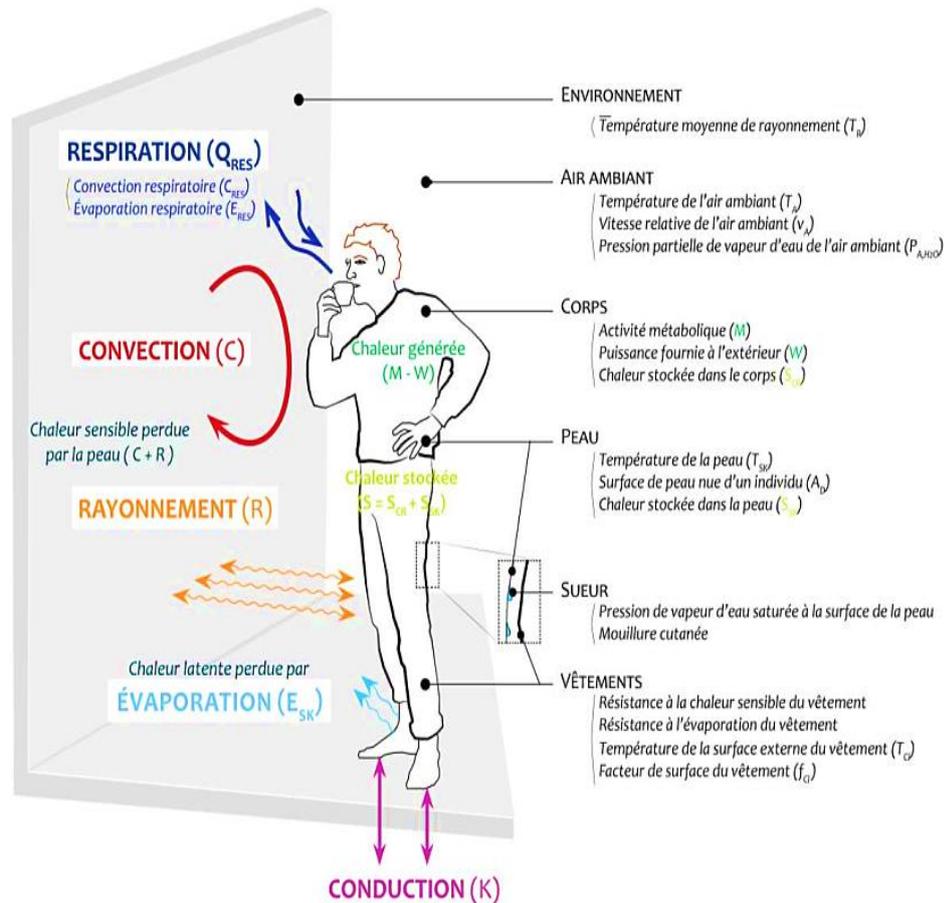


Figure 2.2 : Interaction thermique entre le corps humain et son environnement [123].

Par ailleurs, les conditions de confort préférées peuvent être obtenues en anticipant l'inconfort par la modification de comportement, autrement dit, par la thermorégulation comportementale. Cette dernière peut être effectuée en changeant la tenue vestimentaire, la température du local, ou l'activité métabolique.

Cela permet d'adapter la résistance thermique du corps humain aux conditions climatiques dans lesquels il se trouve, et par conséquent, de limiter les réactions physiologiques [124].

Désormais, les innovations technologiques (systèmes de chauffage et de climatisation) peuvent également contribuer à la thermorégulation, elles permettent une stabilité de la température du milieu extérieur, et par conséquent, une régulation de température corporelle. L'utilisation de ces systèmes s'avère nécessaire dans les conditions climatiques extrêmes (vagues de froid, canicule, etc.), afin d'éviter les risques d'hypothermie et d'hyperthermie (diminution et augmentation de la température corporelle, respectivement).

1.2.1 Le bilan thermique de l'organisme humain

Le maintien de l'homéothermie nécessite un équilibre entre les gains et les pertes de chaleur du corps humain, disons l'équilibre entre la thermolyse (refroidissement du corps) et la thermogenèse (réchauffement du corps). Le rapport entre ces deux paramètres permet de déterminer le bilan thermique [124], qui peut résulter trois situations : l'augmentation de la thermolyse, dont le corps doit se réchauffer, la diminution de cette dernière, dont le corps doit se refroidir, et l'homéothermie, dont le bilan thermique est nul et la réaction physiologique est limitée.

En outre, la chaleur libérée du corps humain peut également être le résultat d'une activité physique. Cette énergie métabolique, déclare JOHNSON [125], peut varier selon le climat, l'habillement, le type d'activité, l'âge, le sexe, les hormones, et plusieurs d'autres facteurs. Cette dernière doit toujours être prise en considération lors de l'estimation du bilan thermique du corps humain ; elle peut être déterminée à partir de la classification par catégorie d'activité détaillée dans la norme ASHRAE [24] (Tableau 2.1). Or, c'est à partir de ces différents mécanismes physiologiques que le bilan thermique passif du corps humain³ peut être déduit [126, 127].

$$M - W = C + R + K + E_{SK} + C_{RES} + E_{RES} + S \quad (\text{Eq 2.1})$$

³ Le bilan selon lequel la production de chaleur du corps humain est compensée par les échanges de chaleur au niveau de l'épiderme.

Où :

- **M** : Activité métabolique, W/m^2
- **W** : Puissance fournie à l'extérieur, W/m^2
- **C** : Échanges de chaleur par convection, W/m^2
- **R** : Échanges de chaleur par rayonnement, W/m^2
- **K** : Échanges de chaleur par conduction, W/m^2
- **E_{SK}** : Échanges de chaleur par évaporation de la sueur, W/m^2
- **C_{RES}** : Échanges thermiques par la convection respiratoire, W/m^2
- **E_{RES}** : Échanges thermiques par l'évaporation respiratoire, W/m^2
- **S** : Chaleur stockée à la surface de la peau, W/m^2

Tableau 2.1 : Métabolisme du corps humain en fonction de l'activité physique [24].

Activité physique	Métabolisme énergétique (M)	
	Met	W/m^2
Endormi	0.7	40
Allongé	0.8	45
Assis	1	60
Activité sédentaire	1.2	70
Activité légère, debout	1.6	90
Activité moyenne, debout	2	115
Marche à plat (3.2km/h)	2	115
Marche à plat (4.3km/h)	2.6	150
Marche à plat (6.2km/h)	3.8	220

De ce fait, dans un environnement équilibré ou même froid, l'être humain faisant une activité physique de forte intensité, disons sportif, est capable de se sentir inconfortable, notamment chaud, afin que le thermorégulateur physiologique refroidisse son corps en évacuant la chaleur par convection. Quant à celui qui souffre, par exemple, de la thyroïde, la sensation de chaleur se traduit par le trouble hormonal que cette maladie procède. En outre, porter des vêtements lourds pendant l'été génère également la sensation de déséquilibre thermique, du fait que ce type d'habillement est associé, à tort, uniquement à la période hivernale, dont il procure une isolation thermique et par conséquent limite le transfert du froid par convection ou par conduction. Ces phénomènes confirment les travaux du FANGER [126] qui se poursuivent toujours, et qui montrent qu'il s'avère impossible de

satisfaire plusieurs personnes simultanément, en réunissant les meilleures conditions de confort.

1.3 Le bâtiment, la troisième peau de l'être humain

Le bâtiment présente la troisième frontière séparant le corps humain de l'environnement extérieur, après la peau et la tenue vestimentaire. Il est considéré comme un élément déterminant de confort thermique, puisqu'il est soumis à de nombreux phénomènes physiques, notamment aux échanges thermiques qui se font principalement par convection, conduction et rayonnement (Figure 2.3). Ces transferts d'énergie dépendent essentiellement des caractéristiques du bâtiment (forme, situation géographique, orientation, etc.), et des conditions météorologiques extérieures (température et vitesse de l'air, l'humidité relative et le rayonnement solaire). Or, c'est à partir de ces échanges que le bilan thermique du bâtiment peut être déduit [128].

$$C_b \frac{dT_b}{dt} = P_{int} \pm P_{gc} + \Phi_{sol} \pm \Phi_{env} \pm \Phi_{air} \quad (\text{Eq 2.2})$$

Où :

- C_b : Capacité thermique du bâtiment, J/°C
- T_b : Température moyenne du bâtiment, °C
- t : Temps, s
- P_{int} : Puissance produite par les apports internes, W
(Êtres humains, éclairage, électroménager, informatique, etc.)
- P_{gc} : Puissance produite par les systèmes du génie climatique, W
(Positive pour le chauffage et négative pour la climatisation)
- Φ_{sol} : Apports solaires transférés à travers les vitrages, W
- Φ_{env} : Apports thermiques transférés à travers l'enveloppe, W
- Φ_{air} : Apports thermiques transférés liés au renouvellement d'air, W

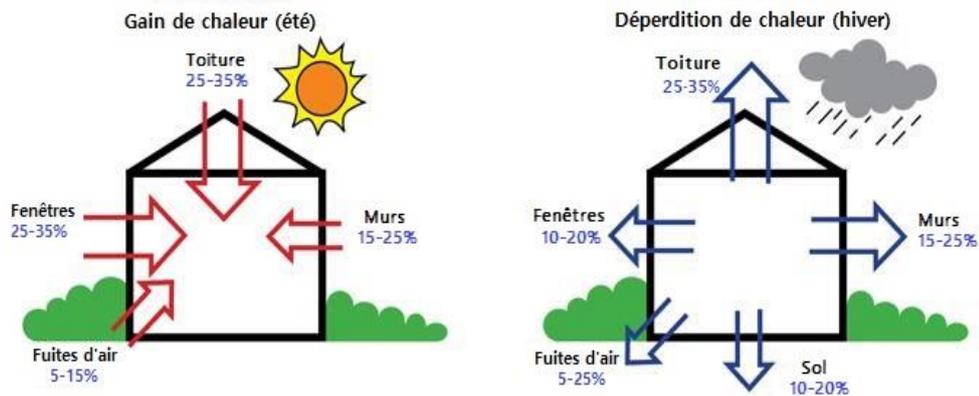


Figure 2.3 : Echanges thermiques dans le bâtiment [129].

En outre, la déperdition d'énergie (de chaleur ou du froid) dépend également des matériaux de construction constituant l'enveloppe du bâtiment et leurs caractéristiques (conductivité thermique, épaisseur, résistance thermique, capacité thermique, etc.). Ces derniers sont responsables de la température des parois qui influe autant sur la température ressentie par l'occupant, dite opérative (Eq 2.3), et par conséquent, sur les besoins en chauffage ou en refroidissement dans la construction [24].

$$T_0 = (T_a + T_r)/2 \quad (\text{Eq 2.3})$$

Où :

- T_0 : Température opérative, °C
- T_a : Température de l'air, °C
- T_r : Température moyenne radiante des parois, °C

1.4 Notion du confort thermique de l'occupant

Le confort thermique est une sensation de bien-être, qui provient de l'équilibre entre la température corporelle est celle de l'ambiance, autrement dit, c'est d'avoir un bilan thermique nul, et par conséquent, des réactions physiologiques limitées. Il est également défini comme étant un état de satisfaction psychophysique quant à l'ambiance thermique [115]. En outre, être satisfait, c'est pouvoir répondre subjectivement (en position assise ou en effectuant une activité légère) par 'je me trouve dans une situation que j'en souhaite garder' sur ces trois principales questions : est-ce que j'ai chaud ou froid ? ... est cette ambiance agréable ou non ?... et est-il préférable de changer de comportement (avoir plus chaud ou avoir plus froid) ? [120].

1.4.1 Approche analytique (statique)

FANGER [126] a traduit les conditions de cette sensation de bien-être en chiffre, afin de satisfaire le plus grand nombre de personnes. Son étude a été basée sur l'évaluation de degré de satisfaction de 1300 personnes en chambres climatiques, portant de différents habits, effectuant de différentes activités, dans des ambiances thermiques stationnaires homogènes. Ceci a lui permis d'établir un indice qui prévoit l'appréciation moyenne du confort (dite PMV : Vote Moyen Prévisible) sur une échelle graduée de -3 (trop froid) à +3 (trop chaud), dont la sensation de confort est atteinte lorsque le PMV correspond à zéro (Figure 2.4) [24].

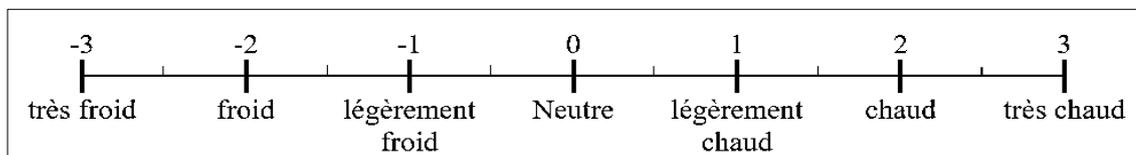


Figure 2.4 : Echelle d'appréciation des conditions thermique d'ASHRAE [24].

Cet indice est exprimé en reprenant l'équation du bilan thermique (Eq 2.4). Cependant, sa formule empirique n'est recommandée d'être utilisée que dans des intervalles précis (Tableau 2.2).

$$PMV = (0.303 \exp(-0.036M) + 0.28 [M - W - 0.00305 (5733 - 6.99 (M - W) - P_v)] - 0.42 (M - W - 58.15) - 0.000017M (5876 - P_v) - 0.0014M (307 - T_A) - (R + C) \quad (\text{Eq 2.4})$$

Où :

- T_A : Température de l'air ambiant, °C
- P_v : Pression partielle de vapeur d'eau, Pa
- M : Activité métabolique, W/m²
- W : Puissance fournie à l'extérieur, W/m²

Tableau 2.2 : Intervalles des paramètres qui interviennent dans l'indice PMV [130].

Paramètre de base	Intervalle
Métabolisme	46 à 232 W/m ² (0.8 à 4Met)
Résistance thermique d'habillement	0 à 0.310 m ² .°C/W (0 à 2Clo)
Température de l'air	10 à 30°C
Température moyenne de rayonnement	10 à 40°C
Vitesse de l'air	0 à 1m/s
Pression partielle de vapeur d'eau	0 à 2700Pa

La méthode de FANGER, a également lié le vote moyen prévisible à un autre indice qui prévoit le pourcentage de personnes insatisfaites (PPD) dans les conditions climatiques considérées (Eq 2.5), précisément, le pourcentage des personnes dont le vote aura été hors l'intervalle [-1,+1]. Cet indice prévoit qu'il est impossible de définir les conditions climatiques qui conviennent à tous, et qu'il reste au mieux 5% d'insatisfait pour un PMV neutre [115].

$$PPD = 100 - 95 \exp[-(0.03353PMV^4 + 0.2179PMV^2)] \quad (\text{Eq 2.5})$$

En effet, ce modèle a permis de développer la norme française et internationale NF EN ISO7730 qui l'adoptait. En outre, il a été intégré dans la réglementation américaine (ASHRAE Standard 55) qui a devisé, à la base de ce modèle, la sensation de confort thermique en trois classes (Tableau 2.3).

Tableau 2.3 : Classes de confort thermique en fonction de PPD et PMV [24].

Classe de confort	PPD	PMV
A	< 6	- 0.2 < PMV < +0.2
B	< 10	-0.5 < PMV < +0.5
C	< 15	-0.7 < PMV < +0.7

Comme évoqué, ce modèle ne parvient à déterminer la situation du confort que dans des conditions climatiques stables et homogènes (intervalles restreints) ; pour cela, il a été associé à un autre modèle, dit à deux nœuds, qui a été développé par GAGGE [131] en simplifiant le modèle de 25 nœuds développé par STOLWIJK [132]. Ce modèle statique consiste à déterminer les paramètres physiologiques du corps humain liés à la sensation thermique, notamment, la température effective⁴ (ET), qui se compare, par la suite, avec les plages de température standard effective (SET), qui sont présentées dans le tableau 2.4.

La combinaison de ces derniers modèles a permis de développer un nouvel indice (PMV*), en remplaçant la température opérative T_o dans l'équation de PMV (précisément dans le calcul d'échange de chaleur) par la température effective (ET) [133].

Plusieurs d'autres modèles physiologiques, plus ou moins complexes, ont été développés, afin d'approfondir la prédiction du confort thermique et du

⁴“La température d'une atmosphère calme et saturée qui, en l'absence de rayonnement, produirait le même effet que l'atmosphère en question” [189, p. 68].

comportement de l'individu, en prenant en considération plusieurs paramètres permettant le calcul de la température effective qui est souvent liée à la sensation thermique. Cependant, le modèle de GAGGE, reste le modèle le plus utilisable, jusqu'à l'heure actuelle [134].

Tableau 2.4 : Relation entre l'indice SET et la sensation thermique [133].

SET (°C)	Sensation	L'état physiologique d'une personne sédentaire
> 37.5	Extrêmement chaud, très inconfortable	Echec de régulation
34.5 - 37.5	Très chaud, très inacceptable	Sudation profuse
30.0 - 34.5	Chaud, inconfortable, inacceptable	Sudation
25.6 - 30.0	Légèrement chaud, légèrement inacceptable	Sudation légère, vasodilatation
22.2 – 25.6	Confortable et acceptable	Neutralité
17.5 – 22.2	Légèrement froid, légèrement inacceptable	Vasoconstriction
14.5- 17.5	Froid et inacceptable	Refroidissement ralenti du corps
10.0 – 14.5	Très froid, très inacceptable	Frisson

1.4.2 Approche adaptative

Le confort adaptatif provient de l'idée que l'individu s'adapte, physiologiquement, comportementalement et psychologiquement, aux conditions thermiques de l'environnement dans lequel il se trouve, afin de maintenir une sensation de satisfaction et de bien-être. En contrepartie aux modèles analytiques (qui ont été critiqués par leur manque de précision par HUMPHREYS & FERGUS [135], notamment dans le cas des bâtiments naturellement ventilés), l'approche adaptative est une méthode basée sur les enquêtes sur terrain ; elle prévoit les conditions thermiques standards qui peuvent conduire l'individu à une sensation du confort.

En effet, cette méthode empirique dynamique a été principalement développée à la base de deux projets [134]. Il s'agit de projet américain RP-884 de l'ASHRAE, et du projet européen SCATs, qui sont aujourd'hui intégrés, respectivement, dans la norme ASHRAE standard 55 et NF EN 15251.

Le premier projet a été réalisé par DE DEAR, BRAGER, et COOPER en 1997. Il a été basé sur la collecte de 21000 observations d'ambiance thermique dans 160 bâtiments à travers le monde. Cette étude a permis de dégager les réponses subjectives de l'individu sur son ambiance architecturale et son environnement

thermique extérieur, qui forment une base de données large prenant en considération les facteurs physiologiques, comportementaux et psychologiques. Cette base de données classe les bâtiments selon leurs types de ventilation ; mécanique centrale (contrôlée) ou naturelle [136], et propose leurs modèles adaptatifs (Figure 2.5, Figure 2.6).

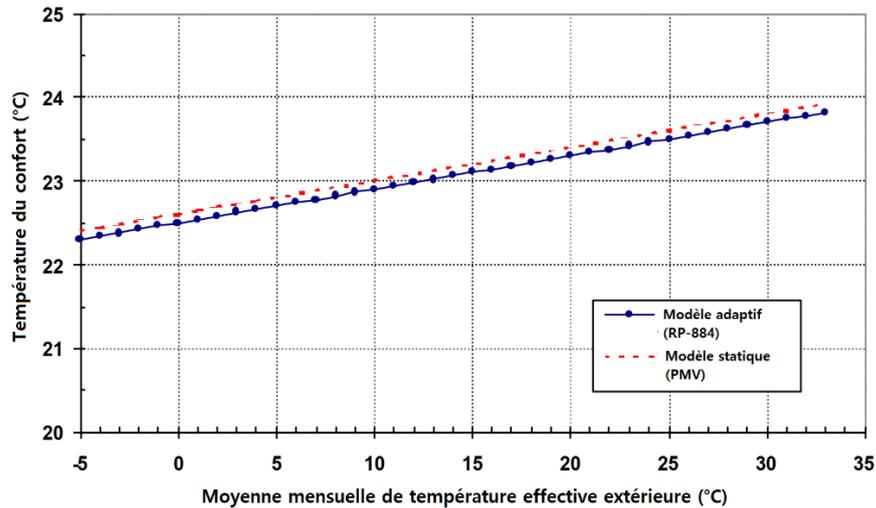


Figure 2.5 : Modèle adaptatif proposé par le projet RP-884, pour les bâtiments à ventilation mécanique centrale [136].

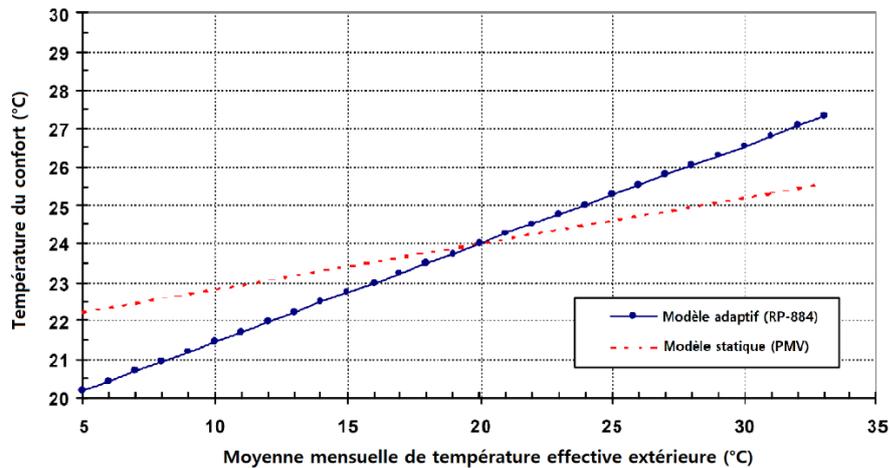


Figure 2.6 : Modèle adaptatif proposé par le projet RP-884, pour les bâtiments à ventilation naturelle [136].

Cependant, le projet SCATs (smart control and thermal comfort) a été mené par MCCARTNEY et FERGUS [137] sur 26 bâtiments dans 5 pays européens (France, Grèce, Portugal, Suède et Royaume-Uni), ce projet a permis de mettre en œuvre une méthode de réduction de dépenses énergétiques dans les bâtiments climatisés, en développant le système de régulation ACA (algorithme du contrôle adaptatif, Tableau 2.5) basé sur l'approche adaptative du confort thermique [137].

Tableau 2.5 : Algorithme du contrôle adaptatif développé par le SCATs [137].

Pays	Algorithme de contrôle adaptatif	
	$T_{MR80} \leq 10$	$T_{MR80} > 10$
France	$0.049 \times T_{MR80} + 22.85$	$0.206 \times T_{MR80} + 21.42$
Grèce	n.a	$0.205 \times T_{MR80} + 21.69$
Portugal	$0.381 \times T_{MR80} + 18.12$	$0.381 \times T_{MR80} + 18.12$
Suède	$0.051 \times T_{MR80} + 22.83$	$0.051 \times T_{MR80} + 22.83$
Royaume-Uni	$0.104 \times T_{MR80} + 22.58$	$0.168 \times T_{MR80} + 21.63$
Tout	22.88°C	$0.302 \times T_{MR80} + 19.39$

1.4.3 Le confort thermique dans les normes internationales

Le confort thermique a fait l'objet de plusieurs réglementations prescrivant des méthodes d'évaluation des ambiances thermiques qui se basent, à la fois, sur l'enquête sociologique et les mesures in situ par instrumentation. L'utilisation de ces normes permet d'améliorer les conditions thermiques des bâtiments et de réduire leurs dépenses énergétiques.

À la base de l'approche statique de FANGER, des normes internationales ont été élaborées par l'organisation internationale de normalisation. La norme dite ISO 7730 fournit des méthodes analytiques (en s'appuyant sur le calcul de PMV et de PPD) permettant la prévision des conditions de confort dans les ambiances thermiques modérées [138]. Cependant, d'autres méthodes de prévision ont été développées pour les ambiances chaudes [139] et froides [140]. Elles sont basées, respectivement, sur le calcul de l'indice WBGT (wet bulb globe temperature) et l'isolement requis vestimentaire [141].

En reposant sur la norme ISO 7730 et plusieurs d'autres, le comité européen de normalisation (CEN) a créé une nouvelle norme, dans le but de réduire la consommation énergétique des bâtiments non industriels. La norme NF EN 15251 [142] énumère les exigences de performance énergétique en matière de qualité de l'air, confort thermique, éclairage et acoustique, elle fournit des méthodes permettant l'évaluation à long terme de l'ambiance intérieure [143].

Par ailleurs, la société américaine des ingénieurs en chauffage, réfrigération et climatisation, a développé un modèle adaptatif dit ANSI/ASHRAE 55 : conditions environnementales thermiques pour occupation humaine, à la base de modèle de GAGGE et celui de DE DEAR, BRAGER, et COOPER. L'objectif de cette norme est

de “spécifier les combinaisons de facteurs environnementaux thermiques à l'intérieur et les facteurs personnels qui produiront des conditions environnementales thermiques acceptables pour la majorité des occupants dans l'espace” [24, p. 4].

Cette norme a fourni trois méthodes déterminant les conditions de confort optimales : la méthode graphique qui se base sur le diagramme psychrométrique (Figure 2.7), la méthode analytique qui utilise le diagramme adaptatif (Figure 2.8) et la méthode de vitesse de l'air élevée. L'utilisation de chacune de ces méthodes est limitée à des conditions strictement précises (Tableau 2.6). En outre, l'ASHRAE 55 fait l'objet d'une révision chaque trois à six ans, sa version la plus récente a été publiée en 2017, mettant à jour celle de 2013 [24].

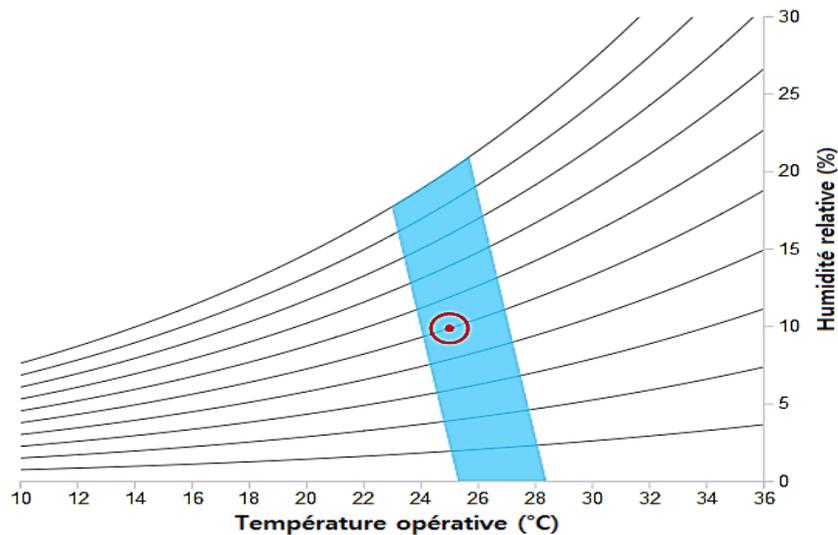


Figure 2.7: Diagramme psychrométrique d'ASHRAE Standard 55 [144].

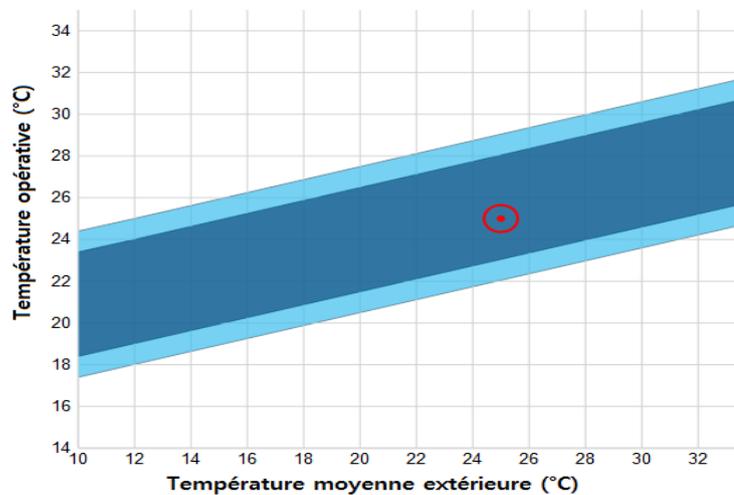


Figure 2.8: Diagramme adaptatif d'ASHRAE Standard 55 [144]

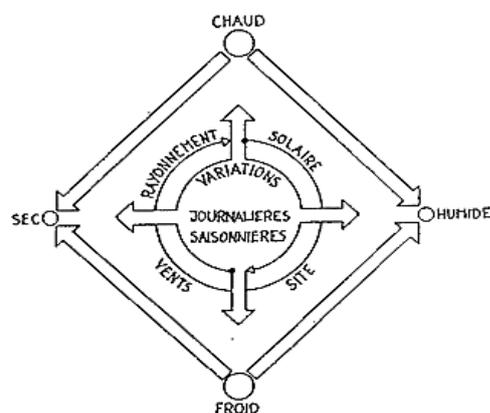
Tableau 2.6 : Les intervalles des méthodes d'ASHRAE [24].

Méthode	Met	Clo	Taux d'humidité (kg-H ₂ O/kg)	Vitesse de l'air (m/s)
Graphique	1.0 à 1.3	0.5 à 1.0	< 0.12	<0.2
Analytique	1.0 à 2.0	0 à 1.5	Tout	<0.2
Vitesse de l'air élevée	1.0 à 2.0	0 à 1.5	Tout	>0.2

Ces normes ont permis d'évaluer des milliers d'exemples d'habitats vernaculaires à travers le monde, afin de prouver leur performance thermique, et par conséquent, leur efficacité énergétique (deux objectifs visés dans la conception bioclimatique). Cependant, la norme ASHRAE standard 55 occupe une position largement prédominante [145], elle est aujourd'hui intégrée dans les logiciels de simulation thermique dynamique.

2. Redécouverte des stratégies bioclimatiques vernaculaires : leçons du passé

“Pour bien disposer une maison, il faut avoir égard au pays et au climat où on veut la bâtir ; car elle doit être autrement construite en Égypte qu'en Espagne, autrement encore au royaume de Pont qu'à Rome, et ainsi toujours en raison des pays, parce qu'il y en a qui sont proches du cours du soleil, d'autres qui en sont éloignés, et d'autres qui sont entre ces extrémités” [146, p. 5]. À partir de cette réflexion et plusieurs d'autres (Chap.1. § 3.1.1) qui la confirment, il convient de retenir que les stratégies architectoniques vernaculaires étaient déterminées par les conditions climatiques propres à chaque région, cette adaptation prend également en compte les variations saisonnières. De ce fait, l'interprétation de ces stratégies doit forcément être fondée sur l'étude du microclimat urbain dans lequel elles étaient optées (Figure 2.9).

**Figure 2.9** : Combinaison des données climatiques fondamentales [147].

2.1 Climat aride (B)

Selon la classification climatique de Köppen-Geiger présentée précédemment (Figure 2.1), on appelle « climat aride », toute région caractérisée par une sécheresse permanente qui dure toute l'année, une évaporation plus importante que les précipitations, une forte amplitude thermique quotidienne (entre les températures diurnes et nocturnes, avec une moyenne annuelle supérieure à 18°C) et un vent constant et souvent fort. Ce terme désigne collectivement les zones désertiques (BWh, BWk) et semi-arides (BSh, BSk) [119].

Pour illustrer le dialogue stratégique portant sur le rapport entre l'habitat vernaculaire et ce type de climat, il convient de relever quelques-uns de ses cas, à savoir ; Shibām au Yémen, la vallée de M'Zab en Algérie, Yazd en Iran et celui de Ksar Ait Ben Hadou au Maroc (des sites font partie du patrimoine culturel mondial de l'UNESCO), dont le premier souci des habitants était d'assurer leur confort en périodes chaudes.



Figure 2.10 : Plan de masse des villages d'habitat vernaculaire. (a) : Ksar Ait-Ben Hadou, (b) : Vallée de M'Zab. [148, 149].

En effet, pour résoudre le problème d'aridité du climat et de fluctuation de températures, les bâtisseurs de ces exemples ont opté pour une protection contre la chaleur, et une meilleure ventilation naturelle. Sur l'échelle urbaine, ces villages sont fondés sur le principe des constructions mitoyennes (souvent sur deux à quatre façades) et des rues étroites serpentineuses ouvertes sur des placettes, ce que résulte des tissus entièrement compacts (Figure 2.10). Cette morphologie participe au confort thermique intérieur comme extérieur ; en ombrageant les ruelles, en évitant

l'immixtion du sable lors des vents, et en réduisant les surfaces exposées aux conditions climatiques hostiles.

À l'échelle architecturale, ces maisons possèdent des formes compactes, souvent carrées ou rectangulaires, et parfois irrégulières, dont un ou plusieurs étages au-dessus de rez-de-chaussée sont élevés, formant des habitations horizontalement étalées à Beni Isguen, Yazd comme à Ait ben Hadou, et des tours à Shibām (Figure 2.11).

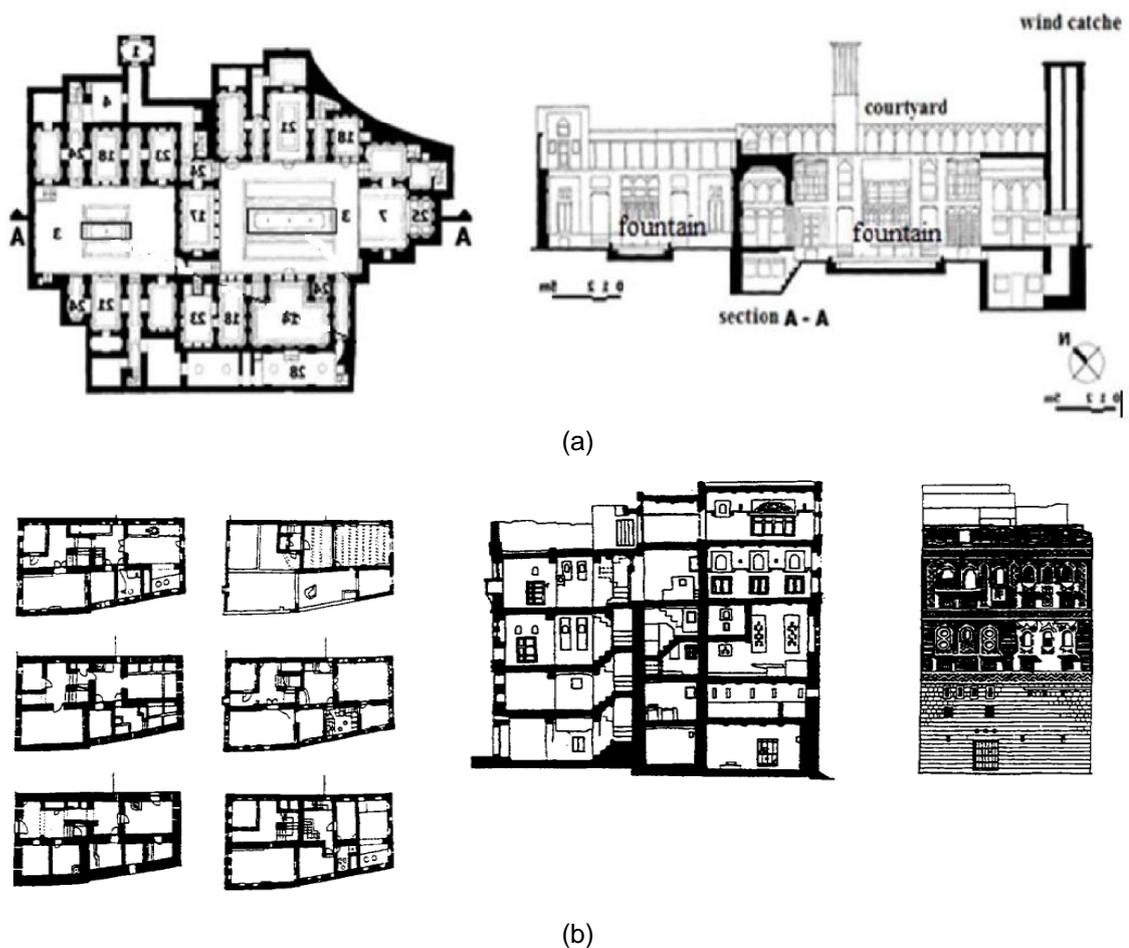


Figure 2.11 : Exemple de maisons vernaculaires de climat aride. (a) : Maison vernaculaire persane (Yazd), (b) : Maison vernaculaire Yéménite (Shibām) [150, 151].

Les maisons horizontales sont caractérisées par leur centralité et introversion, leurs différentes pièces sont organisées autour d'un patio présentant leur seule source (directe ou indirecte) d'éclairage et de ventilation ; celle-ci est assurée par la présence de courant d'air entre la porte d'entrée et l'ouverture de patio. Cette cour centrale, à ciel ouvert, possède souvent une fontaine ou un bassin d'eau et de la végétation, créant un microclimat à l'intérieur de la maison. A cela s'ajoute son

grand ratio H/L, qui permet de maîtriser les rayons solaires directs, et par conséquent de limiter la surchauffe (Figure 2.12). En effet, le patio est un régulateur thermique, il joue le rôle d'espace tampon entre deux climats ; intérieur tempéré et extérieur chaud et sec.

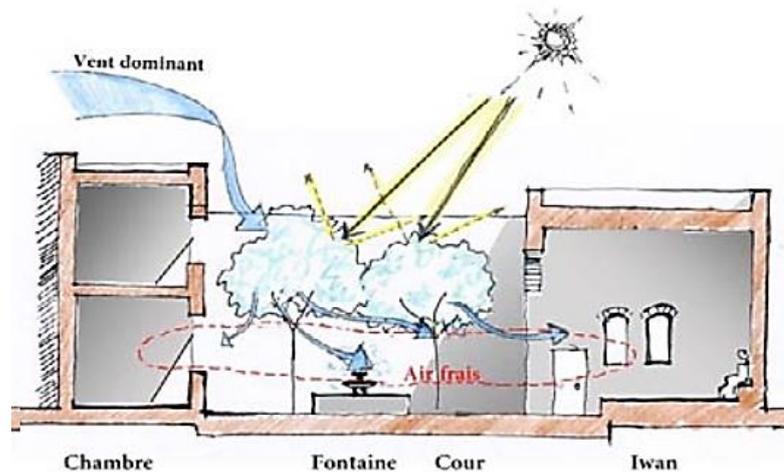


Figure 2.12 : Ventilation naturelle et éclairage par patio [152].

Également, la dimension climatique de ces maisons met en jeu une organisation spatiale permettant de bénéficier de la lumière naturelle, afin d'éviter le soleil trop chaud de l'après-midi. Cette organisation est, en fait, liée à la distribution des activités, dont les espaces de vie sont orientés sud, inversement à ceux de services. Or, la hauteur sous plafond de ces espaces est variée entre 2.7 et 3m.

En particulier, la maison vernaculaire de Shibām est caractérisée par une verticalité (allant jusqu'aux 9 étages de haut, et atteignant les 29.15 mètres de hauteur) qui permet de limiter les gains de chaleur pendant l'été, en réduisant la surface de la toiture par laquelle est transmise la plus grande quantité de chaleur à la maison [150].

Contrairement aux trois exemples précédents, les façades de ces tours sont dotées de grandes fenêtres (Figure 2.11) protégées par un maillage de bois (Moucharabieh) permettant un ensoleillement maîtrisé et une ventilation naturelle transversale (Figure 2.13). Celle-ci est également assurée par un tunnel vertical à ciel ouvert dit 'Manwar' ou 'Shamasah' qui s'étale tout au long du bâtiment, provoquant une circulation et un échange d'air entre l'extérieur et l'intérieur, assuré

par l'effet cheminée (tirage thermique) ; ce dispositif est généralement situé au centre de la maison juste à côté de la cage d'escalier [153].

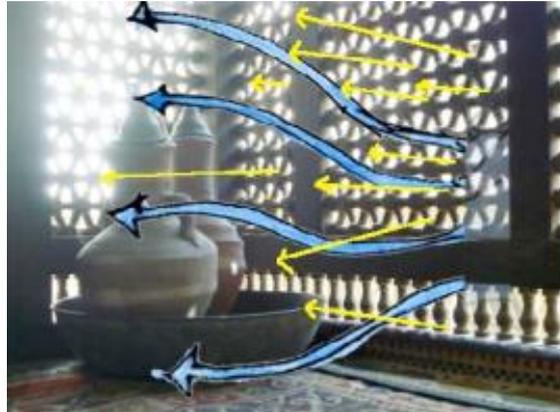


Figure 2.13 : Schéma démonstratif du fonctionnement de moucharabieh [152].

Cette stratégie passive de ventilation s'est traduite dans la maison iranienne et celle marocaine, par un dispositif vernaculaire dit 'Badguir', nommé également 'Malquaf' en Égypte (littéralement 'tour à vent' ou 'attrape-vent') ; il s'agit d'une conduite verticale, (ressemblant à une grande cheminée), dotée de hautes fenêtres verticales faisant face à la direction du vent (Figure 2.14). Cet élément architectural dispose souvent d'un bassin d'eau ou d'un réservoir aménagé dans sa base, permettant un rafraîchissement par évaporation [154].

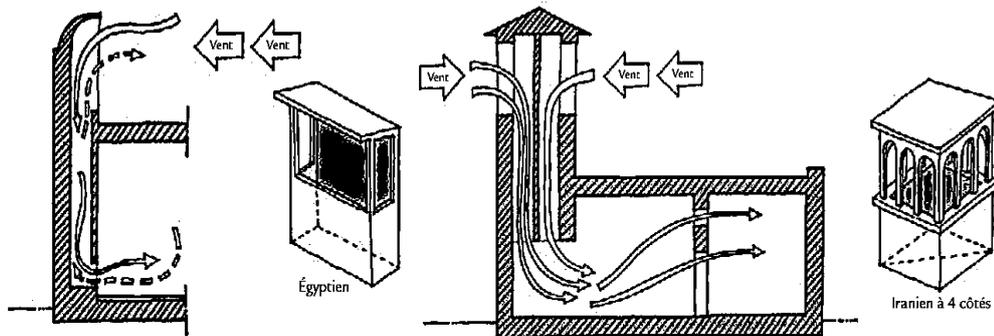


Figure 2.14 : Coupes schématiques des tours à vent [155].

Du plus, les systèmes constructifs vernaculaires se diffèrent d'un cas à un autre. Ces vieilles bâtisses présentent des murs épais constitués de matériaux locaux, notamment, de terre (Shibām, Yazd et Ksar Ait ben Hadou) ou de pierre (la vallée de M'Zab), garantissant un grand déphasage thermique (et une régulation d'humidité - pour le matériau terre). Ils permettent de conserver la chaleur toute la journée et ne la restituer dans la maison qu'en soirée (lorsque la température est plus basse et la ventilation est assurée) ; inversement, ils emmagasinent la fraîcheur

nocturne pour la restituer lorsqu'il fait chaud. Ce principe de déphasage a guidé les habitants à un rythme de vie particulier : nomadisme quotidien, ils montent à la terrasse pendant la nuit et inversement le jour.

Parlons des systèmes de toiture ; la maison persane d'Yazd est dotée d'un plafond en dôme qui dispose d'une bonne isolation (grâce à la brique d'adobe), permettant une réduction de gain de chaleur pendant le jour⁵ et une restitution rapide pendant la nuit⁶ (Figure 2.15), et favorisant la ventilation naturelle des espaces par l'ouverture aménagée souvent au sommet [156]. Cependant, les toitures des restes des exemples sont plates, elles sont réalisées d'ossatures en bois (solive de tronc d'arbre, souvent de palmier) recouvertes de roseaux, d'une couche de terre ou d'argile, puis d'une couche de mortier de chaux (Figure 2.16). Or, ces toitures sont peintes en couleur claire (souvent blanche) afin de diminuer l'absorption de chaleur solaire et par conséquent l'échauffement des maisons (Figure 2.17).

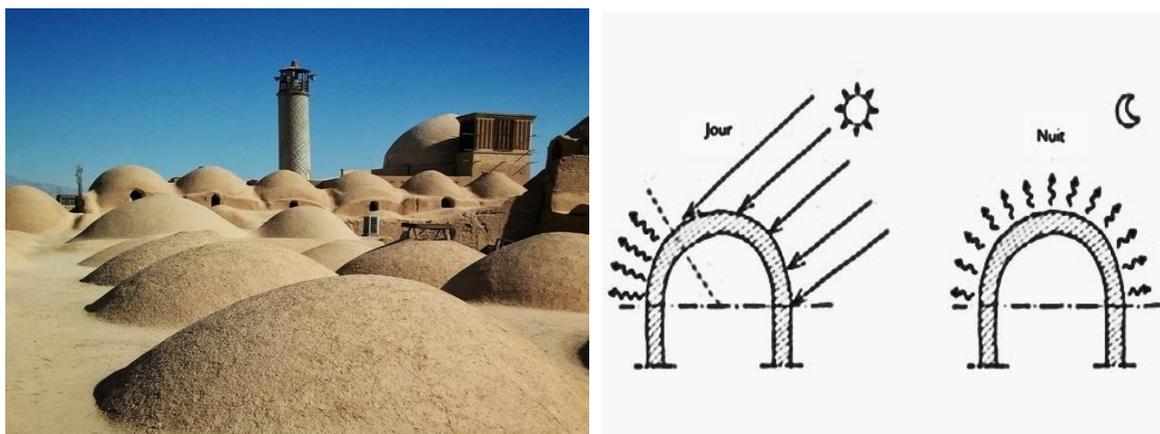


Figure 2.15 : Aspect bioclimatique de toiture en dôme [157, 155].

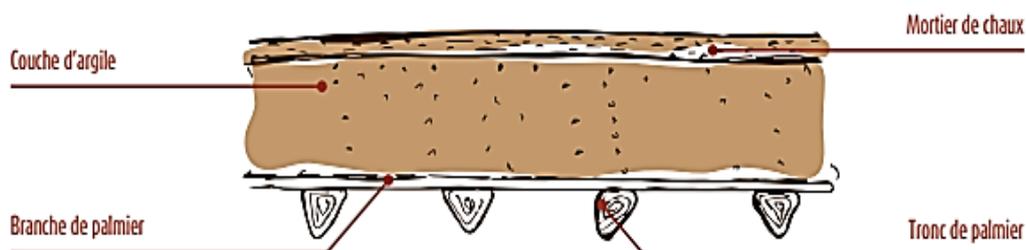


Figure 2.16 : Plancher traditionnel en troncs et branches de palmier [158].

⁵ Une partie du toit est toujours ombragée (excepté à midi). En outre la forme hémisphérique de dôme permet de casser les rayons solaires directs.

⁶ La géométrie du dôme permet d'augmenter la vitesse de flux d'air (effet Bernoulli) ce que facilite le transfert de chaleur par convection.



Figure 2.17 : Choix de couleur aux maisons vernaculaires. (a) : Village de Shibām, (b) : Ksar Beni Isguen. [159, 160].

2.2 Climat tempéré chaud (C)

Une température moyenne comprise entre -3°C et 18°C dans le mois le plus froid, et supérieure à 10°C durant l'été, une forte amplitude de température journalière et une précipitation saisonnière, sont les données climatiques caractérisant le climat tempéré chaud selon la classification de Köppen-Geiger [161]. Ce dernier correspond aux climats : Méditerranéen (Csa, Csb, Csc), subtropicale humide (Cfa, Cwa) et océanique (Cfb, Cfc, Cwb, Cwc), qui se caractérisent, en général, par une saison humide, que ce soit en été ou en hiver.

Le climat tempéré chaud a des spécificités, à la fois, en termes d'ensoleillement, de température, de vent et d'humidité. Les maisons vernaculaires étaient habiles à tirer parti des atouts et des contraintes de ces spécificités, en se protégeant de la chaleur en été et du froid en hiver, des violences du vent et de la pluie, afin d'évacuer l'humidité.

Prenons un exemple d'habitat vernaculaire de climat subtropical humide. Les maisons cycladiques de l'île de Santorin (sud Grèce) sont construites en hauteur épousant le relief abrupt du terrain ; elles forment un tissu urbain compact faisant face à la mer (Figure 2.18), caractérisé par des rues et des ruelles étroites et sinueuses permettant une protection contre la chaleur et les vents.



Figure 2.18 : Village de Santorin [162].

L'habitat de Santorin, généralement de forme rectangulaire avec une toiture de voûtes en berceau, faisait entre 2.5 et 3m de haut (Figure 2.19). L'enveloppe de ce dernier est construite en pierre de lave (d'une épaisseur variée entre 60 à 80cm) couverte de chaux blanche réduisant l'humidité de parois. Elle possède de petites ouvertures aménagées en assurant un ensoleillement maîtrisé et une ventilation naturelle transversale grâce au vent du nord appelé 'Maltemi' [163].

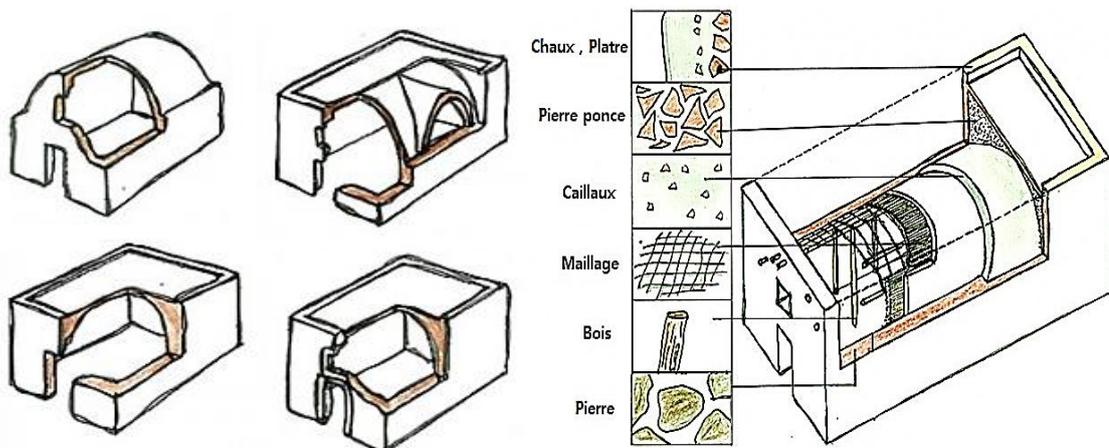


Figure 2.19 : Système constructif des maisons Cyclades grecques [164].

En particulier, le village de Santorin présente un deuxième modèle d'habitat ; des maisons troglodytes profitant des atouts du terrain, notamment de la fraîcheur de roche (Figure 1.20). La ventilation et l'ensoleillement dans ce type de maison se font par des ouvertures aménagées dans son unique façade qui fait face à la mer et dans le toit (Figure 1.21).

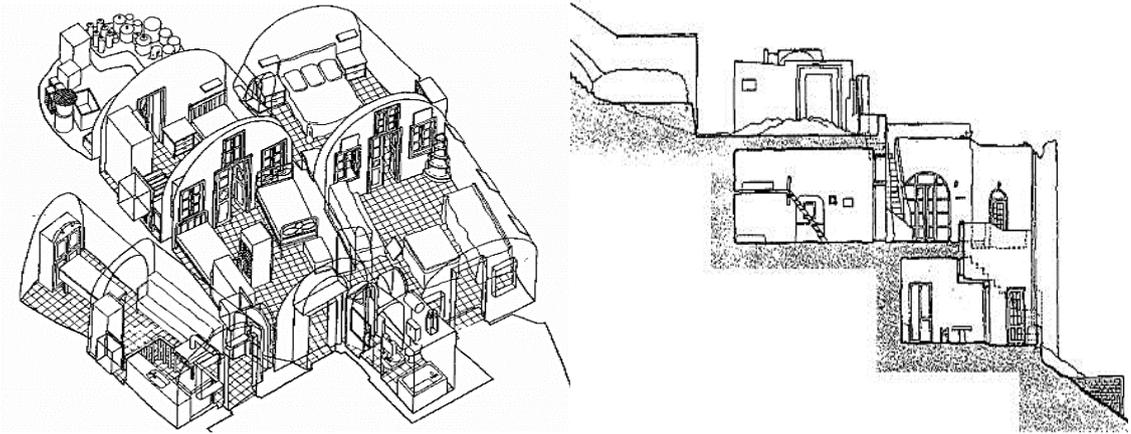


Figure 2.20 : La maison troglodyte de Santorin [163].

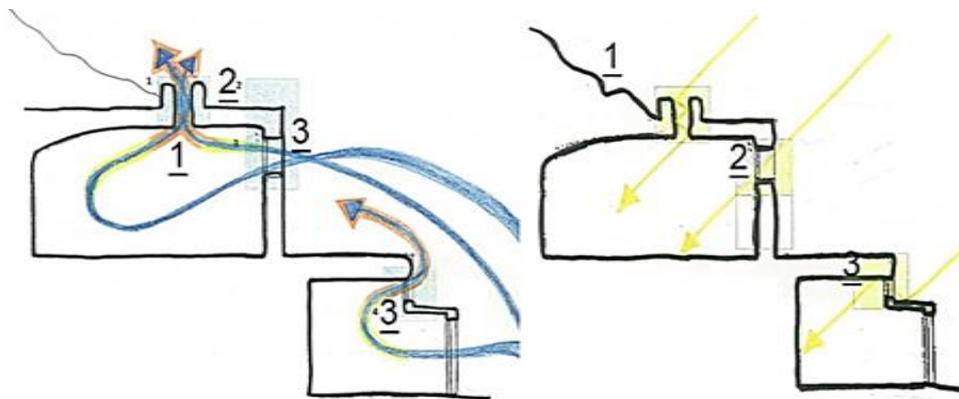


Figure 2.21 : Stratégies de ventilation et d'éclairage dans la maison troglodyte de Santorin [164].

En effet, plusieurs sont les villages vernaculaires construits par les principes de Santorin : se protéger de la chaleur par la compacité du tissu urbain, l'inertie thermique des matériaux de construction, la couleur blanche de l'enveloppe, la réduction des dimensions de fenêtres ; et se rafraîchir naturellement en évacuant l'humidité par la création d'un courant d'air ou par un tirage thermique, en tirant profit de relief. Citons les cas de : la Casbah d'Alger (Algérie), la Casbah des Oudayas et la médina de Tanger, et de Chefchaouen (Maroc), la médina de Sousse et le village de Sidi Bousaid (Tunis) ; des tissus urbains compacts, dotés des maisons à patio, construites en hauteur (Figure 2.22).



Figure 2.22 : Bâti vernaculaire du climat tempéré chaud. (a) : Sidi Bousaid, (b) : Chefchaouen, (c) Casbah d'Alger.

2.3 Climat équatorial (A)

Le milieu équatorial se rencontre aux latitudes proches de l'équateur terrestre. Il est caractérisé par une régularité de température (avec une moyenne annuelle de 27°C), une forte humidité provoquée par les pluies presque quotidiennes, une rareté des vents et une pression atmosphérique basse. Le terme équatorial désigne collectivement les zones tropicales de savane (AW), de mousson (AM) et les forêts décidues humides tropicales (AF) [119]. La sensation d'inconfort dans ces zones est due à la chaleur très humide aggravée par l'absence des mouvements d'air.

Allons voir un autre endroit du monde, bien plus humide, la Malaisie. La maison vernaculaire malaisienne, dite 'Malay', présente une réponse au climat équatorial. Elle s'est construite en servant un certain nombre d'objectifs ; se ventiler naturellement, se protéger des pluies, réduire les gains de chaleur et évacuer l'humidité.

Afin d'atteindre un certain degré de confort thermique, les bâtisseurs malaisiens ont opté pour un tissu urbain peu dense, où les maisons forment des unités distinctes garantissant le passage d'air et préservant sa vitesse (Figure 2.23.a), ce que permet une ventilation naturelle provoquée davantage par la forme de la bâtisse. Cette dernière présente un plan rectangulaire libre (Figure 2.23.b) épousant un socle de pilotis et une toiture ventilée inclinée (Figure 2.24).

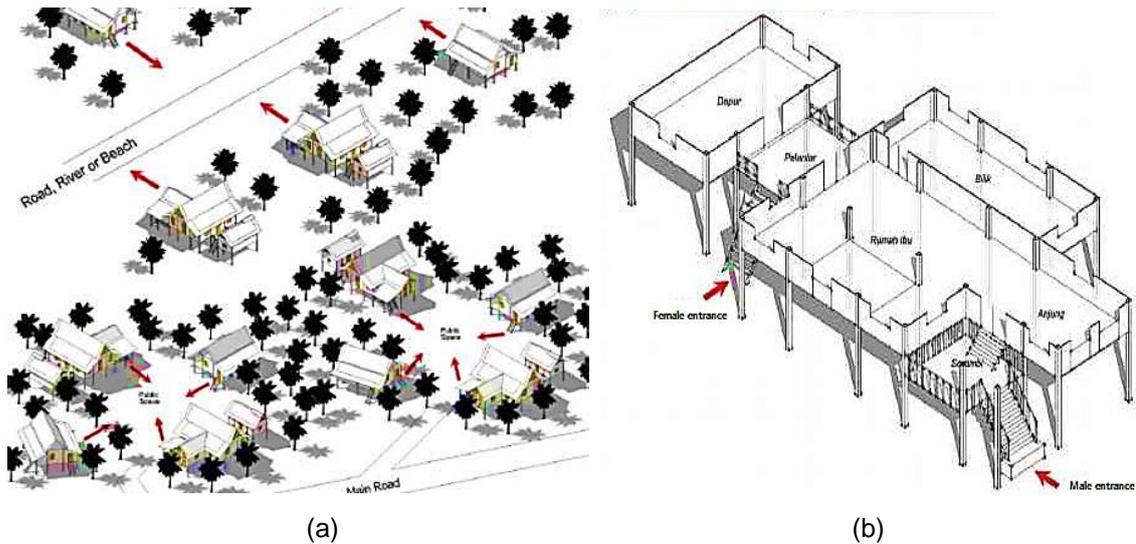


Figure 2.23 : Habitat traditionnel de Malay. (a) : Plan de masse, (b) : Organisation spatiale [165].

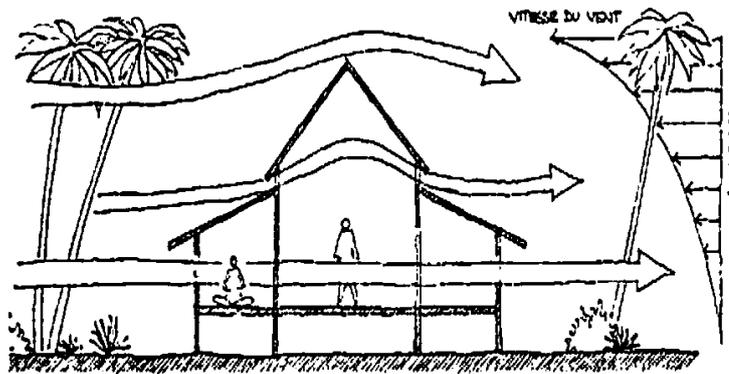


Figure 2.24 : Ventilation naturelle dans la maison Malay [166].

En effet, cette maison est souvent orientée est-ouest, afin de minimiser les surfaces exposées aux radiations solaires directes. Ses façades sont protégées davantage par un large avant-toit en surplomb, qui leur assure également une protection contre les pluies tassées par sa forme inclinée. En outre, cet avant-toit est indispensable pour défendre les fenêtres en pleines longueurs (dédiées à la ventilation) des pluies battantes en rompant leur cheminement (Figure 2.25).

Par ailleurs, la construction de ce modèle de maison consistait à utiliser le bois des arbres tropicaux et le bambou, qui se caractérisent par une faible capacité thermique permettant une bonne isolation contre la chaleur. De plus, ces arbres se trouvent souvent plantés près des maisons Malay, servant à les ombrager tout en préservant la circulation d'air (Figure 2.24).

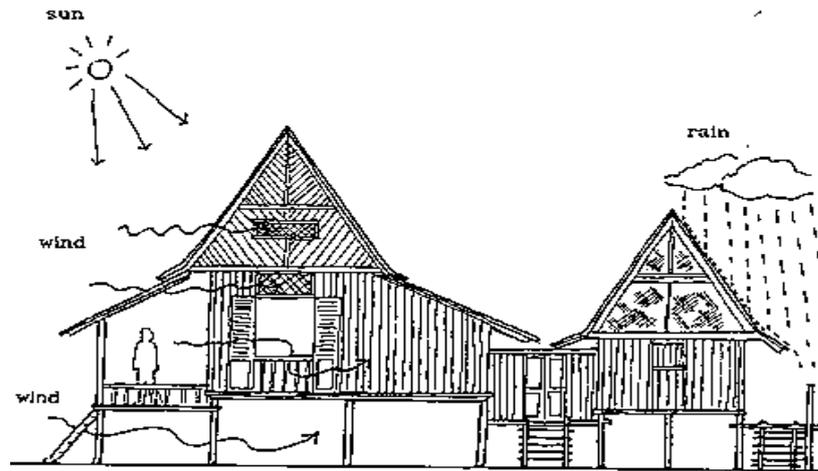


Figure 2.25 : Réponses climatiques de maison traditionnelle Malay [167].

La maison Malay présente une réaction type pour un climat équatorial. Plusieurs sont les exemples d'habitats obéissant aux mêmes principes et conçus selon le même model (Tongkonan et KeratonKasepuhan en Indonésie : village de Sarawak en Malaisie, villages d'Iquitos et de Shipibo-Conibo au Pérou, Village Hmong au Vietnam, les punjis en Inde, etc.).

2.4 Climat polaire (E)

Ce type de climat s'étend sur les régions arctiques et antarctiques. Il se caractérise, tout au long de l'année, par de basses températures (supérieures à 10°C, même au mois le plus chaud), des précipitations rares (elles tombent essentiellement sous forme de neige), des vents violents accompagnés d'une tempête de neige (Blizzard) et un sol gelé en profondeur (Pergélisol). Ce type de climat correspond au climat d'inlandsis ou calotte glaciaire (EF) et celui de toundra (ET) [119].

Sur le même principe de l'Igloo (Chap.1. § 3.1), les Esquimaux d'Angmagssalik (village au Groenland oriental qui se caractérise par un climat de toundra) ont opté pour une réduction maximale de perte de chaleur à travers l'enveloppe du bâtiment. La maison semi-enterrée d'Inuits d'Angmagssalike, construite habituellement sur un terrain accidenté, et adopte une forme souvent rectangulaire et parfois trapézoïdale, possédant un long tunnel (sas thermique) qui mène à une entrée partiellement souterraine, excavée d'environ 60cm (Figure 2.26) [168].

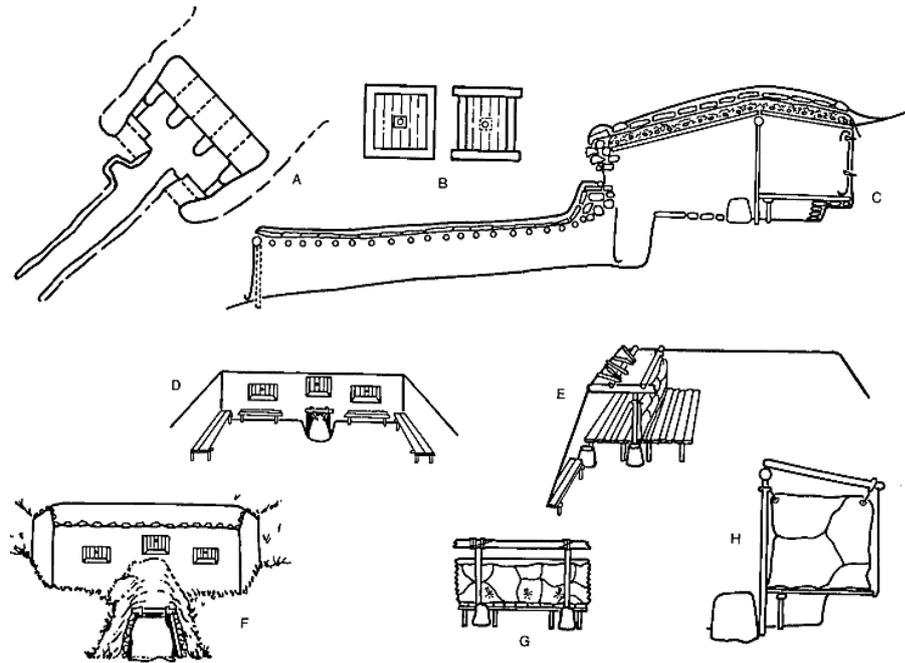


Figure 2.26 : Plan et élévation d'une hutte d'Angmagssalik [169].

Les murs de cette dernière sont en pierre recouverte de gazon ; ils soutiennent des poutres de bois flottées (ou de côtes de baleine) consolidées de terre ou de tourbe, puis recouvertes de peaux, de pierre et enfin de gazon formant une toiture légèrement inclinée ; celle-ci est soutenue également par des poteaux en bois [169].

La hutte d'Angmagssalik assure une température plus ou moins convenable, compte tenu des conditions extérieures extrêmes. La compacité de son volume et l'inertie thermique de son enveloppe permettent de réduire les pertes de chaleur ; cette dernière est fournie par la seule source de chauffage qui peut y exister à l'intérieur : la lampe à huile. En outre, en aménageant la petite conduite d'entrée et l'accès sous forme de siphon, les Esquimaux protègent leurs maisons des vents violents et des blizzards et créent une fosse à froid permettant d'évacuer l'air froid descendant par le mouvement de convection afin de chasser et bloquer l'air chaud à l'intérieur (Figure 2.27).

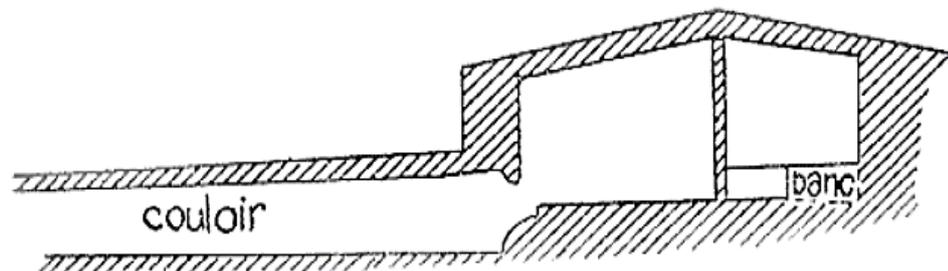


Figure 2.27 : Coupe de la maison vernaculaire d'Angmagssalik [168].

Cet exemple présente un modèle fondamental de maisons vernaculaires de climat polaire ; il est suivi d'une grande variété régionale marquant une diversité dans les matériaux de construction (neige, bois, côte de baleine, pierre) ainsi que dans les formes (dôme, rectangle, trapèze) et gardant les mêmes solutions bioclimatiques (Figure 2.28).

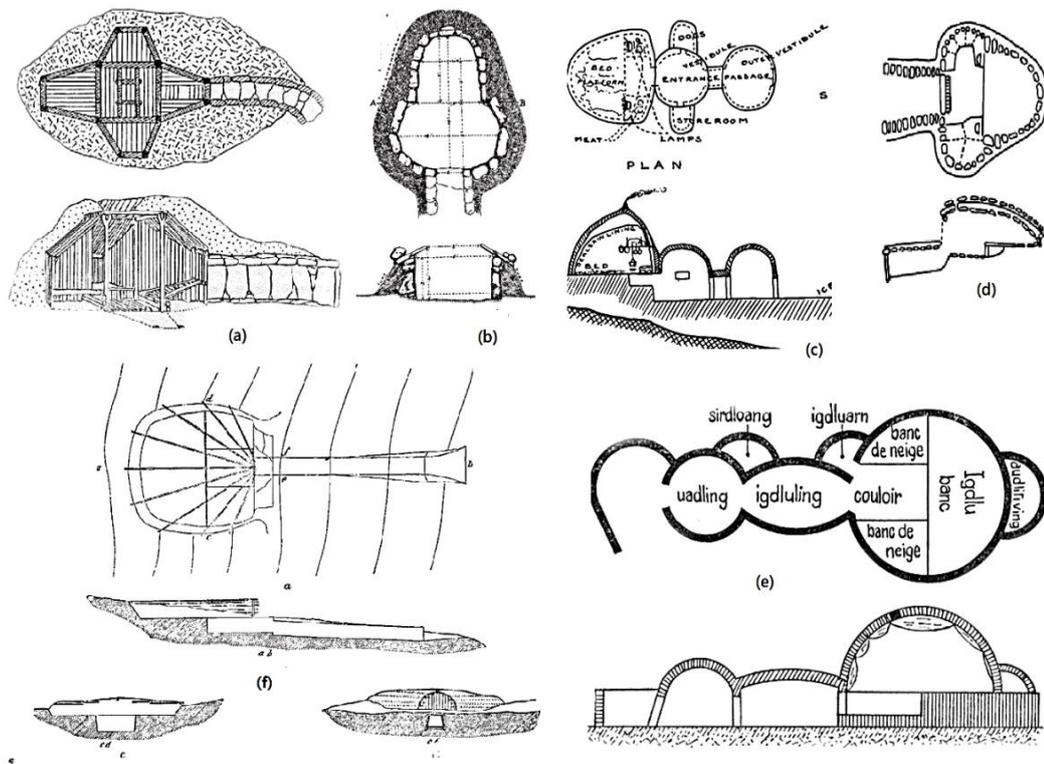


Figure 2.28 : Modèles d'habitat vernaculaire du climat polaire [169, 168].

2.5 Climat boréal (D)

Le climat boréal est un type de climat qui se caractérise par deux saisons ; un hiver long (de 6 à 9 mois) et rigoureux (dont les températures peuvent descendre jusqu'à -50°C) avec des tempêtes de neige et des vents violents, et un été assez court, avec une température moyenne minimale de 10°C et des précipitations très faibles d'un ordre annuel moyen de 380mm. Contrairement aux zones arctiques, ces régions subarctiques sont dotées d'une végétation forestière [119]. Ce climat correspond aux climats ; continental humide (Dfa, Dfb, Dwa, Dwb, Dsa, Dsb) et subarctique (Dfc, Dfd, Dwc, Dwd, Dsc, Dsd).

Les Inuits de cette région abritent, en majorité, un modèle d'habitat semblable à celui de climat polaire, en le considérant comme abri temporaire d'hiver. Cependant, les tentes (soutenues par un cadre de bois flottés, recouvertes

généralement par la peau de phoques en raison de son impérialité, et retenues par de grosses pierres) présentent l'habitat de la saison chaude, et c'est également le cas pour les Esquimaux du climat polaire (Figure 2.29) [170].



(a)

(b)

Figure 2.29 : Habitat vernaculaire de climat boréal. (a) : Abri d'hiver, (b) : Abri d'été [171, 172].

L'analyse de ces exemples d'habitat vernaculaire a permis de déterminer les solutions passives adoptées à chaque zone climatique. Ces derniers présentent une grande variété (en termes de forme, matériau, orientation, dimension des ouvertures, choix de couleur, etc.), provenant de l'exploitation des caractéristiques climatiques et physiques de l'environnement dans la construction de l'abri. Le tableau ci-après (Tableau 2.7) résume ces stratégies, et présente les objectifs visés de leur mise en œuvre.

Tableau 2.7 : Synthèse des solutions bioclimatiques adoptées dans les exemples analysés de l'habitat vernaculaire.

Climat	Contrainte	Solution	Objectif
Aride	Chaleur Sècheresse Forte amplitude thermique	Compacité du tissu urbain et de volume Réduction du nombre et dimension des ouvertures Protection des ouvertures (Moucharabieh) Favorisation de l'orientation nord-sud Utilisation des matériaux à forte inertie thermique (pierre), et régulateurs d'humidité (terre) Ventilation naturelle nocturne (transversale, par tirage thermique ou par tour à vent) Choix de couleurs claires Mise en place des bassins d'eau et de la végétation	Réduction des gains de chaleur. Maitrise de l'ensoleillement. Limitation de surchauffe Amortissement des apports thermiques Evacuation de chaleur Rafraîchissement Régulation d'humidité Création de microclimat
Tempéré chaud	Chaleur Forte humidité	Compacité du tissu urbain et de volume Réduction de dimension des ouvertures Favorisation de l'orientation nord-sud Utilisation des matériaux à forte inertie thermique (pierre) Ventilation naturelle (transversale ; ou par tirage thermique) Choix de couleurs claires	Réduction des gains de chaleur. Protection contre le froid d'hiver Maitrise de l'ensoleillement. Rafraîchissement naturelle Evacuation de l'humidité
Equatorial	Pluies fréquentes Forte humidité Basse pression atmosphérique	Densité du tissu urbain Plan libre Favorisation de l'orientation est-ouest Ventilation naturelle (transversale) Socle en pilotis et large toiture inclinée ventilée Maximisation du nombre et de la taille des fenêtres Utilisation des matériaux à faible capacité thermique (Bois) Mise en place des arbres de hautes tiges	Evacuation de l'humidité Protection contre les pluies Rafraîchissement naturelle Réduction des gains de chaleur
Polaire et boréal	Température très basses Neige Vent violent (Blizzard) Pergélisol	Volume compact semi-enterré Inertie thermique de l'enveloppe (en bloc de neige, ou en pierre) Mise en place d'un tunnel excavé (sas thermique) et d'un accès sous forme de siphon.	Réduction des pertes de chaleur Evacuation d'air froid

Par ailleurs, ces solutions ont fait l'objet des outils synthèses d'aide à la décision dans les projets architecturaux. Ces derniers permettent de déterminer les stratégies passives et les méthodes actives à mettre en œuvre pour améliorer le confort thermique d'un environnement, à partir de ses conditions climatiques. L'efficacité de ces stratégies peut être évaluée par la suite, par des outils de simulation de la performance thermique du bâtiment dits BPS Tools⁷.

3. Outils d'aide à la conception bioclimatique

En 1920, l'institut américain des architectes (fondé en 1857 par 13 architectes) a publié un manuel de conception architectural (The architect's Handbook of professional practice)⁸ développant des outils d'assistance à la première étape du processus de design, la préconception et l'esquisse. Ces derniers comprennent une série de diagrammes bioclimatiques permettant d'intégrer le savoir climatique et environnemental dans le processus de la conception architecturale [173, 174]. Parmi ceux-ci, le diagramme bioclimatique d'OLGAY [11] et celui de GIVONI [175]. Néanmoins, il existe d'autres outils synthèses, dont, les plus connus sont la méthode de SZOKOLAY [176] et les tables de MAHONY [177].

3.1 Diagramme d'OLGAY

En 1963, l'architecte et le pionnier de bioclimatisme, Victor OLGAY, a élaboré le premier diagramme bioclimatique (Figure 2.30) s'agissant d'une procédure systématique pour l'adaptation des bâtiments aux régions humides (présentant une fluctuation minimale entre les températures extérieures et intérieures, et une altitude ≤ 1000 pieds/305m. Ce dernier détermine la zone du confort thermique en faisant intervenir deux paramètres dans le graphique (température de l'air comme ordonné, et l'humidité relative comme abscisse), afin de proposer des mesures correctives, par lesquelles l'occupant peut, plus ou moins, arriver à la sensation du bien-être (ombrage, rayonnement solaire, ventilation, refroidissement par évaporation, etc.) face à des conditions climatiques inconfortables [11].

⁷ Building Performance Simulation Tools.

⁸ Ce manuel a fait l'objet de plusieurs actualisations (de 1920 à 2013) et de nouveautés, dont plusieurs éléments soulignent cette évolution, comme, par exemple l'intégration de l'approche BIM (Building Information Manager) et la méthode ALDB (Architect- Led Design-Build) en construction [370].

En effet, la zone de confort thermique est située, selon OLGAY, dans une limite de température d'air comprise entre 21°C (70°F) et 27.8°C (82°F) et un taux d'humidité relative compris entre 17 et 77% [11]. En outre, un troisième paramètre entre en jeu afin d'arriver à un niveau de confort satisfaisant ; la vitesse de l'air, cette dernière est définie dans le diagramme d'OLGAY en fonction de l'humidité relative, elle doit être inférieure à 0.1 m/s (Figure 2.30).

Comme évoqué, cette méthode ne s'applique que dans les zones humides à très faible amplitude de température, du fait que le climat attendu à l'intérieur du bâtiment n'est pas pris en considération. Pour cela, un autre diagramme a été développé par GIVONI pour les bâtiments non climatisés, basant sur leurs températures intérieures, inversement à celui d'OLGAY [175].

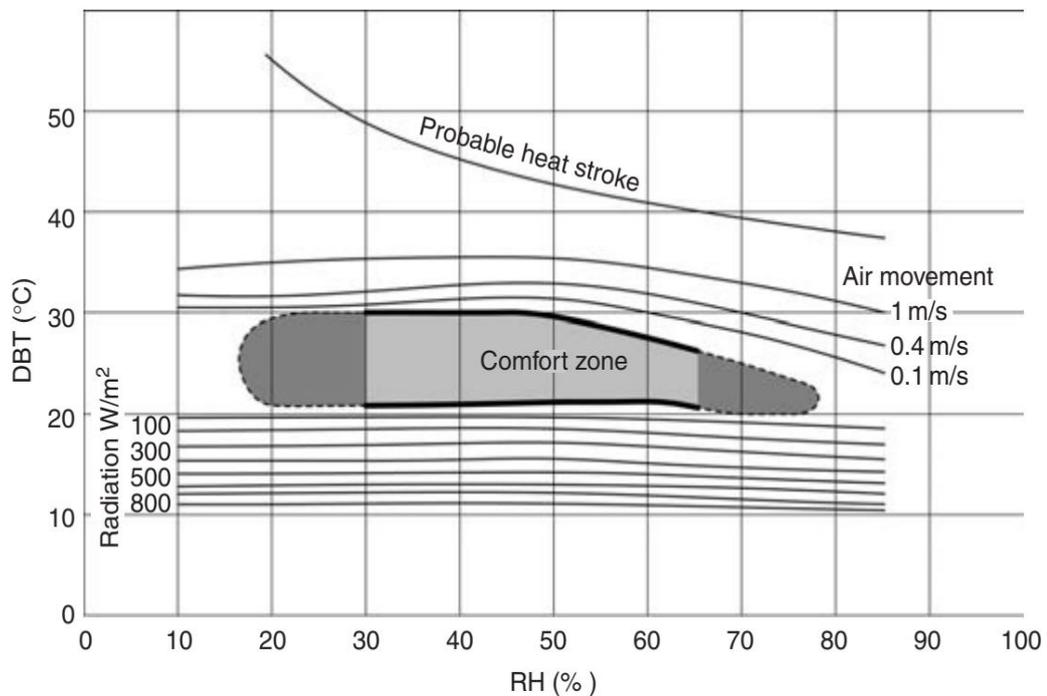


Figure 2.30 : Diagramme bioclimatique d'OLGAY [178].

3.2 Diagramme de GIVONI

Le diagramme psychrométrique de GIVONI a été conçu en 1976, il prévoit les limites de conditions climatiques extérieures, auxquelles des stratégies architecturales ainsi que des systèmes de refroidissement passif et à faible consommation énergétique peuvent fournir un équilibre thermique aux occupants de climat chaud à fortes amplitudes thermiques journalières [175].

GIVONI, propose une zone de confort thermique, reliant linéairement la température de l'air et l'humidité relative (moyennes mensuelles). Cette zone se trouve entre 18 et 25°C en hiver, et entre 20 et 27°C en été, avec un taux d'humidité compris entre 20 et de 80% et une vitesse d'air < 0.25m/s. Cependant, quatre autres zones ont été définies dans ce diagramme (Figure 2.31) ; ventilation naturelle, inertie thermique, inertie thermique et ventilation nocturne et rafraîchissement évaporatoire. Ces zones présentent des solutions permettant une situation favorable au confort thermique [175].

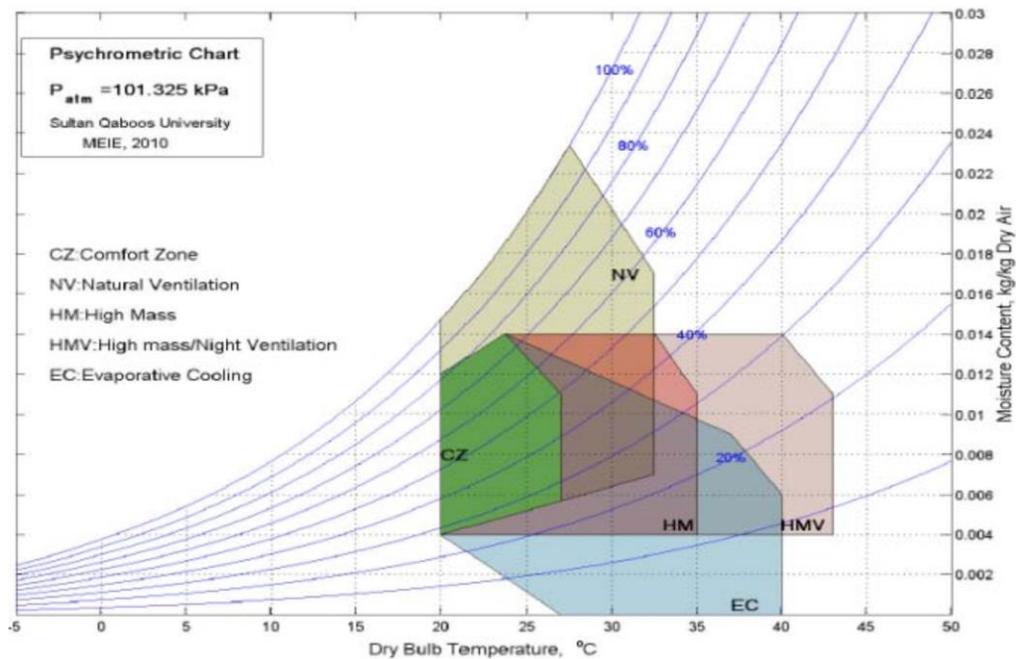


Figure 2.31 : Diagramme bioclimatique de GIVONI [179].

Ce diagramme a fait l'objet d'une actualisation en 1979, par MILNE et GIVONI, en établissant d'autres zones, afin de déterminer les méthodes actives et passives de chauffage et de rafraîchissement nécessaires pour obtenir le confort dans chacune de ces zones (Figure 2.32). Ces méthodes sont déterminées à partir des exigences physiologiques du confort évaluées en faisant appel à l'indice de stress thermique ITS⁹ [180]. Il devrait être noté que MILNE et GIVONI considéraient instables, voire ambiguës, les limites des douze zones résultantes. Ceci est traduit par les flèches incluses dans leur diagramme (Figure 2.32), dont l'augmentation du taux d'humidité permet de déplacer le seuil supérieur de température de confort, atteignant les 33°C.

⁹ Rapport entre le débit sudoral requis pour maintenir l'équilibre thermique (E_{req}) et l'efficacité de la sudation (χ). Il s'exprime en g/h [369].

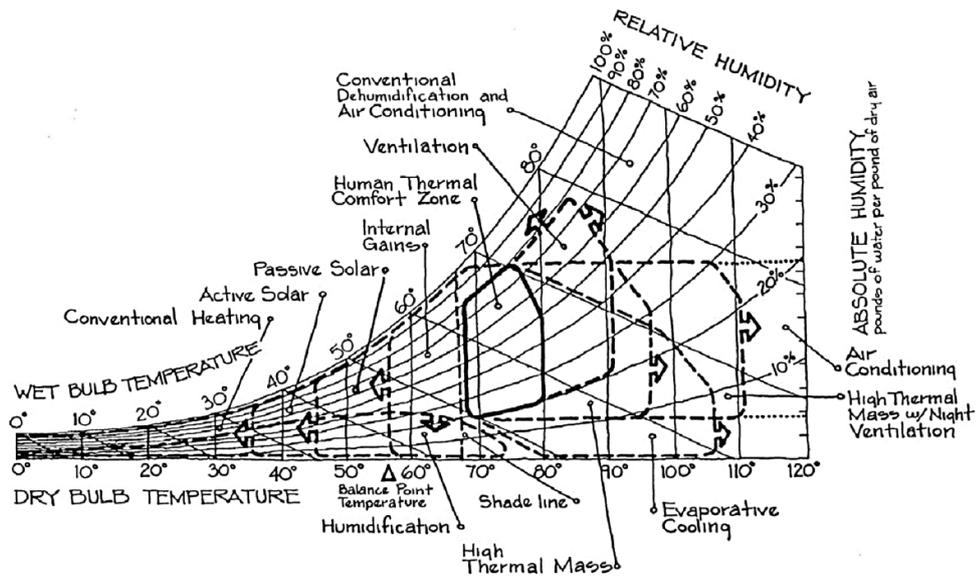


Figure 2.32 : Diagramme bioclimatique de GIVONI et MILNE [181].

En effet, ce diagramme est intégré, à nos jours, dans les logiciels d'aide à la décision et à la conception architecturale bioclimatique, notamment dans celui de Climate Consultante (Figure 2.33.a). Ce dernier est un outil d'analyse de données climatiques, il permet de tracer les diagrammes climatiques d'une région donnée à partir de ses données climatiques annuelles¹⁰, afin de visualiser les modèles et les attributs de son climat, relatifs à la conception et l'exploitation des bâtiments (Figure 2.33.b) [182].

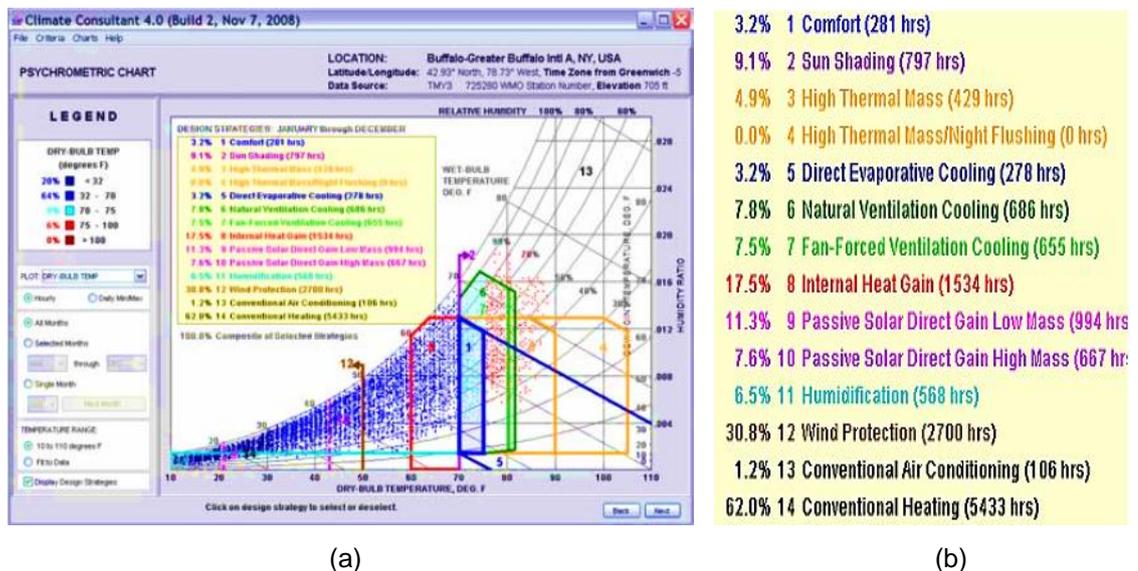


Figure 2.33 : Analyse des données climatiques de la région de Buffalo, New York par Climate consultante. (a) : Diagramme psychrométrique fourni par Climate Consultant, (b) : Stratégies de conception proposées [182].

¹⁰ Fournies par le département de l'énergie, sous forme d'un fichier avec extension EPW, généré gratuitement à l'aide de logiciel Meteonorm.

3.3 Méthode de SZOKOLAY

En s'appuyant sur les travaux de GIVONI [183] portant sur l'indice de stress thermique et ceux de HUMPHREYS [184] et AULICIEMS [185] déterminant les équations de la neutralité thermique du corps humain et la température effective (ET), ainsi que sur la norme internationale ASHRAE 55-81, Steven SZOKOLAY [176] a défini deux zones de confort thermique (pour période estivale et hivernale) établies par la corrélation entre la température neutre (T_n) et la température moyenne mensuelle de l'air (T_m) (Eq 2.6) [186].

$$T_n = 17.6 + 0.31 T_m \quad (\text{Eq 2.6})$$

Où :

- T_n : Température neutre, °C
- T_m : Température moyenne mensuelle de l'air, °C

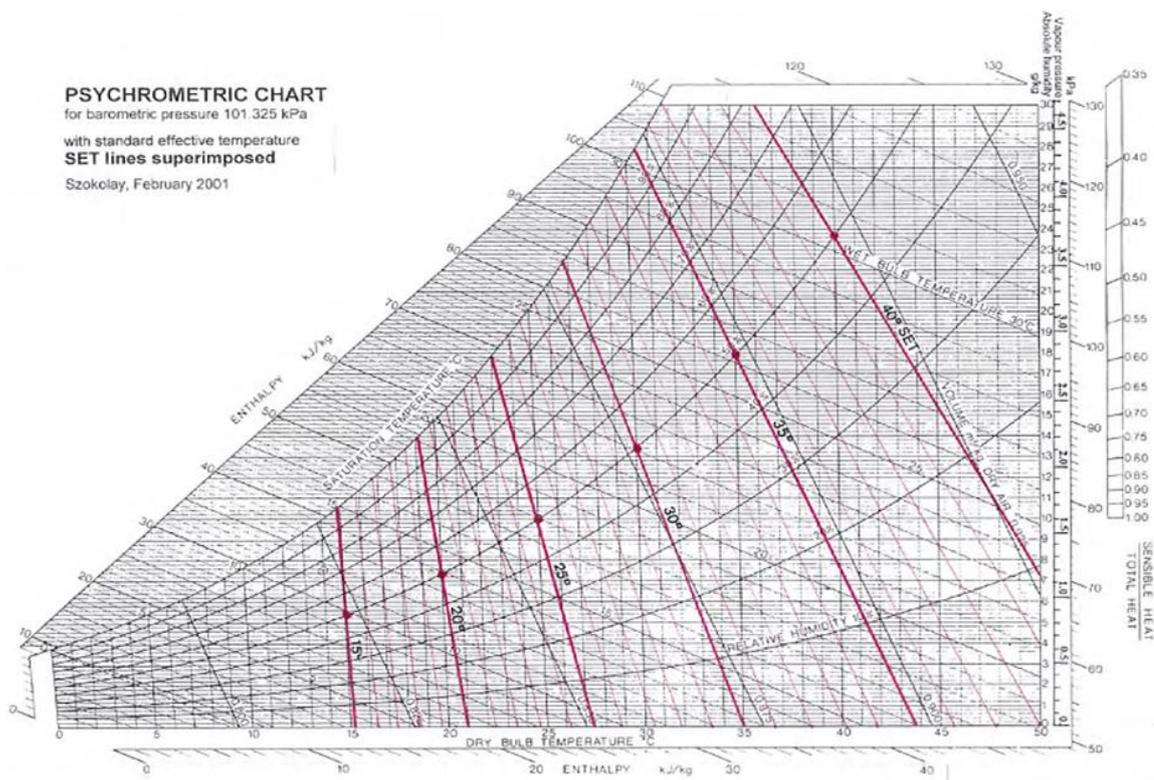


Figure 2.34 : Diagramme psychrométrique de SZOKOLAY [187].

La zone de confort thermique (pour l'acceptation de 90% des occupants) se situe, selon SZOKOLAY, dans une limite de température comprise entre $T_n - 2.5^\circ\text{C}$ et $T_n + 2.5^\circ\text{C}$ (élevant à $\pm 3.5^\circ\text{C}$ pour 80% d'acceptabilité) et un taux d'humidité absolue compris entre 4 et 12g/kg et une pression de vapeur comprise entre 0.6 et 1.9kPa [187]. Pour tracer cette zone (spécifique à chaque région), SZOKOLAY a

proposé un digramme psychrométrique reliant l'humidité absolue (ou la pression de vapeur), la température ($T_{n\pm 2.5^{\circ}\text{C}}$) et la température effective (Figure 2.34), afin de déterminer les mesures passives permettant d'obtenir un certain niveau de confort : masse thermique, masse thermique et ventilation nocturne, chauffage solaire passif, ventilation naturelle, rafraîchissement évaporatif direct et indirect.

3.4 Tableaux de MAHONEY

Élaborés par Charles MAHONEY, ces tableaux étaient les résultats d'une étude conduite en 1968 au Nigeria, et développée en 1970 (en collaboration avec John Martin EVANS et Otto KÖNIGSBERGER). Ils ont été publiés en 1971 par le département de développement et des études tropicaux de l'association architecturale, développant une méthodologie de conception architecturale basée sur trois phases ; conception préliminaire, esquisse, développement du projet. Cette méthodologie prend en considération les conditions climatiques de lieu où le bâtiment s'inscrira, en intégrant les travaux de MAHONEY dans sa deuxième phase (esquisse), afin de déterminer les indicateurs qualitatifs permettant de prendre la décision à une conception adaptée au climat [186, 188].

En effet, les tableaux de MAHONEY sont basés sur quatre facteurs climatiques ; température de l'air, humidité relative, précipitation, et vitesse du vent. En intervenant les valeurs min, max et moyennes mensuelles de chacun de ces facteurs, une classification climatique mensuelle peut être faite (humide ou aride, chaud, froid ou confortable) (Tableaux 2.8, 2.9 et 2.10), celle-ci permet de déterminer les différents remèdes à apporter au bâtiment ; ces derniers sont classés comme suit : plan de masse, espacement des bâtiments, circulation d'air, dimension, positions et protection des ouvertures, murs et planchers, toiture, sommeil en plein air, et protection contre la pluie (Tableau 2.11).

Tableau 2.8 : Groupe d'humidité en fonction d'humidité moyenne annuelle [189].

HR(%)	Groupe d'humidité
0-30	1
30-50	2
50-70	3
70-100	4

Tableau 2.9 : Limites de confort en fonction d'humidité et de température moyenne annuelle TMA [189].

Groupe d'humidité	TMA > 20°C		15°C > TMA > 20°C		TMA < 15°C	
	jour	nuit	jour	nuit	jour	nuit
1	26-34	17-25	23-32	14-23	21-30	12-21
2	25-31	17-24	22-30	14-22	20-27	12-20
3	23-29	17-23	21-28	14-21	19-26	12-19
4	22-27	17-21	20-25	14-20	18-24	12-18

Tableau 2.10 : Indicateurs d'humidité et d'aridité [189].

Indicateur	Explication	Stress thermique		Précipitation mensuelle	Groupe d'humidité	T° moy mensuelle
		jour	nuit			
H1	Mouvement d'air essentiel	chaud	-	-	4	-
		chaud	-		2, 3	<10°C
H2	Mouvement d'air désirable	confort	-	-	4	-
H3	Protection contre pluie nécessaire	-	-	+200mm	-	-
A1	Capacité thermique nécessaire	-	-	-	1, 2, 3	>10°C
A2	Sommeil en plein air désirable	-	chaud	-	1, 2	-
		chaud	confort		1, 2	>10°C
A3	Protection contre froid	froid	-	-	-	-

Tableau 2.11 : Recommandations conceptuelles [177].

Plan de masse	A1 (0- 10) ou A1 (11-12) + A3 (5-12)	a1	Orientation selon un axe longitudinal est- ouest
	A1 (11-12) + A3 (0-4)	a2	Plans compacts avec cours intérieurs
Espacement	H1 (11-12)	b1	Grands espacements pour favoriser la pénétration du vent
	H1 (2-10)	b2	Grands espacements avec protection contre vent chaud/froid
	H1 (0-1)	b3	Plan compact
Mouvement d'air	H1 (12-13) ou H1 (1-2) + A1 (0-5)	c1	Simple orientation, avec une circulation d'air permanente
	H1 (1-2) + A1 (6-12) ou H1 (0) + H2 (2-12)	c2	Double orientation, avec une circulation d'air intermittente
	H1 (0) + H2 (0-1)	c3	Aucune circulation d'air n'est requise
Dimension des ouvertures	A1 (0-1) + A3(0)	d1	Large, 40 – 80% des façades nord et sud
	A1 (0-1) + A3 (1-12) ou A1 (2-5) ou A1 (11-12) + A3 (4-12)	d2	Moyenne, 25- 40% de la surface des murs
	A1 (6-10)	d3	Intermédiaire, 20-35% de la surface des murs
	A1 (11-12) + A3 (0-3)	d4	Petite, 15-25% de la surface de mur
Position des ouvertures	H1 (3-12) ou H1 (1-2) + A1 (0-5)	e1	Dans le mur nord et sud, à la hauteur du corps humain
	H1 (1-2) + A1 (6-12) ou H1(0) + H2 (2-12)	e2	Pareil à e1, mais avec des ouvertures dans les murs intérieurs
	H1 (0) + H2 (0-1)	e3	Aucune solution n'est recommandée
Protection des ouvertures	H3 (0-2) + A3 (3-12)	f1	Aucune protection n'est nécessaire
	H3 (0-2) + A3 (0-2)	f2	Se protéger des rayons solaires directs
	H3 (3-12) + A3 (0-2)	f3	Se protéger des pluies et des rayons solaires directs
	H3 (3-12) + A3 (3-12)	f4	Se protéger des pluies
Murs et planchers	A1 (0-2)	g1	claire, à faible capacité thermique
	A1 (3-12)	g2	Massive, plus de 8 heures de déphasage
Toitures	H1 (10-12) + A1 (0-2)	h1	Légère, avec revêtement réfléchissantes
	H1 (10-12) + A1 (3-12) ou H1 (0-9) + A1 (0-5)	h2	Légère, et bien isolé
	H1 (0-9) + A1 (6-12)	h3	Massive, plus de 8 heures de déphasage
Sommeil en plein air	A2(0)	i1	Aucune prévision pour le sommeil en plein air n'est requise
	A2 (1-12)	i2	un espace pour le sommeil en plein air est requis
Protection contre pluie	H3 (1-2)	j1	drainage adéquat des eaux pluviales
	H3 (3-12)	j2	Se protéger contre les fortes pluies
	H3(0)	j3	Aucune protection contre les fortes pluies n'est nécessaire

De plus, ces tableaux limitent les caractéristiques thermo-physiques de l'enveloppe des bâtiments, notamment la conductivité thermique et le facteur solaire des murs et des toitures recommandés (Tableau 2.12).

Tableau 2.12 : Caractéristiques thermiques recommandées par MAHONEY [177].

Élément constructif	Conductivité thermique (w.m ² . °C)	Facteur solaire (%)	Temps de déphasage (h)
Mur léger	< 2.8	< 4	< 3
Mur massive	< 2	< 4	8 à 14
Toit léger	< 1.1	< 4	< 3
Toit léger, bien isolé	< 0.85	< 3	< 3
Toit massive	< 0.85	< 3	> 8

4. Outils de simulation énergétique du bâtiment 'BPS'

Le BPS (Building performance simulation) est une technologie permettant l'étude des performances thermiques et énergétiques d'une conception architecturale proposée ou d'un bâtiment déjà existant, d'une manière réaliste basée sur des modèles mathématiques informatisés. Cette technologie a émergé après la crise énergétique, au milieu des années 70, dans le but de maîtriser les besoins énergétiques des constructions et d'améliorer le bien-être de leurs occupants, en menant des réflexions sur les interactions entre le bâtiment et son environnement [180].

En effet, ce domaine a connu un progrès marqué, allant des manuels basés sur de simples feuilles de calculs statistiques à des outils informatiques très sophistiqués. Des centaines d'outils de simulation ont été développés ces dernières décennies ; leur évolution a été liée à la facilité de leur utilisation et leur interprétation et à leur représentation du bâtiment et leur intégrité vis-à-vis du monde réel [190].

Cette évolution a permis, en fait, de disposer des modèles détaillés, prenant en compte l'interaction entre le bâtiment et son climat. La modélisation de ces derniers est basée sur les caractéristiques du bâtiment ; sa géométrie, son système constructif, ses apports internes, ses systèmes de 'CVC'¹¹, 'ECS'¹² et d'éclairage, ses stratégies d'exploitation ainsi que sur un fichier météorologique (généralisé souvent par logiciel Meteonorm, avec extension .epw) choisi selon la position géographique

¹¹ Chauffage, ventilation, climatisation.

¹² Eau chaude sanitaire.

du bâtiment et conçu pour la simulation énergétique. Il est à noter que l'importation de ces données nécessite parfois l'utilisation des outils d'ingénierie, tels que les logiciels de modélisation géométrique [180].

L'étude diagnostique par simulation thermique et énergétique dynamique (STD et SED) s'avère nécessaire et souvent indispensable à nos jours, elle aide les acteurs de bâtiment à préconiser des mesures correctives réduisant la consommation énergétique des bâtiments, en interprétant les résultats fournis par le logiciel. Cette étude peut être faite pour : l'évaluation des performances énergétiques du bâtiment, la modélisation de système HVAC, l'analyse des coûts et du cycle de vie et l'étude des options d'efficacité énergétique. Ses résultats peuvent constituer une base d'élaboration des codes et des normes pour la conception des bâtiments éco énergétiques.

La diversité des logiciels de simulation existant aujourd'hui, présente la première source de difficulté pour leurs utilisateurs potentiels. Afin d'obtenir les meilleurs résultats, le choix des outils doit être principalement basé sur l'objectif visé par la modélisation, le temps et le budget alloué, le type et les caractéristiques du projet, sa complexité technique, ses équipements et ses stratégies de régulation. Ces outils présentent cependant, des limitations et des règles de modélisation, entraînant des différences systématiques entre les résultats de réalité et ceux de modèle virtuel. Pour cela, la meilleure utilisation d'une simulation est de faire une comparaison entre les solutions techniques afin d'influencer le choix conceptuel en estimant les économies anticipées.

Le tableau 2.13 présente une comparaison entre les outils de simulation énergétique, les plus utilisés au niveau international. Ces derniers permettent d'évaluer plusieurs aspects dans le bâtiment, conformément aux exigences des normes internationales : ASHRAE, ISO, RT12, etc., afin de répondre aux besoins d'optimisation.

Tableau 2.13 : Comparaison entre les outils de simulation énergétique.

Interface	Logiciel de modélisation géométrique	Résultat							Licence	Réf.
		thermique	acoustique	Eclairage	Qualité d'air	Emission CO ₂	Energie	CCV ¹³		
Trnsys	Sketch up	X	-	X	X	-	X	X	Commerciale	[191, 192, 193]
Esp-r	CAD	X	X	X	X	-	X	X	Gratuite	[194, 195]
Radiance	CAD	-	-	X	-	-	X	-	Gratuite	[196]
Energyplus	Sketch-up	X	-	X	X	X	X	-	Gratuite	[197]
Design Builder	Sketch-up, Revit	X	-	X	X	X	X	X	Commerciale	[198]
Pléiade + Comfie	Sketch up	X	-	X	X	X	X	X	Commerciale	[199]
Open studio	Sketch-up	X	-	X	X	X	X	X	Gratuite	[198]
DOE-2	CAD, Revit	X	-	X	X	-	X	X	Gratuite	[200]
Ecotect	CAD, Revit	X	X	X	X	-	X	-	Commerciale	[201]
TAS	CAD	X	-	X	X	X	X	-	Commerciale	[202]

¹³ Coût du cycle de vie.

5. Conclusion

Ce chapitre découle d'une aperçue bibliographique sur le bioclimatisme et le confort thermique : deux notions associées au concept de bâti vernaculaire. Il révèle que la conception d'un bâtiment bioclimatique est essentiellement basée sur la compréhension de l'interaction entre trois éléments critiques : climat, organisme humain et enveloppe du bâtiment. La prise en compte de ces éléments a permis la création des dizaines de stratégies architectoniques dans le bâti vernaculaire maintenant l'équilibre entre ceux-ci. En outre, l'étude du climat contribue à la détermination de l'environnement physique que l'homme vise à corriger par la construction, tandis que la compréhension de mécanisme du corps humain et son interaction avec le bâtiment permet d'anticiper les mesures correctives participant à la régulation de température corporelle, autrement dit, assurant, passivement, le confort thermique.

Ces mesures se résument dans : l'urbanisme, la forme bâtie, la conception de façade et l'enveloppe du bâtiment. L'homme primitif des zones arides a opté pour : un tissu urbain et un volume compact, une réduction du nombre et de dimensions des ouvertures, une orientation nord-sud, un matériau inerte et une couleur d'enveloppe claire, afin de réduire les gains de chaleurs, d'amortir les rapports externes et de favoriser la ventilation naturelle nocturne permettant d'évacuer la chaleur. Quant aux zones froides, les habitants ont opté pour une maximisation de gains de chaleur et une réduction de pertes de cette dernière par la compacité de volume, l'orientation sud du bâtiment et l'inertie thermique de l'enveloppe.

Ces solutions bioclimatiques étaient issues, au passé, d'une longue expérience et d'un savoir-faire indéniable transmis d'une génération à une autre. Quant à nos jours, elles font l'objet des outils d'aide à la conception architecturale, permettant d'évaluer les performances des bâtiments en phase de conception ou existants, afin de proposer des solutions d'optimisation. Ces outils sont souvent des diagrammes, des tableaux, des manuels ou des logiciels informatiques basés sur des équations mathématiques et souvent conformes aux normes et réglementations de confort thermiques (déterminant les conditions de confort optimales) élaborées à la base des projets et des enquêtes auprès des citoyens, partout dans le monde, particulièrement l'ASHRAE Standard 55.

En effet, les logiciels des simulations énergétiques sont les outils les plus utilisés aujourd'hui. Ils présentent une exigence qui s'impose de plus en plus, tant en bâtiment neuf qu'en bâti ancien. Leur modélisation est basée sur les caractéristiques des bâtiments, leurs scénarios d'exploitation ainsi que leurs climats.

Néanmoins, le matériau de construction constitue le paramètre le plus important dans la modélisation thermique du bâtiment. Ce dernier présente la base des échanges thermiques entre la construction et son environnement, ses caractéristiques thermiques jouent un rôle essentiel dans l'efficacité énergétique du bâtiment. C'est la raison pour laquelle, le chapitre suivant sera consacré à l'étude des matériaux de constructions vernaculaires, notamment l'adobe, qui présente le matériau ancestral le plus répandu ; un constat établi de l'observation de l'habitat vernaculaire partout dans le monde, en particulier dans le climat aride.

CHAPITRE 3
L'ADOBE, UN MATÉRIAU DE CHOIX
POUR UNE ARCHITECTURE DE QUALITÉ

CHAPITRE 3 :

L'ADOBE, UN MATÉRIAU DE CHOIX POUR UNE ARCHITECTURE DE QUALITÉ

L'objectif de ce chapitre est de dresser un état de l'art sur le matériau de construction néolithique 'Adobe'. Sa première section porte sur les différentes techniques de construction en terre crue, dont une attention toute particulière est portée sur l'argile, le composant qui assure leur cohésion et leur stabilité, afin d'apporter certaines connaissances permettant la compréhension de son comportement.

La deuxième section de ce chapitre est consacrée au matériau adobe, elle détermine ses origines et ses traces dans le monde entier, afin de présenter les plus anciens exemples d'habitat vernaculaire inscrits sur la liste du patrimoine mondial, qui font l'objet de plusieurs études mettant en exergue leur valeur patrimoniale incontestable. Cette section aborde également, les anciens Ksour témoignant de l'utilisation séculaire de l'adobe, qui font partie du patrimoine bâti algérien.

Ensuite, une revue bibliographique est faite sur les performances thermiques, énergétiques et environnementales de l'adobe, tout en présentant les résultats des études antérieures visant à évaluer les exemples d'habitat vernaculaire présentés dans la section précédente. Afin d'assimiler les potentiels tirés de l'usage de ce matériau, une attention est portée sur son comportement hygrothermique, et ainsi sur son impact environnemental.

La dernière section de ce chapitre correspond à une aperçue générale sur le renouveau de l'adobe, elle met l'accent sur les procédés de stabilisations de ce dernier, à travers l'analyse d'une vingtaine d'études récentes, portant sur l'amélioration de ses propriétés par les additions chimiques. Enfin, cette analyse permet de nous orienter à faire le choix de stabilisant pour notre travail de recherche.

1. La terre crue, une matière première

La terre est l'une des principales matières premières utilisées dans le monde (Figure 3.1), elle est utilisée dans le domaine de construction depuis plus de onze millénaires. Son emploi présente une variété des techniques constructives (adobe, pisé, torchis, bauge, etc.) qui offre une grande palette de possibilités architectoniques et esthétiques. À l'heure actuelle, environ la moitié de la population mondiale vit, désormais, dans des constructions en terre, d'autant plus, plus de 15% des biens inscrits sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO¹⁴ (soit 173/1121) sont fondés sur l'emploi privilégié de ce matériau, également, 27% des architectures vernaculaires [14, 15].

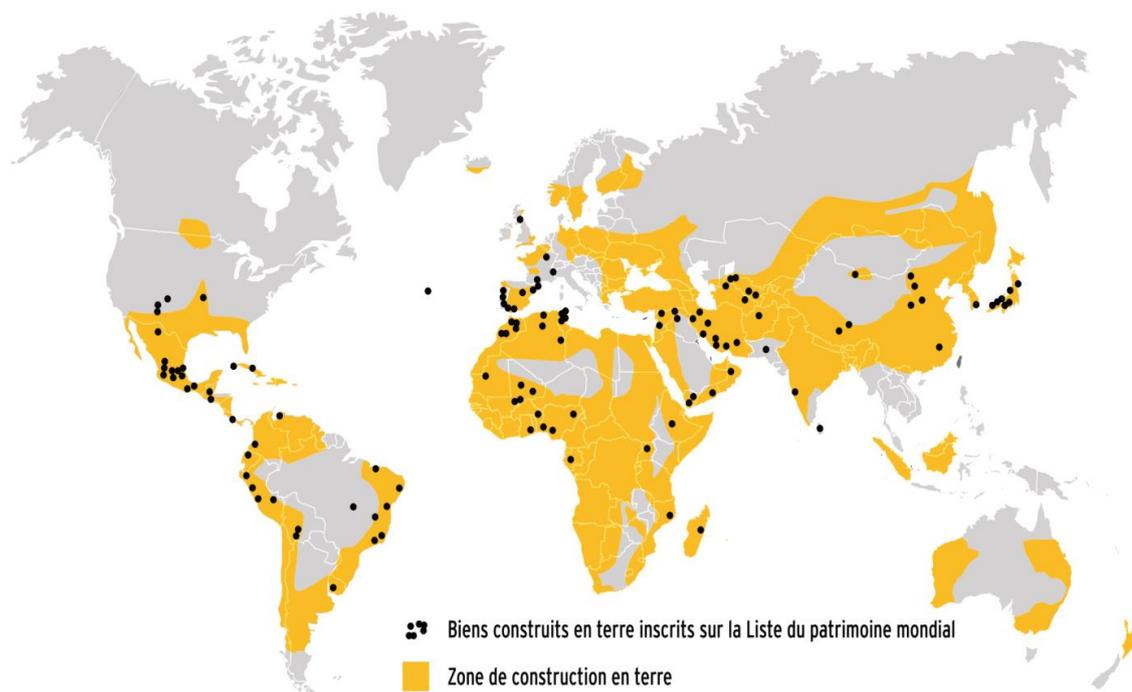


Figure 3.1 : Architecture de terre dans le monde [203].

1.1 Les minéraux

La terre est un matériau granulaire, qui possède de distinctes fractions granulaires, permettant de déterminer la technique qui doit être associée (Tableau 3.1), tout en se basant sur leurs proportions, qui varient d'une terre à une autre, et leurs réactions dans le matériau.

¹⁴ Organisation des Nations Unies pour l'Éducation, la Science et la Culture.

Tableau 3.1 : Fractions granulaires de la terre [203].

Fraction	Taille
Cailloux	entre 20 cm et 2 cm
Graviers	entre 2 cm et 2 mm
Sables	entre 2 mm et 60 μm
Limons	entre 60 μm et 2 μm
Argiles	au-dessous de 2 μm

Selon HOUBEN et GUILLAUD [17], les cailloux et les graviers sont des particules grossières (angulaires ou arrondies) résultant de la désagrégation physique et chimique de la roche mère. Ils permettent de limiter la capillarité et le retrait de la terre. Cependant, les sables et les silts sont des particules caractérisées par une grande friction interne, une structure ouverte et une perméabilité ; la différence entre ces deux fractions granulaires réside dans leur écart de taille et leur cohésion.

**Figure 3.2** : Granularité de la terre [203].

1.1.1 Les argiles

Les argiles présentent les composants les plus fins de la terre. Elles résultent de l'altération des minéraux de la roche mère, qui les divise en quatre familles ; les Kaolinites et les Illites (résultant de l'altération des feldspaths potassiques), les Smectites ou les montmorillonites (résultant de la décomposition des Feldspaths sodiques), et les Chlorites (résultant de la destruction des roches magmatiques). En effet, l'occurrence des minéraux argileux dans le sol a, également, une relation avec le climat. En climat chaud et humide, l'altération est poussée, ce qui permet de donner les kaolinites et les Smectites (en milieu drainé et confiné, respectivement). Cependant l'altération faible de climat froid donne de l'illite et le Chlorite ; ces

derniers peuvent ainsi être le résultat de l'altération modérée du climat tempéré et humide (Tableau 3.2).

Tableau 3.2 : Occurrence des minéraux en fonction du climat [204].

Climat	Minéraux fréquents
Polaire	Illite, Chlorite
Boréal	illite, Chlorite, Smectites
Tempéré chaud	Smectites
Aride	Illite, Chlorite
Equatorial	Kaolinite

Contrairement aux autres fractions granulaires, les argiles ont des propriétés toutes particulières. Chimiquement, elles sont essentiellement structurées à base des silicates (SiO_2), des alumines (Al_2O_3), et des oxydes de fer (Fe_2O_3). Toutefois, les Silicoalumineux comptent pour environ 74.3% de l'ensemble des matériaux de l'écorce terrestre [15]. Physiquement, les argiles font partie des Phyllosilicates ; elles ont une structure en couche formée des feuillets empilés (Tableau 3.3), de très faible épaisseur leur offrant le caractère collant : l'argile présente le liant de la terre. Ces feuillets proviennent de l'association des unités de bases : tétraèdres (T)¹⁵ et octaèdres (O)¹⁶, elles présentent une charge électrique, déterminant le comportement des argiles, notamment, le gonflement et l'hydratation [205].

En effet, les Kaolinites et les Chlorites ont une structure élémentaire neutre, tandis que, les illites et les Smectites présentent une structure chargée électriquement (charges positives et négatives, respectivement). La présence des charges électriques permet une cohésion des feuillets d'argile. À cela s'ajoutent l'empilement de ces feuillets, et la présence de l'humidité dans l'air [205].

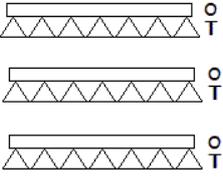
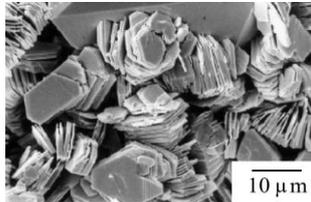
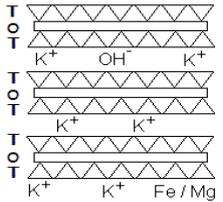
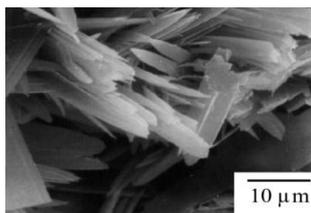
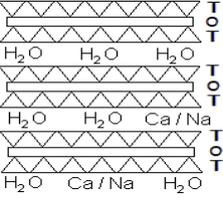
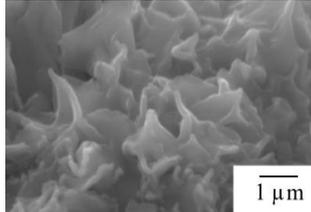
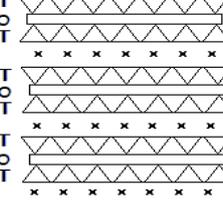
De plus, l'empilement rigide des feuillets de Kaolinite (Tableau 2.3) empêche l'eau de pénétrer à l'intérieur des plaquettes, ce que rend le matériau stable au contact avec l'eau et par conséquent non gonflant. Contrairement, les feuillets d'Illites et de Smectites se présentent sous forme de membranes interconnectées (Tableau 2.3) entre lesquelles l'eau peut pénétrer et ensuite faire gonfler le réseau. Néanmoins, la neutralité des Kaolinites influe négativement leur cohésion,

¹⁵Particule formée de quatre atomes d'Oxygène munis au centre d'un atome de Silicium ou d'Aluminium.

¹⁶Particule formée de six atomes d'Oxygène ou d'Hydrogène, munis au centre d'un atome d'Aluminium ou de Magnésium.

ce que facilite leur lessive par l'eau de pluie et par conséquent, les rendre inappropriés pour la construction malgré leur caractère non gonflant et non fissurant. Inversement, les Smectites sont adéquats pour la construction (grâce à leur cohésion assurée par les charges électriques négatives et leurs interactions aux forces électrostatiques et de Van Der Waals¹⁷), tout en réduisant leur fissuration et leur gonflement par l'ajout d'un stabilisant, notamment de sable ou de la paille [206].

Tableau 3.3 : Caractéristique des Argiles [205, 207].

Argile	Nombre de feuillet / particule	Structure	Observation MEB
Kaolinite $Al_2O_3, 2SiO_2, 2H_2O$	100-200		
Illite $K Al_2 (OH)_2, (Al Si_3 (O, OH)_{10})$	1-10		
Smectites $2Al_2O_3, 8SiO_2, 2H_2O, n H_2O$ (Montmorillonite) $(Mg, Ca), O, Al_2O_3, 5SiO_2, n H_2O$	1		
Chlorite $Mg_5, (Al, Fe) (OH)_8 (Al, Si)_4 O_{10}$	1		

Revenons aux composants de la terre, aux cinq minéraux (cailloux, graviers, sables, silts, et argiles), s'ajoutent des composants organiques (animaux ou

¹⁷ La force Van Der Waals est une interaction électrique de faible intensité, qui s'exerce entre atomes et/ou molécules présentant des pôles de signes opposés (positif et négatif). Elle peut influencer la structure du matériau en rapprochant les molécules le plus possible lors de séchage.

végétaux), des gaz (air ; Azote, Oxygène et gaz carbonique), et des liquides (eau et éléments solubles).

1.2 Proportions et techniques

Comme évoqué précédemment, la proportion de chacun de ces composants dépend essentiellement de la technique de construction visée. En effet, l'adobe (Figure 3.3.a), le torchis (Figure 3.3.b) et la bauge (Figure 3.3.c) sont des techniques qui mettent en œuvre des terres à l'état plastique d'une granularité ; sablo-argileuse (adobe), limono-argileuse (torchis), ou gravelo-sableuse (bauge). Le mélange de ces matériaux est séché à l'air libre après avoir été façonné, à l'aide des mains ou des pieds : en bloc par un moule prismatique en bois (adobe), en parois de 15 à 20cm d'épaisseur en l'étalant sur un lattis ou un clayonnage fixé dans un colombage (torchis), ou en mur monolithique de 40 à 60 cm d'épaisseur en empilant des boules afin de les tasser légèrement (bauge) [17, 203].

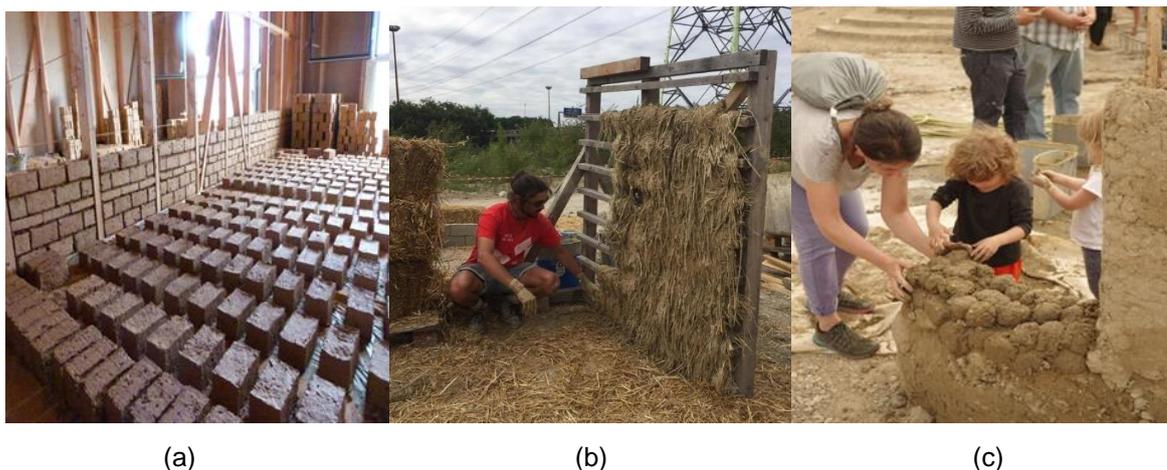


Figure 3.3 : Techniques de construction en terre à l'état plastique. (a) : Adobe, (b) : Torchis, (c) : Bauge [208, 209].

Néanmoins, la technique de pisé (Figure 3.4.a) et celle de bloc de terre comprimée (Figure 3.4.b) se mettent en œuvre avec des terres à l'état humide, à granularité sablo-graveleuse. La méthode de pisé consiste à compacter¹⁸ la terre à l'aide d'un pilon, dans des banches, couche par couche, afin de façonner des murs de 40 à 60 cm d'épaisseur. Cependant, le BTC est obtenu par la compression de la terre à l'aide d'une presse manuelle ou mécanisée. Afin d'améliorer les

¹⁸Augmenter la masse volumique d'une terre en diminuant son volume, et réduisant ses vides.

caractéristiques mécaniques et la résistance à l'eau de ce matériau, un liant peut être ajouté au mélange, tels que le ciment ou la chaux hydraulique [17, 210].



Figure 3.4 : Techniques de construction en terre à l'état humide. (a) : BTC, (b) : Pisé [209, 211].

Toutefois, ces techniques doivent être mises en œuvre avec des teneurs précises d'eau (Tableau 3.4). Un mélange trop humide provoque un déplacement latéral de la terre au lieu d'un compactage, et influe sur la résistance mécanique du matériau. D'autant plus, l'obtention des meilleures caractéristiques, nécessite la prise en compte des teneurs recommandées en matière minérale et organique (Tableau 3.4) ; une teneur importante en argile augmente le risque de retrait et de fissuration, un mélange trop sableux manquera de cohésion, et celui contenant trop de matière organique sera soumis à une instabilité et une vulnérabilité à l'eau due à sa porosité très importante.

Tableau 3.4 : Proportion en poids des composants dans les matériaux terre [212, 17, 213].

Technique	Gravier (%)	Sable (%)	Limons (%)	Argile (%)	Matière organique (%)	Eau (%)
Adobe	-	55-75	10-28	15-18	< 3	15-30
Pisé	0-15	40-50	20-35	15-25	-	5-20
Torchis	-	10-15	60-80	10-30	< 3	15-35
Bauge	30-40	25-30	10-20	10-25	< 2	15-30
BTC	0-40	25-80	10-25	8-30	< 2	5-20

Ainsi, les procédés de fabrication (préparation de mélange, mise en œuvre, séchage) conditionnent les propriétés physiques, mécaniques et thermiques de ces techniques. Avec le regain d'intérêt de ce savoir-faire, qui a eu lieu pour la réhabilitation des bâtiments historiques ainsi que pour répondre aux préoccupations

écologiques contemporaines, plusieurs études ont été réalisées, définissant les caractéristiques des matériaux terre. Le tableau ci-dessous (Tableau 3.5) présente les principales propriétés des trois grandes familles de mise en œuvre de la terre crue.

Tableau 3.5 : Caractéristiques thermo-physiques et mécaniques des trois grandes familles de mise en œuvre de terre [214].

Propriété	Terre compactée	Terre moulée	Terre Allégée
Masse volumique sèche (kg/m ³)	1600 – 2200	1200 – 2100	300 – 1200
Coefficient de résistance à la vapeur	5 - 13		
Module de Young (GPa)	1.0 - 6.0		< 1.0
Résistance à la compression (MPa)	0.4 - 3.0	0.4 - 5.0	-
Résistance à la traction (MPa)	0.1 - 0.5		
Capacité thermique massique (J/kg.K)	600 - 1000		
Capacité thermique volumique (kJ/m ³ .K)	960 - 2200	720 - 2100	180 - 1200
Conductivité thermique (W/m.K)	0.5 – 1.7	0.3 – 1.5	0.1 – 0.3

En effet, ces enquêtes ont permis d'établir une base de connaissance sur le matériau terre, afin d'élaborer des documents normatifs relatifs à son utilisation dans le domaine de construction. Ces derniers ont fait l'objet d'un travail de recherche réalisé en 2012, visant à déterminer les normes développées au cours des 30 dernières années, à partir desquels 33 documents normatifs de 19 pays ont été récoltés, fournissant ainsi des informations techniques sur la classification du sol, les techniques de construction en terre et leurs systèmes constructifs [215]. Les résultats de cette étude sont présentés dans l'annexe I (Tableau A.1).

À l'origine, les techniques de construction en terre n'ont été standardisées qu'en XX^e siècle. L'intérêt croissant pour ces techniques a entraîné un changement dans les méthodes de production, de la fabrication à la main à la production industrielle standardisée et contrôlée par des laboratoires et des personnels qualifiés. Cependant, la présence de ce bon nombre de normalisations montre l'absence des

procédures d'essais uniformes sur ce type de construction¹⁹ ; dans ce cas, d'autres procédures d'essais normalisés, particulièrement celles du béton, sont souvent utilisées [215].

Quant aux blocs de terre comprimée (BTC), des normalisations ont été élaborées par le "Centre pour le Développement Industriel (CDI)" en collaboration avec CRAterre-ENSAG (le centre international de la construction en terre, de l'école nationale supérieure d'architecture, Grenoble) et approuvées par l'ORAN (organisation régionale africaine de normalisation) pour devenir des normes africaines. Il s'agit d'un guide présentant "*les critères de sélection des matériels de fabrication ainsi que la méthodologie pour la conduite d'une étude de faisabilité économique sur le développement de ce produit*" [216, p. 5] sous forme d'une série de normes homologuées.

2. L'Adobe, une technique néolithique

Datant de la période néolithique, d'environ 10 000 avant Jésus-Christ, souvent appelé 'Toub, Ottob, Thobe, Banco, brique de terre crue', l'adobe se présente comme la plus ancienne des techniques de construction en terre [217]. Les plus anciennes traces d'habitations construites par cette technique sont celles de Tell es-Sultan (Figure 3.5), elles ont été retrouvées à Jéricho²⁰ (Palestine) qui est considérée par l'UNESCO comme la plus ancienne et grande ville néolithique de Moyen-Orient. Ces dernières sont datées entre 10000 et 9000 av. J,-C ; il s'agit des simples structures avec une pièce unique à plan libre (souvent rectangulaire et parfois carré, circulaire, ou circulaire multagonale). Leurs murs sont dotés des soubassements en pierre et recouverts de mortier de terre [218].

¹⁹La différence est bien remarquable dans les critères de sélection des terres, les tests de résistances à la compression et l'élançement des structures murales.

²⁰ Elle est décrite en Torah par 'la ville des palmiers'.

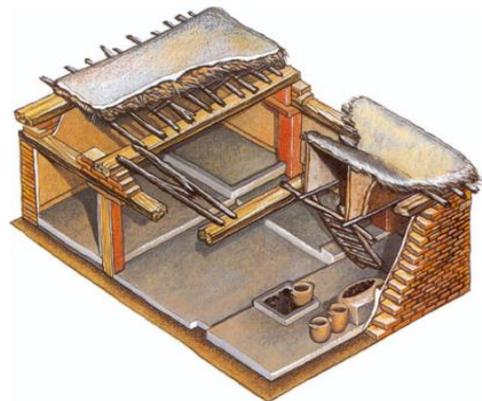


Figure 3.5 : Fondations de maisons retrouvées à Tell es-Sultan, Jéricho [219].

Le village Çatal Höyük (Anatolie, Turquie) est également l'un des plus anciens ensembles d'habitation en adobe (Figure 3.6.a). Ce site néolithique est daté entre 7200-6400 av. J.-C, il a été découvert dans les années 1950. Cent soixante-six (166) maisons ont été fouillées afin de comprendre leur architecture, notamment leur système constructif. Les murs de ces dernières sont construits de brique de terre crue dépassant 1 mètre de long (murs porteurs), or les toitures sont faites de supports en bois ou de roseaux, couverts d'une couche de terre damée (Figure 3.6.b) [220].



(a)



(b)

Figure 3.6 : Village Çatal Höyük, en Anatolie, Turquie. (a) : Fouilles de Çatal Höyük, (b) : Dessin modèle de la maison vernaculaire de Çatal Höyük [220].

Par la suite, nombreux villages constituant des constructions en adobe, notamment des ensembles d'habitation, ont été découverts. Elles présentent une diversité et une richesse architecturale. Ces dernières sont datées de : la période néolithique à Chypre, de l'Âge de Fer en Europe, entre 8000 et 6000 av. J.-C au Turkménistan, de 7500 av. J.-C à la vallée de Tigre, de 5700 Av. J.-C en Grèce, de 4000 av. J.-C en Assyrie, de 2900 av. J.-C à l'Égypte antique (Figure 3.7), et de

1600 av. J.-C en Turquie [217]. En effet, l'adobe était, pendant des siècles, la technique de construction par défaut de plusieurs communautés. Ses œuvres architecturales présentent aujourd'hui 50% des biens (bâti en terre) inscrits sur la liste du patrimoine (Figure 3.7) ; 68% en Asie pacifique, 60% en Amérique latine et Caraïbes, et 17% en Europe et Amérique du Nord, 46% en Afrique, 60% en États arabes) [14].

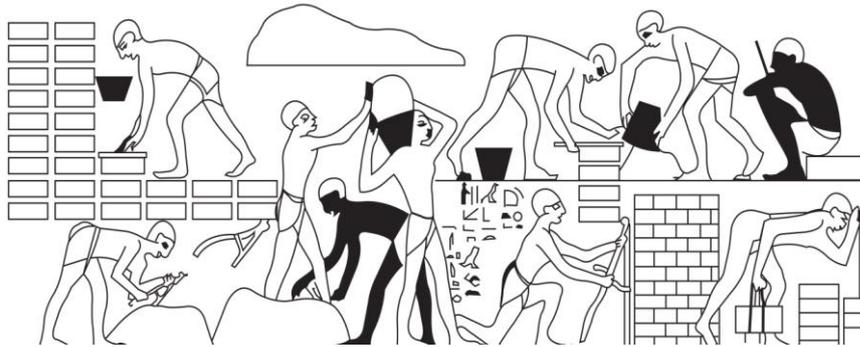


Figure 3.7 : Mise en œuvre d'adobe dans l'ancienne Égypte [220].

2.1 L'habitat vernaculaire d'adobe

Âgé de plus de 10 siècles (1000-1500 ap. J.-C), le Pueblo de Taos (*lieu des saules rouge* ; traduction française) au Nouveau-Mexique (Chap.1. §3.1.1), présente le plus ancien ensemble d'habitation traditionnelle en adobe (Figure 3.8) continuellement habité depuis près d'un millénaire. Ce village abrite toujours la communauté indienne, qui résiste encore à l'industrialisation, dont aucune sorte de modernisation n'est apportée à ses habitations lors de leur restauration (elle y vit toujours sans eau, ni électricité, ni canalisation d'égouts).

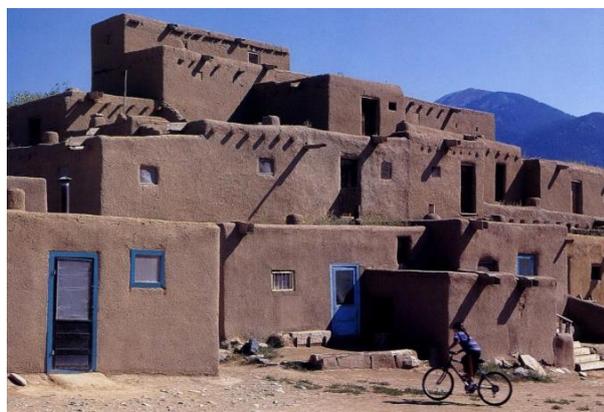


Figure 3.8 : Pueblo de Taos [221].

À cet exemple s'ajoute la cité antique de Shibām au Yémen daté de XVI^e siècle (qui a fait l'objet d'une analyse détaillée dans au chap.2. §2.1) abritant, selon

l'UNESCO, environ 500 immeubles en adobe, entourés d'une enceinte fortifiée (Figure 3.9), et caractérisés par leur hauteur exceptionnelle pouvant atteindre les 8 étages. Cette cité abrite aujourd'hui environ 7000 habitants, en leur offrant un mode de vie traditionnel.

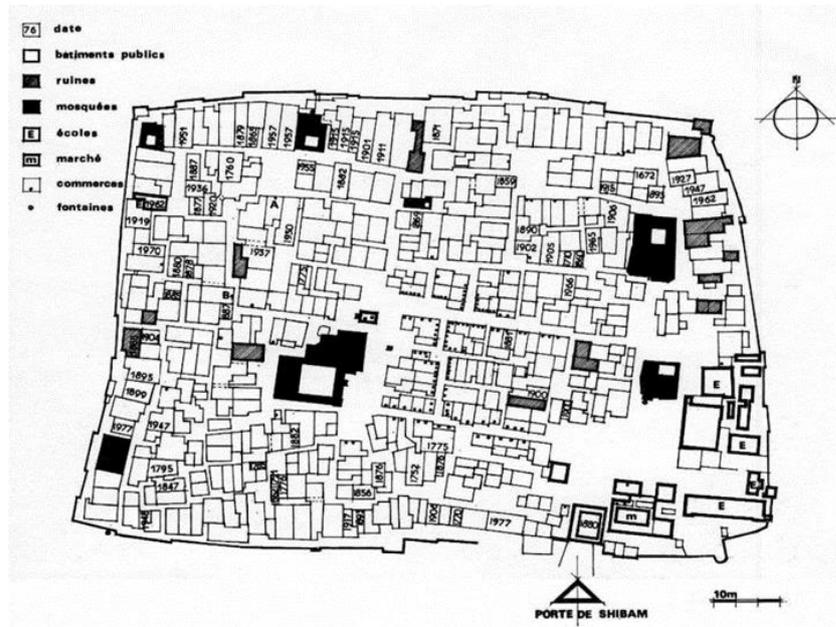


Figure 3.9 : Plan de masse de village Shibām [222].

Ainsi, la ville-oasis de Ghadamès en Libye (âgée de plus de 400 ans) : un des plus anciennes cités présahariennes, selon l'UNESCO, et un exceptionnel exemple de Ksour de terre crue, émanant de l'adaptation de la vie aux conditions climatiques du désert. Cette ville est caractérisée principalement par ses maisons à patio (soit 1342 ; identiques à celles mozabites, d'Algérie), ses ruelles couvertes (formant des tunnels), ainsi que ses places ; ces trois éléments sont étroitement groupés créant un nid d'abeille [223, 224] (Figure 3.10).



Figure 3.10 : Vue aérienne sur l'ancienne ville de Ghadamès [225].

Les maisons Ghadamsies sont construites en adobe, avec des structures en murs porteurs épais allant jusqu'à trois niveaux (Figure 3.11), leurs plafonds sont soutenus par des charpentes formées de troncs de palmiers, recouverts d'un plancher en palmes, lui-même recouvert d'une couche de terre puis de revêtement de chaux [224, 226] .

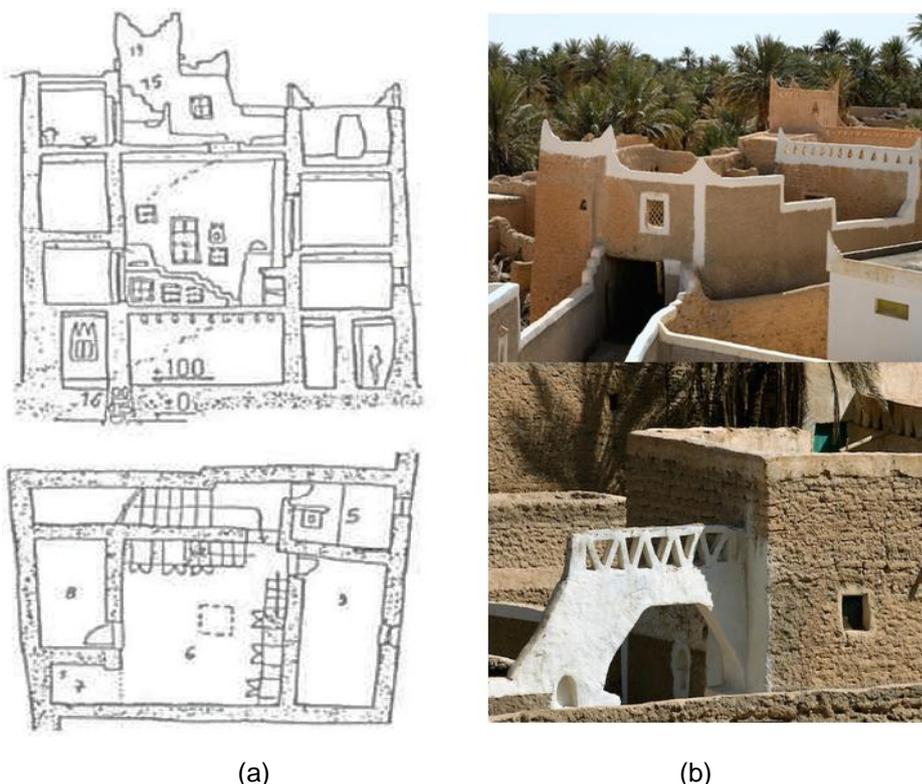


Figure 3.11 : Détail architectural et constructif des maisons Ghadamsies. (a) : Plan et coupe, (b) : Système constructif [227, 225].

Comme déjà évoqué, cette culture constructive s'est diffusée dans les régions sahariennes, déterminant autant de formes et des typologies architecturales. La ville mythique de Tombouctou à Mali présente un autre exemple d'habitat vernaculaire d'adobe inscrit sur la liste du patrimoine mondial. Cette dernière est caractérisée, comme la plupart des cités sahariennes, notamment celle présentée auparavant, par son tissu urbain très dense, ses ruelles étroites, ses maisons à cour intérieure (Batouma), ses murs épais, et ses façades à petites ouvertures [228] (Figure 3.12.a). Cette organisation et cette technique de construction étaient également l'expression du mode de vie de la société iranienne, ils se sont retrouvés à l'ancienne citadelle détruite de Bam (Figure 3.12.b), ainsi qu'en Ispahan [229, 230].

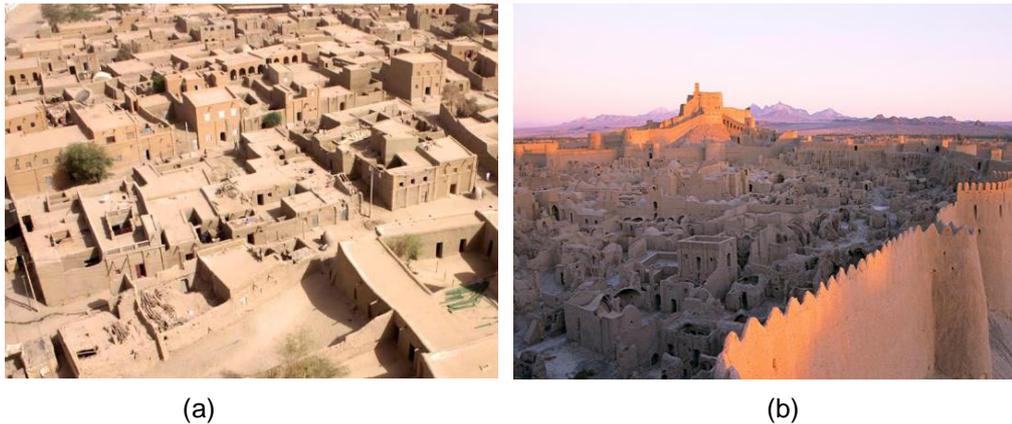


Figure 3.12 : Habitat vernaculaire en adobe. (a) : Ancienne ville de Tombouctou, (b) : Citadelle de Bam [228, 231].

En effet, Mali est connue également par un autre site culturel classé au patrimoine mondial de l'humanité, ce dernier est caractérisé par ses habitations traditionnelles en adobe, édifiées sur un plateau volcanique rocheux près du sommet d'une montagne isolée. Datée de XIV^e siècle, la falaise de Bandiagara, connu également par le nom de pays de Dogon, est composée des maisons simples de forme cubique (à deux niveaux), dans lesquelles s'intègrent de nombreux greniers posés sur pilotis, avec un plan carré, et des toitures pointues en chaume (Figure 3.13). Ce site a été conservé pendant des millénaires grâce à la difficulté d'accès de ce territoire montagneux isolé, selon l'UNESCO, il présente une intégration harmonieuse authentique au paysage naturel.

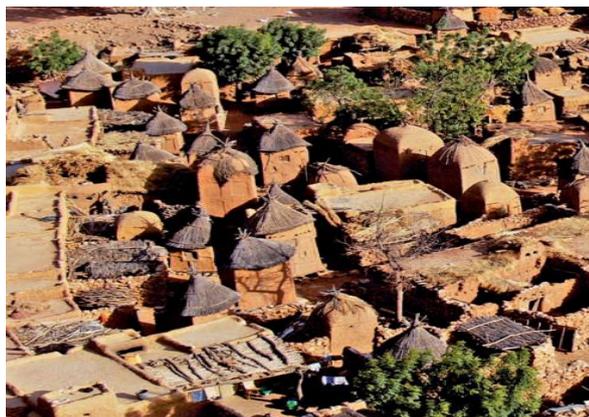


Figure 3.13 : Village Dogon à Mali [213].

Ces sept exemples sont considérés actuellement comme les meilleurs et les plus anciens exemples d'habitat vernaculaire construit purement en adobe, chaque exemple présente des critères d'authenticité et d'intégrité, régissant son inscription sur la liste du patrimoine mondial. Néanmoins, des milliers sont les ensembles d'habitation dignes d'être conservés, mais non classés. La plupart d'entre eux ont

fait l'objet des lectures et des interprétations, mettant en valeur leurs particularités, aussi bien techniques que culturelles.

2.1.1 L'usage de l'adobe dans l'habitat traditionnel en Algérie

Comme tous les pays du monde, l'Algérie recèle d'un patrimoine d'architecture de terre crue qui remonte à des millénaires, ce matériau de construction a été largement utilisé dans l'habitat traditionnel. À l'instar de différentes régions de ce pays, les villes du sud, témoins de l'utilisation séculaire de l'adobe, qui présente la technique ancestrale la plus répandue dans les climats présahariens et sahariens, où les habitants ont opté pour un matériau local, à faible énergie grise, recyclable, et possédant des qualités hygrothermiques très intéressantes.

En effet, l'usage de cette technique dans les zones algériennes arides était répandu dans deux formes prédominantes de centres historiques : Ksour et Kasbah. Ces ensembles architecturaux et urbains sahariens compromettent les capacités des sociétés à concevoir un établissement humain dans une aire géographique aride ou désertique, au profit d'une meilleure exploitation des ressources naturelles (terre, palmeraie, Oued) d'une part, et d'une prise en compte progressive des dimensions humaines, géographiques, climatiques, économique-culturelles et politiques, d'une autre part.

En outre, l'apparition de ces villages sahariens est datée à tort entre les XI^e/XII^e siècles [232], ces derniers ont été "érigés sur les grands parcours caravaniers qui relient le Nord au Sud de l'Afrique sub-saharienne" [233, p. 197] (Figure 3.14).

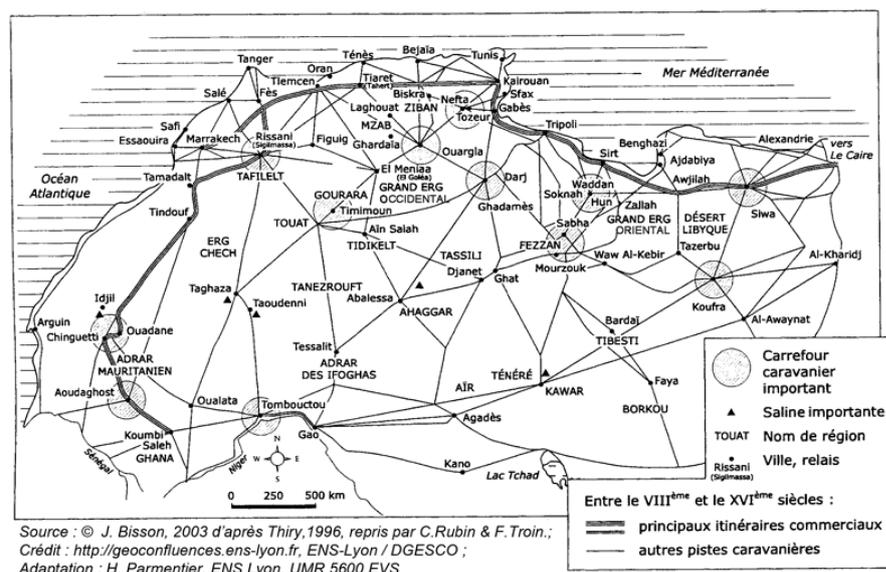


Figure 3.14 : Grands parcours commerciaux transsahariens, entre VIII^e et XVI^e siècle [234].

Appréhendées dans leur dimension patrimoniale²¹, certains ksour et Kasbah d'adobe (parmi les centaines) sont inscrits aujourd'hui dans des démarches de sauvegarde, bénéficiant de mesures de protection légale du ministère de la Culture Algérienne, spécifiés par la loi n°98-04 relative à la protection du patrimoine culturel. Néanmoins, deux ensembles d'habitats traditionnels (Chap.2. §2.1 et §2.2), construits partiellement en adobe, sont classés sur la liste du patrimoine mondiale de l'UNESCO : la Casbah d'Alger, et la vallée du M'Zab qui est constituée de cinq ksour (Ghardaïa, Beni Isguen, Bounoura, Melika et la palmeraie d'El-Atteuf).

Au nombre de trente et un Ksour protégés, et de dix-huit ksour bénéficiant des mesures de protection nationale, autrement dit classés au patrimoine algérien [235], huit établissements humains sahariens sont construits purement en adobe : Ksar Taghit et celui de Beni Abbas et de Kenadsa à Bechar, Ksar de Tamentit (Adrar), Kasbah de Témacine et celle de Ouargla (à Ouargla), Ksar Khenguet sidi Nadji à Biskra, et Ksar Tamerna à El-Oued. Ces Ksour et Kasbah du grand Sud sont réputés par leur architecture domestique arabo-musulmane maghrébine, caractérisée par une simplicité, et une sobriété formelle et technique (Figure 3.15). Ces derniers ont fait l'objet de plusieurs études, mettant en exergue leur valeur patrimoniale incontestable, à travers leurs formes et leurs structures.



Figure 3.15 : Vues aériennes sur deux anciens ksour construits en adobe. (a) : Ksar Beni Abbas, (b) : Ksar Temacine [236].

En effet, ces ensembles fortifiés présentent, selon Said MAAZOUZ, une unité qui se traduit à travers leur localisation, le processus de leur implantation (intégration de triptyque, bâti, palmeraie et eau), et leur organisation, ainsi qu'une

²¹ "Leur homogénéité et leur unité architecturale et esthétique, présentent un intérêt historique, architectural, artistique ou traditionnel " [371].

spécificité qui se résume dans la morphologie de leurs unités fondamentales (Figure 3.16) [237]. Du fait, le lien de causalité entre le climat désertique et ces établissements humains résulte un large éventail de réponses participant au confort intérieur comme extérieur, tout en faisant face à trois contraintes majeures sur l'échelle urbaine : radiations solaires, tourbillons de poussière et vents du sable [238], et en luttant contre le transfert de chaleur et le surchauffe, sur celle architecturale.

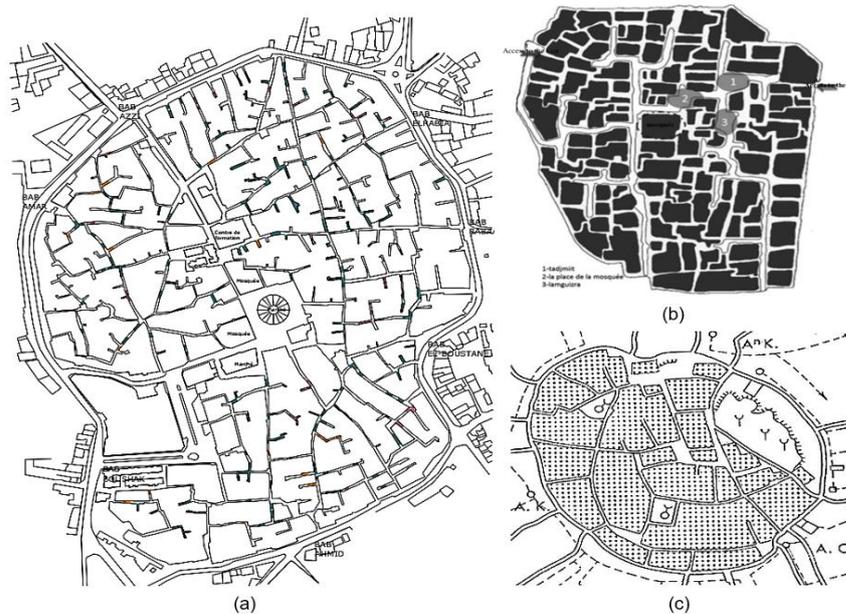


Figure 3.16 : Diversité de morphologies urbaines Ksouriennes. (a) : Ksar Ouargla, (b) : Ksar Taghit, (c) : Ksar Tamerna [239, 240, 241].

2.1.1.1 L'adaptation bioclimatique dans le patrimoine ksourien

La première adaptation au climat est achevée par la compacité du tissu urbain (Figure 3.16), permettant d'ombrager les ruelles, de limiter les surfaces exposées aux radiations solaires intenses, de diminuer le temps d'ensoleillement des façades exposées, et d'assurer une protection contre les vents du sable. Cette théorie a déjà été démontrée expérimentalement par plusieurs chercheurs, parmi eux ALABSI, SONG et GARFIELD [242], qui ont analysé cinq exemples d'établissements humains (Village Shibām et l'ancienne ville de Sanaa en Yémen, cité de Khadramiah à Bagdad, l'ancien Damas en Syrie, et le projet de Paris en Égypte), à l'aide de logiciel Ecotect. Les résultats de leur étude ont montré que la densité du bâti permet d'empêcher plus de 80% des radiations solaires d'atteindre les rues et ruelles, et de réduire les températures d'air. Cela a été également assuré

par le faible ratio "hauteur des constructions/ largeur des rues et ruelles" (Figure 3.17).



Figure 3.17 : Ruelles des Ksour (a) : Ksar Tamentit, (b) : Ksar Taghit.

En outre, les ruelles sont conçues d'une manière permettant la création d'un effet venturi²², et des coupe-vent favorisant la ventilation naturelle, elles forment des canyons augmentant la vitesse des vents tout en réduisant ou créant des variations dans sa pression [243].

Par ailleurs, la compacité s'émerge également dans la typologie architecturale des habitations, dont elles obéissent, au même plan introverti (Figure 3.18), avec un patio, autour duquel tendent à s'organiser les pièces (chambres, cuisine, dépôt et enclos pour animaux). En fait, organiser une maison serrée (qui ne dépasse généralement pas les 100 m²) autour d'une cour intérieure présentant la source unique d'air, de lumière et d'échange thermique avec l'extérieur, permet de réduire le coefficient de compacité (ratio de surface totale extérieure des parois/volume habitable) qui doit être inférieur à 0.7 [244], et par conséquent limiter sensiblement les gains ou les pertes de chaleur à travers les parois. Cette diminution est également assurée par la mitoyenneté des maisons, leur orientation (sud-est)²³, les dimensions du patio (H/L) et celles de son ouverture qui dépendent principalement de l'indice d'aridité²⁴ de chaque région [245, 246].

²² "L'effet Venturi (du nom de physicien italien Giovanni Battista Venturi) est le nom donné à un phénomène de la dynamique des fluides où les particules gazeuses ou liquides se retrouvent accélérées à cause d'un rétrécissement de leur zone circulation" [367, p. 23].

²³ Cette orientation permet de recevoir plus de rayons solaires pendant l'hiver, et de les maîtriser facilement durant l'été (par l'effet de masque).

²⁴ L'indice d'aridité est l'un des indicateurs quantifiant le degré de sécheresse d'une région donnée. C'est le rapport entre la précipitation moyenne annuelle (mm) et l'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne en mm [341].

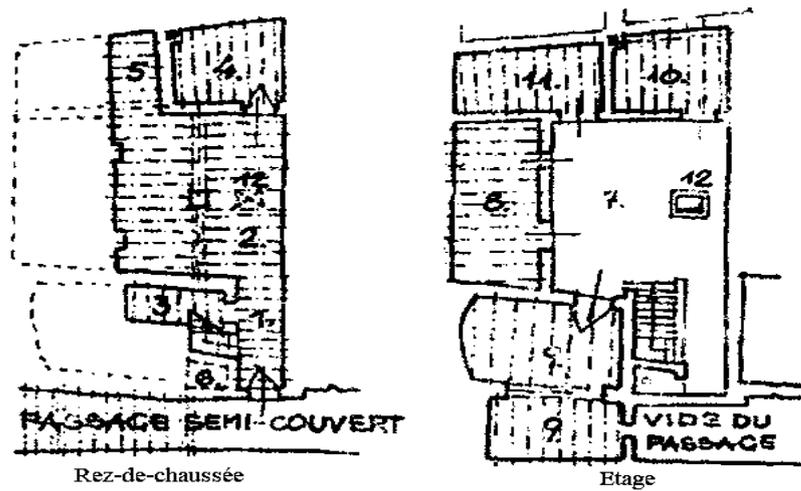


Figure 3.18 : Plan d'une maison ksourienne à Taghit [247].

Cette cour (appelée aussi amass an tiddar, wastedar, ardediar, houch, fena...etc.) est considérée comme une stratégie bioclimatique, régulatrice de température et génératrice du microclimat. Son mécanisme a été discuté par ABDULKARIM [248], afin d'être résumé en quatre cycles réguliers (Figure 3.19), basés essentiellement sur l'inertie thermique de l'enveloppe (Figure 3.20), et la circulation thermosyphonique naturelle créée entre l'ouverture du patio, la grande porte d'entrée qui est laissée généralement ouverte, et les petites ouvertures percées parfois en haut des murs.

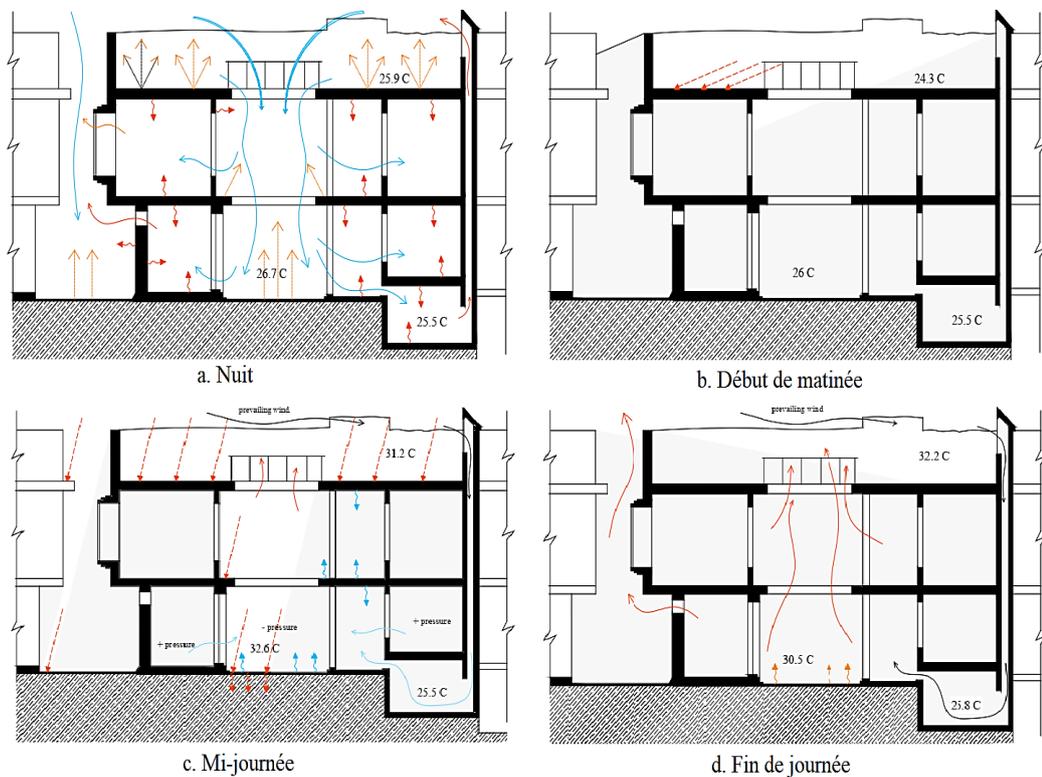


Figure 3.19 : Quatre cycles de mécanisme du patio [248].

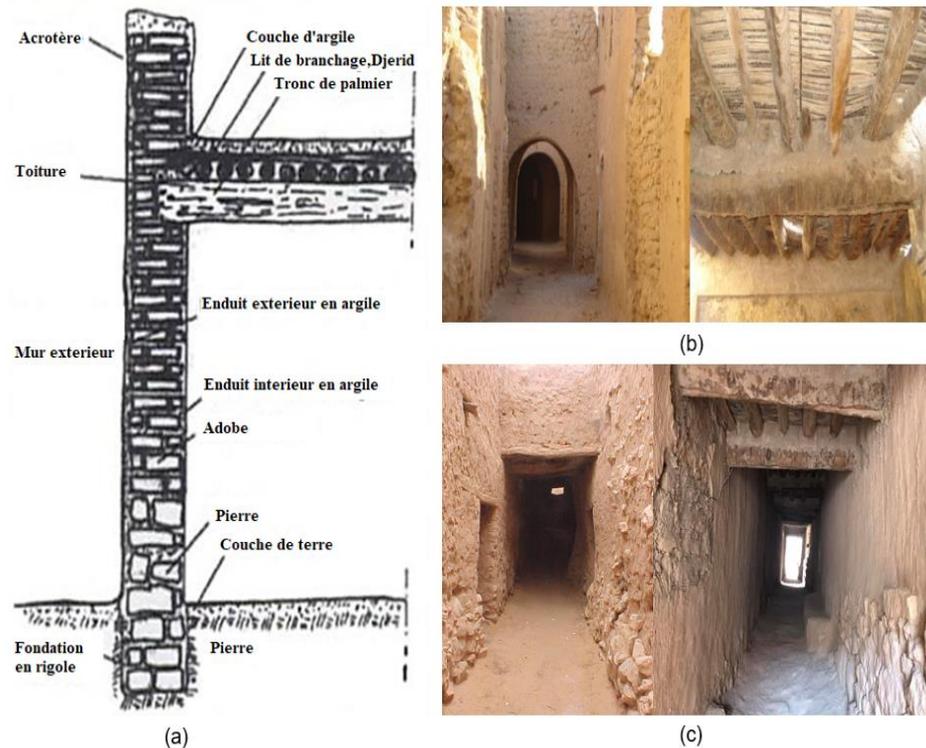


Figure 3.20 : Enveloppe du bâti ksourien. (a) : Système constructif des maisons, (b) : Ksar Témacine, (c) : Ksar Taghit [237, 249].

En fait, ce mécanisme a guidé les habitants des maisons traditionnelles à une autre méthode d'adaptabilité climatique ; le nomadisme quotidien et saisonnier (Figure 3.21). Ce dernier a été défini par Ammar BENNADJI²⁵ [250] comme étant un procédé qualifiant l'occupation partielle d'une maison, il s'agit d'un déménagement quotidien ou saisonnier vers un espace considéré plus confortable que les autres : l'occupation du rez-de-chaussée durant la journée, et le déménagement vers la terrasse pendant la nuit [243].

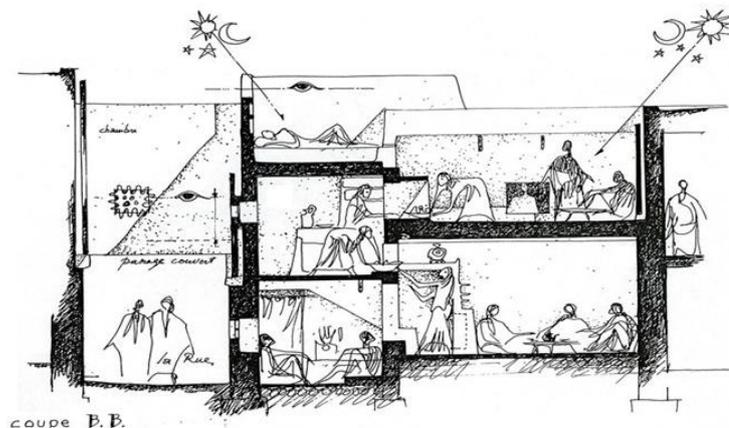


Figure 3.21 : Nomadisme quotidien estival [251].

²⁵ Docteur en architecture à l'université de Robert Gordon, Royaume-Uni.

Parlons du nomadisme, notamment celui saisonnier, le sud algérien possède d'autres exemples d'habitat vernaculaire construit en adobe, ne faisant partie ni de Ksour ni de Kasbah, cependant, ils obéissent à une architecture identique à celle de la maison ksourienne. Il s'agit en effet d'habitations dispersées en milieu rural, résultant généralement des activités agricoles, elles sont souvent implantées au cœur de la palmeraie (Figure 3.22). Dans certaines régions (par exemple, Ghardaïa), ces maisons présentent des refuges d'été, permettant aux citoyens de s'échapper de la chaleur, afin de profiter de la fraîcheur et de l'ombre fournies par l'oasis : la végétation permet de réduire la température de l'air jusqu'à 4°C [252]. Il est à noter que ces dernières servent également comme des résidences en période de cueillette des dattes.



Figure 3.22 : Maison traditionnelle à Mchounech, Biskra.

En conclusion, ces habitations vernaculaires se trouvent aujourd'hui au cœur des préoccupations écologiques cherchant à intégrer la qualité environnementale dans le domaine de construction ; selon l'UNESCO, elles "*contribuent fortement au développement social, culturel en respect de l'environnement et dans une perspective de développement durable*" [253, p. 26]. En outre, leur essentiel

matériau de construction, adobe, présente de nombreux avantages environnementaux qui peuvent le placer dans la position d'un matériau de choix pour répondre aux enjeux de durabilité (à chaque étape du cycle de vie du bâtiment, depuis l'extraction des matières premières, jusqu'au traitement de fin de vie - recyclage) et de transition écologique. Ces avantages pouvaient être tirés des analyses et des interprétations conscientes de l'habitat vernaculaire qui s'étaient appuyées sur une méthode aussi bien quantitative que qualitative.

3. Efficiences énergétiques de l'habitat vernaculaire en adobe

Étant un matériau à excellentes propriétés hygrothermiques, la brique d'adobe est reconnue par son efficacité énergétique, qu'autant de chercheurs ont tenté d'étudier, à travers l'évaluation du comportement thermique de l'habitat vernaculaire, qui permet de montrer les potentiels tirés de l'usage de cette technique. Pour se résumer, seuls les résultats des études évaluant quelques exemples de ceux présentés auparavant sont discutés.

À la base de l'approche adaptative du confort thermique d'ASHRAE standard 55 (Chap.2. §1.4), une évaluation de comportement thermique des maisons vernaculaires Ghadamsies est réalisée par ALABID et TAKI [254]. Cette dernière a montré la neutralité de plus de 50% des habitants envers l'environnement de leurs maisons, dont la température ambiante et l'humidité relative se sont fluctuées entre 29 et 30°C, et 49 et 58%, respectivement (avec une moyenne de 38,6°C et 26% à l'extérieur). Ces résultats ont affirmé plusieurs études expérimentales antérieures faites sur le même exemple, notamment celles d'AHMED, KETRISH, et ABUGHRES [255] et d'EALIWA, et al. [256] qui ont fait, également, l'objet d'une affirmation par le travail récent de SHAHRAN, REBA, et KRKLJES [225], visant à étudier le confort thermique, l'adaptabilité et la durabilité de la maison Ghadamsie.

Également, en s'appuyant sur une campagne de mesures in situ, un questionnaire et une simulation numérique par Ecotect, AL-SHIBAMI [153] a dévoilé la question de performance thermique d'adobe au village de Shibām en période estivale, où une sensation de chaleur a été marquée dans les maisons yéménites pendant l'après-midi (+1.55 sur l'échelle d'appréciation des conditions thermique), et de neutralité durant le reste de la journée (-0.62 au matin et -0.25 pendant la nuit), avec une fluctuation légère de température intérieure (30 à 34°C), et une

consommation électrique nette nulle. Ceci a été affirmé par l'étude de BAESSA [257], démontrant la satisfaction de 94% des citoyens envers leurs maisons et celle récente de BAKIR et MEDAHJI [258], prouvant une réduction de 50% dans la consommation énergétique due au chauffage et climatisation.

Quant en Ispahan (Iran), 64% des habitants des maisons traditionnelles à patios (identiques à celles d'Yazd présentées au Chap.2. §2.1) étaient satisfaits, en considérant leurs habitations qui présentaient une stabilité de températures intérieures (à l'ordre de 24°C) fraîches [259], un résultat qui a été affirmé par l'étude récente de ZAMANI et al. [260] basée sur ASHRAE standard 55, et la simulation numérique faite par Design Builder et Energyplus, visant à déterminer le rôle des stratégies bioclimatiques, notamment celui du patio.

En parallèle, les ensembles fortifiés de sud Algérie présentaient généralement un climat intérieur supportable, qui pouvait être géré par un simple rafraîchissement passif. En fait, l'évaluation du comportement hygrothermique des maisons Ksouriennes d'Ouargla (une région dans laquelle les températures peuvent atteindre les 58°C, avec une amplitude de 18°C, une humidité relative de 2% et un indice d'aridité de 0.8) a montré une température stable de l'ordre de 38°C et une fluctuation d'humidité entre 44 et 48% : un environnement qui a été jugé tolérable selon l'acclimatation de l'habitant, cependant la norme préconise une plage de température de 24 à 32°C [261].

Néanmoins, toutes ces études discutées ne permettaient pas d'assimiler correctement l'impact que peut avoir l'usage d'adobe sur le confort thermique, vu que le comportement de ces maisons dépendait aussi et forcément de leur conception architecturale bioclimatique. Pour cela un autre type d'étude expérimentale, visant à comparer l'environnement intérieur des habitations partageant les mêmes caractéristiques architecturales et se différenciant en matériaux de construction, a été fait.

En effet, toute étude sur le rôle joué par l'adobe dans les maisons traditionnelles (en comparaison avec celui joué par les nouveaux matériaux industrialisés dans l'habitat contemporain), montre que ce dernier permet d'amortir les apports externes et de diminuer les fluctuations de températures, ce qu'entraîne une stabilité et une régulation de l'environnement intérieur de l'habitat, permettant

de réduire, ou même parfois, d'éviter l'utilisation des systèmes de climatisation, contrairement aux nouveaux matériaux de construction qui entraînent une surconsommation d'énergie.

Au départ, dans une étude réalisée en 1990, visant à comparer les performances thermiques des différents matériaux de construction (adobe, pierre, béton, brique creuse, et parpaing en béton), à l'aide de simulation numérique, EBEN SALEH a montré que sous le climat désertique de Riyad (Arabie Saoudite), l'adobe présente les meilleures qualités thermiques. Ce résultat a été confirmé par d'autres récentes études, comparant l'environnement intérieur des maisons vernaculaires avec celui de l'habitat contemporain, ainsi que leurs besoins et consommations énergétiques [262].

Par ailleurs, en comparant l'efficacité de l'adobe et celle du parpaing de ciment sous un climat aride, PORTAN-GANDARA, RUBIO, et FERNANDEZ [263] ont dévoilé une économie de 18% sur le coût de la consommation énergétique estivale en Mexique ; BINICI, et al. [264] ont démontré une augmentation de 41.5% dans les températures hivernales, et une diminution de 56.3% pendant l'été, en Turquie ; ALRASHED, ASIF, et BUREK [265] ont prouvé une diminution de 5 à 19% aux besoins énergétiques annuels dans cinq régions d'Arabie Saoudite.

Dans ce même objectif et sous les mêmes conditions climatiques, mais avec d'autres matériaux (béton, bois et pierre, brique creuse), une meilleure économie d'énergie a été montrée par ALGIFRI, BIN GADHI, et NIJAGUNA [266] en Yémen ; de meilleures qualités thermiques, sans recours aux systèmes de climatisation, ont été dévoilées par MARTIN, MAZARRON, et CANAS [267] en Espagne; et une réduction de température ambiante et une stabilité thermique ont été aperçues par FEZZAOUI, et al. [268] et MATARI, MAHI, et LACHI [269] en Algérie (Béchar), et par DATTA et MUSTAFA [270] à Bengladesh.

Toutefois, cette question reste encore très ouverte jusqu'à aujourd'hui, vu que ces performances ne dépendent pas seulement des caractéristiques thermo-physiques de l'adobe, mais aussi forcément de la compréhension de son comportement qui présente une question essentielle sur laquelle repose son usage dans le bâtiment et un point de départ de la conception architecturale [271].

3.1 Comprendre les qualités hygrothermiques d'adobe

Comme le précisent GUILLAUD et HOUBEN [17], l'adobe (un matériau composé essentiellement de la terre) n'a pas de propriétés isolantes²⁶, cependant, il présente des qualités naturellement intrinsèques lui permettant de contribuer efficacement au confort hygrothermique et de réaliser des économies d'énergie drastiques qui ont été déjà marquées dans le bâti vernaculaire. En fait, ce matériau a une nature spécifique, qui a attiré l'attention de la communauté scientifique d'autrefois et d'aujourd'hui : une capacité d'agir comme un chauffage et un climatiseur naturel, concourant à la régulation de deux facteurs, l'hygrométrie et la température de l'air.

En outre, la nature poreuse de ce matériau a permis l'étude de cette régulation à l'échelle microstructurale, où un transfert hygrothermique se déroule (transfert couplé d'humidité et de température). Ce dernier peut être conduit principalement par l'inertie thermique du matériau, son caractère hygroscopique et sa capacité de changement de phase, dans des plages de température et d'humidité relative [272].

3.1.1 Inertie thermique

Le premier effet qui se manifeste est l'inertie thermique (la capacité d'un matériau à stocker l'énergie thermique et à la restituer d'une manière diffuse). Ce paramètre permet au bâtiment d'être moins sensible aux variations quotidiennes de température, en stabilisant sa température ambiante à son niveau initial puis l'amenant lentement vers un nouvel équilibre en adéquation avec le contexte dans lequel il se situe.

En effet, il existe deux types d'inertie, avec des fonctionnements totalement différents, qui interviennent dans ce phénomène de stabilisation : l'inertie par transmission et l'inertie par absorption. Le premier type sert à ralentir l'échange énergétique entre le bâtiment et les ambiances thermiques adjacentes, il peut être assuré par une paroi à faible vitesse de transmission (diffusivité thermique), à la différence du deuxième type, qui nécessite des murs à forte capacité de stockage et de transmission de l'énergie thermique (effusivité thermique) pour qu'ils s'opposent aux variations des températures intérieures et les stabilisent. Il est à

²⁶“La terre ne possède nullement les propriétés thermiques dont on a bien voulu la doter. Le matériau n'est pas très isolant” [17, p. 35].

noter que ces deux grandeurs physiques évoluent en fonction de la conductivité et la capacité thermique, plus le matériau a une capacité thermique élevée et une faible conductivité thermique, plus sa diffusivité et son effusivité sont faibles; ainsi, plus le matériau est diffusif, plus il est effusif [273, 274].

Néanmoins, le climat chaud implique que la meilleure solution est celle qui permet une véritable protection contre la chaleur et les risques de surchauffe et une diminution de fluctuation quotidienne de température à l'intérieur du bâtiment. Autrement dit, réaliser une paroi avec une inertie par transmission maximale et donc une diffusivité minimale, et par conséquent, une conductivité thermique minimale et une capacité thermique volumique maximale, est la solution la plus efficace pour gérer au mieux les aléas thermiques extérieurs.

Indépendamment de ces propriétés thermo-physiques, l'épaisseur importante de la paroi présente le deuxième facteur décisif. En association avec ces dernières, elle favorise deux paramètres dynamiques relatifs à l'inertie thermique ; le temps de déphasage thermique (Φ) et le facteur d'amortissement (f) (Figure 3.23) [275]. Le premier paramètre détermine le temps mis par le flux de chaleur pour traverser la paroi, autrement dit, c'est le décalage du temps entre la température du pic intérieure et extérieure (Eq 3.1), alors que la seconde est définie comme la différence entre la température finale et celle initiale de ce flux (Eq 3.4) [276, 272].

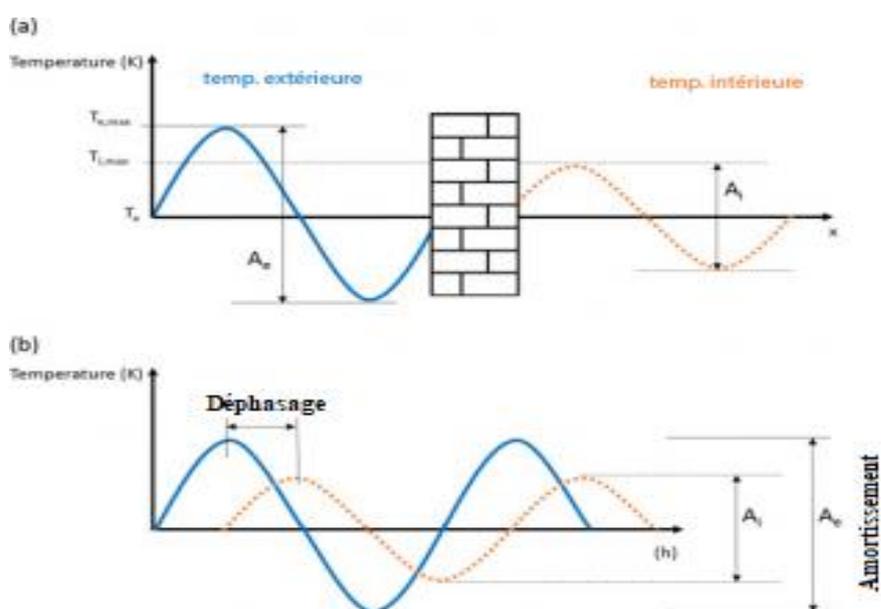


Figure 3.23 : Le déphasage thermique et l'amortissement [277].

$$\Phi = t_{Tin,max} - t_{Tex,max} \quad (\text{Eq 3.1})$$

Dont, $t_{T_{in,max}}$ et $t_{T_{ex,max}}$ sont les moments auxquels les pics de températures intérieures et extérieures sont atteints, respectivement, et Φ (h) est le temps de déphasage thermique qui peut être calculé également, comme suit, à partir des caractéristiques du matériau :

$$\Phi = \frac{d^2}{a} \quad (\text{Eq 3.2})$$

Où :

- d : Epaisseur du matériau, m
- a : Diffusivité thermique du matériau, m²/s. Elle peut être calculée comme suit :

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (\text{Eq 3.3})$$

Où :

- λ : Conductivité thermique du matériau, W/m.K
- ρc_p : Capacité thermique volumique du matériau, J/m³.K, d'où :
- ρ : Masse volumique du matériau, kg/m³
- c_p : Capacité thermique massique du matériau, J/ kg.K

$$f = \frac{\Delta T_{in}}{\Delta T_{ex}} \quad (\text{Eq 3.4})$$

Où f représente le facteur d'amortissement et ΔT_{in} et ΔT_{ex} représentent l'amplitude de températures intérieures et extérieures, respectivement.

Revenons à l'adobe et à sa qualité thermique, ce matériau massif et dense possède une inertie thermique, en général, supérieure à celle des matériaux de construction courants, soit trois fois celle de la brique creuse et du parpaing du ciment [278]. Le premier facteur déterminant de son inertie (ses propriétés thermo-physiques) varie selon sa composition qui, elle-même, varie en fonction des minéraux présents dans le sol de chaque région [279], à la différence du deuxième facteur (épaisseur du mur), qui dépend essentiellement de son positionnement (à l'intérieur ou à l'extérieur, au rez-de-chaussée ou à l'étage)²⁷. Le tableau ci-après (Tableau 3.6) présente les caractéristiques thermo-physiques de quelques

²⁷ Au village de Shibām, l'épaisseur du mur varie entre 23 et 76 cm : elle est égale à 76cm au rez-de-chaussée, à 69cm au premier étage, à 46cm au deuxième, à 34cm au troisième, à 28 cm au quatrième et à 23cm au dernier étage [368].

exemples de parois construites en adobe non stabilisé. Ces propriétés permettent un déphasage thermique qui peut atteindre les 14h et un facteur d'amortissement maximal de l'ordre de 0.05.

Tableau 3.6 : Caractéristiques thermo-physiques des adobes en études antérieures.

Réf.	d (cm)	λ (W/m.K)	C_p (j/kg.K)	a (10^{-7} .m ² /s)	Φ (h)	f
[280]	40	0.34	705.9	2.44	13	0.05
[281]	14	0.75	997	3.76	6	0.4
[282]	18	0.564	1020.5	3.11	7.57	0.43
[283]	20	0.75	880	5.05	4	0.25
[284]	30	0.4	746	3.2	13	-
[285]	20	0.7	880	4.87	5.954	0.554
[271]	50	0.5	696	3.57	19 - 7 ²⁸	0.04 - 0.25
[286]	9.9	0.91	662	6.06	3.32	0.89
	9.9	0.89	712	5.72	3.44	0.89
	10.4	0.9	554	9.23	2.51	0.94
[275]	30	0.75	880	4.92	9.2	0.32
[267]	40	0.7	969	4.07	12	0.55
[287]	40	0.45	800	3.93	13.84	0.13
	40	1.3	880	10.12	9.06	0.3

Rappelons que le climat chaud est caractérisé par des journées assez chaudes et des nuits plutôt froides où la température s'accroît pendant le matin pour atteindre son pic en après-midi, puis elle commence à baisser en fin de journée afin d'être fraîche en soirée, et y reste durant toute la nuit. Ceci provoque un transfert de chaleur de l'extérieur à l'intérieur du mur (par convection naturelle²⁹) ; lorsque la température de sa face extérieure s'élève, une onde de chaleur commence à le traverser progressivement, en se dirigeant vers sa face intérieure (par conduction). Le mur, et grâce à son inertie thermique et sa grande épaisseur, accumule cette chaleur, puis la restitue de manière diffuse une fois la température extérieure est basse. À ce moment-là, le flux de chaleur se dirige vers les deux faces du mur (extérieure et intérieure), afin d'être, à la fois, renvoyé vers sa source initiale et évacué dans l'espace habité, qui lui-même, bénéficie d'une ventilation nocturne permettant de le décharger de cette chaleur, ainsi de favoriser la dissipation de la

²⁸ Les valeurs en gras présentent des résultats calculés par auteur à partir des graphes de températures, dont ceux trouvés dans l'étude (calculés numériquement par la méthode ISO 13786) ont été jugés, par les chercheurs eux-mêmes, incohérents avec les mesures in-situ.

²⁹ Mouvement dû aux variations de masse volumique, générées par les gradients de température.

chaleur stockée dans ses murs, par la convection forcée³⁰ provoquée par le mouvement d'air et sa vitesse (Figure 3.24) [288, 274].

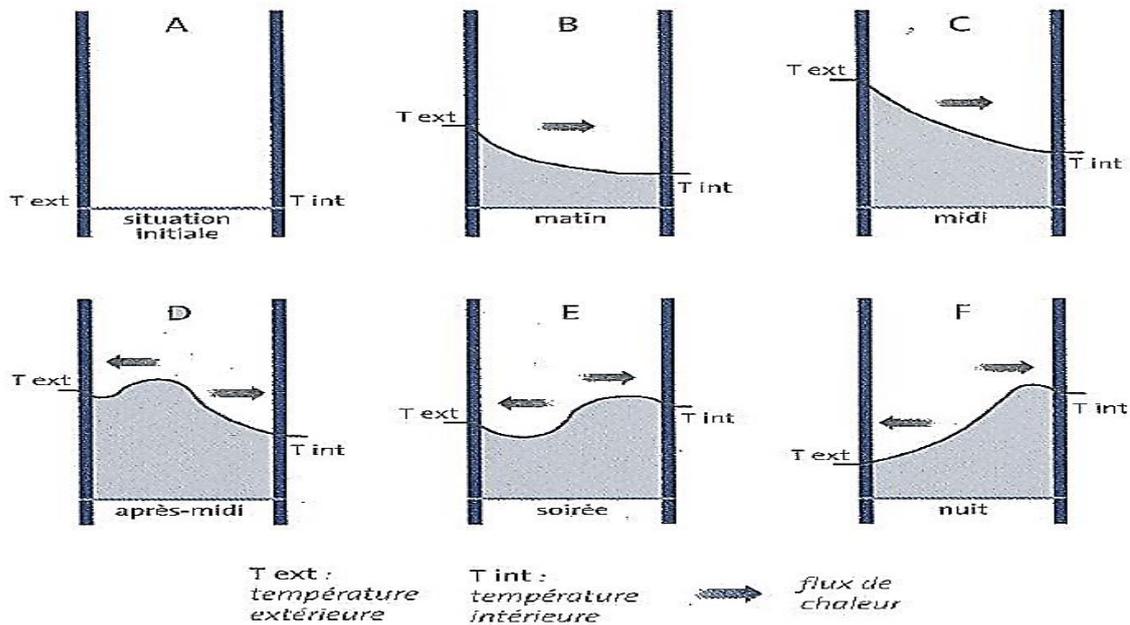


Figure 3.24 : Transfert de chaleur en climat chaud [288].

Or, la stratégie d'inertie thermique dépend d'autres sollicitations physiques, notamment de l'exposition du mur aux rayons solaires directs, autrement dit, son insolation qui dépend, quant à elle, de son orientation et des masques solaires qui l'entourent³¹ (immeubles, grands arbres, etc.). Ces derniers sont, en effet, responsables de sa durée d'insolation, et par conséquent, de la chaleur emmagasinée à son intérieur durant la première moitié de son cycle journalier, particulièrement celle transférée par rayonnement, qui présente la principale source de surchauffe en climat chaud et sec [115]. Cela justifie le choix de l'orientation sud des parois exposées et de la taille réduite du patio et de son ouverture, qui permettent de maîtriser les flux solaires ; ainsi, la compacité du tissu urbain, qui minimise le nombre de parois exposées aux sollicitations climatiques extérieures.

De plus, le transfert radiatif de chaleur implique deux autres grandeurs physiques ; la réflectivité et l'absorptivité thermique. Ceci s'explique par le fait qu'une fois l'irradiation solaire incidente³² est reçue par la paroi opaque, une part de

³⁰ Mouvement provoqué par des actions mécaniques extérieures.

³¹ Elle dépend également de lieu géographique, d'Albédo, de la saison et de l'heure.

flux solaires est absorbée pour être emmagasinée puis diffusée dans l'espace bâti par les phénomènes développés auparavant, tandis que le reste d'énergie thermique est réfléchi grâce au pouvoir réfléchissant du matériau, qui dépend essentiellement de son état de surface (couleur et texture) ; la surface peinte en couleur claire permet de réfléchir jusqu'à 70% de l'énergie incidente [115], et de réduire, par conséquent, 3 à 7°C de la température intérieure ambiante, et 4% des besoins énergétiques de climatisation [289]; la paroi rugueuse absorbe moins de flux radiatifs que celle lisse, sa texture, remplie de petits grains, lui permet une certaine protection solaire, en lui apportant de l'ombrage [290].

Ceci justifie, en effet, le revêtement du mur d'adobe (de l'habitat vernaculaire) en couche fine de terre ou d'argile, dotant d'une couleur claire et d'une texture rugueuse (similaire à celle d'enduit tyrolien) qui résulte de l'application d'enduit à la main et de son frottement à l'aide des feuilles de palmier [291]. Il est à noter que certains murs sont revêtus d'une couche de mortier de chaux ayant un coefficient de réflectivité entre 0.75 et 0.85% [225]. Ce revêtement, quant à lui, permet d'améliorer les performances thermiques de la paroi et de la protéger contre les infiltrations des eaux pluviales.

Enfin, il convient de noter qu'en l'associant à l'approche bioclimatique consistant à optimiser les rapports solaires, l'inertie thermique peut participer au confort thermique d'hiver, en réduisant les pertes de chaleur et en restituant pendant la nuit le flux de chaleur reçu pendant la journée, cela se fait par le même principe de stockage thermique évoqué précédemment.

3.1.2 Hygroscopicité et changement de phase

Comme tout matériau terre, l'adobe possède une structure microporeuse (à pores ouverts) lui conférant un caractère hygroscopique, autrement dit, une capacité de réguler l'humidité de l'air environnant par l'adsorption et la désorption : deux phénomènes physiques liés à l'action des molécules d'eau (gaz ou liquide) en contact avec une surface solide, sous l'effet des sollicitations climatiques thermiques.

3.1.2.1 Adsorption ; gain du poids avec humidification

Étant un matériau poreux humide, l'adobe est un milieu comprenant toujours une certaine quantité d'eau, cette dernière dépend essentiellement de ses

propriétés physiques (porosité, surface spécifique), des conditions climatiques dans lesquelles il est placé (température et humidité relative) et de la nature de la phase aqueuse de l'eau (liquide ou gaz). Les molécules d'eau (en état gazeux) sont fixées dans le domaine hygroscopique de l'adobe (les pores dont le rayon est inférieur à 1 micromètre : les micropores), par le phénomène d'adsorption monomoléculaire, quand l'humidité relative est très faible (au-dessous de 10%), et par l'adsorption plurimoléculaire, quand l'humidité relative de l'air devient plus importante (entre 10 et 50%); la première étape sert à recouvrir la surface des pores par une seule couche moléculaire d'eau sous l'effet des forces Van Der Waals (développée auparavant), alors que la seconde permet la fixation de plusieurs couches à la première (Figure 3.25) [292].

Par ailleurs, quand l'humidité relative augmente de manière isotherme (au-delà de 50%), les couches plurimoléculaires s'accumulent tout en se rejoignant pour former un pont liquide qui sera ensuite retenu par les forces capillaires afin d'entraîner un remplissage des pores. Ce pont est, en effet, séparé de la phase gazeuse par un ménisque³³ (Figure 3.25). À la différence de l'adsorption, le phénomène de condensation capillaire permet la fixation des molécules d'eau en état liquide dans les mésopores et les macropores (pores à rayon supérieur à 1 μm), autrement dit, dans le domaine capillaire de l'adobe [292, 210].

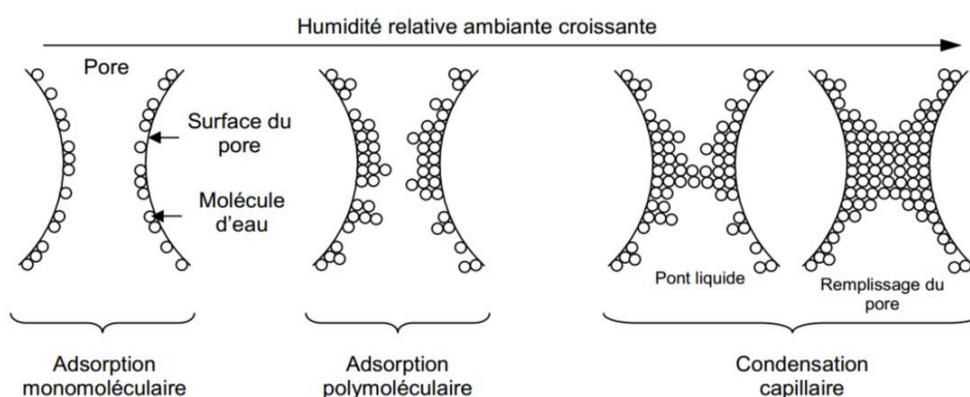


Figure 3.25 : Mécanismes de fixation d'eau dans les pores [210].

Cette capacité de fixer et de stocker l'eau, autrement dit l'hygroscopicité, se traduit par une isotherme d'adsorption : une courbe présentant l'évolution de la teneur en eau à l'équilibre (W_{eq}) en fonction de l'humidité relative de l'air (a_w), dans

³³ Une interface liquide/vapeur courbe au niveau des porosités, adopté par le liquide pour éviter que la surface du matériau soit exposée à l'air de séchage [305].

une température donnée (moins de 40°C) (Figure 3.26). Cette teneur est calculée à partir de la formule ci-après [293].

$$W_{eq} = \frac{m(t) - m_0}{m_0} = \frac{m_{H_2O}}{m_0} \quad (\text{Eq 3.5})$$

Avec :

- W_{eq} : Teneur en eau, kg/kg³⁴
- $m(t)$: Masse du matériau humide, kg
- m_0 : Masse sèche du matériau, kg
- m_{H_2O} : Masse de l'eau adsorbée, en kg

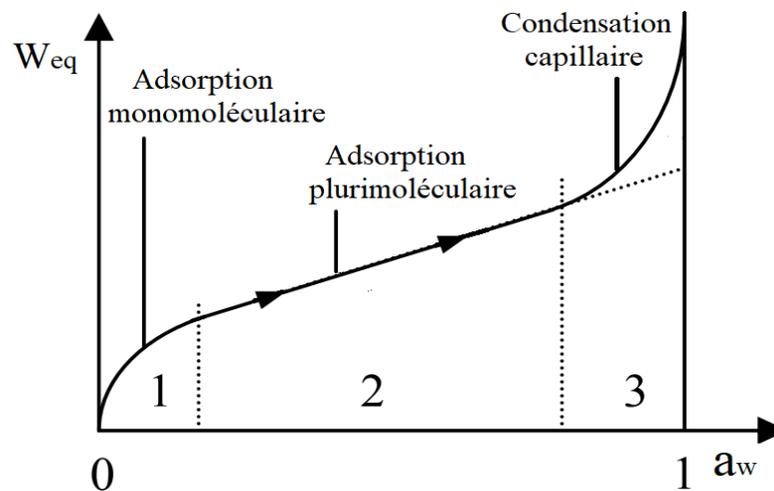


Figure 3.26 : Isotherme d'adsorption [294].

En outre, la teneur d'eau obtenue à de différentes humidités dépend, en particulier, de la porosité du matériau (plus particulièrement celle ouverte et interconnectée, autrement dit, celle accessible à l'eau³⁵) et de sa surface spécifique [295] : deux grandeurs caractéristiques définissant le volume (%) et la surface accessibles aux molécules d'eau, respectivement. En adobe, ces dernières sont respectivement comprises entre 15 et 35% [296] et 20 et 80m²/g [297], ce qui lui confère une capacité d'adsorption très élevée par rapport aux autres matériaux (Figure 3.27) et une teneur en eau équilibrée, en état normal, variant entre 1 et 3% [298] : un pourcentage permettant d'assurer la cohésion de ses feuillets d'argile; or

³⁴kg d'eau par kg de matière sèche.

³⁵Les pores à travers lesquels le fluide peut traverser le matériau.

son augmentation influe considérablement sur ses caractéristiques thermophysiques et mécaniques et donc sa durabilité.

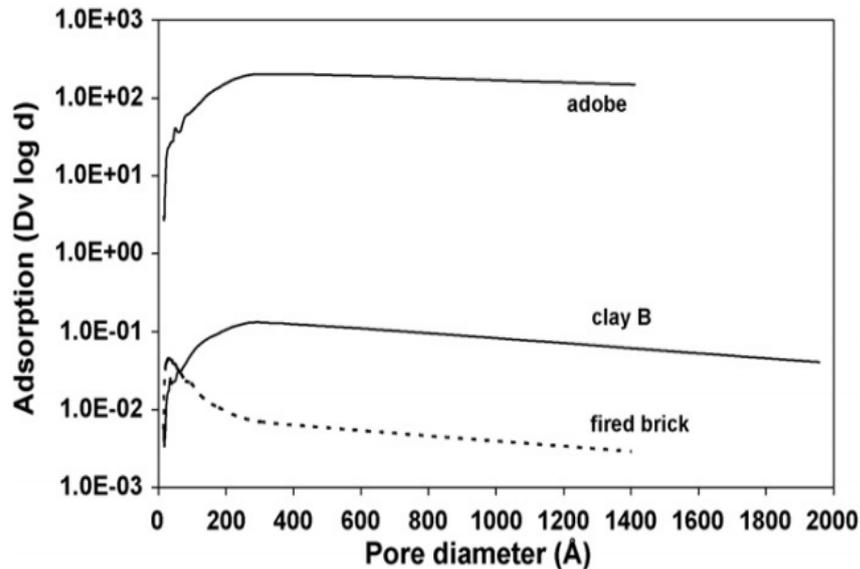


Figure 3.27 : Courbe montrant la porosité et l'adsorption d'un échantillon d'adobe en comparaison avec la brique cuite et l'argile utilisée pour leur fabrication [295].

En effet, MEDJELAKH, ULMET, et DUBOIS [299] ont tenté d'étudier le comportement hygroscopique d'un mur en adobe (de 10 cm d'épaisseur), afin de déterminer son impact sur ses propriétés thermophysiques. Selon les résultats de leur travail, l'augmentation de l'humidité relative de l'air environnant a entraîné une augmentation de la teneur en eau du matériau de 1.8 à 5.2% (Figure 3.28) et par conséquent, une augmentation de sa densité (de 1761.9 à 1797.6kg/m³), sa conductivité thermique (de 0.77 à 0.95W/m.K), sa chaleur spécifique (de 817.6 à 877.6J/kg.K), ainsi que sa diffusivité thermique (de 5.34×10⁻⁷ à 6.02 ×10⁻⁷ m²/s). Ceci a été également montré par EL-FGAIER, et al. [300] ; ils ont montré que la saturation d'un échantillon d'adobe (W_{eq} =3.5% à 95% d'humidité relative), caractérisé par une densité de 1988kg/m³, une capacité tampon hydrique (VBS) de l'ordre de 6.86g/m².HR%, et une surface spécifique égale à 52.01m²/g (méthode BET), a permis d'augmenter sa conductivité thermique jusqu'à 20% (de 0.82 à 1.02 W/m.K), et sa chaleur spécifique de 660 à 675J/kg.K.

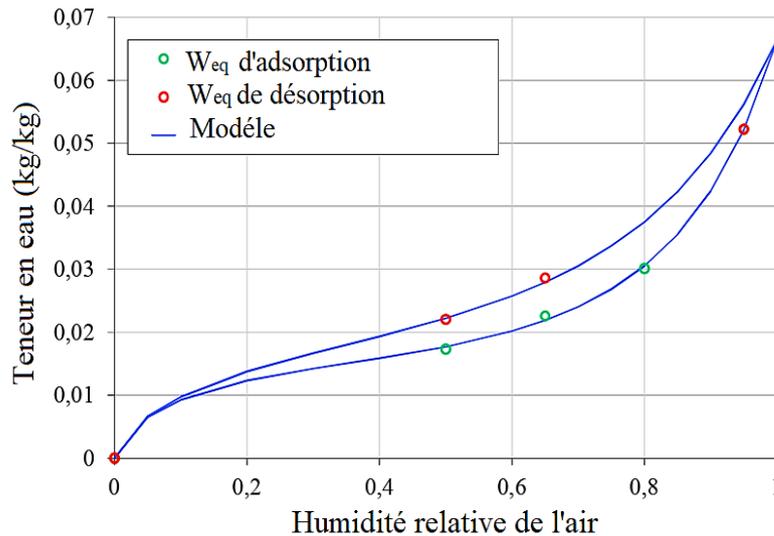


Figure 3.28 : Isotherme de sorption du matériau adobe [299].

Quant aux caractéristiques mécaniques, la résistance à la compression d'adobe diminue avec l'augmentation de sa teneur en eau : un mur de 30 cm d'épaisseur peut perdre jusqu'à environ 62% de sa capacité à supporter les charges latérales, si la quantité d'eau à son intérieur touche les 15% (état de saturation), un résultat qui a été montré numériquement par AL AQTASH, et al. [301]. Toujours dans l'objectif d'étudier l'effet de l'humidité sur la résistance à la compression des murs d'adobe, WELDON, et al. [298] ont tenté de comparer expérimentalement la résistance de deux murs d'adobe (de 6 cm d'épaisseur, 152 cm de longueur et de 76 de hauteur) à la compression, en variant leurs teneurs en eau (4.44 et 7.25% en soubassement, et 3.86 et 3.30% au sommet du mur, respectivement). Les résultats de leur travail ont montré que cette augmentation de la teneur en eau du mur a conduit à la réduction de sa résistance à 75%. Également, MICCOLLI, et al. [302] ont dévoilé que l'augmentation de la teneur en eau d'adobe de 1.5 à 4.4% entraîne une diminution de sa résistance de 6.7 à 2.5MPa, un résultat qui a été également affirmé par MARTINS, et al. [303] en démontrant une réduction de 40% (0.82 à 0.49MPa) de la résistance du matériau après sa saturation.

Parlons toujours de l'influence de la teneur en eau sur les propriétés mécaniques d'adobe, pour un échantillon stabilisé par les fibres naturelles de pin d'Alep, JOVE-SANDOVAL, et al. [304] ont montré que la saturation du matériau réduit sa résistance à la traction de 20 à 17MPa, et son module d'élasticité de 300 à 240MPa. En outre, dans une étude comparative entre la résistance l'adobe et celle de la brique cuite à l'érosion induite par l'eau, CALABRIA, et al. [295] ont

montré la forte vulnérabilité de l'adobe à l'eau ; l'augmentation de sa teneur en eau a conduit à sa dégradation après 30 jours d'exposition à l'eau, dont une réduction de sa surface spécifique, et une augmentation de volume et de diamètre moyen de ses pores ont été marquées (Tableau 3.7).

Tableau 3.7 : Effet de l'érosion sur les caractéristiques physiques de l'adobe [295].

Caractéristiques physiques	0 jours	30 jours	Ecart
Surface spécifique (m ² /g)	44	18	26
Volume spécifique de pores (cm ³ /g)	0.24	0.28	0.04
Diamètre moyenne de pores (nm)	22	64	42

3.1.2.2 Désorption ; perte du poids par séchage

L'eau adsorbée et stockée dans les pores du matériau hygroscopique (pendant la période humide) est ensuite restituée à l'intérieur de la maison sous forme de vapeur, lorsque la température est élevée et inversement l'humidité. Ce processus de désorption est décrit comme un transfert d'eau couplé à un transfert de chaleur (transfert hygrothermique), il se fait en trois phases ; l'évaporation, la diffusion et la mise en équilibre hygroscopique, qui représentent deux régimes distincts de vitesse constante et décroissante [305].

Durant la phase de préchauffage, l'évaporation se fait principalement à la surface libre de l'échantillon en contact avec l'air chaud qui, quant à lui, entraîne une augmentation de sa température jusqu'à atteindre la température de bulbe humide³⁶. Une fois l'équilibre thermique entre la surface du matériau et l'environnement extérieur atteint, la première phase, débute et l'eau libre au cœur du matériau se transporte vers sa surface par une vitesse constante et l'évaporation se produit au niveau du ménisque (Figure 3.29). Cette phase se termine lorsque le matériau atteint une teneur en eau critique et l'air chaud est en contact direct avec la surface du matériau. Il est à noter que le taux d'évaporation à cette phase dépend de la surface du matériau, toutefois, il est constant, et ainsi la vitesse d'évaporation.

Dans la deuxième phase, la température de surface s'élève au-dessus de celle de bulbe humide, le taux d'évaporation diminue, et ainsi sa vitesse, parce que le séchage s'effectue, à ce moment-là, par diffusion à partir du front d'évaporation qui

³⁶La température de l'air circulant à l'intérieur d'un matériau saturé en eau.

se forme quand l'air commence à s'infiltrer à l'intérieur du matériau après la récession des ménisques à l'intérieur du corps (Figure 3.29). Cette phase se termine lorsque le front de séchage atteint le cœur du matériau et toute l'eau libre est évaporée.

Par ailleurs, une troisième phase correspondant à la mise en équilibre hygroscopique du matériau commence. Cette dernière est marquée par le décroissement de la vitesse de séchage, et la chute du taux d'évaporation ; ainsi, la température du matériau tend vers la température de séchage et l'intérieur de la maison devient immédiatement humide. Il convient de noter que le phénomène de désorption se traduit par une isotherme de désorption, présentant l'évolution de la teneur en eau en fonction de l'humidité relative (à une température donnée), en partant d'un matériau saturé en eau, inversement à l'isotherme d'adsorption qui part d'un matériau en état sec (Figure 3.29).

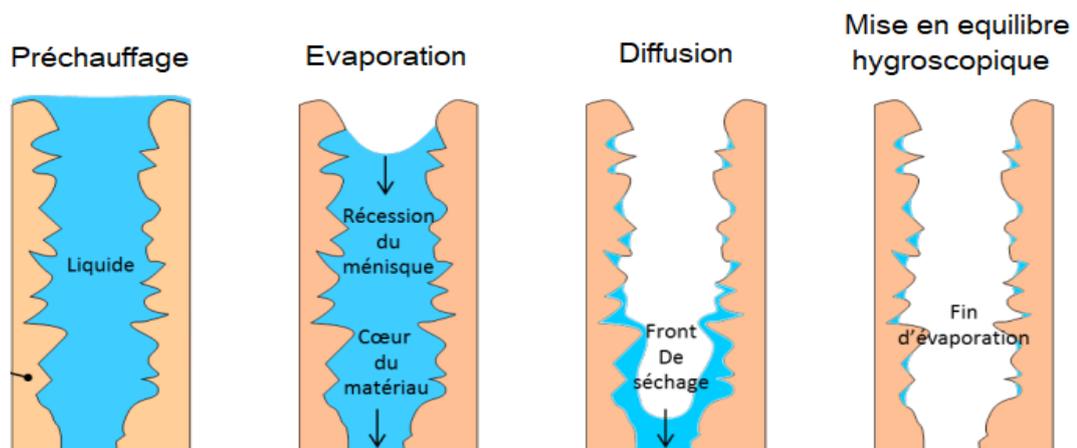


Figure 3.29 : Phases de séchage du matériau hygroscopique [305].

En conclusion, le changement de phase de l'eau (de l'état liquide à l'état vapeur) à l'intérieur d'un mur d'adobe, permet de baisser sa température en période chaude, et inversement, le passage de l'état vapeur à l'état liquide, permet de le réchauffer en période froide. Ce phénomène permet également une stabilité d'humidité relative à l'intérieur des maisons, qui présente constamment une humidité de l'ordre de 50% (avec des variations de 5 à 10%) durant toute l'année [279].

4. Impact environnemental du matériau adobe

En plus d'assurer un excellent confort hygrothermique, le matériau adobe présente un faible impact environnemental. L'analyse de cycle de vie de ce matériau montre bien que sa contribution dans la préservation de l'environnement est importante, d'autant plus que la consommation énergétique pendant son exploitation a été déjà prouvée réduite.

En effet, cette analyse (ACV) permet d'évaluer et d'estimer ses impacts environnementaux pendant toute sa durée d'existence, en les classant en quatre catégories de dommage : écosystème, changement climatique, santé humaine, et ressources naturelles [306]. Elle se fait, à l'aide des logiciels de simulation numériques (Chap.2.§4), en quantifiant les ressources prélevées, l'énergie consommée, la quantité de gaz à effet de serre (GES) émis et de déchets produits, pendant ses quatre phases de vie ; la production (extraction de matière première, traitement, transport et fabrication), la construction (transport vers le chantier, construction/installation sur site), l'exploitation (utilisation, entretien, rénovation) et la fin de vie (démolition, recyclage).

4.1 Production et construction

Étant donné l'enjeu majeur de l'épuisement des ressources naturelles du fait de la surconsommation humaine, la prise en compte de la disponibilité de matière première et de son caractère renouvelable est devenue essentielle lors de la production d'un matériau de construction. La brique d'adobe est un matériau à base de terre sablo-argileuse : une matière première essentielle pour sa fabrication, à laquelle s'ajoute de l'eau et parfois de la paille. Le recours à ces ressources disponibles, souvent sur site de construction, permet de limiter le transport du matériau et ainsi sa main d'œuvre ; en fait, la construction d'une maison en adobe est limitée, dans certaines régions (par exemple, Amérique de sud), à deux personnes travaillant pendant un mois, sans aucune machinerie et produisant jusqu'à mille briques par jours, avec une consommation moyenne de 434kcal/h d'énergie par personne [307].

Dans une étude d'ACV de production des adobes de Chypre, constitués essentiellement d'un mélange de 91kg de terre (extraite du site), de 2.29kg de pailles (transportées) et de 37kg d'eau (qui résultent 93.8kg d'adobe, 13kg de

déchets de moulage, et 23 kg d'eau évaporée lors de séchage), CHRISTOFOROU, et al. [16] ont montré que l'usage des ressources disponibles localement, la minimisation du transport et le recours à des savoir-faire empruntés, permettent de réduire l'impact carbone et l'énergie grise de la première phase de cycle de vie d'un matériau de construction. Ce constat a été dévoilé en comparant les résultats d'adobe avec des études antérieures faites sur d'autres matériaux de construction (Tableau 3.8). L'analyse de cycle de vie a été réalisée à l'aide de logiciel GaBi basé sur la norme ISO 14040, qui permet de déterminer plusieurs catégories d'impact environnemental (Tableau 3.9).

En outre, BADINO, et al. [308] ont tenté de comparer l'impact environnemental de la brique cuite et celui d'adobe en phase de production, à l'aide du logiciel SimaPro (basé également sur la norme ISO 14040); les résultats de leur étude ont montré que la fabrication de la brique cuite dépense 4849MJ d'énergie grise par tonne, et émit 407kgCO₂/tonne et 86kgSO₂/tonne, à la différence de la production de l'adobe qui émit 59kgCO₂/tonne et 20kgSO₂/tonne, avec une énergie grise dépensée de 857MJ/tonne.

Tableau 3.8 : Energie grise de différents matériaux de construction [16].

Matériau	Adobe	Pisé	Parpaing	Brique cuite
Energie grise (Mj/kg)	0.033	0.45 – 0.60	1.32 – 1.62	1.2 – 4.05

Tableau 3.9 : Impacts environnementaux de la production d'adobe [16].

Impact environnemental	Adobe
Potentiel de réchauffement climatique (kg éq.CO ₂)	1.76×10 ⁻³
Potentiel d'acidification (kg éq. SO ₂)	1.52 ×10 ⁻⁵
Potentiel d'eutrophication (kg éq. N)	8.31 × 10 ⁻⁷
Potentiel d'appauvrissement de couche d'ozone (kg éq. CFC -11.)	8.72 ×10 ⁻¹³
Potentiel d'épuisement des combustibles fossiles (Mj)	4.9 × 10 ⁻²
Potentiel d'écotoxicité terrestre (kg éq DCB.)	0.871
Potentiel d'écotoxicité marine (kg éq DCB.)	1.94×10 ⁻⁵
Potentiel d'écotoxicité humaine (kg éq DCB.)	1.95×10 ⁻⁴

4.2 Exploitation

L'énergie de la phase d'exploitation représente 90% de l'énergie totale consommée (électricité et combustible fossile), et plus de 50% du total des impacts

environnementaux émis tout au long du cycle de vie du bâtiment [309]. Dans cette phase, qui peut durer plusieurs siècles pour les maisons d'adobe, il convient de maîtriser trois aspects essentiels : la consommation énergétique, le potentiel de réchauffement climatique³⁷ et celui de toxicité humaine³⁸.

Dans une étude d'ACV d'exploitation d'une maison d'adobe (construite en 1984 à New Delhi, Inde), CHEL et TIWARI [310] ont montré que l'usage de ce matériau permet de réduire 60% de la consommation énergétique annuelle de chauffage et de climatisation (1813kWh en été, et 1481kWh pendant l'hiver), tout en assurant une température autour de la plage du confort (14 à 16°C en hiver, et 24 à 28°C en été), ce qui a rendu la maison considérée comme une maison passive et zéro énergie. Dans ces conditions, les atténuations totales des émissions CO₂ et d'énergie grise dues au potentiel d'économie de chauffage et de climatisation ont été estimées à 5165kg/an et 187Gj/an, respectivement. Dans ce même objectif, SHUKLA, TIWARI, et SODHA [311] ont démontré que l'emploi de l'adobe permet de réduire jusqu'au 58 tonnes/an les émissions de dioxyde de carbone, et 370GJ d'énergie grise, pendant la phase exploitation (en comparaison avec une maison contemporaine). Il convient de noter que l'énergie grise de maintenance présentait 12% de celle de la phase de construction, et que la période de la récupération de cette énergie est estimée à moins de deux ans.

Concernant l'écotoxicité humaine, MCEWEN, et al. [312] ont tenté d'évaluer la concentration des métaux cancérigènes, notamment de mercure (Hg), de Plomb (Pb) et d'arsenic (As) dans des échantillons de brique d'adobe extraits de 49 maisons traditionnelles de Potosí (Bolivie), afin d'estimer leur risque sur la santé des enfants (âgés de 1 à 6 ans), pour un taux d'ingestion variant entre 50 à 1000mg/jour. Les résultats ont montré que l'adobe étudié contenait des pourcentages élevés de plomb et d'arsenic (32.2% et 13.9%, respectivement), à la différence de pourcentage de mercure qui était estimé à 0.085%. Ces pourcentages élevés présentent des risques d'intoxication chronique (Saturnisme³⁹ et Arsenicisme⁴⁰), pour les jeunes enfants, même avec un taux minimum d'ingestion

³⁷ Un facteur permettant de prédire l'influence des GES émis par le matériau sur le système climatique.

³⁸ Un facteur reflétant l'influence du matériau sur la santé des êtres humains.

³⁹ Intoxication par le Plomb.

⁴⁰ Intoxication par l'Arsenic.

(50mg/jour) ; des troubles neurologiques ont été observés à très court terme, et des affections cancéreuses sont sous-estimées à long terme. Il est à noter que la région étudiée était l'une des grandes raffineries d'Argent en Amérique du Sud, où ces métaux ont été utilisés pour l'amalgamation, pendant plus de 350ans.

Toutefois, en analysant le cycle de vie de la brique traditionnelle d'Inde à l'aide de logiciel Simapro, KUMBHAR, et al. [313] ont montré que la fabrication de 1000 briques, entraîne une émission de 6.35 à 12.3kg de CO et 0.52 à 5.9kg de So₂ et que ce matériau présente un potentiel cancérigène, un potentiel d'écotoxicité et un potentiel de radiation chimique nul, en phase d'exploitation. Cependant, le potentiel de réchauffement climatique et d'acidification de ce matériau est estimé dans cette phase à 0.363×10^{-5} kg éq.CO₂ et 0.275×10^{-5} kg éq.So₂, respectivement. Ces résultats ont été confirmés par l'étude d'OLUKOYA, OBAFEMI et KURT [314] visant à évaluer l'impact environnemental d'une maison construite en adobe à Chypre, où l'émission de CO₂ annuelle est estimée nulle.

4.3 Fin de vie

Lors d'un choix de matériau de construction, il est essentiel de se poser la question de sa fin de vie. Un choix adéquat est celui qui assure une déconstruction permettant de limiter les déchets, afin de faciliter la réutilisation éventuelle ou le recyclage en fin de vie. Étant un matériau à base de terre, la brique d'adobe est biodégradable et 100% recyclable à l'infini, et ce grâce à l'action cohésive de sa matière première jouée par l'argile, qui lui présente la particularité d'être réversible par l'ajout d'eau assez aisément. Ce matériau présente, donc, un potentiel de recyclage très élevé, lui offrant la possibilité de réutilisation directe après la démolition, pour la construction de nouveaux bâtiments, ou de restitution à la nature, s'il ne fait pas l'objet d'un traitement avec des produits contenant des métaux lourds ou avec des composés organiques halogènes.

Sur ce contexte, CATALAN et al. [315] ont étudié la possibilité de recyclage d'adobe extrait des anciennes constructions de Valea Draganului (Roumanie), afin de produire un nouvel échantillon amélioré. Les résultats ont montré que le recyclage de cette brique par l'ajout d'eau a permis d'obtenir un adobe avec de meilleures caractéristiques thermomécaniques: une augmentation de la résistance à la compression (50%) et une faible réduction de la conductivité thermique (1.5%)

ont été observées. Cette amélioration a été justifiée, en fait, par la bonne dispersion des particules d'argile (montmorillonite) au sein de la matrice assurant une meilleure cohésion du matériau.

Enfin, le potentiel de recyclage élevé permet de diminuer la consommation des ressources naturelles et de limiter les déchets de démolition, et par conséquent, réduire significativement les émissions de gaz à effet de serre (CO₂, CH₄ et N₂O principalement) liées à leur stockage, qui présentent entre 2 et 15% du total des émissions au niveau mondial [316] et 43% des émissions de secteur de déchet en Algérie [317].

5. Renouveau de l'adobe

Grâce à ses nombreuses qualités environnementales et économiques, l'adobe connaît aujourd'hui un regain d'intérêt de la part des chercheurs et des professionnels du bâtiment, visant à répondre aux défis liés à l'environnement. Le laboratoire CRAterre-ENSAG est l'un des plus influents dans le domaine de construction en terre depuis plus de 40 ans, il réunit une équipe pluridisciplinaire internationale qui contribue à une meilleure utilisation des ressources locales, humaines et naturelles, à l'amélioration de l'habitat et condition de vie, et à la valorisation de la diversité culturelle, en établissant un lien créatif entre la recherche, les actions de terrain et la formation.

Ce laboratoire a piloté en 1998, la chaire UNESCO architecture de terre, culture constructive et développement durable, visant à accélérer la diffusion, au sein de la communauté internationale, des savoirs scientifiques et des techniques sur l'architecture de terre dans le domaine d'environnement, patrimoine mondial et établissement humain-habitat. Cette chaire a un réseau appelé UNITWIN⁴¹ comptant 40 pôles d'excellence et d'innovation⁴² dans 23 pays du monde, parmi eux le Centre Algérien du Patrimoine Culturel Bâti en Terre (CAPterre). Ces pôles ont la charge d'organiser des ateliers pédagogiques, de participer aux différentes manifestations culturelles et scientifiques, nationales ou internationales ou d'en être l'organisateur, de constituer un fonds documentaire et de créer enfin une base de données numériques.

⁴¹ University Twinning and Networking.

⁴² 6 en Afrique, 19 en Amérique latine, 7 en Europe, et 8 en Asie.

En effet, c'est lors du 3^{ème} symposium international sur la préservation de la brique de terre, organisé en 1980 par les Comités ICOMOS⁴³ et ICOM⁴⁴ en Turquie, que le concept « architecture de terre » a été introduit et défini. La dynamisation des échanges au sein de la communauté internationale, autour de ce concept, a été mise en œuvre au cours des 20 ans qui suivaient, néanmoins, elle a été favorisée après le lancement du projet GAIA, puis celui de Terra, associant le CRAterre-ENSAG à l'ICCROM et ensuite le projet d'Africa 2009, visant à conserver le patrimoine architectural en terre par le développement d'une stratégie de formation qui accroîtra la connaissance et la conscience de ce dernier et créera des compétences pour sa sauvegarde [318].

Ces projets ont permis une nouvelle vitalité de matériau terre, afin de permettre les professionnels, les experts, les chercheurs ainsi que le grand public de découvrir ses qualités esthétiques, techniques et écologiques. À ceux-ci s'ajoutent les événements scientifiques internationaux qui apportent une contribution d'excellence au concept architecture de terre, dont les plus fréquents et influents sont la conférence internationale sur la conservation de l'architecture de terre « Adobe 90 » et le congrès mondial sur les architectures de terre « Terra » qui a lieu tous les quatre ans, depuis 1972.

La dernière session de ce congrès, qui s'est organisée en 2016, sous l'égide du comité d'ICOMOS, la chaire UNESCO et le laboratoire CRAterre-ENSAG, a fait l'objet d'une exception dont un prix mondial des architectures contemporaines de terre crue a été lancé (Terra Award), afin de valoriser le choix d'un tel matériau dans les constructions modernes, et d'encourager les acteurs de construction qui l'ont fait. Ce programme a permis de créer la première base de données sur l'architecture contemporaine en terre crue : l'ouvrage de Dominique GAUZIN-MÜLLER 'l'architecture de terre aujourd'hui', dans lequel 40 projets réalisés avec différentes techniques (adobe, pisé, bauge, etc.) sont présentés. Ces projets ont été sélectionnés par le jury d'expert parmi 357 projets issus de 67 pays, ils se sont considérés comme une "*contribution majeure à la transition écologique*" [18, p. 7].

Le catalogue présente 13 projets construits en brique de terre crue, l'un de ces derniers (la maison communautaire Cam Thanh en Veitnam) est marqué par l'usage

⁴³ Le Conseil International des Monuments et des Sites.

⁴⁴ Le Conseil international des musées.

d'un échantillon d'adobe stabilisé par la chaux et le ciment (Figure 3.30), afin d'améliorer certaines de ses propriétés finales. En effet, la question de la stabilisation chimique d'adobe, par l'intermédiaire de certains ajouts, a fait l'objet de multiples recherches, elle présentait également l'une des pratiques traditionnelles, dont plusieurs recettes ont été employées par les anciens bâtisseurs à travers le monde. Néanmoins, il existe d'autres procédés de stabilisation ; la stabilisation mécanique qui s'opère par le compactage de la terre, et la stabilisation physique qui peut se faire par la modification des propriétés du sol (correction de la granularité), ou par l'ajout des fibres végétales.



Figure 3.30 : Maison communautaire Cam Thanh, Veitnam [18].

5.1 Stabilisation chimique d'adobe

La stabilisation n'est, en fait, obligatoire que lorsque le matériau est exposé à l'eau, ou a besoin d'être amélioré mécaniquement, d'être densifié ou allégé, autrement dit, l'essentiel but de stabilisation est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de l'adobe et ainsi sa durabilité vis-à-vis de l'eau, tout en diminuant sa porosité. Dans leur ouvrage 'Traité de construction en terre', GUILLAUD et HOUBEN ont présenté les palettes de stabilisants chimiques de matériau terre, afin de les classer selon leurs origines ; produits minéraux (ciment, chaux, bitume, etc.), produits naturels (d'origine animale, végétale ou géologique) et produits synthétiques (acide, sels, déchets industriels, etc.).

De plus, le laboratoire CRAterre-ENSAG (en collaboration avec laboratoire LRMH⁴⁵) a fait la première synthèse des stabilisants naturels d'origine animale ou végétale, afin d'étudier une grande variété d'adjuvants organiques faisant partie des

⁴⁵ Laboratoire de recherche des monuments historiques.

pratiques traditionnelles, qui permettent d'améliorer la cohésion du matériau et de diminuer sa sensibilité à l'eau. Les résultats de projet Paterre+⁴⁶ ont été rassemblés dans un cahier présentant 30 recettes traditionnelles fruits de siècles d'expérimentation, qui peuvent être une alternative plus vertueuse que les autres types de stabilisant, de point de vue environnemental [319].

En parallèle, plusieurs études scientifiques ont montré que la stabilisation du matériau terre aux produits naturels est une tradition monolithique. Selon YANG, ZHANG, et MA [19], et XIAO, et al. [320], le riz gluant était le stabilisant (d'origine végétale), le plus répandu en chine antique, où les traces de son utilisation remontent à l'époque de la construction de la Grande Muraille de Chine (il y a plus de 20 siècles). Cet additif organique permet de réduire la densité du matériau, sa perméabilité à l'eau et son coefficient d'absorption, et d'améliorer sa résistance mécanique (résistance à la compression et à la flexion, le module Young, et l'adhérence) et par conséquent, sa durabilité. En Outre, ZHAO, et al. [321], ont montré l'usage du sang de cochon, et d'huile d'abrasin, avec des proportions limitées entre 3 et 5%.

À l'heure actuelle, la stabilisation du matériau terre aux minéraux est le procédé le plus répandu dans la littérature. HUMPHREY, et al. [20] ont mené une revue bibliographique sur la stabilisation des matériaux terre, dans laquelle les résultats de 56 articles ont été présentés. 90% de ces travaux portent sur la stabilisation aux minéraux, dont 50% au ciment et le reste est partagé entre d'autres additions minérales et un mélange de plusieurs types de stabilisants. Cependant, l'utilisation de ces derniers dans de fortes proportions peut remettre en question le caractère écologique du matériau, dont une étude d'impact environnementale s'avère indispensable. Le tableau présenté dans l'annexe I (Tableau A.2), montre les résultats de 23 études récentes visant à améliorer les propriétés finales de l'adobe par l'ajout des différents types de stabilisant.

Les résultats de cette synthèse bibliographique montrent que les fortes proportions (pourcentage maximal) de stabilisants naturels d'origine végétale permettent de réduire considérablement la conductivité thermique de l'adobe ; le meilleur résultat a été obtenu dans l'étude de SOW, et al. [322] par l'ajout de 5% de

⁴⁶ Patrimoine architectural en terre et stabilisant naturels d'origine animale ou végétale.

paille de riz, qui a permis de passer de 0.33 à 0.06W/m.K, avec un taux de réduction de 82%. Néanmoins, le gain de la résistance à la compression par l'ajout de ce type de stabilisant est très peu marqué ; le meilleur résultat a été obtenu dans l'étude de LERTWATTANARUK et CHOKSIRIWANNA [323], par l'ajout de 6% de Bagasse, qui a permis de passer de 1.57 à 3.15MPa, avec un taux d'augmentation de 55%. Contrairement, l'ajout d'un produit synthétique, notamment les scories d'acier (dans l'étude de LIU, et al. [324]), a permis de passer d'une résistance à la compression de 2.8 à 6.16MPa, et d'une conductivité thermique de 0.19 à 0.23 W/m.K. Il convient de noter que les stabilisants naturels présentés dans le tableau, ont donné lieu à une fourchette de pourcentage d'ajout, dont un taux dépassant cette dernière peut entraîner une chute de résistance; par exemple dans le cas de la paille de Fonio, la résistance à la compression de l'adobe est passée de 2.6 à 2.9MPa avec 0.4% de paille, puis à 2.3MPa quand le pourcentage a été augmenté à 1%.

De plus, le nombre de recherches sur la stabilisation de l'adobe aux produits synthétique, et aux produits naturels d'origine animale, notamment les liants organiques, reste faible au regard de la très grande variété existante. Dans ce sens, CHANG, et al. [325] ont montré que l'ajout d'un faible pourcentage de liant organique (soit 1.5%) permet d'augmenter considérablement la résistance à la compression (de 0.4 à 4.2MPa). Cependant, ce n'était pas le cas dans l'étude de CORREA, et al. [326] visant à stabiliser l'adobe avec la salive synthétique de termites.

Quant aux stabilisants minéraux, les résultats du tableau A.2 (présenté en annexe I) montrent que la résistance à la compression d'un échantillon d'adobe stabilisé au ciment peut atteindre les 6.5MPa avec un pourcentage maximal de 12% [22], cependant l'ajout du même pourcentage a permis d'obtenir une résistance de 3.2MPa dans l'étude de DOA, et al. [21]. Ceci peut être traduit par les pourcentages des autres composants d'adobe, puisque la première étude est marquée par l'usage d'une terre sableuse (86% de sable, 14% argile + limon), tandis qu'une terre argileuse a été utilisée dans la deuxième étude (42% de sable, 52 % argile+ limon). Cela justifie ainsi les résultats obtenus par l'ajout de 12% de chaux, dans l'étude de MAUREL et MILLOGO [22] qui a été marquée par le passage de la résistance à la compression de 2.3 à 3.2MPa, et l'étude de BHARATH, et al. [327], dans laquelle une terre argilo-sableuse a été utilisée (50.1% sable et 49.9% argile+ limon), qui a

montré une résistance de 2.71MPa. Il est à noter que dans l'étude de ZABAIR, FOUCHAL, et HAMOUINE [328], l'ajout de la chaux a entraîné une réduction de la résistance, puisqu'un passage de 1.9 à 1.05MPa a été marqué par l'ajout de 10% de chaux industrielle, et de 1.9 à 0.6MPa par l'ajout de 10% de chaux artisanales. En outre, le mélange de ces deux stabilisants (ciment et chaux) a permis d'obtenir une résistance de 5.5MPa, avec 5% de ciment et 5% de chaux, et de 4.43MPa, avec 8% de ciment et 3% de chaux [329, 327].

En outre, l'ajout des fortes proportions de gypse ou de phosphogypse (de l'ordre de 25%) permet d'augmenter la résistance à la compression d'adobe à 4.8MPa [330]. Ceci a été ainsi remarqué dans le cas de la poudre de marbre mélangée aux fibres polymères (10 et 0.5%, respectivement) et de polymère renforcé aux fibres de verre (10%), où les résistances résultantes étaient égales à 3.47 et 2.05MPa, respectivement [331, 332]. De plus, le mélange de ces minéraux avec des stabilisants naturels ou synthétiques a permis également d'obtenir de bons résultats de point de vue résistance à la compression ; SHARMA et al. [333] ont mélangé le ciment avec des fibres végétales (pin d'Himalaya et *Grewia Optiva*), TURKMEN et al. [334] ont mélangé le gypse, la paille et les scories de Ferrochrome.

Étant un matériau poreux, la stabilisation de l'adobe aux liants minéraux peut contribuer parfois à réduire sa porosité, et donc augmenter sa densité apparente. Cette augmentation influe considérablement sur ses caractéristiques thermiques, plus particulièrement sa conductivité thermique. En effet, peu de travaux vérifient l'effet de la stabilisation chimique par l'ajout des minéraux sur le comportement thermique de brique de terre. Parmi les 23 études analysées, seules trois études portent sur l'impact de ce type de stabilisant sur la conductivité thermique de l'adobe : DOA et al. [21] et SAIDI, et al. [335] ont montré que l'ajout d'un pourcentage élevé de ciment (soit 12%), entraîne une augmentation de conductivité thermique (de 1.1 à 1.4W/m.K et de 0.79 à 1.1W/m.K, respectivement) et c'était ainsi le cas pour la chaux dans l'étude de SAIDI, et al. [335]. En revanche, GANDIA, et al. [332] ont montré que l'ajout de 10% de polymère renforcé aux fibres de verre permet de réduire la densité sèche de l'adobe de 1619 à 1524kg/m³, et par conséquent la conductivité thermique de 0.86 à 0.68W/m.K.

Enfin, de point de vue durabilité, la principale propriété étudiée est la résistance à l'eau. Douze articles sur vingt-trois évaluent cette propriété en se

basant sur la méthode de l'absorption d'eau capillaire. Les résultats sont exprimés en pourcentage ou en $\text{kg/m}^3 \cdot \text{s}^{1/2}$. Ces derniers ont montré que tous les stabilisants permettent d'augmenter la durabilité de l'adobe vis-à-vis de l'eau, sauf le ciment, qui a entraîné une absorption importante de l'eau.

6. Conclusion

Ce chapitre découle d'une étude bibliographique qui a été menée sur la construction en "adobe". C'est l'une des techniques de construction en terre crue, qui met en œuvre des terres à l'état plastique, séchées à l'air libre après les avoir façonnées manuellement en brique à l'aide d'un moule prismatique en bois. Les formulations types de ce matériau sont constituées de 55 à 75% de sable, 10 à 28 de limon, 15 à 18% d'argile et d'une teneur en eau généralement comprise entre 15 et 30%. Ces composants permettent à l'adobe d'avoir une résistance à la compression variant entre 0.4 et 5MPa, une conductivité thermique de 0.3 à 1.5W/m.K et un coefficient de résistance à l'eau limité entre 3 et 15. Ce comportement est principalement influencé par l'argile : un composant minéral avec des propriétés toutes particulières lui offrant un caractère collant assurant la cohésion et la stabilité du matériau.

L'utilisation de ce matériau en construction date de la période néolithique. Elle est considérée comme la plus ancienne des techniques de construction en terre. Ses œuvres présentent aujourd'hui 50% des biens bâtis en terre classés dans le patrimoine mondial de l'humanité, dont 27% sont des maisons vernaculaires continuellement habitées depuis des siècles. À l'instar de différentes régions climatiques, les zones chaudes et arides témoignent de l'utilisation séculaire de cette technique, qui était plus répandue, sous deux formes prédominantes de centres historiques abritant de nombreuses habitations : les Ksour et les Kasbah. Ces derniers ont fait l'objet de plusieurs études mettant en exergue leur valeur patrimoniale incontestable, à travers leurs formes et leurs structures.

En effet, les analyses et les interprétations conscientes de ces habitations vernaculaires, qui s'étaient appuyées souvent sur une méthode quantitative, ont permis de les mettre au cœur des préoccupations écologiques cherchant à intégrer la qualité environnementale dans le domaine de construction, afin de placer leur

essentiel matériau de construction 'adobe' dans la position d'un matériau de choix, pour répondre aux enjeux de durabilité et de transition écologique.

Toutefois, les potentiels tirés de l'usage de cette technique ont été assimilés à travers l'évaluation du comportement thermique de l'habitat vernaculaire, qui a été basée sur l'approche adaptative de l'ASHRAE standard 55, et sa comparaison avec celui des maisons construites par d'autres matériaux de construction. Cette comparaison a montré que la brique de terre crue contribue efficacement au confort hygrothermique, grâce à sa capacité d'agir comme un chauffage ou un climatiseur naturel, concourant à la régulation de deux facteurs : l'hygrométrie et la température de l'air. Cette régulation peut être conduite principalement par son inertie thermique (par transmission) et son épaisseur, qui favorisent le déphasage et l'amortissement des apports externes, et par son caractère hygroscopique et sa capacité de changement de phase qui lui permettent de retenir l'humidité de l'air environnant (par l'adsorption et la désorption) dans des plages de température et d'humidité relative.

En plus d'assurer un excellent confort hygrothermique et des économies d'énergie, la brique d'adobe présente un faible impact environnemental. L'approche Analyse Cycle de Vie (ACV) présentée dans la norme ASHRAE 14040, a permis d'estimer les impacts de ce matériau, notamment ses émissions de gaz à effet de serre et son énergie grise, pendant ses quatre phases de vie ; production, construction, exploitation et fin de vie. Pendant la phase "production" et "construction", l'adobe permet de réduire la consommation des ressources naturelles, le transport et la main d'œuvre, et par conséquent l'impact carbone et l'énergie grise. Ensuite, en phase d'exploitation qui présente 90% de l'énergie totale consommée et 50% des GES émis, tout au long du cycle de vie du bâtiment, l'adobe permet de réduire jusqu'à 60% de la consommation énergétique annuelle, 101 tonnes des émissions de dioxyde de carbone et environ 370GJ d'énergie grise par an. A ceux-ci s'ajoutent son potentiel cancérogène, son potentiel d'écotoxicité et son potentiel de radiation chimique estimés nuls. Enfin, à sa fin de vie, l'adobe permet de limiter les déchets, grâce à son potentiel de recyclage très élevé, qui offre la possibilité de sa réutilisation directe après la démolition.

Grâce à ses nombreuses qualités environnementales, l'adobe connaît aujourd'hui un regain d'intérêt de la part des chercheurs et des professionnels du

bâtiment, qui ont tenté de le remettre en valeur afin d'améliorer ses caractéristiques mécaniques et sa durabilité vis-à-vis de l'eau, par l'ajout des différents types de stabilisants (minéraux, naturels, synthétique). Cependant, la stabilisation chimique aux minéraux présente le procédé le plus répandu à l'heure actuelle, l'analyse de 23 études récentes de stabilisation a montré que les liants minéraux permettent d'améliorer les propriétés finales de l'adobe, néanmoins, ils peuvent remettre en question le caractère écologique du matériau.

Conclusion : bilan des études bibliographiques et orientation d'étude

L'efficacité énergétique de l'habitat est toujours liée au degré du confort résidé à son intérieur, notamment le confort thermique, qui peut être assuré par le bon choix des matériaux de construction, et la mise en œuvre des principes bioclimatiques. Cette technicité peut contribuer à rendre la maison viable et durable par le confort résultant des solutions passives.

L'architecture vernaculaire fait appel à cette technicité, elle présente des pratiques alternatives qui ouvrent la voie à une pensée écologique. Ces derniers se résument dans l'emploi des matériaux localement disponibles, la prise en compte du milieu ; géographie et climat, et le respect de l'identité socioculturelle. La prise en considération de chacun de ces facteurs apporte des solutions types à des problèmes donnés et répond nécessairement aux besoins de l'homme dans son environnement, tout en permettant la construction des maisons à la fois saines, confortables, durables, économes en énergie, belles et socialement acceptables.

Cette trilogie rappelle, en effet, les piliers de développement durable présentés dans le rapport de Brundtland 'notre avenir à tous' (l'équité sociale, la préservation de l'environnement et l'efficacité économique). Elle permet à l'architecture vernaculaire de vivre une renaissance, et de faire l'objet d'une grande vigilance aujourd'hui, afin de donner naissance à une architecture dite néo-vernaculaire considérant l'architecture vernaculaire comme un processus de production contemporain.

Ce regain d'intérêt a permis une nouvelle vitalité des matériaux de construction locaux, notamment l'adobe : la technique de construction en terre crue ancestrale, la plus répandue au monde, et plus particulièrement aux régions chaudes et arides. Ce matériau est reconnu par son efficacité énergétique (assurée par sa capacité de réguler la température et l'humidité de l'air), et son faible impact environnemental, qu'autant de chercheurs ont tenté d'étudier, à travers l'évaluation de comportement thermique, et l'analyse de cycle de vie de l'habitat vernaculaire, particulièrement celui ksourien, qui fait partie du patrimoine bâti. Ces évaluations étaient basées à la

fois, sur l'enquête sociologique, les mesures in situ par instrumentation, et la simulation numérique par outils BPS.

Bien qu'il est un matériau économique et écologique de premier plan, l'adobe présente certains inconvénients lorsqu'il est comparé aux nouveaux matériaux de construction, pour cela, plusieurs améliorations, par l'intermédiaire de certains ajouts, ont été proposées, afin de valoriser le choix d'un tel matériau dans les constructions modernes. Plusieurs stabilisants, permettant d'améliorer la résistance mécanique de ce matériau et sa durabilité vis-à-vis de l'eau, ont été employés, dont les additifs minéraux présentent la grande majorité des cas. Néanmoins, le choix d'un stabilisant de telle nature, remet en question l'impact environnemental du matériau, notamment en phase d'exploitation, dans laquelle il convient de maîtriser, la consommation énergétique, les émissions CO_2 , et la toxicité humaine.

La revue de littérature faite a montré que l'habitat vernaculaire construit en adobe connaît aujourd'hui un regain d'intérêt de la part des chercheurs et des professionnels du bâtiment, visant à répondre aux défis liés à l'environnement, dont plusieurs travaux de recherche ont été réalisés, évaluant le comportement thermique de ce patrimoine bâti à travers le monde, afin de le revaloriser et de proposer des recommandations architecturales ou constructives pour l'habitat néo-vernaculaire d'avenir.

En effet, cette synthèse d'état actuel de la recherche en lien avec notre problématique d'étude nous a conduits à faire le choix quant à la manière de mener notre travail de recherche. La partie suivante de la thèse sera consacrée à l'étude expérimentale, dans laquelle, un nouvel exemple d'habitat vernaculaire d'adobe, faisant partie du patrimoine ksourien sud algérien, sera évalué ; un stabilisant minéral qui n'a jamais été utilisé, jusqu'à présent pour la stabilisation d'adobe sera employé ; et différents aspects seront traités (confort thermique, consommation énergétique, impacts environnementaux, résistance mécanique, durabilité, etc.). Cette étude peut contribuer à la revalorisation du patrimoine en terre du sud algérien, à l'amélioration de l'habitat et de conditions de vie, à la réduction des impacts environnementaux du secteur de bâtiments, à une meilleure utilisation des ressources locales, et une meilleure gestion de déchets.

PARTIE II

L'HABITAT KSOURIEN DE LAGHOUAT ; **UNE DEMARCHE VERS UN HABITAT** **CONTEMPORAIN DURABLE**

Introduction

Bien qu'il soit l'un des pays les plus actifs en matière de législation de l'environnement, la situation environnementale de l'Algérie reste inquiétante, vu que son économie est principalement basée sur l'exploitation des ressources naturelles. L'absence d'une vision partagée des nouveaux projets du développement et la non-conformité des textes d'application avec la loi-cadre relative à la protection de l'environnement, n'ont pas permis la mobilisation suffisante des énergies et des ressources pour une opérationnalisation conséquente en Algérie.

En effet, le secteur du bâtiment (un secteur énergivore non productif), et plus particulièrement l'ensemble résidentiel tertiaire, est parmi les secteurs économiques les plus consommateurs d'énergie en ce pays, il pèse pour 38% dans la consommation énergétique finale, après le secteur des transports (42%), et suivi du secteur d'industrie (17%) puis de l'agriculture (3%) [10]. Ceci est dû à la l'urbanisation accélérée conjuguée par la pression démographique et la croissance économique.

Cette situation énergétique implique de trouver des solutions de fortune permettant de réduire les dépenses énergétiques des bâtiments, notamment celles de secteur résidentiel des zones arides, dans lesquelles l'absence du confort thermique sollicite le recours aux systèmes actifs de chauffage et de climatisation, qui présentent 51% de l'énergie totale consommée [336]. Ces solutions portent notamment sur la conception des bâtiments, dont il s'avère indispensable de construire des logements décents en qualité comme en quantité, tout en respectant les impératifs du climat, qui consistent à trouver le point d'équilibre entre la construction, les spécificités de son contexte géographique et les besoins sociaux de ses occupants, pour réduire autant que possible l'emploi de ressources énergétiques et les rejets de gaz à effet de serre (GES) produits principalement de chauffage et de climatisation. L'idée de base est donc de concilier l'équité sociale, l'efficacité énergétique et la qualité environnementale, trois facteurs qui peuvent être assimilés par la découverte des principes de l'architecture vernaculaire propres à chaque région.

C'est dans cette perspective que s'inscrit la présente partie de thèse, qui cherche à étudier le comportement thermique des maisons vernaculaires de Ksar Zgag El-Hadjadj à Laghouat (un secteur sauvegardé) et l'efficacité énergétique de

leur essentiel matériau de construction ; l'adobe, qui est reconnu, non seulement par ses avantages économiques, environnementaux et techniques, mais également par son seul inconvénient ; la vulnérabilité vis-à-vis de l'eau.

Du fait, cette partie passe premièrement en revue la région d'étude (une ville sud algérienne, faisant partie de la septième zone énergétique, dans laquelle la consommation énergétique du secteur résidentiel présente 35% de l'énergie finale [10]), tout en faisant ressortir les réponses architecturales relatives à son climat désertique (sur la base des diagrammes bioclimatiques), et en mettant l'accent sur son patrimoine ksourien (Ksar Zgag El-Hadjadj), ses espaces urbains et architecturaux, et son état des lieux.

Puis, elle aborde le comportement thermique (en période hivernale et estivale) d'une maison type du Ksar, par deux méthodes expérimentales complémentaires recommandées par l'approche adaptative d'ASHRAE 55 (la méthode qualitative subjective -enquête sociologique- et celle quantitative objective- instrumentation in situ-) [24], et ses besoins énergétiques par simulation thermique dynamique à l'aide du logiciel Energyplus, qui fait premièrement l'objet d'une évaluation permettant la validation de ses résultats.

Enfin, elle s'accroît sur la revalorisation de la brique d'adobe, à travers l'optimisation de ses caractéristiques mécaniques, thermiques et hydriques par l'incorporation de la poudre de verre issu de recyclage de verre blanc à vitrage en envisageant différents pourcentages (5, 10, 15 et 20%), dans le mélange de bases de ce matériau. Cette optimisation passe, en premier lieu, par une identification et une caractérisation de matières premières utilisées pour la production de ce matériau. Le nouvel échantillon d'adobe passe, finalement, par une analyse cycle de vie (à l'aide du logiciel SimaPro) permettant de déterminer son impact environnemental en phase de production. L'intérêt de la valorisation de ce matériau peut se résumer dans son usage pour la réhabilitation du bâti vernaculaire de l'ancien Ksar de Laghouat, qui se trouve actuellement dans un état de dégradation très avancé menaçant l'hygiène, le confort et la sécurité de ses habitants.

CHAPITRE 4

REGARD SUR L'HABITAT KSOURIEN DE ZGAG EL- HADJADJ A LAGHOUAT

CHAPITRE 4 :

REGARD SUR L'HABITAT KSOURIEN DE ZGAG EL-HADJADJ A LAGHOUAT

Ce chapitre s'attache à présenter le patrimoine ksourien de la ville de Laghouat, chef-lieu de la wilaya du même nom et la porte du désert. Sa première section porte sur la présentation de cette ville, dont une attention toute particulière est portée sur sa situation géographique et sur l'historique de sa naissance et son évolution à travers le temps.

Ensuite, la deuxième section de ce chapitre est consacrée à la climatologie de la ville et à ses réponses architecturales. Elle met en exergue les solutions passives permettant d'assurer le confort thermique dans ce contexte climatique, tout en reposant sur trois types de diagrammes bioclimatiques ; le diagramme d'ASHRAE 55, de GIVONI, et celui de SZOKOLAY, et sur les tableaux de MAHONEY. Cette partie aborde également une comparaison entre les résultats obtenus par chacun de ces outils.

Enfin, la dernière section de ce chapitre met l'accent sur le patrimoine Ksourien de la région, notamment celui classé en secteur sauvegardé. Elle correspond à une présentation du noyau historique de la ville de Laghouat : Ksar Zgag El-Hadjadj et ses espaces urbains et architecturaux, afin de faire ressortir leurs particularités climatiques. De plus, cette section aborde l'état des lieux de ce patrimoine, tout en déterminant les désordres apparents au niveau de ses structures et les sources potentielles de dégradations observées.

1. Laghouat, la porte du désert

Laghouat⁴⁷, El-Aghouath, ou El-Arouat, est une wilaya saharienne de l'Algérie, elle se situe au centre du pays (Figure 4.1), à 329km au sud de la capitale Alger, entre 32°80' et 34°69' latitude nord, et 1°33' et 4°48' longitude est. Cette wilaya s'étend sur une superficie de 25052km², elle est issue du découpage administratif de

⁴⁷ Un mot signifiant 'montagne en dent de scie' en berbère, et 'maisons entourées de jardins' en arabe [372].

l'an 1974, elle est composée de 10 Daïra et 24 communes, et limitée par la wilaya de Djelfa et Tiaret au nord, Ghardaïa au sud, Djelfa à l'est, et la wilaya d'El-Bayad du côté ouest.

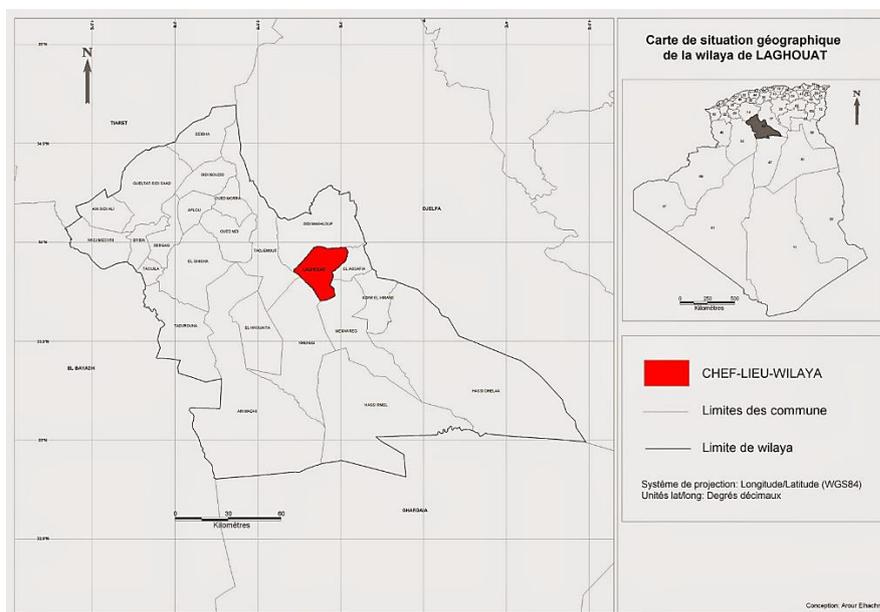


Figure 4.1 : Situation géographique de la wilaya de Laghouat [337].

Cette région se distingue par deux zones : l'Atlas saharien caractérisé par des altitudes allant de 1000 à 1700m et des pentes de 12.5 à 25%, et les plateaux sahariens qui se caractérisent par des pentes ne dépassant pas les 3%, et des altitudes allant de 700 à 1000m.

La commune de Laghouat présente le chef-lieu de la wilaya, elle est située dans la partie est de la wilaya (Figure 4.1) ; à 410km au sud de la capitale (sur la RN°01), et à plus de 750m d'altitude sur les hauts plateaux : 33°47'60" latitude nord, et 2°51'55' longitude est. Cette dernière s'étend sur une superficie de 2524ha, elle est limitée par la commune de Tadjmout au nord-ouest, El-Khnag au sud-ouest, El-Assafia à l'est, et la commune de Ben Nacer Ben Chohra au sud.

1.1 Synthèse historique de la ville de Laghouat

Selon Bachir ROUGHY⁴⁸, la naissance de la ville de Laghouat remonte au XI^e siècle, dont IBN KHALDOUNE⁴⁹ a signalé l'existence d'un village, précisément, un

⁴⁸ Blogueur auteur qui s'intéresse à l'histoire locale de Laghouat.

⁴⁹ Dans son manuscrit intitulé 'livre des enseignements et traité d'histoire ancienne et moderne sur la geste des Arabes, des Persans, des Berbères et des souverains de leur temps'.

Ksar entouré d'un rempart, abritant les Maghrawas Zénètes⁵⁰ (Beni-lagwat). Ce village a été également cité dans le manuscrit d'ABI ABDALLAH MOHAMMED IBN ALI IBN HAMAD, intitulé 'أخبار ملوك بنو عبيد و سيرتهم', relatant l'histoire de l'édification de l'état Fatimide, paru en XII^e siècle.

Après avoir été habitée par les Arabes Hilaliens, Laghouat était devenue une ville formée de plusieurs Ksour dispersés dans l'oasis, autrement dit, des Ksour satellites (Ben Bouta, Bou Mendala, Nedjal, Sidi Mimoun, Bedla et Kasbah Ben Fatouh), fondés sur les bords de Mzi : un oued présentant leur essentielle source d'eau (Figure 4.2.a).



Figure 4.2 : Évolution urbaine de la ville de Laghouat. (a) : à la fin de XVIII^e siècle, (b) : avant la prise coloniale, (c) : pendant la période coloniale [338].

En 1700, à l'arrivée de Marabout SIDI EL-HADJ AISSA BEN BRAHIM (le saint patron de la ville), ces ksour ont été fusionnés autour du ksar-noyau (Ben Bouta), afin

⁵⁰ Peuple berbère fait partie de peuple antique de Gétules occupant l'Afrique du Nord.

de former une ville fortifiée nommée 'Laghouat', construite en hauteur sur une colline (Kef Tizigrarine) qui fut intégrée dans son système défensif, et entourée de jardins occupant plus de 1000 hectares (Figure 4.2.b). Cette ville abritait sept cents à huit cents maisons, quatre mosquées, deux marchés, deux cimetières, une citadelle (Dar Eççafah), quatre tours, et quatre portes⁵¹.

En bénéficiant d'une position géographique stratégique, la ville de Laghouat fut un carrefour caravanier, un centre d'échange, et une plaque tournante pour le trafic du sud Afrique au Méditerranée (Figure 3.14). En 1727, cette dernière a été soumise à la domination ottomane, sous l'autorité de Bey TITERRI. Cette période fut marquée par la division de la ville en deux quartiers en perpétuelles querelles ; les Ahlefs à l'est et Oulad Serghin à l'ouest, séparés par un corps du bâtiment doté d'un portail, qui a été ouvert, après la réunion de ces communautés ennemies en 1830, par Khalifa BEN SALEM (le neveu du chef des Ahlafs), après avoir épousé la fille du chef des Oulad Serghin.

Après la conquête de Laghouat par les Français en 1852, les tours et la muraille ont été détruites, afin d'être reconstruites à nouveau. La nouvelle fortification était dotée de trois portes, et de deux forts (Bouscaren à l'ouest et Morand à l'est). Au cours de cette période, l'évolution urbaine de la ville s'est faite sur l'axe nord-sud, elle a été marquée par la réalisation des équipements à différents usages (résidentiels, administratifs, religieux, militaires, sanitaires, etc.), l'aménagement des places, la restructuration de voirie, et l'élargissement des voies de circulation. Ces opérations ont permis ainsi la structuration de la nouvelle cité, selon un tracé en damier, sur les décombres de la partie ouest de l'ancienne ville (Figure 4.2.c).

Après l'indépendance, la ville de Laghouat a connu une urbanisation massive et anarchique. Cette période a été marquée par un accroissement avancé de la population (une conséquence de l'exode rural), et une explosion des constructions résidentielles sur l'axe sud. À partir de 1974, le développement urbain s'affranchit par la création des ZHUN, à la plaine ouest et sud-ouest, dans lesquelles ont été construites de différentes infrastructures. Aujourd'hui encore, la ville continue à se développer sur les mêmes axes, elle s'étend actuellement sur un périmètre dépassant les 2520 hectares (Figure 4.3).

⁵¹ Bab Chergui, Bab Schettet, Bab Nebka, et Bab Nouader.

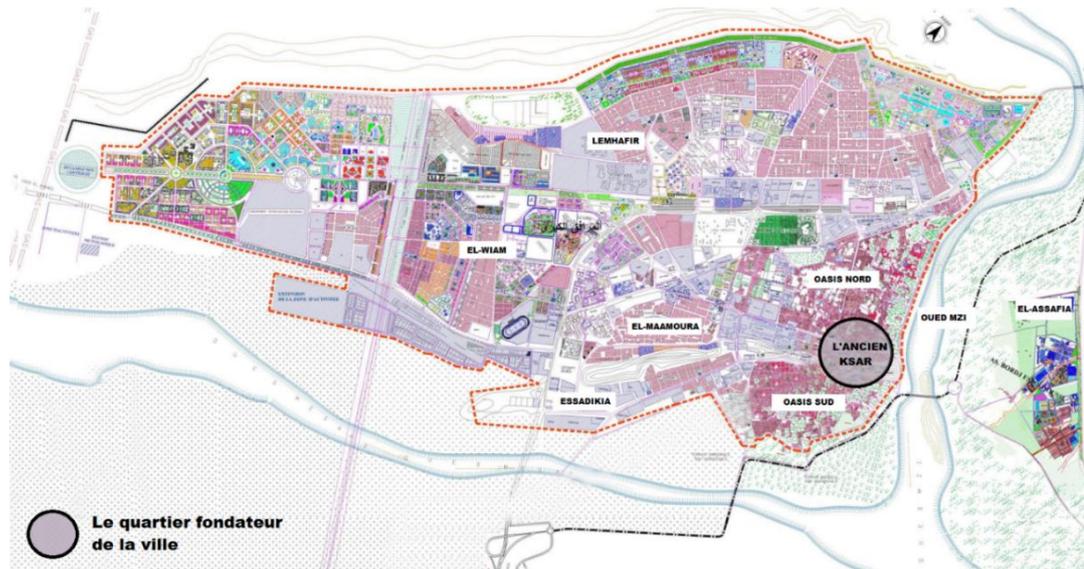


Figure 4.3 : PDAU de la commune de Laghouat [339].

1.2 Climatologie de la ville de Laghouat

Selon la classification climatique de Köppen-Geiger [119] présentée dans la figure ci-après (Figure 4.4), la wilaya de Laghouat fait partie des zones arides (B), sa partie nord-ouest (Atlas Saharien) possède un climat de steppe (BSk : semi-aride froid)⁵². Cependant, dans la région des hauts plateaux, le climat est de type désertique sec ; froid au centre (BWk), et chaud au sud-est (BWh)⁵³.

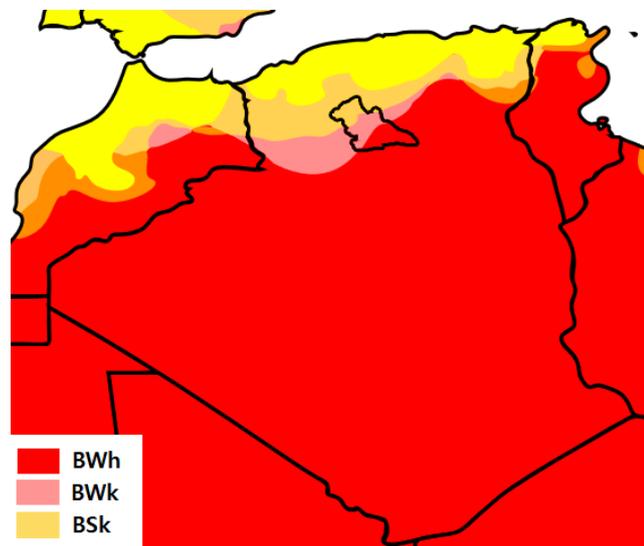


Figure 4.4 : Projection de la wilaya de Laghouat sur la classification climatique de Köppen-Geiger.

⁵² Dans cette région, la température moyenne annuelle est de l'ordre de 13.6°C, et la moyenne des précipitations annuelles atteints 300mm.

⁵³ Sur l'année, la température moyenne dans cette zone est 23.3°C, et les précipitations annuelles sont en moyenne de 124mm.

La ville de Laghouat, chef-lieu de la wilaya, est classée dans l'étage bioclimatique désertique sec et froid (BWk). Dans son ensemble, ce dernier est caractérisé par une seule période sèche qui s'étale sur toute l'année, et de fortes excursions thermiques annuelles, avec une précipitation moyenne annuelle de 158.18mm (Figure 4.5), une humidité relative moyenne annuelle de 43%, et une température moyenne annuelle de 20.37°C (Tableau 4.1). L'indice d'aridité calculé (selon la formule de DE MARTONNE ; Eq 4.1) pour cette ville est de 5.20, ce que confirme son appartenance au climat désertique (Tableau 4.2).

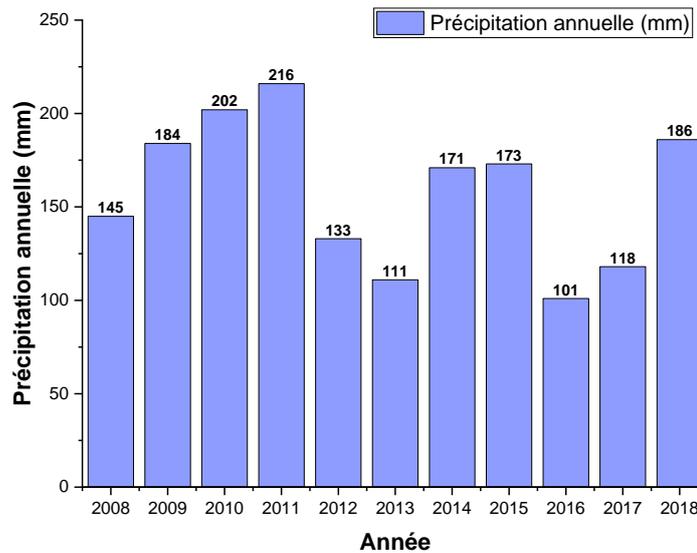


Figure 4.5 : la précipitation annuelle de la ville de Laghouat entre 2008-2018 [340]

Tableau 4.1. Données climatiques de la ville de Laghouat entre 2008-2018 [340].

Période Mois	2008-2018					
	Température (°C)			Humidité relative (%)	Précipitation (mm)	Vitesse du vent (m/s)
	Max	Moy	Min			
Janvier	14.8	8.4	2.04	58.0	5.87	2.39
Février	15.3	9.5	3.3	52.0	8.32	2.69
Mars	20.5	13.2	6.2	45.5	10.88	3.28
Avril	24.7	18.2	11.4	39.3	10.03	3.79
Mai	28.9	22.0	14.3	34.7	9.65	3.49
Juin	34.5	27.1	18.3	31	10.08	3.28
Juillet	38.7	32.3	24.1	23.2	5.74	3.09
Aout	36.6	28.8	22.8	28.4	14.38	2.97
Septembre	31.1	24.4	17.8	39.3	21.45	2.78
Octobre	25.1	19.05	13.3	43.0	20.50	2.70
Novembre	17.4	12.4	6.8	54.3	13.39	2.58
Décembre	14.7	8.8	2.92	60.6	8.39	2.49

$$I = \frac{P}{T+10} \quad (\text{Eq 4.1})$$

Où :

- **I** : Indice d'aridité
- **P** : Précipitation moyenne annuelle, mm
- **T** : Température moyenne annuelle, °C

Tableau 4.2 : Classes d'aridité de DE MARTONNE [341].

Indice d'aridité	Climat
$0 < I < 5$	Hyperaride
$5 < I < 10$	Désertique
$10 < I < 20$	Semi-aride
$20 < I < 50$	Tempéré
$I > 50$	Equatoriale

L'étude des données climatiques entre 2008 et 2018⁵⁴, fournies par l'Office National de la Météorologie (Tableau 4.1), révèle que juillet est le mois le plus chaud avec une température moyenne maximale de 38.7°C, tandis que le mois le plus froid et celui de janvier, avec une température moyenne minimale de 2.04°C, l'amplitude de température, tout au long de l'année, est de 23.9°C. Ces données permettent de calculer le quotient pluviothermique d'EMBERGER (Q2), suivant la formule de STEWART (Eq 4.2), afin de déterminer le type de climat désertique caractérisant la ville. Après l'application de cette formule (Q2= 14.79), la ville se trouve soumise à l'étage bioclimatique désertique à hiver frais (Figure 4.6).

$$Q2 = 3.43 \frac{P}{M-m} \quad (\text{Eq 4.2})$$

Où :

- **Q2** : Quotient pluviothermique d'EMBERGER.
- **P** : Précipitation moyenne annuelle, mm
- **M** : Température moyenne maximale du mois le plus chaud, °C
- **m** : Température moyenne minimale du mois le plus froid, °C

⁵⁴ Mesurés par une station installée à 777m d'altitude, sur 33°45'50" latitude Nord, et 2°49'35" longitude Est.

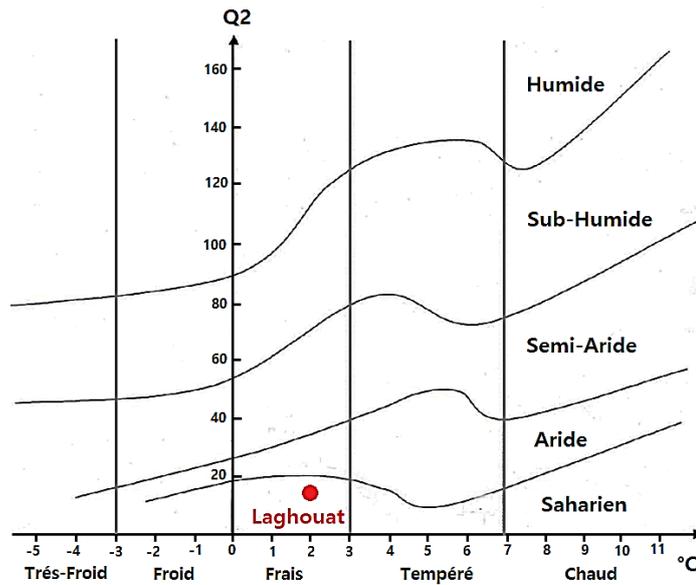


Figure 4.6 : Projection de la ville de Laghouat sur le Climagramme d'EMBERGER.

De plus, les données pluviométriques (Tableau 4.3) montrent que septembre est le mois le plus pluvieux (21.75mm), alors que le mois le plus sec et celui de juillet, avec une pluviométrie moyenne de 5.74mm.

En outre, la région subit des vents violents et froids soufflant du mois de novembre à avril dans la direction sud-ouest, nord et nord-ouest (Figure 4.7), avec une vitesse moyenne de 3.0 m/s. Un vent violent chaud et chargé généralement de sable, venant du Sahara - le Sirocco- peut y souffler en été, avec une vitesse variée entre 15 et 30m/s [342]. Le nombre des jours venteux est estimé pour la ville de Laghouat à 59 jours/an.

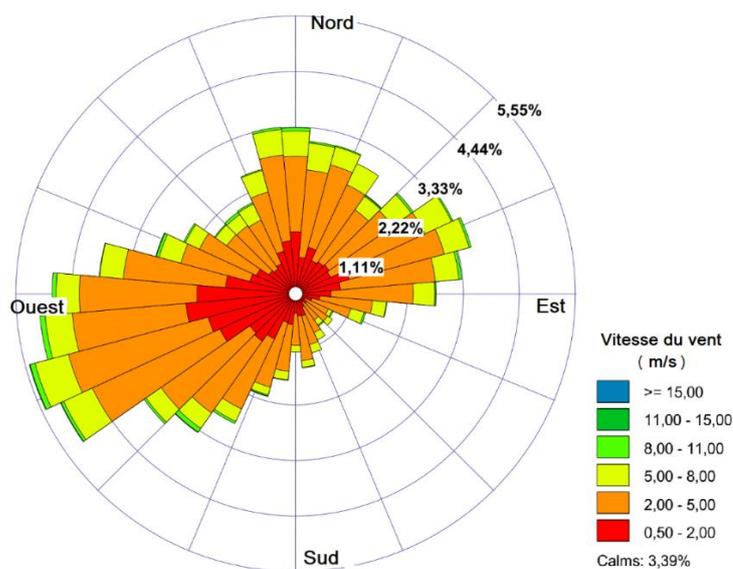


Figure 4.7 : Rose du vent de la ville de Laghouat, modélisée par l'outil WRPLOT view 8.0.2.

1.2.1 Réponses architecturales au climat de Laghouat

Le choix de réponses bioclimatiques permettant d'obtenir le confort thermique recherché dans le bâtiment d'une manière naturelle, repose essentiellement sur le climat local. Ce choix peut être fait de manière rigoureuse et simplifiée à l'aide des outils de conception architecturale, notamment de diagramme psychrométrique d'ASHRAE 55, de GIVONI ou celui de SZOKOLAY et les tableaux de MAHONEY.

1.2.1.1 Diagramme psychrométrique d'ASHRAE 55

La figure ci-après (Figure 4.8) montre le diagramme psychrométrique de la ville de Laghouat, tracé à l'aide du logiciel Climate Consultant 6.0, à partir des données climatiques de la ville, notamment la température et l'humidité relative de l'air, pour la période 1991-2010 (régénéré à l'aide de logiciel Meteonorm 7.3). L'analyse bioclimatique faite par ce logiciel a été basée sur le modèle adaptatif du confort thermique présenté dans l'ASHRAE 55-2010, fixant le métabolisme énergétique à 1.1Met, l'isolement vestimentaire d'hiver à 1Clo, et ce d'été à 0.5Clo.

L'analyse des données illustrées dans cette figure permet de relever les dispositifs architecturaux et les techniques, qui peuvent être utilisées pour remédier aux sollicitations du climat saharien de la ville et accroître passivement le confort thermique des occupants. Les stratégies de conception bioclimatique figurant dans le diagramme sont, en global, de trois ordres :

- La période allant du mois de novembre à la mi-mars : elle se caractérise par un climat froid et sec, où une valorisation des charges internes (éclairage, appareil, occupation humaine, etc.) et des apports solaires (rayonnement direct), est conseillée pour obtenir des températures minimales de confort ; et une inertie thermique est recommandée afin de limiter les surfaces d'échange thermique avec l'extérieur, et de réduire les amplitudes de température journalière (par la restitution de la chaleur stockée pendant la journée). Cependant, un chauffage supplémentaire peut être nécessaire afin d'assurer un confort optimal de mi-décembre au mi-janvier ;
- La période comprise entre la mi-mars et la fin du mois de mai, y compris la mi-septembre et le mois d'octobre : elle est caractérisée par un climat relativement confortable, avec une faible amplitude thermique journalière. Néanmoins, la

mise en place de protections solaires est préférentielle afin de prévenir la surchauffe, et ainsi une ventilation naturelle (en mois de mai).

- La période allant du mois de juin à la mi-septembre : elle se caractérise par un climat chaud et sec, où une inertie thermique, une ventilation naturelle nocturne et un rafraîchissement évaporatif sont nécessaires, pour un stockage de la fraîcheur nocturne, un déphasage des apports de chaleur externes et un rafraîchissement du bâtiment. De plus, des protections solaires extérieures doivent être mises en place afin de limiter l'irradiation solaire au niveau des ouvertures.

En effet, ce diagramme permet ainsi de déterminer le nombre d'heures et le pourcentage du temps correspondant à chaque réponse architecturale (Tableau 4.3). Il dévoile que la majeure partie de l'année est située hors de la zone du confort thermique (soit 79.9% des heures). La stratégie de chauffage passif la plus efficace est la valorisation des gains solaires (1589h), tandis que le rafraîchissement évaporatif, l'inertie thermique et la ventilation naturelle nocturne sont les stratégies de refroidissement passif les plus efficaces (1783h et 1543h, respectivement).

Tableau 4.3 : Temps correspondant aux stratégies architecturales recommandés.

Stratégie	C	PS	GI	GS	I	IV	V	R
Heures	1758	1394	2221	1589	651	1534	1482	1783
%	20.1	15.9	25.4	18.1	7.4	17.2	16.9	20.4

C : confort thermique, **PS** : protections solaires, **GI** : gains internes, **GS** : gains solaires, **I** : inertie thermique, **IV** : inertie thermique est ventilation naturelle nocturne, **V** : ventilation naturelle, **R** : rafraîchissement évaporatif.

En outre, ces réponses architecturales figurent également sur le diagramme bioclimatique de GIVONI (Figure 4.9), analysant les données climatiques de la ville obtenues entre 2008 et 2018. Ce dernier fait sortir que le climat de la ville de Laghouat est caractérisé par une forte fluctuation de température mensuelle ; deux à trois stratégies passives sont recommandées pour chaque mois.

De plus, l'examen de ce diagramme démontre que le confort hivernal (situé entre 20 et 27°C de température et 20 et 80% d'hygrométrie) peut être assuré par le chauffage solaire passif et actif, et les apports de chaleur provenant de tout élément situé à l'intérieur du bâtiment. Ces stratégies passives doivent parfois être associées à un système de chauffage actif, particulièrement au début de la saison hivernale.

Le confort d'été, quant à lui, peut être favorisé, pendant les mois présentant une chaleur extrême (juillet et août), par l'inertie thermique, la ventilation naturelle nocturne et par le rafraîchissement évaporatif, tandis qu'une ventilation naturelle et un rafraîchissement évaporatif sont largement suffisants au début et en fin de saison estivale (mi-juin et le mois de septembre), pour obtenir une température ambiante et une hygrométrie situées entre 20 et 27°C, et 20 et 80%, respectivement.

La zone du confort hygrothermique délimitée par GIVONI couvre, pour le climat de Laghouat, la saison du printemps et la première moitié d'automne, durant ces périodes aucune réponse architecturale n'est recommandée. Selon les données climatiques présentées dans le tableau 4.1, cette période est caractérisée par une température variant entre 18 et 24°C et une humidité relative limitée entre 39 et 43%.

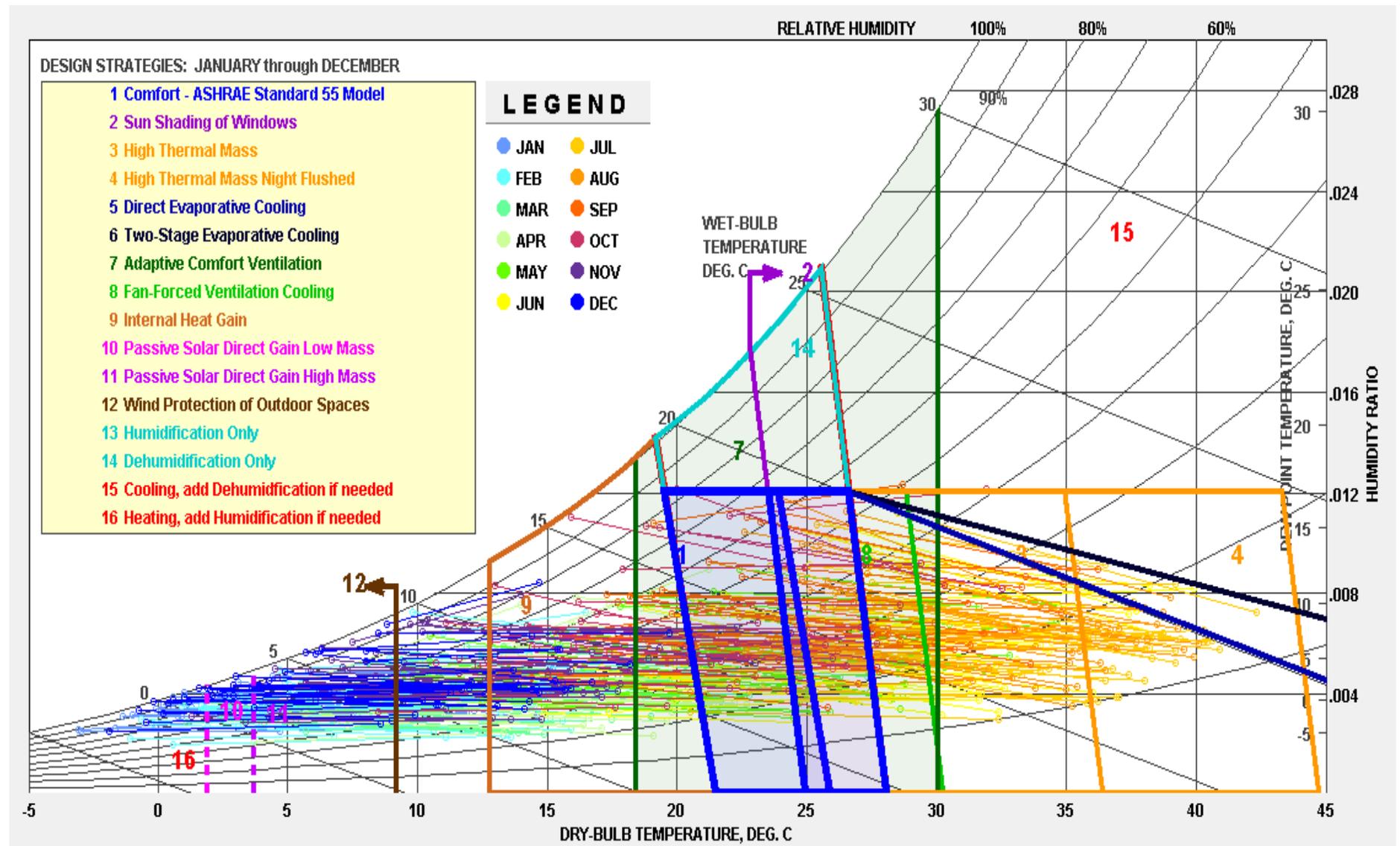


Figure 4.8 : Diagramme psychrométrique d'ASHRAE 55 pour la ville de Laghouat, modélisé par Climate Consultant 6.0.

Psychrometric Chart

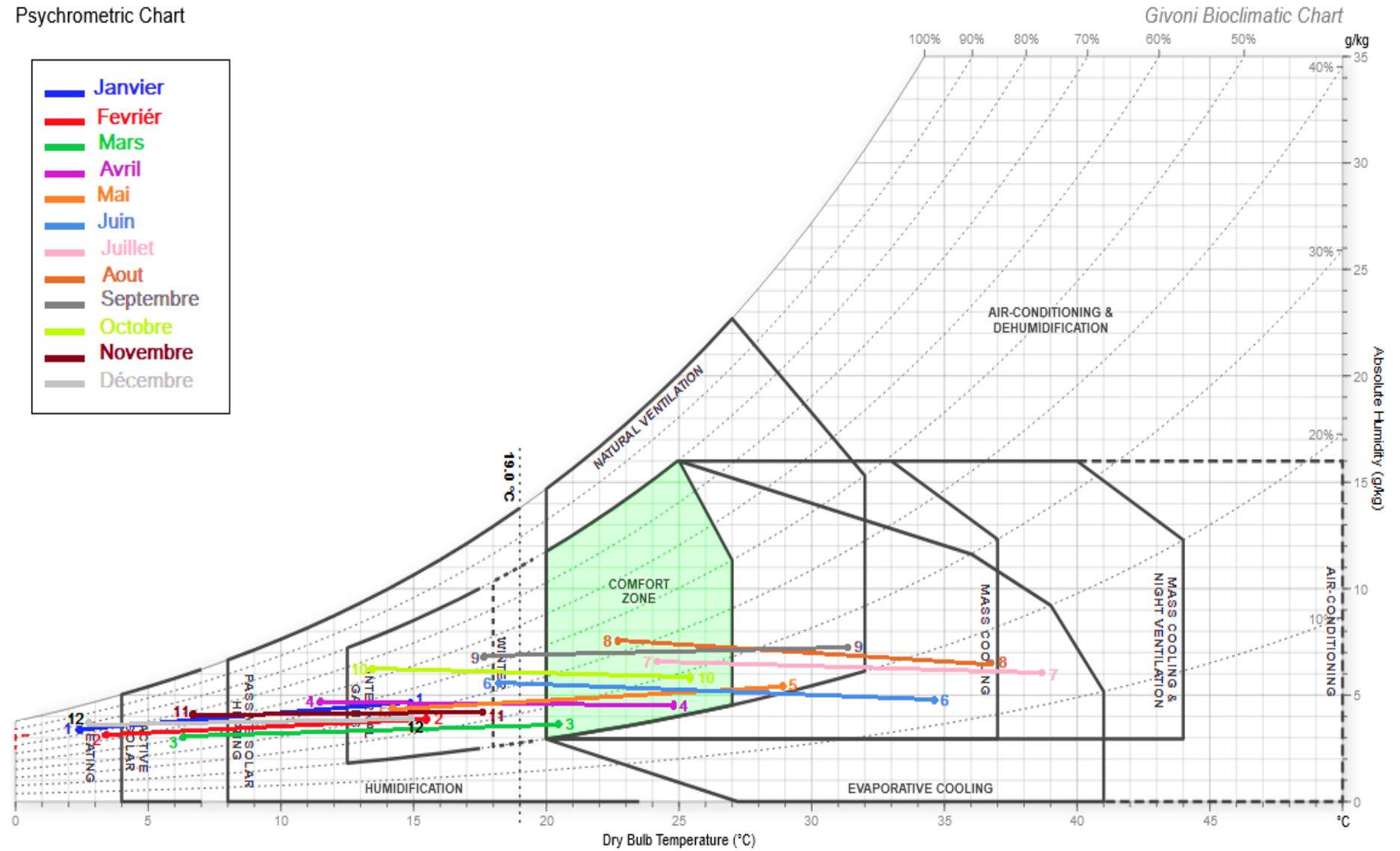


Figure 4.9 : Diagramme bioclimatique de GIVONI pour la ville de Laghouat (2008-2018).

1.2.1.2 Tableaux de MAHONEY

Le tableau ci-après montre les résultats de l'analyse bioclimatique de la ville de Laghouat (entre 2008-2018), basée sur la méthode de MAHONEY permettant de formuler les problèmes climatiques liés à ce contexte, afin de proposer des recommandations conceptuelles. Comme expliqué précédemment (Chap.2. § 3.4), cette méthode s'appuie sur quatre facteurs climatiques : la température de l'air, l'humidité relative, la précipitation et la vitesse du vent (Tableau 4.4).

En effet, en fonction de la température moyenne annuelle (TMA), et les groupes d'humidité relative (Tableau 2.8), un diagnostic détaillé a été établi, déterminant, pour chaque mois de l'année, les seuils du confort diurne et de ce nocturne qui ont permis de faire une classification climatique mensuelle (humide ou aride, froid : C, confortable : O, ou chaud : H).

Cette classification climatique a montré que le climat de Laghouat se caractérise par une seule période aride (ce que confirme davantage son appartenance à l'étage bioclimatique désertique) déterminée par trois indicateurs ; le stockage thermique (A1), le sommeil en plein air (A2), et la protection contre le froid (A3), et trois saisons : froide, mi- saison, et chaude. Ces derniers peuvent être devisés en trois classes générales :

- Une période allant du mois de novembre au mois d'avril, caractérisée par des journées et des nuits froides, dont la contrainte thermique est en dessous de limites du confort, et les indicateurs A1 et A3 sont préconisés
- Une période comprise entre le mois de juin et le mois de septembre, caractérisée par des journées chaudes et des nuits plus ou moins confortables, dans laquelle les indicateurs A1 et A2 sont préconisés.
- Une courte période composée de deux mois ; mai et octobre, qui se caractérisent par des températures journalières confortables, et diurnes froides, durant lesquelles l'indicateur A1 est préconisé.

Enfin, la méthode de MAHONEY mit en avant, dans le cas de ces conditions climatiques, des recommandations conceptuelles matérialisant la compacité, l'orientation nord-sud, l'usage des matériaux à grande capacité thermique, la mise en place des ouvertures ne dépassant pas 40% de la surface des murs, et l'aménagement d'un espace extérieur, notamment une terrasse.

Tableau 4.4 : Résultats des tableaux de MAHONEY pour la ville de Laghouat.

Localisation : Laghouat		Période : 2008-2018	Latitude : 33°47'60" N		Longitude : 2°51'55" E		Altitude : 750m		T°. Min : 2.04°C T°. Max : 38.7°C		TMA : 20.37°C		RMA : 36.66°C	
			jan	fév.	mar.	avr.	mai	juin	juil.	août	sep.	oct.	nov.	déc.
Données climatiques	Température (°C)	Max	14.8	15.3	20.5	24.7	28.9	34.5	38.7	36.6	31.1	25.1	17.4	14.7
		Min	2.04	3.3	6.2	11.4	14.3	18.3	24.1	22.8	17.8	13.3	6.8	2.92
	Humidité (%)		58.2	52.0	45.5	39.3	34.7	31	23.2	28.4	39.3	43.0	54.3	60.6
	Groupe d'humidité		3	3	2	2	2	2	1	1	2	2	3	3
	Précipitation (mm)		5.74	8.32	10.88	10.3	9.65	10.8	5.87	14.38	21.45	20.5	13.39	8.36
	Vitesse du vent (m/s)		2.39	2.69	3.28	3.79	3.49	3.28	3.09	2.97	2.78	2.70	2.58	2.49
Diagnostic	Limite de confort diurne	Max	29	29	31	31	31	31	34	34	31	31	29	29
		Min	23	23	25	25	25	25	26	26	25	25	23	23
	Limite de confort nocturne	Max	23	23	24	24	24	24	25	25	24	24	23	23
		Min	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
	Contrainte thermique	jour	C	C	C	C	O	H	H	H	H	O	C	C
nuite		C	C	C	C	C	O	O	O	O	C	C	C	
Indicateurs	H1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	H2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	H3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	A1	12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	A2	04	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
	A3	06	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1
Recommandations conceptuelles	Plan de masse	A1 (0- 10) ou A1 (11-12) + A3 (5-12)						a1	Orientation selon un axe longitudinal est- ouest					
	espacement	H1 (0-1)						b3	Plan compact					
	Mouvement d'air	H1 (0) + H2 (0-1)						c3	Aucune circulation d'air n'est requise					
	Dimension des ouvertures	A1 (0-1) + A3 (1-12) ou A1 (2-5) ou A1 (11-12) + A3 (4-12)						d2	Moyenne, 25- 40% de la surface des murs					
	Position des ouvertures	H1 (0) + H2 (0-1)						e3	Aucune solution n'est recommandée					
	Protections des ouvertures	H3 (0-2) + A3 (3-12)						f1	Aucune protection n'est nécessaire					
	Murs et planchers	A1 (3-12)						g2	Massive, plus de 8 heures de déphasage					
	toitures	H1 (0-9) + A1 (6-12)						h3	Massive, plus de 8 heures de déphasage					
	Sommeil en plein air	A2 (1-12)						i2	Un espace pour le sommeil en plein air est requis					
Protection contre la pluie	H3(0)						j3	Aucune protection contre les fortes pluies n'est nécessaire						

1.2.1.3 Méthode de SZOKOLAY

À la différence des autres méthodes, la méthode de SZOKOLAY consiste à déterminer, pour chaque contexte climatique, les limites de diverses zones du contrôle potentiel (Annexe II), à la base de la température moyenne annuelle (T_m), la température neutre, l'irradiation solaire moyenne journalière du mois le plus froid (H_v), et l'amplitude thermique mensuelle du mois le plus chaud (dT_m) (entre 2008-2018). Le tableau ci-après présente les limites de ces zones pour la ville de Laghouat (calculées suivant les formules présentées dans l'annexe II), dont les températures humides varient entre 15.17 et 42.3°C, et l'humidité absolue est limitée entre 4g/kg et 14g/kg.

Tableau 4.5 : Limites des zones de contrôle de la ville de Laghouat.

Période : 2008-2018	TM = 20.37°C	Tn = 23.91°C	Hv = 3640Wh/m ²	dTm = 14.6°C	
Zone du contrôle potentiel			Température (°C)	Humidité	
Zone du confort			T1	21.91	12g/kg
			T2	25.91	
			T3	23.49	4g/kg
			T4	28.29	
Zone du contrôle potentiel pour les périodes froides	Chauffage solaire passif	T5	15.17	HR : 100%	
Zone du contrôle potentiel pour les périodes chaude	Effet de masse	T6	33.21	12 g/kg	
		T7	32.24	14 g/kg	
		T8	37.05	4 g/kg	
	Effet de masse avec ventilation naturelle nocturne	T9	37.59	12 g/kg	
		T10	36.41	14 g/kg	
		T11	42.30	4 g/kg	
	Ventilation naturelle-mouvement d'air sur la surface de la peau	T12	30.91	12 g/kg	
		T13	32.60	4 g/kg	
		T14	21.91	HR : 90%	
		T15	27.86	HR : 90%	
Zone de refroidissement évaporatif direct			T16	35.91	-
Zone de refroidissement évaporatif indirect			T17	38.91	14 g/kg

Après avoir tracé ces zones sur le diagramme psychrométrique, une projection des données climatiques de la ville a été faite sur ce dernier, notamment des humidités et des températures minimales et maximales mensuelles (Figure 4.10). Les résultats de cette projection montrent trois périodes bien distinctes. :

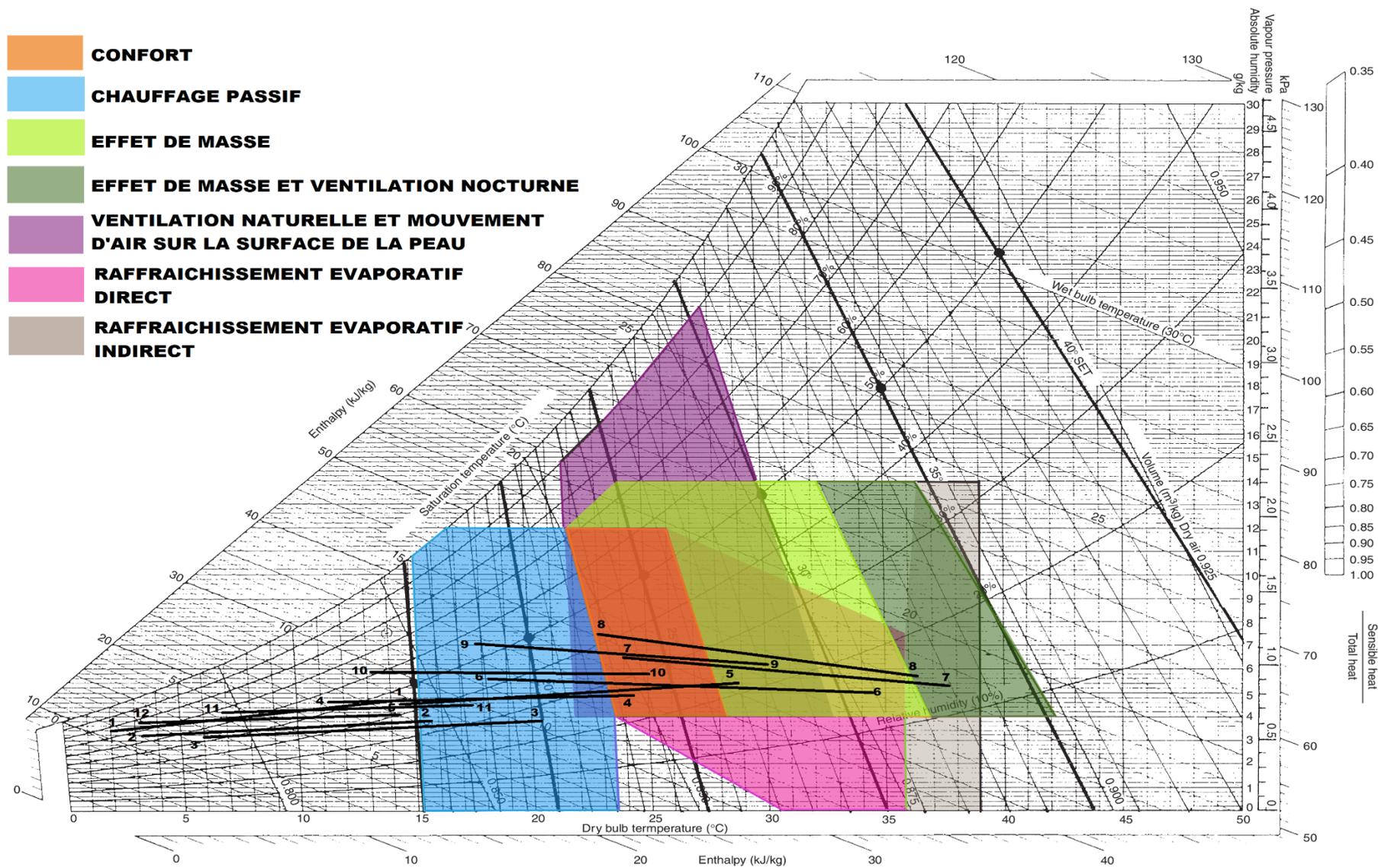


Figure 4.10 : Diagramme psychrométrique de SZOKOLAY, pour la ville de Laghouat.

- Une période froide caractérisée par des humidités plus ou moins élevées, et de basses températures nécessitant un chauffage passif (une bonne orientation, et un choix étudié de dimensions des ouvertures) et un chauffage d'appoint (pour les mois les plus froids). Cette période dure de mi-October à la mi-Avril.
- Une période chaude comprise entre le mois de juin et mi-septembre, caractérisée par une faible humidité relative, une forte chaleur, ainsi qu'une forte amplitude thermique. Cette dernière nécessite un contrôle des radiations solaires par effet de masse, une ventilation nocturne, et un refroidissement évaporatif direct et parfois indirect durant la période de canicules.
- Et une période considérée confortable, comprenant la deuxième moitié du mois d'avril, le mois de mai, la deuxième moitié du mois de septembre, et la première moitié du mois d'octobre.

1.2.1.4 Synthèse de l'analyse climatique

L'analyse bioclimatique de la ville de Laghouat a permis de constater que le confort thermique peut être atteint passivement à l'intérieur de ses bâtiments par une conception architecturale permettant de profiter au maximum du rayonnement solaire direct durant la période hivernale et de s'en protéger en été et en mi-saison tout en évacuant le surplus de chaleur. Cette conception tient compte de la forme et l'orientation du bâtiment, des matériaux de construction, et de dimensionnement des ouvertures.

En effet, les différentes méthodes d'analyse et de l'aide à la conception architecturale, préconisent les mêmes stratégies, elles orientent les acteurs de la construction de cette région, vers une architecture bioclimatique basée sur quatre grandes règles :

- La mise en place du plan compact allongé selon l'axe est-ouest, pour limiter les surfaces d'échange thermique avec l'extérieur, maximiser les gains solaires en hiver et de les réduire en période estivale ;
- Le choix des matériaux de construction disposant d'une forte capacité thermique qui permettent un déphasage dépassant les 8h ;
- La mise en place des ouvertures, dont les dimensions sont étudiées (25 à 40% de la surface des parois extérieures).

- et l'aménagement des espaces ouverts, dans lesquels s'intègrent un bassin d'eau et de la végétation, ce que permet de favoriser la ventilation naturelle et le refroidissement évaporatif direct.

1.3 Patrimoine Ksourien de la ville de Laghouat

Laghouat est une région dans laquelle gravitaient de nombreux Ksour, érigés souvent dans les parcours des pasteurs nomades sahariens, et commandés par les cours d'eau, la palmeraie, et les pitons rocheux (des moyens de défense naturels). Ces ksour sont dotés d'une architecture de génie résultant, comme toute architecture vernaculaire, d'une multitude de facteurs, ils symbolisent une spécificité socioculturelle locale, et font preuve d'une réelle capacité d'adaptation au climat désertique.

Au nombre de trente-deux (32) Ksour dispersés dans le périmètre de la wilaya de Laghouat, vingt-quatre (24) établissements humains sahariens, remontant à la période préhistorique, se trouvent ruinés aujourd'hui. Cependant, le reste des ksour (Tableau 4.6), datant de l'époque médiévale, ont survécu et continuent de survivre, mais ils risquent toujours de disparaître ou d'être irrémédiablement défigurés. Malgré les nombreuses opérations d'entretien, ils se dégradent à une vitesse vertigineuse du fait de l'exode rural, et de la modernisation non contrôlée.

Ces ensembles architecturaux et urbains sahariens sont bâtis au cœur des jardins d'oasis, irrigués par de petits cours d'eau (des Séguias) alimentés par les rivières environnantes. Ils couvrent une superficie atteignant les 8 hectares, comportant plusieurs îlots ceinturés d'une muraille commune, délimitée généralement par les versants de reliefs environnants. Ces ksour présentent une spécificité morphologique (forme des unités fondamentales), et une unité typologique (plan architectural) et technique (matériaux de construction) (Tableau 4.6).

En 2012, trente et un (31) Ksour de ces derniers ont été inscrits sur la liste de l'inventaire supplémentaire des ensembles urbains et ruraux. Cette mesure de protection interdit toute sorte de modification à l'encontre de ces biens culturels immobiliers, qui présentent un intérêt significatif à l'échelle régionale. Par contre, le vieux Ksar de Laghouat (un bien culturel immobilier présentant un intérêt à l'échelle nationale) a été classé en secteur sauvegardé, à la lumière d'un décret exécutif (11-

141) daté du 28 mars 2011, dont un plan permanent de sauvegarde et de mise en valeur des secteurs sauvegardés (PPSMVSS) a été élaboré et approuvé pour ce centre historique.

Tableau 4.6 : Caractéristiques des Ksour de la région de Laghouat.

Ksar	Date de construction	Source d'eau	Superficie (ha)	Morphologie	Typologie	Matériau de construction
Tadjmout	1666	Oued Mzi	6	Trapézoïdale	Maison à patio	Adobe
Ain-Madhi	XVI ^e Siècle	Oued Mzi	2.8	Circulaire	Maison à patio	Pierre
El-Hirane	1801	Oued Mzi	8.5	Circulaire	Maison à patio	adobe
Taouiala	XVII ^e siècle	Oued Taouiala	1.85	Rectangulaire	Maison à patio	Pierre
Tadjrouna	1878	Oued Mzi	1.7	Carrée	Maison à patio	Adobe
El-Assafia	1660	Oued Mzi	2.6	Carrée	Maison à patio	Adobe
El-Houaita	XVII ^e siècle	Oued Mzi	2	Carrée	Maison à patio	Adobe

1.3.1 Le secteur sauvegardé

Le vieux ksar de Laghouat est situé dans la partie sud-est de la ville (Figure 4.3), il présente son centre historique et son premier noyau. Ce Ksar s'étend sur plus de 30 hectares, il compte quatre quartiers ; Tapis vert, Zgag El-Hadjadj, El-Gharbia, Saffah, et un rocher appelé FROMENTIN⁵⁵ faisant partie du patrimoine naturel national (Figure 4.11).

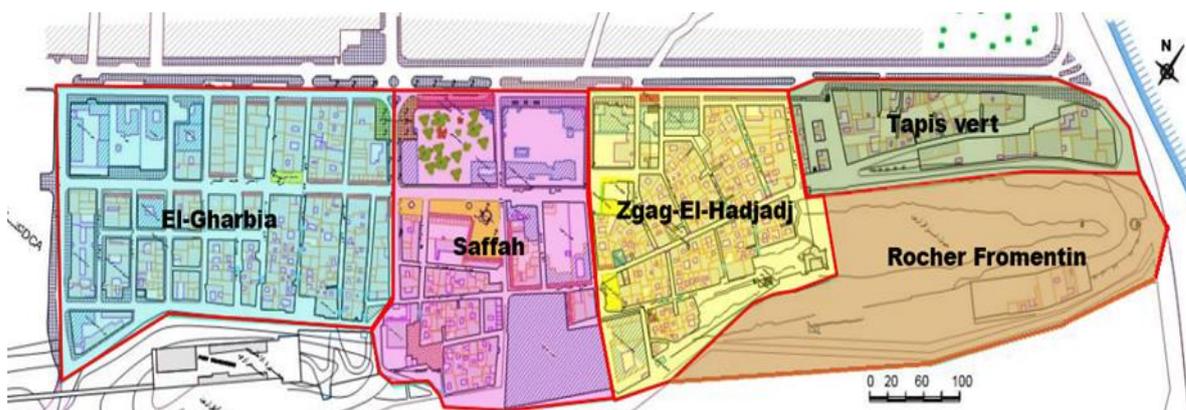


Figure 4.11 : Secteur sauvegardé de la ville de Laghouat [339].

⁵⁵ Eugène Samuel Auguste FROMENTIN, un peintre et un écrivain français qui avait visité la ville vers 1852.

D'après les cartes de l'évolution urbaine de la ville, présentées précédemment (Figure 4.1.b), ce ksar compte les deux quartiers fondateurs de l'ancienne ville fortifiée ; les Ahlefs et Ouled Serghine. Sa partie ouest (quartier Saffah et El-Gharbia ; ancien quartier de Oulad Serghine) fût totalement transformée pendant la période coloniale ; elle s'est effondrée suite à une violente explosion de caisses de cheddite (environ 4.5 tonnes) en 1948 (Figure 4.12). Cependant, celle du côté est (Zgag El-Hadjadj actuellement) conserve toujours son unité, son architecture Ksourienne et son aspect vernaculaire.



Figure 4.12. Explosion des caisses de cheddite en 1948 [343, 344].

Selon le PPSMVSS, le vieux ksar de Laghouat comprend 622 maisons, 62% de ces dernières sont occupées d'une façon permanente par 1500 de personnes, alors que plus de 37% des biens sont abandonnés. En outre, 878 d'entre ces habitants occupent Ksar Zgag-El-Hadjadj (Figure 4.13), le taux d'occupation du logement (TOL) est estimé pour ce quartier à 6, cependant, il est estimé pour le reste des quartiers à 4.

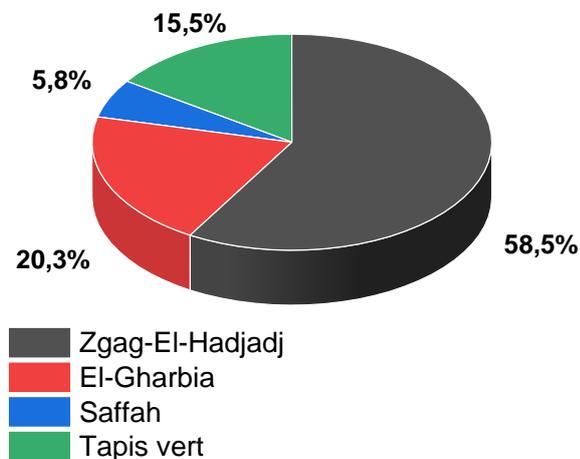


Figure 4.13 : Répartition de la population résidente dans le Ksar, par quartier [339].

2. Ksar Zgag El-Hadjadj, un exemple d'architecture vernaculaire saharienne

Comme évoqué précédemment, Ksar Zgag El-Hadjadj⁵⁶ (quartier Ben-Badis actuellement) est l'un des quartiers fondateurs du noyau historique de la ville de Laghouat. Son existence remonte au début du XVIII^e Siècle (après le fusionnement des ksour satellites, sous l'autorité de SIDI EL-HADJ AISSA BEN BRAHIM), notamment à 1704.

Cet établissement humain est collé au versant ouest de Kef Tizigrarine : une éminence rocheuse protectrice, faisant partie de la chaîne montagneuse de Djebel Amour⁵⁷, dont l'altitude est variée entre 766m du côté nord et 780m du côté sud, sur 33°80' latitude Nord, et 2°88' longitude Est. En effet, le choix de ce site d'implantation a été gouverné par d'autres facteurs : la présence d'une source d'eau vitale, précisément Mzi, un oued qui coule dans le côté est du Ksar, et de deux oasis⁵⁸ (l'une au Nord, et l'autre au Sud) permettant le développement d'une économie basée sur l'agriculture oasienne (Figure 4.14).



Figure 4.14 : Limites naturelles de l'ancien Ksar de Laghouat - photo publiée en 1852 [345].

Comme tous Ksour, Ksar Zgag El-Hadjadj est un ensemble d'habitat compact construit en hauteur, délimité par un rempart (de 4m de hauteur) possédant deux portes (Bab Chergui et Bab Lebhaier) et une tour de guet (Bordj Ben-Abdellah), qui

⁵⁶ Cette appellation peut se traduire par 'la rue des pèlerins'. Cette rue était un dicton que les pèlerins se rassemblaient en préparation pour aller à la maison de Dieu et accomplir les rituels.

⁵⁷ Une chaîne montagneuse faisant partie de l'Atlas Saharien.

⁵⁸ Selon CHARLES PHILBERT, le ksar était entouré des oasis de 21000 palmiers femelles et 500 mâles [373].

ont été substitués pendant la période coloniale, par Bab El-Oued (Figure 4.15.a), Bab Nebka, et Ford Mourand (Figure 4.15.b). En effet, cette période a été marquée également par l'alignement des voies, et l'implantation de quelques équipements au sein du ksar, à savoir ; école Laïque (Figure 4.15.c), église saint Hilarion (4.15.d) et l'hôtel des bains.



Figure 4.15 : Bâtiments construits pendant la période coloniale à l'ancien Ksar. (a) : Bab El-Oued, (b) : Ford Mourand, (c) : Ecole Laïque, (d) : Eglise Saint Hilarion.

2.1 La configuration urbaine du Ksar

Ksar Zgag El-Hadjadj est d'essence vernaculaire, il est l'expression d'exigence à la fois, climatique, sociale, et économique. Son mode d'urbanisation consiste à limiter les surfaces d'échange thermique avec l'environnement extérieur, à assurer une protection contre les radiations solaires intensives et les vents dominants, à favoriser la ventilation naturelle, à préserver l'intimité des habitants et à économiser la ressource foncière.

Cet établissement humain saharien est caractérisé par un tissu urbain compact, adoptant une forme trapézoïdale irrégulière, structurée par une rue principale commerçante (Derb) reliant deux places (des Rahbas), une rue secondaire, des ruelles (des Zgag) et des impasses (Figure 4.16). Ce dernier

s'étend sur une superficie de trois hectares, il comprend 135 maisons, réparties sur onze îlots, calqués sur une trame arborescente (Figure 4.16).

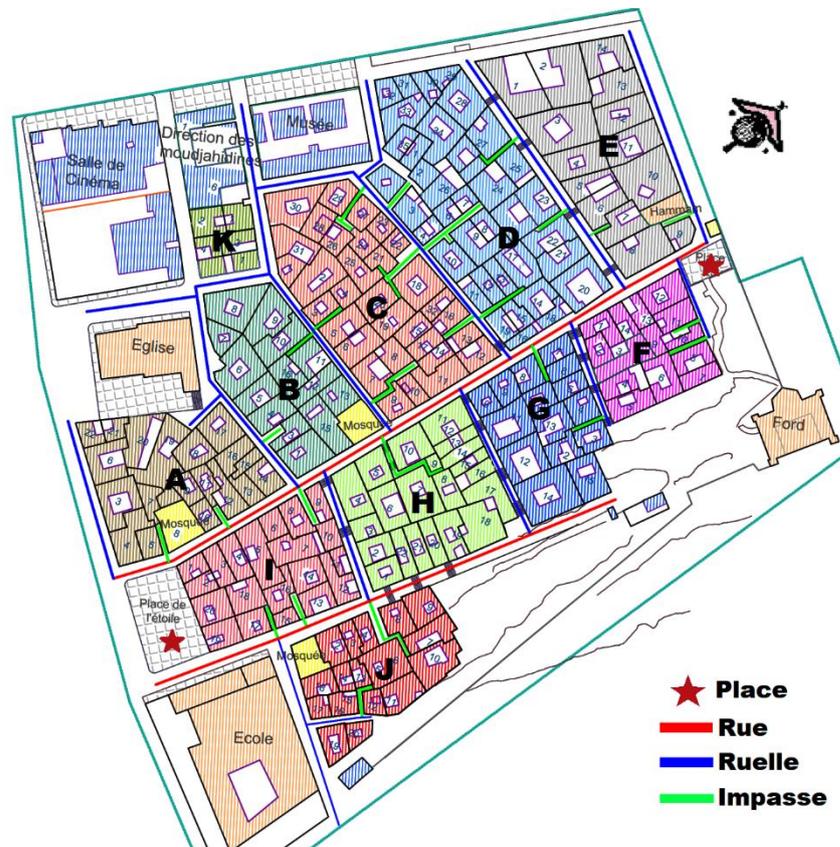


Figure 4.16 : Plan de masse de Ksar Zgag-El-Hadjadj [339].

En effet, les voies structurant ce tissu urbain sont régies par une hiérarchisation spatiale partant du plus public au plus privé. La rue commerçante (rue Ben Badis) présente l'artère publique du ksar (Figure 4.18.c), sur laquelle s'ouvrent les ruelles, cette dernière mène vers les principaux endroits de rencontre et d'échange (la place de l'étoile et la place Est, Figure 4.17.a et 4.17.b), elle se développe sur 220m sur l'axe NE-SO, avec une largeur maximale de 5.4m. Contrairement, les ruelles (espaces semi-publics) sont développées sur l'axe NO-SE avec une largeur ne dépassant pas les 2.5m (Figure 4.18.d), elles se terminent, au niveau de l'îlot urbain, en impasses (de 1 à 1.5m de largeur) matérialisant l'espace urbain semi-public le plus intime du quartier, desservant les habitations (Figure 4.18.e). Ces derniers sont parsemés parfois, par un espace privé couvert dit « Sabat », menant à l'accès de la maison (Figure 4.18.f).



(a)

(b)

Figure 4.17. Places du ksar. (a) : Place de l'étoile, (b) : Place Est.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figure 4.18 : Voies structurant du ksar. (a) Rue commerçante, (b) : Ruelle, (c) : Impasse, (d) : Sabat.

Ce choix de dimensions permet d'empêcher les radiations solaires estivales d'atteindre ces canyons, notamment, pendant l'heure de pic (les canicules). Ce principe est également renforcé par le rapport de la hauteur des habitations à la largeur des voies⁵⁹ (H/L) : plus ce rapport est élevé, plus la protection contre les rayons solaires intenses est grande (Figure 4.19).

⁵⁹ Il convient de noter que la largeur des rues et des ruelles n'est pas originelle, elle a été acquise par l'armée française, pour but de contrôler et de maîtriser la circulation au sein du Ksar.

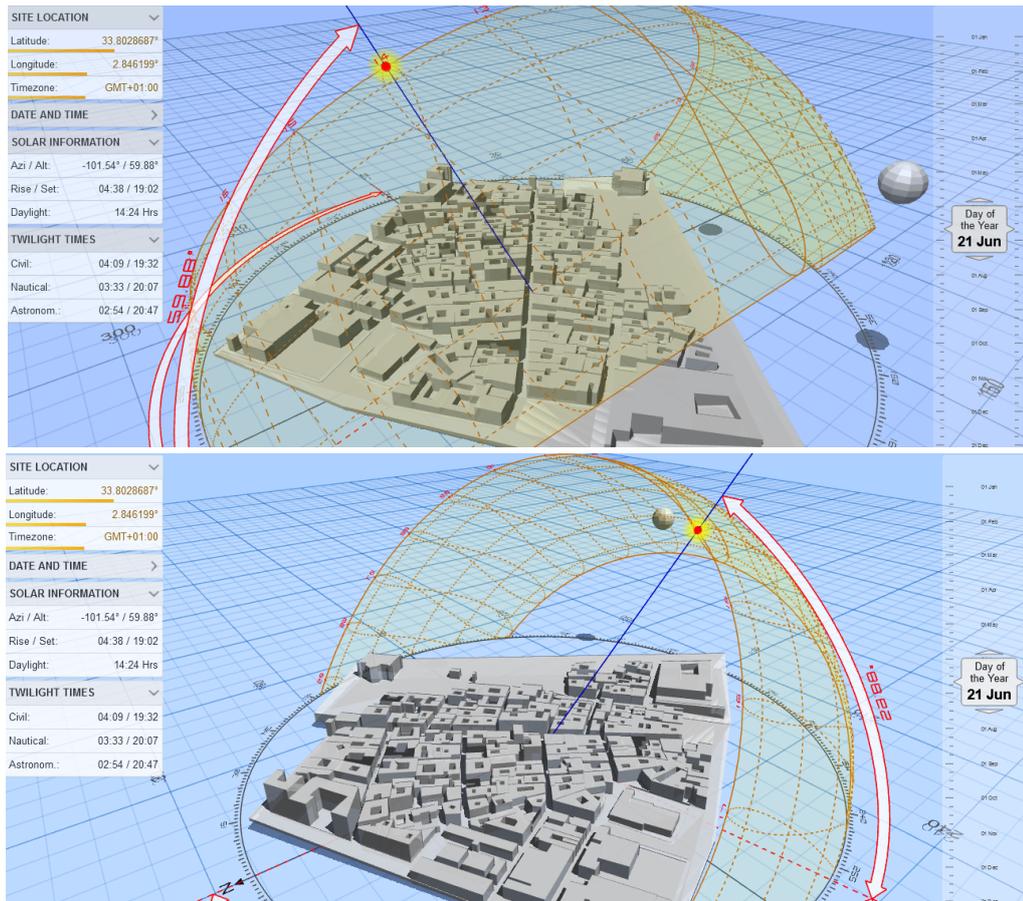


Figure 4.19 : Distribution du rayonnement solaire au niveau du Ksar (Solstice d'été).

En outre, le rétrécissement de ces voies privilégie la ventilation naturelle résultant de l'écoulement du vent, autrement dit, de l'effet venturi qui se produit par la diminution de la vitesse de l'air et l'augmentation de sa pression (Figure 4.20). Cet aspect est ainsi renforcé par le décalage des ruelles, et la topographie du site permettant de créer des coupe-vent variant la pression de l'air autour des bâtiments (Figure 4.20) et par la palmeraie : un brise-vent naturel et un fixateur de poussière.

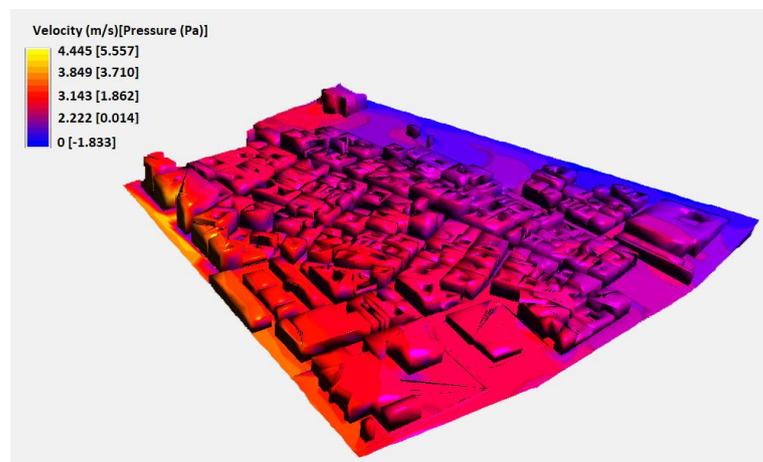


Figure 4.20 : Écoulement du vent dans le tissu compact de Ksar Zgag El-Hadjadj (modélisé par logiciel Autodesk Flow Design).

Cette trame viaire, crayonnée par la lettre T, délimite des îlots de formes pentagonales ou trapézoïdales irrégulières (Figure 4.16), dont la surface varie entre 1550 et 4200m². Ces derniers sont formés d'un ensemble de maisons accolées les unes contre les autres, interrompues par des équipements collectifs ; petite mosquée, hammam, école coranique et des petits commerces. Cette configuration entraîne une compacité et une introversion de l'espace habité (chaque maison possède, au maximum, une façade), ce que permet de limiter ses échanges thermiques avec l'environnement extérieur et de garantir son intimité. De Plus, l'orientation irrégulière de ces îlots permet de créer des coupe-vent.

2.2 La typologie architecturale de l'habitat ksourien

Comme toute maison ksourienne, les maisons vernaculaires de Ksar Zgag El-Hadjadj sont caractérisées par leur compacité, introversion et centralité, elles sont développées horizontalement sur un plan carré ou rectangulaire irrégulier (Figure 4.21.a), et verticalement sur deux niveaux. L'accès à ces dernières est marqué par une entrée en chicane, dont la forme varie selon leurs positions synchroniques (Figure 4.21.b). Cet espace comportant une Skifa et parfois une Driba (Figure 4.21.b), qui s'ouvre sur un patio (Haouch ou West Eddar) et donne accès, dans certaines maisons, à 'Beit Diaf' : une grande pièce indépendante réservée aux invités (Figure 4.21.a).

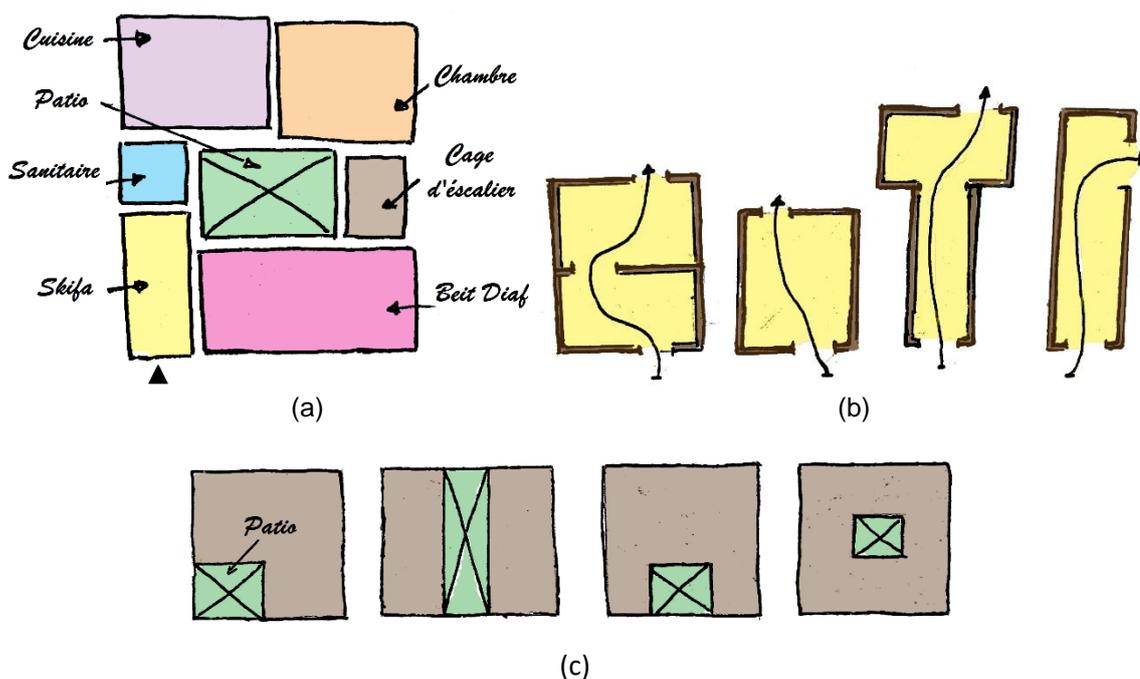


Figure 4.21 : Typologie architecturale des maisons ksouriennes de Zgag El-Hadjadj. (a) : Organisation spatiale des maisons, (b) : Types d'entrée en chicane, (c) : Types de patios.

Ce patio présente, en effet, l'espace principal autour duquel s'organisent les autres pièces (Biout), son emplacement diffère d'une maison à une autre (Figure 4.21.c), cependant, il est centrale dans la plupart des habitations (Figure 4.22), et bordé parfois d'une galerie ouverte de circulation, autrement dit, d'une colonnade (Figure 4.23). Ainsi, il comprend une cage d'escalier menant sur la terrasse (Stah ou Satha).

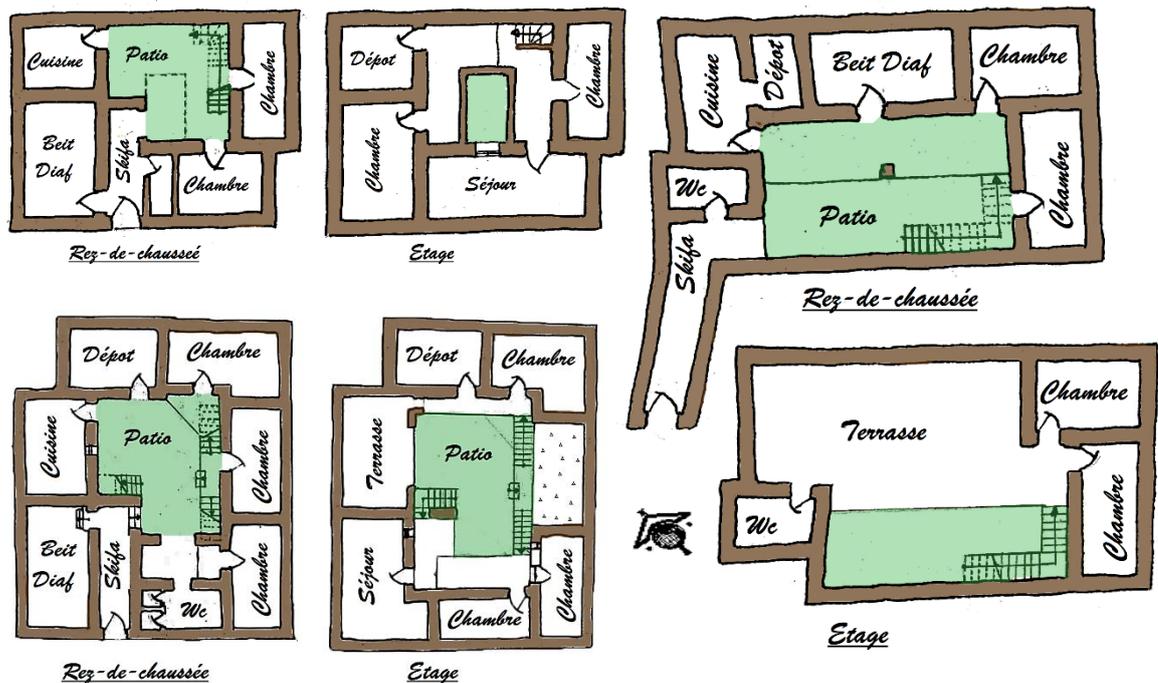


Figure 4.22 : Plans des maisons vernaculaires de Ksar Zgag-El-Hadjadj.

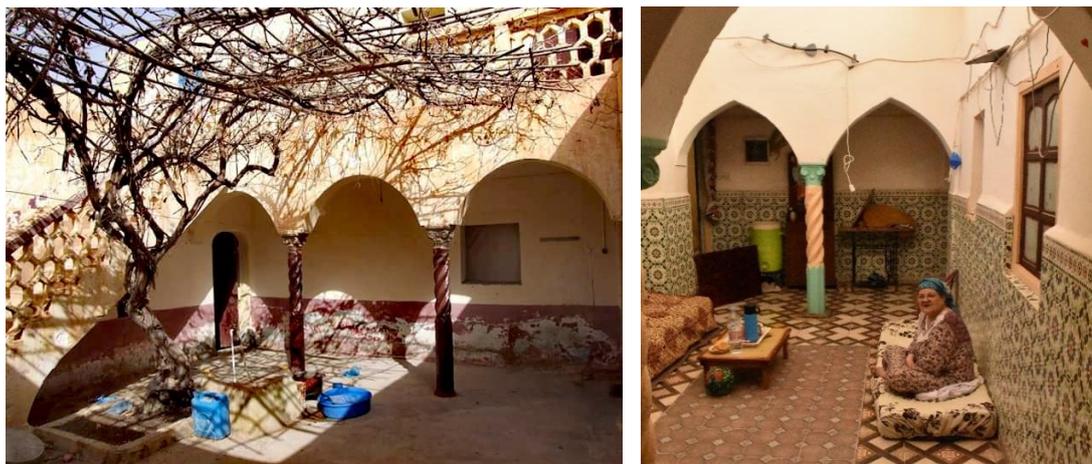


Figure 4.23 : Patios de maisons ksouriennes.

2.2.1 La maison à patio, expression d'exigence sociale

La maison à patio répond par sa typologie à des exigences d'ordre social, elle consiste à préserver l'intimité des habitants et à renforcer leurs liens familiaux. Cette

dernière est caractérisée par une hiérarchisation spatiale et fonctionnelle, partant toujours de l'espace public collectif à l'espace privé intime.

Ce type de maison n'ayant généralement qu'une seule grande ouverture, celle de la porte d'entrée. Cette dernière est marquée par un seuil (El-Atba) matérialisant le changement de lieu (Figure 24.a), autrement dit, le passage à l'espace privé. Derrière cette ouverture, se trouve un espace d'accueil de forme rectangulaire ne dépassant pas 1.5m de largeur et 6m de longueur, nommé Skifa (Figure 24.b). Ce vestibule présente l'espace le plus public de la maison, il donne accès à une antichambre (Beit Eddiaf) (Figure 24.c) et s'ouvre sur la cour centrale par une porte placée perpendiculairement à la porte d'entrée (Figure 24.d).



Figure 4.24 : Maison vernaculaire type de Ksar Zgag-El-Hadjadj. (a) : Entrée de la maison, (b) : Skifa, (c) : Accès de Beit Diaf, (d) : Vue sur patio.

Cette configuration permet une intimité visuelle, notamment aux femmes, dont la pénétration des regards indiscrets est obstruée grâce à l'espace filtre ou un espace-écran 'la Skifa' (Figure 4.24.a). Ce principe fondamental d'intimité et de vie

privée est ainsi renforcé par l'introversion de l'habitat, à travers l'ouverture de ses différentes pièces de vie sur un patio (Figure 4.24.d) : il n'y a pratiquement que peu de fenêtres sur extérieur. Il est à noter que cette configuration favorise également le confort et l'intimité acoustique.

De plus, le patio présente un espace de vie où se regroupent les femmes afin de réaliser les tâches quotidiennes (culinaire, ménagère, artisanale, couture, etc.). Ainsi, c'est un espace social dans lequel les familles se réunissent pour célébrer les occasions particulières (fête religieuse, cérémonie, soirées de ramadan, etc.) (Figure 4.25).



Figure 4.25 : Fête de mariage organisée dans le patio d'une maison ksourienne rénovée.

2.2.2 La particularité climatique de la maison à patio

Comme évoqué précédemment (Chap.1. § 3.1.1), la typologie architecturale de l'habitat vernaculaire est une réponse aux caractéristiques climatiques de la région dans laquelle il est construit. La première adaptation climatique est achevée, dans les maisons de Ksar Zgag El-Hadjadj, par leur compacité. Ces habitations présentent la même forme carrée ou rectangulaire (dont la surface varie entre 100 et 300m²), un plan introverti, et des murs mitoyens réduisant les coefficients de compacité et limitant les surfaces exposées aux conditions climatiques hostiles.

En outre, leurs patios sont configurés en forme de cuvettes, dont les dimensions (proportion en hauteur, en longueur et en largeur) et l'orientation (généralement, NE-SO et NO-SE) sont choisies de façon à se protéger des vents, à empêcher les rayons solaires estivaux de pénétrer à l'intérieur, et à maîtriser la durée d'ensoleillement (Figure 4.26), afin d'éviter toute surchauffe estivale, et de profiter pleinement des apports solaires en hiver.

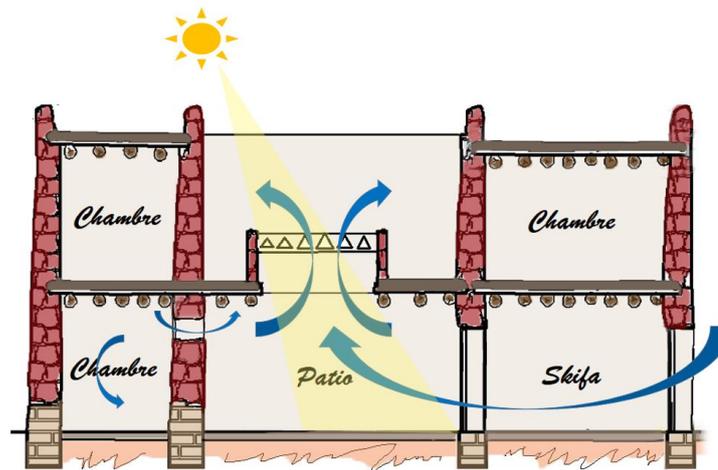


Figure 4.26 : Aspect climatique du patio.

De plus, l'organisation spatiale de ces maisons favorise la ventilation naturelle, elle permet de provoquer une circulation et un échange d'air entre l'extérieur et l'intérieur (Figure 4.26), autrement dit, un renouvellement de l'air chaud par l'air frais. Elle laisse entrer l'air frais à travers le patio et la porte d'entrée (qui est toujours laissée ouverte), afin d'évacuer l'air chaud accumulé dans les différentes pièces, à travers les portes et les petites percées hautes (d'environ 40×40cm) donnant sur la cour centrale (Figure 4.27). Cette stratégie est renforcée par la faible hauteur des plafonds (2.5 à 2.8m) qui permet d'augmenter le débit de ventilation, ainsi que par la présence d'un bassin d'eau et de la végétation dans le patio, provoquant un rafraîchissement de l'air par évaporation (Figure 4.28).



Figure 4.27 : Ouvertures aménagées dans les murs donnant sur le patio.



Figure 4.28 : Patio aménagé d'une maison vernaculaire de Zgag El-Hadjadj.

Enfin, l'étage de la maison à patio comprend généralement une terrasse, où se réunit la famille le soir. Cet espace est une partie intégrante de la maison, il est aménagé dans le souci d'obtenir un confort thermique nocturne pendant la période estivale. Du plus, la terrasse est abordée de murs d'au minimum 3m de hauteur, jouant un double rôle ; ils permettent de préserver l'intimité des habitants, et de protéger les planchers du rez-de-chaussée des rayonnements solaires directs par l'effet de masque.

2.3 Techniques et matériaux de construction

Les maisons du ksar sont construites en terre crue, particulièrement en adobe. La terre utilisée pour la production de ce matériau se trouve généralement sous les terres arables entourant le Ksar (qui sont souvent décapés sur 0.5 à 1m - en fonction des terrains - afin d'atteindre la terre propice aux travaux), ou dans les lits d'Oued Mzi. Ces gisements sont choisis pour la teneur en argile constituant leur terre et pour leurs emplacements par rapport au Ksar qui facilitent le transport des terres. Cette matière première est ensuite mélangée avec de l'eau, puis versée dans des moules en bois de 30×16×11cm, afin d'être démoulée et mise à sécher au soleil pendant un mois pour être maçonnée. En effet, cette opération de production et de fabrication d'adobe ne peut être effectuée que par la Twiza⁶⁰ : un travail collectif volontaire, mobilisant les habitants du Ksar, afin de réaliser les tâches dépassant largement les capacités de l'individu (Figure 4.29.a).

⁶⁰ Un mot signifiant 'aider' en berbère.

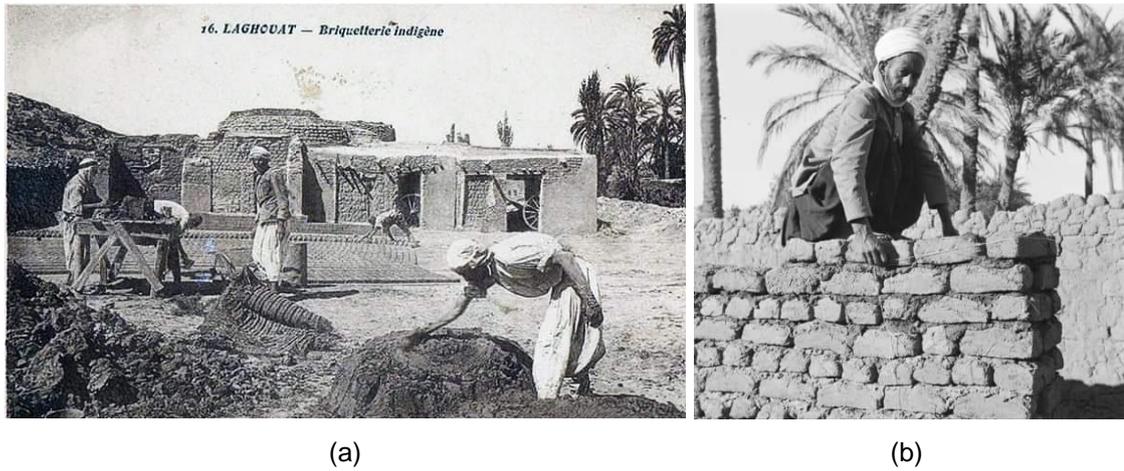


Figure 4.29 : Phases primaires de la construction d'habitat de Zgag El-Hadjadj. (a) : Fabrication de la brique d'adobe, (b) : Construction de murs [346, 347].

L'utilisation de ce matériau de construction permet de réaliser des murs porteurs d'une épaisseur moyenne de 50 à 70cm (Figure 4.30), avec un large soubassement en pierre (d'environ 80cm d'épaisseur et un mètre de hauteur, du niveau du sol) permettant de les protéger des remontées capillaires et des ruissellements d'eau pluviale (de bonnes bottes). Ce soubassement présente, en fait, la continuité de fondations filantes qui font généralement 30 à 50cm de profondeur et 50 à 80cm de largeur (Figure 4.30). Il convient de noter que les murs sont parfois raidis par de poteaux en adobe ou en pierre, d'une section variant de 50 à 80cm.

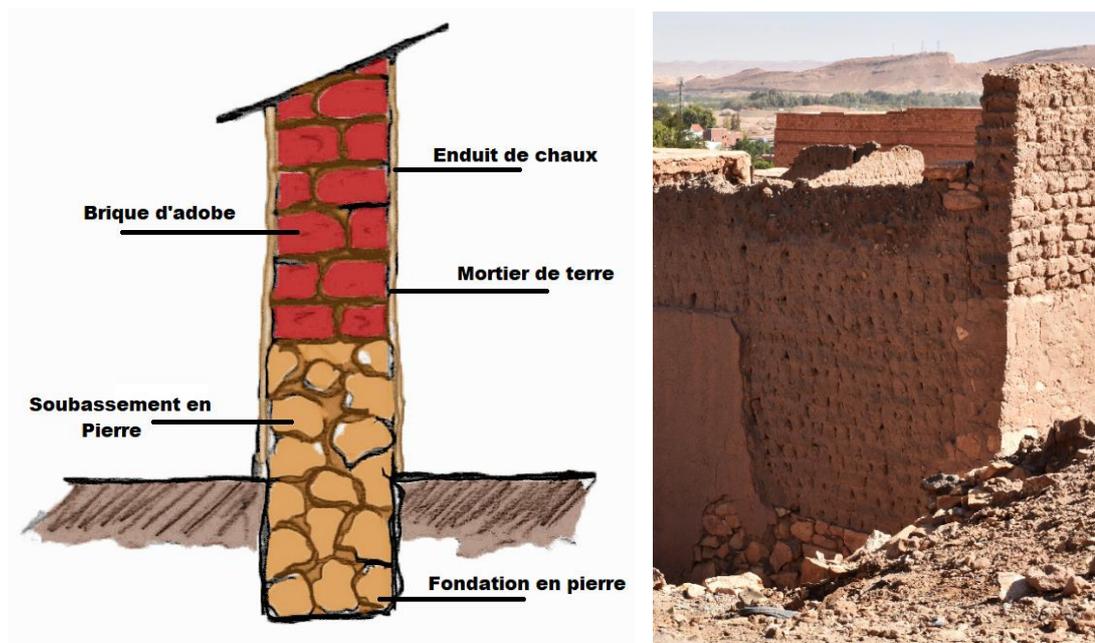


Figure 4.30 : Détails de mur d'adobe.

Ces murs sont dotés des ouvertures, dont les dimensions sont réduites par rapport à celle de l'habitat contemporain : les portes sont entre 0.7 et 1m de largeur, et entre 1.50 et 1.9m de hauteur, cependant, les fenêtres ne dépassent pas les 50cm de largeur, et 60cm de hauteur, sauf celles ouvertes sur la rue principale. L'encadrement et les linteaux de ces derniers sont faits en planchers de bois (de peuplier ou de palmier), les linteaux sont posés sur un lit de mortier de terre en appuis de 25 à 40cm de part et d'autre de l'ouverture. En outre, les ouvrants des portes sont faits du bois de palmier et parfois de bois d'olivier (Figure 4.31). Il est à noter que les portes de petits commerces qui se trouvent au rez-de-chaussée des maisons donnant sur la rue commerçante, sont en arc et de deux vantaux (Figure 4.31), leurs linteaux sont composés de briques cuites.



Figure 4.31 : Portes de petits locaux de commerces.

Les planchers de ces maisons vernaculaires sont souvent d'une hauteur variant entre 2.5 et 2.8m, ils sont constitués de poutres en tronc de palmier ou de solive de peuplier⁶¹ (Figure 4.32), dont la section est variée entre 15 et 25cm. Ces dernières sont posées sur les corbeaux perchés en haut de murs, elles sont recouvertes de branchages de roseaux ou de palmes, protégés par une couche de terre (de 20 à 30 cm d'épaisseur), et revêtus de mortier de terre et de badigeon à la chaux (Figure 4.32). Ce revêtement est également utilisé pour recouvrir les murs.

⁶¹ Ces deux espèces d'arbres sont les plus répandues dans la région de Laghouat.

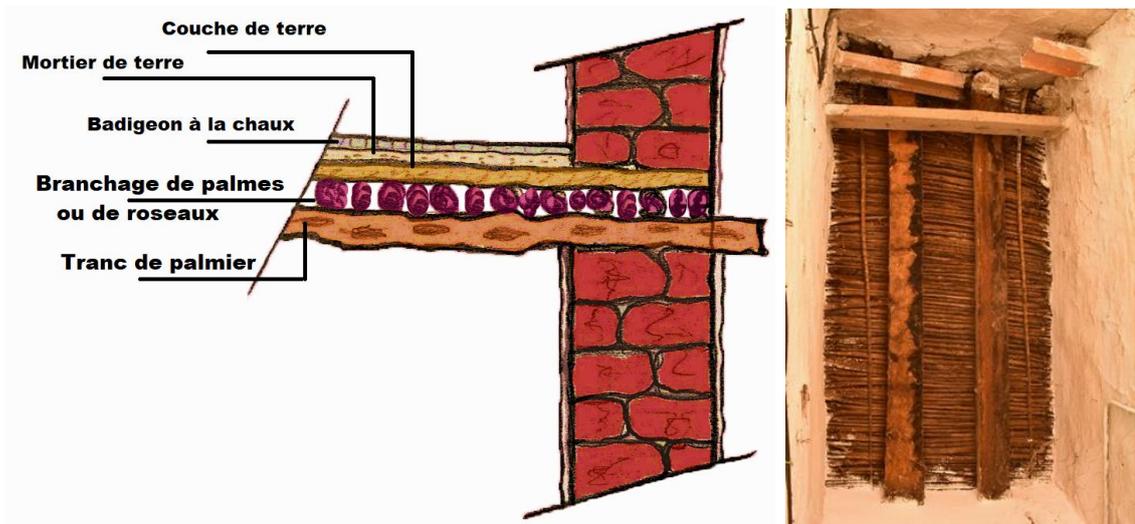


Figure 4.32 : Détails du plancher traditionnel.

Quant au sol, un pavage en briques de terre cuite (de différentes formes et dimensions) est posé sur un lit de mortier de terre (ni sec ni visqueux) d'environ 5cm d'épaisseur. Ce lit est déposé sur une couche de sable de 15 à 20cm d'épaisseur, arrosée et compactée, permettant le nivellement du sol et la création d'une légère pente (d'au minimum 2%) qui facilite l'écoulement des eaux. Les joints séparant les briques de pavage sont remplis par du mortier de terre, afin de combler le vide et d'assurer une bonne finition (Figure 4.33).



Figure 4.33 : Revêtement du sol de l'habitat ksourien.

2.4 État des lieux du Ksar Zgag El-Hadjadj

Le Ksar de Zgag El-Hadjadj se trouve actuellement dans un état de dégradation très avancé menaçant l'hygiène, le confort et la sécurité de ses habitants. La visite des maisons a permis d'examiner les désordres apparents au niveau de la structure et d'identifier les causes probables de dégradations observées (Tableau 4.7). Les pathologies rencontrées sont inhérentes à la forte vulnérabilité de l'adobe aux sollicitations hydriques, au manque d'entretien causé par l'abondant et à la modernisation qui a touché tous les aspects de la vie quotidienne des habitants du Ksar.

Tableau 4.7 : Principales pathologies des maisons.

Pathologie	Cause
<p>Effondrement et détérioration des planchers.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - L'infiltration des eaux pluviales liée à la mauvaise étanchéité, et à l'absence des gouttières et des gargouilles, - L'installation des antennes et de réseau électrique, - L'apparition des insectes et des champignons dans le bois, due à l'humidité (termites). - Le vieillissement, - Le manque d'entretien.
<p>Décollement et des enduits de façades.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Le ruissèlement des eaux pluviales, - La remontée capillaire, - La présence de salpêtres, - Le manque d'entretien.
<p>Décollement de mortier de liaison, Désintégration, fissuration et déformation de la brique d'adobe.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - L'infiltration des eaux pluviales liée au décollement des enduits, - La vibration fréquente due au passage des véhicules dans la rue principale, à l'installation non étudiée et l'usage de systèmes de climatisation et aux travaux de démolition, - L'hétérogénéité du matériau utilisé pour le colmatage de vides (ciment), - La montée de l'humidité du sol, - L'érosion due à la cristallisation de sels - Le manque d'entretien.

<p>Détérioration de la pierre de soubassement.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - La médiocrité du système d'assainissement et de d'eau potable, - L'absence des canaux de drainage, - La remontée capillaire, - La cristallisation de sels, - Les moisissures.
<p>Altération de revêtements de sol.</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - L'absence des canaux de drainage, - Le manque d'entretien

Néanmoins, pour la remise de quelques maisons en état d'habitation, ces désordres ont été traités par des travaux de réhabilitation. Certaines mesures profondes et urgentes étaient conduites par la direction de la culture (Figure 4.34), tandis que plusieurs interventions (agrandissement, réaménagement, reconstruction, etc.) étaient effectuées par les habitants sans prendre en considération la valeur patrimoniale du ksar, ce qui a aggravé de plus l'état de leurs maisons et a conduit à une perte de l'identité architecturale et de caché Ksourien (Figure 4.35).



Figure 4.34 : Réhabilitation guidée par les spécialistes du patrimoine.



Figure 4.35 : Réhabilitations guidées par les habitants.

3. Conclusion

Laghouat est une wilaya sud algérienne, dont le chef-lieu est la commune de Laghouat qui se situe à 410km au sud de la capitale Alger. La naissance de cette ville remonte à l'an 1045, elle était formée de six Ksour satellites qui ont été fusionnés, vers 1700, autour d'un Ksar-noyau (Ksar Ben-Bouta) afin de former une ville fortifiée marquée par la présence de trois éléments naturels ; l'oasis, l'oued et la colline.

Cette ville a connu une évolution urbaine marquée par la destruction et la reconstruction de sa partie ouest, ainsi par la réalisation des différentes infrastructures, l'aménagement des places, la restructuration de voirie, et l'élargissement des voies de circulation : des opérations urbaines qui ont permis la structuration d'une nouvelle cité, selon un tracé en damier, occupant aujourd'hui une superficie dépassant les 2520 hectares.

L'analyse climatique de cette ville (entre 2008-2018) a permis de constater que cette dernière est classée dans l'étage bioclimatique désertique froid (BWK), qui est caractérisé par un hiver sec et froid, pendant lequel la température peut diminuer jusqu'à 2.04°C, un été sec et chaud, où la température touche les 38.7°C

et une amplitude thermique atteignant les 23°C. L'indice d'aridité de cette ville est égal à 5.20.

De plus, cette analyse a démontré, également, que le confort thermique peut être assuré, dans ce climat, par l'inertie thermique des matériaux de construction et la mise en œuvre de trois stratégies bioclimatiques à l'échelle urbaine comme à celle architecturale à savoir, la compacité du plan, l'orientation nord-sud, la réduction de la taille des ouvertures et l'aménagement d'un espace extérieur favorisant la ventilation naturelle et le rafraîchissement évaporatif.

L'analyse du premier noyau de la ville de Laghouat, Ksar Ben-Bouta précédemment et Ksar Zgag El-Hadjadj actuellement, et de ses espaces architecturaux, a permis de constater que les habitants de cet établissement humain saharien sont de remarquables inventeurs des stratégies d'adaptation à la rigueur du climat saharien. Le choix de ces dernières était issu de leur longue expérience et leur profonde compréhension des données caractérisant le climat de leur région.

Outre, l'architecture vernaculaire de Ksar Zgag El-Hadjadj fait appel à toutes les règles du confort thermique, dont les habitations compactes (135 maisons, réparties sur 11 îlots), construites en adobe, et développées sur un plan souvent carré ou rectangulaire qui s'organise autour des patios leur offrant une centralité et une introversion, présentent un exemple réel d'adaptation climatique au contexte désertique.

Ce focus est, en effet, issu de l'analyse approfondie des travaux de recherche antérieurs menés sur des exemples pareils et de la projection des résultats de l'analyse bioclimatique de la ville sur cet exemple, néanmoins, il ne présente qu'une hypothèse théorique qui s'appuie sur l'observation et la recherche, et qui doit être mise à l'épreuve avec un dispositif expérimental, afin d'être approuvée.

Sur ce, le chapitre suivant sera consacré à l'évaluation du comportement thermique d'un exemple d'habitat vernaculaire de Ksar Zgag-El-Hadjadj de Laghouat. Cette évaluation visera à prédire subjectivement la sensation thermique des habitants de ses espaces architecturaux et à mesurer objectivement les conditions microclimatiques de ses ambiances. De plus, cette évaluation en continu pourra apporter une vraie connaissance de l'effet de la dégradation du bâti, non

seulement sur son comportement thermique, mais également sur l'efficacité énergétique de son essentiel matériau de construction ; la brique d'adobe.

CHAPITRE 5
EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DE
L'HABITAT VERNACULAIRE DE KSAR
ZGAG EL-HADJADJ

CHAPITRE 5 :

EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DE L'HABITAT VERNACULAIRE DE KSAR ZGAG EL-HADJADJ

Ce chapitre s'intéresse à l'efficacité énergétique de l'habitat vernaculaire de Ksar Zgag El-Hadjadj à Laghouat. Il a pour objectif d'évaluer le comportement thermique d'une maison traditionnelle faisant partie de ce patrimoine bâti, selon deux méthodes complémentaires de l'approche adaptative de la norme internationale ASHRAE 55 : qualitative et quantitative.

La première évaluation est faite sur la base d'une enquête effectuée auprès des occupants de la maison étudiée, elle permet de prédire la perception thermique globale de ces derniers à l'égard de deux espaces présentant le centre vital de la maison et incarnant une opposition qui permet d'intervenir sur les échanges thermiques entre l'ambiance intérieure et extérieure de la maison.

Ensuite, une campagne de mesure est menée dans les espaces témoins, permettant de mesurer trois paramètres environnementaux de confort thermique (la température de l'air, la température radiante et l'humidité relative de l'air), afin d'être comparés à la plage du confort hygrothermique recommandée pour la ville de Laghouat.

Enfin, une simulation thermique dynamique est effectuée, par l'outil le plus répandu au plan international « EnergyPlus ». La comparaison des résultats de cette dernière avec les mesures expérimentales permet la validation du modèle numérique et l'estimation des besoins énergétiques de l'espace intérieur étudié.

1. La maison en question

La maison d'étude se situe dans la partie sud-ouest du Ksar, sur le premier îlot donnant sur la rue principale et la place de l'étoile (Figure 5.1.a). À la différence des autres habitations, la maison "MECHATTAH" accueille des locaux dédiés aux activités commerciales en rez-de-chaussée (qui fait partie du socle urbain d'activités marchandes), alors que l'étage est à usage d'habitation (Figure 5.1.b), il était occupé par une famille de 7 personnes.

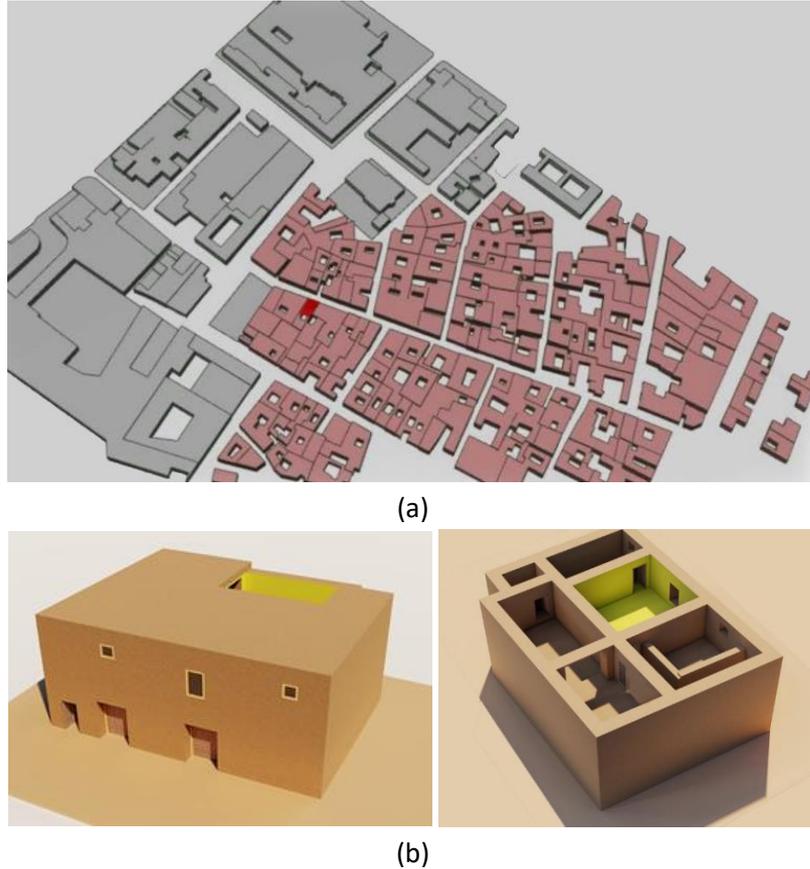


Figure 5.1 : Maison objet d'étude. (a) : Situation de la maison par rapport au Ksar. (b) : Vues en 3D de la maison.

Cette maison présente le plus ancien exemple d'habitat vernaculaire Ksourien de Zgag El-Hadjaj, selon son propriétaire ; MECHATTAH Lakhdar (un ancien plongeur militaire), elle est continuellement habitée depuis sa construction (vers 1700), ainsi, elle résiste encore à l'industrialisation, dont aucune sorte de modernisation n'est apportée à son système constructif lors de son entretien.

Cet exemple d'habitat est, en fait, parmi les cas les plus défavorables du ksar, son organisation verticale imposant la surélévation de rez-de-chaussée, pour faire place à des espaces de service, a donné naissance à une typologie architecturale particulière : une maison ksourienne appelée "Leâlli".

Contrairement aux maisons à patio, la maison "MECHATTAH", quant à elle, est dotée d'une large façade (orientée nord-ouest) percée par des fenêtres donnant sur l'artère principale, d'un plancher donnant sur un espace adjacent non chauffé, avec des portes ouvertes pendant toute la journée, et d'une toiture en contact direct avec l'environnement extérieur. Cette différence permet, en effet, d'agir davantage sur les performances thermiques de la brique d'adobe.

1.1 La configuration spatiale de la maison

Comme le reste des maisons du ksar, la maison "MECHATTAH" s'organise sur un plan rectangulaire occupant une superficie de 122m². Son rez-de-chaussée comprend trois locaux commerciaux ouverts sur eux-mêmes par des arcs plein-cintre (Figure 5.2.a). Cette série de locaux occupe une superficie de 50m², elle partage le plan en petites zones rectangulaires, dont la surface varie entre 9 et 22m². Ces locaux présentent environ 70% du rez-de-chaussée de la maison, ils sont accessibles par deux grandes portes donnant sur le Derb (Figure 5.2.a).

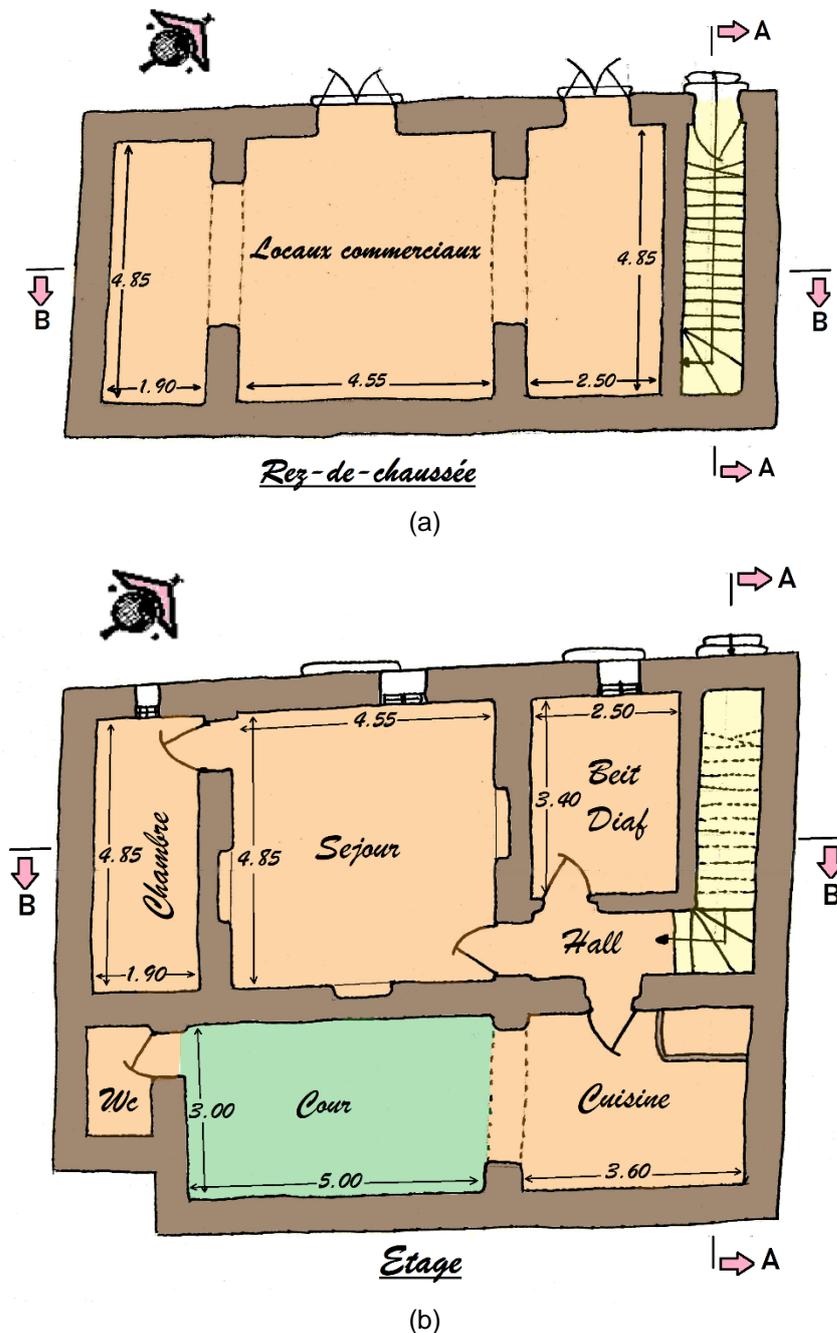


Figure 5.2 : Plans de la maison objet d'étude. (a) : Plan de RDC, (b) : Plan d'étage.

Également, la maison est accessible directement depuis cette rue (Figure 5.3), il s'agit d'un premier étage qu'on atteint par un escalier étroit (de 90cm de large) et raid (Figure 5.2.b et 5.4), partant directement derrière la petite porte d'entrée (Figure 5.4). Cet étage comporte trois pièces, un petit hall d'entrée, une cuisine ouverte sur une cour extérieure, et un WC. Une des pièces est un grand séjour, avec deux portes, l'une donnant sur le hall d'entrée et l'autre sur une petite chambre à coucher ; cet espace est doté de trois niches servant de rangement et d'une fenêtre aménagée sur la façade donnant sur l'axe principal du Ksar.



Figure 5.3 : Accès à la maison vernaculaire étudiée.

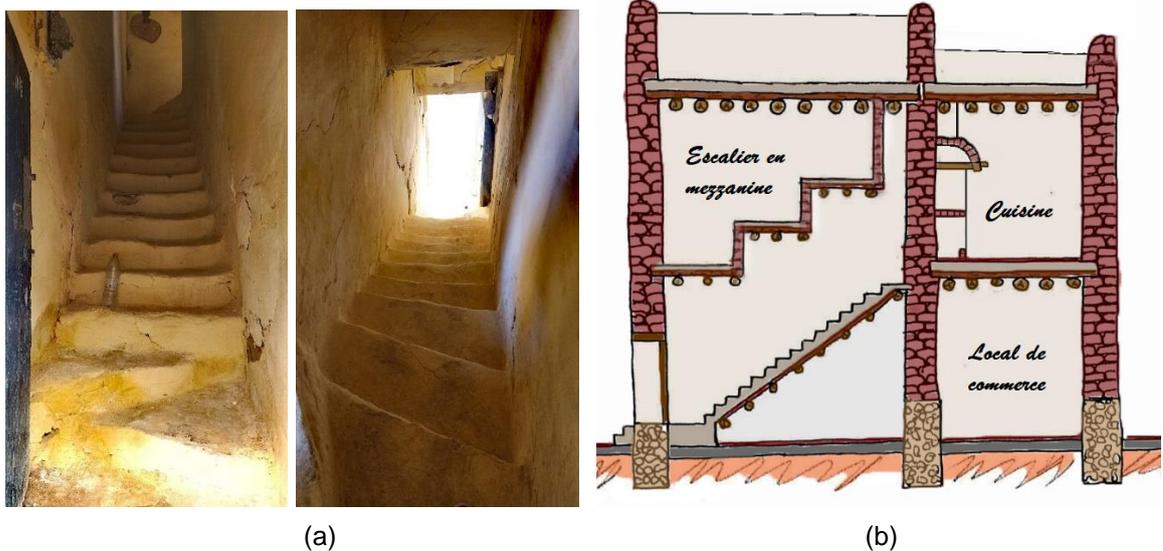


Figure 5.4 : Détails de la cage d'escalier. (a) : Vue sur l'escalier, (b) : Coupe schématique de la cage d'escalier (A-A).

À côté du séjour, se trouve Biet Diaf ; une petite pièce qui possède une forme carrée occupant une superficie de 8.5m². Cette dernière est dotée d'une petite fenêtre (70×50cm) orientée nord-ouest et une porte faisant face à la porte de la cuisine. Or, la troisième pièce est une chambre à coucher, toute différente des autres pièces, elle présente une forme rectangulaire longue et profonde (1.9×4.85m) avec une porte donnant sur le séjour et une petite percée (30×40cm) donnant sur l'extérieur (Figure 5.5).



Figure 5.5 : Chambre à coucher.

De l'autre côté du hall d'entrée, une petite cuisine est aménagée prenant la forme d'un Iwan ; il s'agit d'une pièce couverte, adoptant une forme presque carrée (de 10.8m²) ouverte par le côté sud-est (qui est délimité par un arc plate-bande) sur la cour. Cette dernière est pourvue d'un four à bois doté d'une cheminée trouée dans la toiture, facilitant l'évacuation de fumée (Figure 5.6).

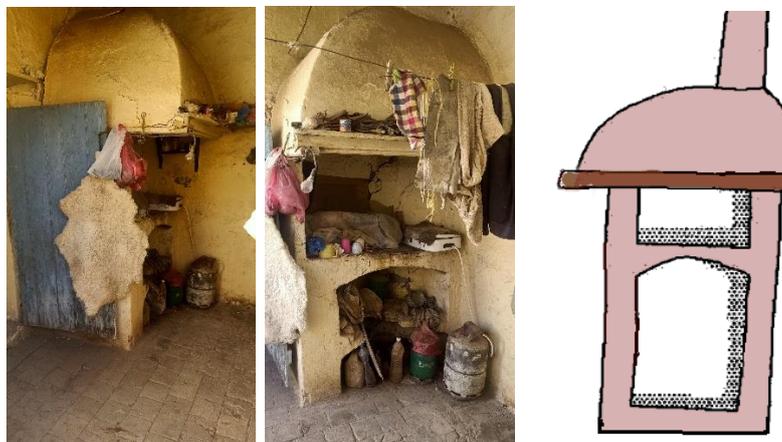


Figure 5.6 : Four à bois en brique.

La cour de cette maison est de plan rectangulaire, elle est délimitée par le séjour, la cuisine, le WC et un mur de voisinage. Il est à noter que la largeur des portes dans cette maison varie entre 0.8 et 0.9m et leur hauteur est comprise entre 1.5 et 1.9m.

1.2 Matériaux et techniques de construction

Les murs porteurs de la maison sont construits en briques d'adobe maçonné sur un soubassement en pierre (de 80cm d'épaisseur et de 90cm de hauteur), au mortier de terre. Leurs épaisseurs varient entre 57 et 65cm, seule la cloison séparant la cage d'escalier et Beit Diaf présente une faible épaisseur de 35cm (Figure 5.7). Ces derniers sont revêtus d'une couche de mortier de terre d'environ 10cm d'épaisseur, puis d'un enduit de chaux. Ses chaînages horizontaux sont en bois de palmier, tandis que ceux verticaux sont en adobe.

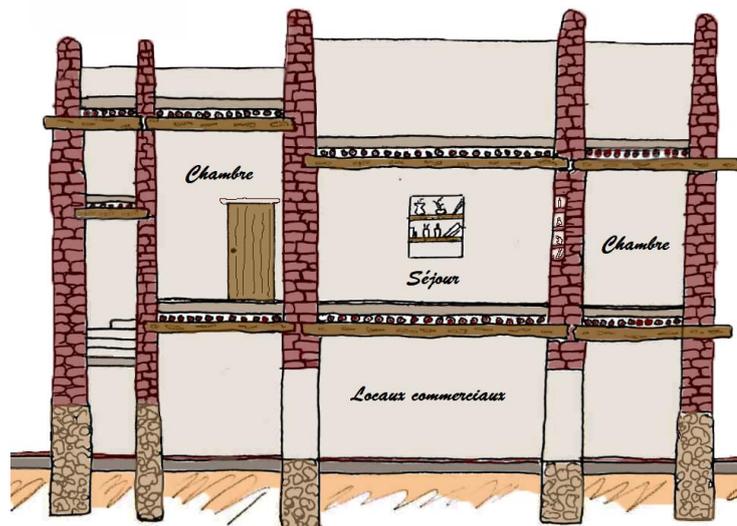


Figure 5.7 : Coupe schématique de la maison d'étude (B-B).

L'ossature porteuse de la toiture est, quant à elle, faite de poutres principales en troncs de peuplier de 25cm de diamètre, prenant appui sur les murs porteurs (Figure 5.8). Ces poutres sont surmontées de poutrelles de peuplier d'au moins 15cm de diamètre, placées parallèlement et distantes entre elles de 10 à 35cm (Figure 5.8). Cette ossature est recouverte de roseaux liés en tapis, protégés d'une couche de terre d'environ 30cm d'épaisseur, revêtus de mortier de terre, puis de badigeon à la chaux. Il convient de noter que la hauteur sous plafond dépend d'un espace à un autre, elle est de 2.1m dans le hall d'entrée, de 2.6m dans les pièces, de 2.9m dans le WC et de 3.1m dans la cuisine et Beit Diaf (Figure 5.7).



Figure 5.8 : Planchers de la maison d'étude.

Le sol de cette maison est pavé de rectangles de terre cuite, d'environ 18cm de longueur et 15cm de largeur. Ce pavage de couleur rouge clair est jointé par du mortier de terre, dont le vide séparant les briques ne dépasse pas 1cm (Figure 5.9).



Figure 5.9 : Revêtement du sol.

Quant aux portes, elles sont faites de longues lames en bois de palmier, de 5 à 8cm d'épaisseur (Figure 5.10). Leurs encadrements et leurs linteaux sont également faits en planchers de bois de palmier, les linteaux débordent d'une vingtaine de centimètres de part et d'autre de ces derniers, et ainsi de fenêtres.



Figure 5.10 : Portes de la maison.

Le tableau ci-après (Tableau 5.1) présente les caractéristiques thermo-physiques des différents matériaux de construction constituant l'enveloppe de cette maison. Ces caractéristiques sont déterminées pour l'adobe par des essais de caractérisations réalisés au niveau de laboratoire (Chap.6. §3.1), tandis que pour le reste des matériaux, elles sont définies à partir du Document Technique Règlementaire intitulé DTR C3-T "Réglementation thermique des bâtiments" [348], élaboré par le Centre National d'Études et de Recherches Intégrées du Bâtiment.

Tableau 5.1 : Caractéristiques thermo-physiques des matériaux de construction de la maison objet d'étude [Auteur, 348].

Élément constructif	Matériau de construction	Densité (kg/m ³)	Conductivité thermique (W/m.K)	Chaleur spécifique (J/kg.K)
Mur	Adobe	2567.6	0.89	987
	Mortier de terre	1200	0.5	1200
	Mortier de chaux	1800	0.87	1080
	Enduit d'argile	600	0.17	600
Plafond	Tronc de peuplier	390	0.085	1140
	Roseau	200	0.06	2088
	Terre	1700	1.15	1080
	Badigeon à la chaux	1800	0.32	1080
Plancher	Pavage en terre cuite	2000	0.47	936
	Mortier de terre	1200	0.5	1200
	Sable	1800	1.2	792

2. Espaces d'étude

Le choix a été porté sur les espaces communs à multiples usages ; la cour jouant le rôle d'un patio et le séjour. Ces derniers présentent le centre vital de la maison, dont plusieurs activités en s'y déroulent et ce, tout au long de la journée. Ce sont les pièces dont le taux d'occupation est probablement le plus important au cours de la journée.

En outre, ces espaces de vie occupent, par leurs volumes, la plus grande surface de la maison (soit 48.3% de sa superficie), dont la plupart de leurs parois sont soumises aux conditions climatiques extérieures. Ces derniers incarnent une opposition (intérieur/extérieur, couvert/ouvert) permettant d'intervenir sur les échanges thermiques entre l'ambiance intérieure de la maison -qui ne possède

aucun système actif de chauffage, de ventilation ou de climatisation- et celle extérieure.

2.1 La salle de séjour

Comme présenté dans la figure ci-après, la salle de séjour occupe une position centrale de la maison (Figure 5.11) permettant d'assurer l'articulation entre l'espace le plus intime ; la chambre à coucher et ce plus public ; le hall d'entrée. Elle s'organise sur un plan carré occupant une superficie de 22m² (4.85x4.55m), dont la hauteur sous plafond est de 2.6m (Figure 5.12).



Figure 5.11 : Position de la pièce de vie par rapport aux autres espaces de la maison.

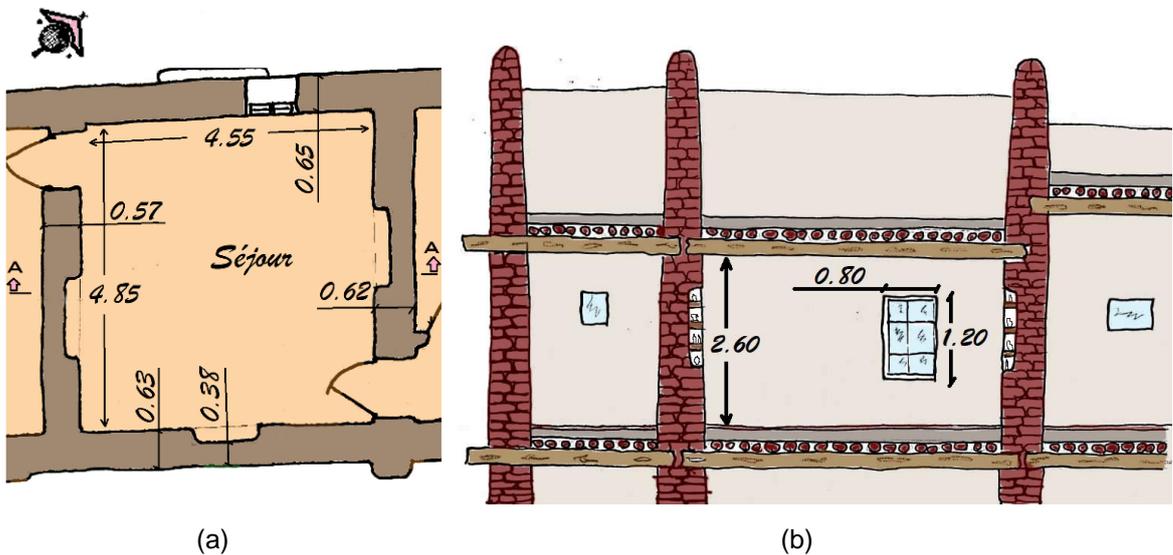


Figure 5.12 : Détails de séjour objet d'étude. (a) : Plan, (b) : Coupe schématique du séjour (A-A).

En outre, cette salle familiale possède deux façades ; l'une orientée nord-ouest donnant sur la grande rue commerçante et l'autre orientée sud-est, délimitant la cour extérieure. La première façade est ouverte par une grande fenêtre – par rapport aux ouvertures caractérisant l'habitat vernaculaire- de 0.8m de largeur

contre 1.2m de hauteur (Figures 5.12 et 5.13). Le coefficient de compacité est estimé pour cette espace à 0.79, dont la surface des parois exposées est de 45.72m² et le volume habitable est estimé à 57.37m³. En considérant compact l'espace ayant un coefficient de compacité inférieur à 0.7, le coefficient de cette pièce correspond à une mauvaise compacité.



Figure 5.13 : Vues de l'extérieur et de l'intérieur sur la fenêtre du séjour.

Quant aux portes, la pièce est dotée d'une porte de 0.8m de largeur et 1.9 de hauteur. Cette dernière est marquée par un seuil matérialisant le passage de l'espace public (le hall d'entrée) à ce semi-public. En outre, une deuxième porte de 0.7m de largeur et de 1.5m de hauteur est aménagée, au sens opposé de la première, dans le mur qui sépare cette pièce de la chambre à coucher (Figure 5.14).



Figure 5.14 : Pièce de vie (séjour).

Dans cet espace, l'épaisseur de mur varie entre 0.57 et 0.65m, néanmoins, trois d'entre ses murs sont dotés d'une niche de rangement de 1m de largeur, 1.2m de hauteur et de 0.25m de profondeur (Figure. 5.12).

2.2 La cour extérieure

La cour s'organise sur un plan rectangulaire occupant une superficie de 15m² (5×3m), développé sur l'axe NE-SO (Figure 5.15.a). Elle est accessible par une porte, de 0.9m de largeur et de 1.9m de hauteur, aménagée dans le mur séparant le hall d'entrée de la cuisine (Figure 5.15.d).

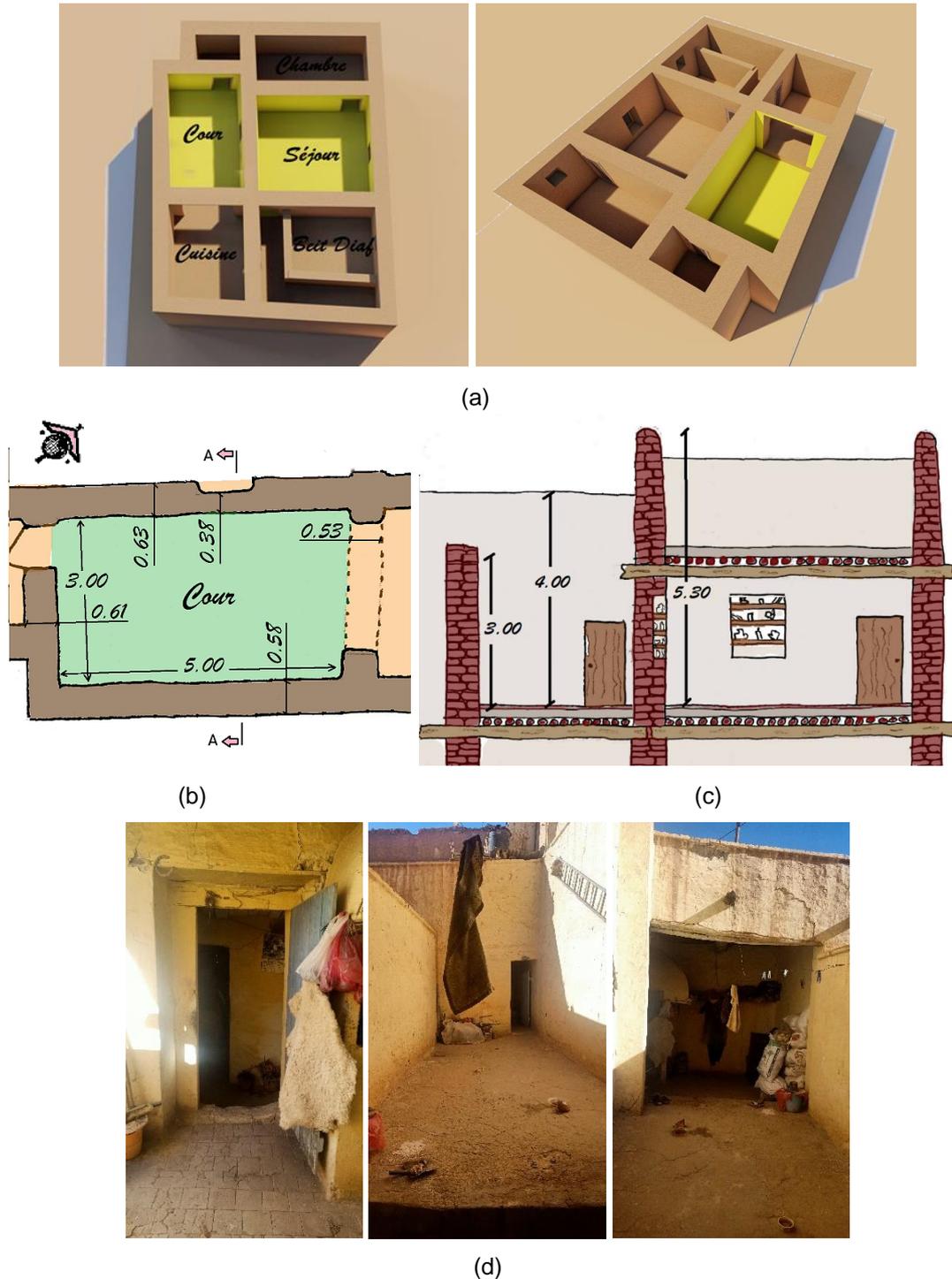


Figure 5.15 : Détail de la cour étudiée. (a) : Position par rapport à la maison, (b) : Plan, (c) : Coupe schématique de la cour (A-A), (d) : Vues sur la cour.

Cette cour à ciel ouvert est limitée du côté sud-ouest et nord-est par des murs de 4m de hauteur, dont la largeur est de 0.53 et 0.61m, respectivement. Elle s'ouvre sur la cuisine par un arc plate-bande de 2.2m de largeur et de 2.3m de hauteur (Figure 5.15.d). La paroi séparant cet espace du séjour est de 0.63m de largeur et de 5.3m de hauteur, cependant, celui qui le sépare de la maison voisine est de 3m de hauteur (Figure 5.15.c et 5.15.d). Le rapport H/L est estimé pour cette espace à 1, en considérant la hauteur du mur la plus basse.

3. Performance thermique de l'habitat ksourien

L'évaluation de comportement thermique des espaces considérés est faite selon deux méthodes faisant partie de l'approche adaptative analytique d'ASHRAE 55 [24] ; la méthode qualitative et celle quantitative ; la première permettant de prédire subjectivement la sensation thermique des habitants et leur satisfaction à l'égard de l'environnement thermique de ces espaces ; cependant, la deuxième consiste à mesurer d'une manière objective les conditions microclimatiques de ces ambiances, en fonction des conditions extérieures.

Ces méthodes complémentaires permettent de prendre en compte les six paramètres de base des échanges thermiques entre le corps humain et son environnement, qui sont regroupés en deux catégories ; les paramètres humains (métabolisme et vêture) et les paramètres environnementaux (température de l'air, température radiante, humidité et vitesse de l'air), afin de comparer les ambiances thermiques et les perceptions thermiques réelles des sujets.

En outre, avant de passer à cette évaluation, une préenquête s'est tenue afin de prédire la perception globale des occupants à l'égard de leur maison (le cas étudié). Cette dernière a également pour objectif de se familiariser avec les enquêtés, et de leur situer dans un contexte global (sociologique, psychologique, historique, etc.), qui permet de vérifier la faisabilité et l'acceptabilité de questionnaire auprès de leurs.

3.1 Pré-enquête

En réponse à la question de la perception globale du confort, tous les habitants déclarent trouver leur maison confortable en toute saison. Ces personnes perçoivent que leur maison, qui fait partie du patrimoine, présente de bonnes

qualités thermiques par rapport au nouveau bâti, où y vivent le reste des membres de leur famille aujourd'hui. Elles évoquent leur satisfaction à l'égard de cette maison disant que *"notre maison d'adobe est mieux que celles d'aujourd'hui construites en parpaing, elle est plus solide et plus confortable. Le matériau traditionnel utilisé pour sa construction permet d'assurer un bon confort d'été sans nécessiter le recours à la climatisation. En hiver, des vêtements adaptés à la saison et parfois un bon feu au bois peuvent garantir une sensation du confort"*.

En effet, les réponses des occupants montrent également leur acclimatation à l'environnement habité, dont une occupante rajoute *"on est adapté à la fraîcheur d'hiver, on ne peut pas vivre dans un espace clos, même pendant les jours les plus froids de l'année, les portes sont laissées ouvertes. De plus, le feu au bois utilisé de temps en temps se trouve généralement placé dans une seule pièce, il permet de réchauffer toute la maison"*. A cela s'ajoute la notion du nomadisme journalier, dont les habitants déclarent : *"en hiver, on passe la matinée dans la cour, car elle est exposée au soleil qui permet de la réchauffer naturellement. En revanche, pendant la période estivale, on ne fréquente cet espace qu'au bon matin (généralement de 6h à 9h) ; durant lequel elle reste à l'ombre, ou en soirée, après une opération de mouillage et d'arrosage du sol, qui permet de baisser sa température"*.

De plus, ces pratiques quotidiennes montrent une maîtrise de l'espace habité et une cohabitation, elles font preuve de la compréhension de cet espace dans ses différentes formes, sur ce parle l'un des occupants : *"les murs de notre maison ont une particularité spécifique, ils conservent la chaleur pendant toute la journée et la dissipent à sa fin, pour cela on laisse toutes les ouvertures entrouvertes pendant la nuit, même celle d'entrée, pour que la chaleur puisse s'évacuer vers l'extérieur"*.

Enfin, cette pré-enquête s'est terminée par des remarques liminaires, disant, en premier lieu, que *"le climat de la ville de Laghouat est totalement changé, chacune de ces dernières années a été plus chaude que la précédente, les saisons hivernales apparaissent si douces qu'on n'a même pas allumé le chauffage, et l'été apparaît plus chaud"*. Cette expression permet de constater que le déséquilibre climatique est bel est bien ressenti par la population locale.

La deuxième remarque porte sur l'état du bâti et la durabilité de l'adobe, les sujets se plaignent de la vulnérabilité du matériau aux effets de l'eau, en déclarant :

"bien qu'étant un matériau de construction durable, l'adobe est devenu moins résistant au fil du temps. Lors des pluies battantes, l'eau pénètre le matériau en entraînant une stagnation, une infiltration, une humidification, puis un effondrement de murs". Cet effet domino peut également être lié, selon les enquêtés, au manque d'entretien régulier qui a pour objectif de maintenir les structures sèches, et de les couvrir par une couche de protection contre l'eau de pluie.

De ce qui précède, il ressort que l'environnement thermique de la maison vernaculaire est globalement jugé satisfaisant par les occupants. Pour la période estivale, la pré-enquête montre un confort généralisé perçu, sans aucun recours au système actif de climatisation. Cependant, une situation d'inconfort est susceptible d'être observée en hiver, nécessitant parfois l'usage de chauffage, néanmoins l'état thermique de l'ambiance est considéré acceptable par ces sujets acclimatés au froid.

3.2 Méthode qualitative subjective : enquête sociologique

Cette méthode consiste à effectuer un sondage auprès de trois habitants de la maison, afin de dégager leurs réponses subjectives sur l'environnement thermique des ambiances architecturales considérées. L'enquête est basée sur un questionnaire (Annexe III) composé de questions organisées en deux parties ; la première partie permet de déterminer les caractéristiques de l'occupant, et la deuxième persuade sa perception globale par rapport à l'ambiance thermique ainsi que ses habitudes d'usage. Ce modèle de questionnaire est, en fait, proposé dans la norme ASHRAE 55 [24].

Cette enquête s'est déroulée pendant les deuxièmes jours de mesure in situ (le 8 janvier et le 9 juillet 2017). Elle est effectuée en fonction du nomadisme journalier et saisonnier, les occupants sont questionnés en hiver ; sur la cour pendant la matinée (vers midi), et sur la salle de séjour en fin de journée (vers 19h), et inversement en été.

3.2.1 Analyse des résultats

3.2.1.1 Caractéristiques personnelles des habitants

Les personnes interrogées sont principalement deux hommes ayant 72 et 32ans, et une femme âgée de 67ans. Ces habitants connaissent leur maison et l'occupent depuis plus de 40 ans, ce que prouve leur attachement à ce lieu de

familiarité et de continuité. La réponse sur le confort thermique prit en compte ce détail, car ces habitants comparent toujours leur confort actuel avec celui qu'ils ont perçu auparavant.

De plus, cette enquête tient compte de la variation saisonnière d'isolation vestimentaire et le métabolisme des occupants (Tableau 5.2). Les valeurs de ces dernières sont calculées à la base des tableaux normatifs d'ASHRAE 55 [24], dont les personnes âgées adoptent des activités physiques sédentaires ou légères qui se pratiquent principalement en position assise (lire, bricoler, etc.), le taux de ces dernières est limité entre 1.1 et 1.2Met. En revanche, le jeune homme paraît généralement en inactivité physique, il se trouve en position assise dont le métabolisme est estimé à 1Met.

Quant à l'isolation vestimentaire, les personnes interrogées portent, en période hivernale, des vêtements épais et de grande capacité d'isolation. Contrairement, ils adoptent pour des tenues vestimentaires de tissu frais et léger, pendant l'été (Tableau 5.2). L'isolement vestimentaire moyen d'hiver est de 0.95Clo, et celui d'été est de 0.53Clo (le détail de calcul d'isolement vestimentaire est présenté dans l'annexe III, tableau A.3).

En effet, selon le tableau déterminant les conditions de choix des méthodes d'évaluation de confort thermique (Tableau 2.6) présenté dans la norme ASHRAE 55 [24], la méthode normative pour ces conditions (le métabolisme est limité entre 1.0 et 2.0Met, l'isolement vestimentaire est compris entre 0 et 1.5Clo, la vitesse de l'air est inférieure à 0.2m/s) est celle analytique, basée sur le diagramme adaptatif. Il est à noter que la méthode graphique peut également être utilisée dans ces conditions, mais seulement dans le cas d'un ratio d'humidité inférieur à 0.012kg·H₂O/kg [24].

Tableau 5.2 : Isolation vestimentaire et métabolisme des personnes interrogées.

saison	paramètre	Homme		Femme
		jeune	âgé	
Hiver	Isolement vestimentaire (Clo)	0.91	0.97	0.98
	Métabolisme (Met)	1.0	1.1	1.2
Eté	Isolement vestimentaire (Clo)	0.5	0.58	0.53
	Métabolisme (Met)	1.0	1.2	1.2

3.2.1.2 Appréciation des conditions thermiques

En réponse à la question relative à l'appréciation subjective des conditions thermiques, les enquêtés âgés déclarent trouver l'environnement thermique de la cour neutre ($PMV = 0$), pendant la journée type d'hiver. Cette sensation du confort se traduit par le maintien de l'homéothermie assuré principalement par les échanges thermiques par radiation ; les corps de sujets cèdent la chaleur sous forme de rayonnement solaire direct. A cela s'ajoute ; l'activité physique liée au déplacement ou celle effectuée dans le cadre de vie domestique (bricoler) qui permettent d'élever plus ou moins la température interne, et par conséquent d'accroître le dégagement de la chaleur ; et les tenues vestimentaires qui créent une résistance aux échanges thermiques par convection ou par conduction, entre la surface du corps et l'ambiance.

Cette énergie solaire présente, néanmoins, une source d'inconfort pour le jeune homme portant des vêtements de couleur sombre, en lui causant une surchauffe, qui lui oblige de s'asseoir dans la partie ombragée de la cour, jugée légèrement froide ($PMV = -1$) par cet enquêté. En effet, cette réponse permet de constater qu'il existe une très grande différence entre l'ambiance thermique à l'ombre et celui au soleil, ce que rend difficile, voire impossible de rester sous les rayons solaires pour plus d'une heure, même en période hivernale, confirment les enquêtés : *" ce n'est pas pareil comme quand on reste assis pour plus d'une heure sous le soleil sans bouger, et quand on se déplace perpétuellement pour faire les tâches quotidiennes "*.

En outre, cet inconfort peut être également traduit par la surface du corps exposé au rayonnement solaire ; les enquêtés âgés préservent toujours la moitié de leurs corps sous l'ombre, contrairement au jeune homme qui expose son corps entier au soleil. Il est à noter qu'aucune source d'inconfort n'est déclarée par les sujets âgés.

Parlons de la salle de séjour, tous les enquêtés trouvent que cet espace est légèrement froid pendant la journée type d'hiver ($PMV = -1$), dont trois sources d'inconfort sont déclarées : le sol, la fenêtre, et la porte menant au terrasse.

À la différence des murs qui paraissent chauds en hiver d'après les occupants, le sol est jugé « glacial ». Cette sensation gênante de pieds froids oblige les

habitants de porter des chaussettes épaisses, pour ne pas sentir mal à leur aise dans les parties non tapissées du sol. En effet, la température basse ressentie peut être le signe d'une déperdition énergétique liée aux ponts thermiques entre le plafond de rez-de-chaussée (un espace non chauffé) et le sol de l'étage.

Par ailleurs, un air froid est déclaré généré par la fenêtre, et une fraîcheur est ressentie devant toute la surface de cette dernière. Cela peut être traduit par la déperdition de chaleur liée à l'état dégradé de la fenêtre et sa mauvaise isolation. C'est fréquemment par ses jointures que l'air s'infiltré dans la pièce, ainsi par son simple vitrage orienté nord-ouest (direction des vents froids) générant une transmission de chaleur de l'intérieur vers l'extérieur par convection et par conduction. Ce phénomène est renforcé par l'absence des volets qui permettent d'augmenter la résistance thermique de la fenêtre et de limiter les pertes de chaleur par conduction dans le verre.

Enfin, la porte de terrasse présente, d'après les enquêtés, une troisième source d'inconfort, à chaque ouverture de cette dernière (pour que les occupants puissent accéder au WC), une vague d'air froid est laissée s'engouffrer au sein de la maison, et particulièrement au séjour. En effet, elle est considérée comme un élément, parmi d'autres, ajustés (la porte et la fenêtre de séjour), afin de réduire les déperditions énergétiques de séjour.

En été, les habitants jugent les deux espaces (cour et séjour) confortables, leurs réponses sont coïncidentes avec la valeur 0 de l'échelle d'appréciation thermique d'ASHRAE. Ils déclarent ajuster les ouvertures pendant la nuit afin d'assurer une ventilation naturelle évacuant la chaleur de la salle de séjour, afin d'y être plus frais le lendemain. Quant pour la cour, un rafraîchissement évaporatif est assuré par l'opération de mouillage du sol et parfois des murs, faite environ une heure avant de l'occuper.

Globalement, l'enquête réalisée auprès des occupants de la maison ksourienne montre la satisfaction des enquêtés à l'égard des espaces considérés, pendant la période estivale (Tableau 5.3). Cependant, en hiver deux tiers des occupants (2/3) trouvent que la cour est confortable pendant la matinée, tandis qu'elle est jugée légèrement froide par la troisième personne. Cet inconfort est

également ressenti dans la salle de séjour par les trois enquêtés déclarant trouver l'ambiance thermique légèrement froide en fin de journée (vers 19h).

Tableau 5.3 : Appréciation globale des ambiances thermiques.

Saison	Espace	PMV							PMV _{global}	PPD
		-3	-2	-1	0	+1	+2	+3		
Hiver	Séjour	0	0	3	0	0	0	0	-1	15.52
	Cour	0	0	1	2	0	0	0	-0.3	7.62
Eté	Séjour	0	0	0	3	0	0	0	0	5
	Cour	0	0	0	3	0	0	0	0	5

Pour améliorer leur confort thermique, en hiver comme en été, les habitants ont tendance d'adapter leur habillement, de créer une ventilation naturelle par l'ouverture des portes et des fenêtres, de limiter les déperditions énergétiques par leur fermeture, et de se réchauffer parfois au feu du bois. Cette source de chaleur s'est éteinte durant la période d'enquête, ce qui permet une appréciation réelle de l'ambiance thermique.

Selon la norme ASHRAE [24], les espaces considérés sont classés confortables en saison estivale (Tableau 5.4), dont le vote moyen prévisible global est dans l'intervalle [-0.7, +0.7] et le pourcentage de personnes insatisfaites (PPD) est inférieur à 15% (Tableau 5.4). De plus, la sensation du confort thermique dans ces derniers est classée A (Chap.2. § 1.4.1. Tableau 2.3).

Tableau 5.4 : Conditions d'un environnement thermique acceptable [24].

PPD	PMV
<15	-0.7 < PMV < +0.7

En hiver, seule la cour est considérée confortable, néanmoins, la sensation du confort thermique dans cette dernière est classée B. Quant pour la salle de séjour, l'environnement thermique est considéré inconfortable, le PMV et le PPD de cet espace sont hors plage d'acceptabilité (-1 et 15.52, respectivement).

3.3 Méthode quantitative objective : instrumentation in situ

Cette méthode consiste à mesurer les différentes grandeurs physiques de l'ambiance thermique conformément à la norme ASHRAE [24]. Selon cette dernière, l'image du confort thermique est donnée principalement par la température opérative (qui peut être calculée en fonction de la température de l'air et la température moyenne radiante). De plus, elle peut être influencée par d'autres

paramètres, dont l'humidité relative et la vitesse de l'air. Il convient de noter que le deuxième paramètre n'est considéré dans la méthode analytique de l'approche adaptative d'ASHRAE 55, évaluant les bâtiments à ventilation naturelle, que pour le calcul de la température opérative [24].

Pour atteindre cet objectif, deux thermo-hygrographes (ThiesClima 1.0665.00.005) à enregistrement mécanique autonome (Figure 5.16.a), permettant de mesurer simultanément la température et l'humidité relative de l'air ambiant, et un pyromètre infrarouge (IRTEC P500) qui permet de mesurer la température radiante des parois sans contact (Figure 5.16.b), ont été fournis par le laboratoire SREML de l'université de Laghouat. Ces instruments satisfont aux exigences de l'ASHRAE 55, leur précision s'inscrit dans la plage de tolérance indiquée dans cette norme (Tableau 5.5).



(a)

(b)

Figure 5.16 : Instruments de mesures. (a) : Thermo-hygrographe, (b) : Pyromètre infrarouge.

Tableau 5.5 : Comparaison entre les exigences d'ASHRAE 55 et les caractéristiques des instruments de mesure.

	Température de l'air (°C)		Température radiante (°C)		Humidité relative (%)	
	Plage	Précision	Plage	Précision	Plage	Précision
ASHRAE 55	10 à 40	±0.2	0 à 50	±1.0	25 à 95	±5
Thermo-hygrographe	-20 à 60	±0.5	-		0 à 100	±2
Pyromètre infrarouge	-		-10 à 60	±0.75	-	

En outre, l'emplacement des instruments de mesures, notamment de thermo-hygrographes, a été personnalisé à la base de l'espace considéré (ils devaient être protégés de rayonnement solaire et du rayonnement des parois, notamment celles extérieures), de la position des occupants (assis ou debout) et de leur emplacement.

Au séjour, ce dernier a été placé au centre, à 0.6m au-dessus du sol. Quant dans la cour, il a été placé à 1m du mur de voisinage, à 0.5m du mur séparant cet espace et le WC et à 0.6m au-dessus du sol (Figure 5.17), c'est le seul endroit protégé des rayons solaires, en été comme en hiver. Les températures radiantes ont été prises du centre de chaque paroi.

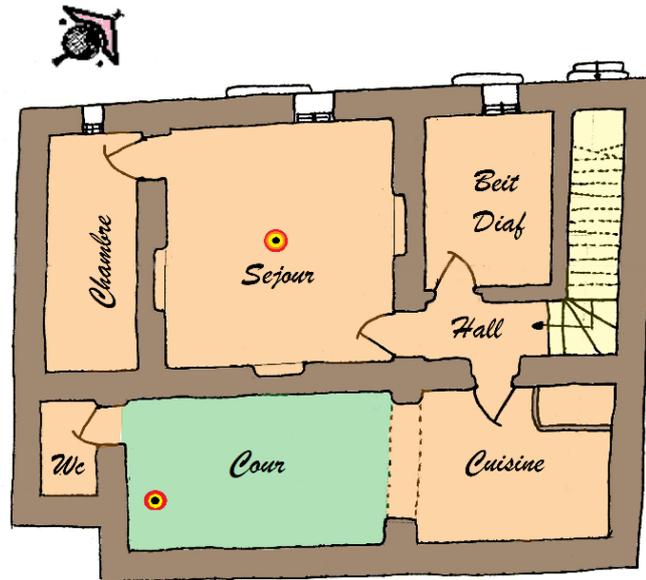


Figure 5.17 : Position des thermo-hygrographes.

Par ailleurs, ces mesures ont été effectuées du 7 au 10 janvier 2017, et du 9 au 11 juillet 2017. Ce choix a été basé sur les données climatiques de la ville de Laghouat entre 2008-2016, dont le mois le plus froid est celui de janvier, et le plus chaud est celui de juillet, autrement dit, il est porté sur le mois le plus critique de la période hivernale et celui de la saison estivale. Il convient de noter que ces jours de mesure sont caractérisés globalement par un ciel clair (dégagé), et une vitesse de vent ne dépassant pas les 2m/s en hiver, et les 0.5m/s en été [340].

La température et l'humidité relative de l'air ambiant ont été enregistrées continuellement, tandis que les mesures de la température radiante ont été effectuées toutes les deux heures, elles ont été prises sur des points situés aux centres des parois. Les relevés horaires de température et d'humidité de l'air extérieur ont été obtenus, aux jours des mesures, de la station météorologique de la ville.

Enfin, la vitesse de l'air n'a pas été mesurée, dont aucun mouvement d'air n'est ressenti par les occupants en hiver, et aucun courant d'air n'est considéré (la

vitesse de l'air est estimée inférieure à 0.2m/s). De plus, lors de la prise des mesures pendant les journées types d'été, les occupants se sont contractés, ce que rend difficile, voire impossible, de gérer tous les paramètres du confort thermique.

3.3.1 Scénarios de l'occupation

La vie des usagers durant l'hiver se déroule plutôt à l'intérieur de la maison, notamment à la pièce de vie (séjour). Cet espace est aéré en matinée, notamment entre 10h et 12h, pendant que les habitants utilisent la cour pour profiter des apports solaires. Le renouvellement de l'air de cette pièce se fait par la porte donnant sur la cour, qui est, généralement, laissée semi-ouverte, afin de laisser pénétrer l'air doux, ou de réduire les déperditions thermiques pendant les journées froides. Après l'aération matinale, cette ouverture est maintenue fermée, et n'est ouverte que pour permettre le passage au WC ou à la cuisine. Il convient de noter que la cour demeure inoccupée pendant le reste de la journée d'hiver.

En été, les habitants occupent le séjour pendant la canicule. Cet espace reste confiné toute la journée, ses ouvertures sont maintenues fermées, afin d'éviter toute sorte de surchauffe. Vu l'absence de volets, la fenêtre se couvre par un rideau pour limiter l'entrée de la chaleur, notamment lorsque le soleil commence à taper.

Vers 19h, les usagers déménagent vers la cour à ciel ouvert, après avoir aspergé son sol d'eau et l'essayé, pour permettre un rafraîchissement d'air par humidification. À ce moment-là, toutes les ouvertures de la maison sont maintenues ouvertes pour permettre la ventilation et l'évacuation de la chaleur accumulée à l'intérieur. Au lever de soleil, les occupants se rendent de nouveau à l'intérieur de la maison, et les ouvertures sont maintenues fermées vers 8h. La cour demeure donc un espace nuit, pendant l'été.

3.3.2 Résultats et analyses

3.3.2.1 Période hivernale

a. Température de l'air (T_a)

Le graphique ci-après (Figure 5.18) présente les variations des températures intérieures et extérieures sur les trois jours de mesures (d'hiver), la lecture de ce dernier démontre une forte fluctuation de températures extérieures avec une amplitude thermique journalière moyenne de 16.6°C (elle est estimée pour les jours de mesures à 15.4°C, 18.3°C et 16.3°C, respectivement). Cette fluctuation est

également remarquable au niveau de la cour, dont l'amplitude thermique est estimée variée entre 7.2 et 8.8°C, avec une moyenne de 8.2°C. Contrairement, les températures retenues dans la salle de séjour présentent une faible amplitude thermique par rapport aux autres ambiances. Cette dernière est égale à 2.66°C (elle est estimée pour les trois jours de mesures à 2.49°C, 3.06°C et 2.44°C, respectivement).

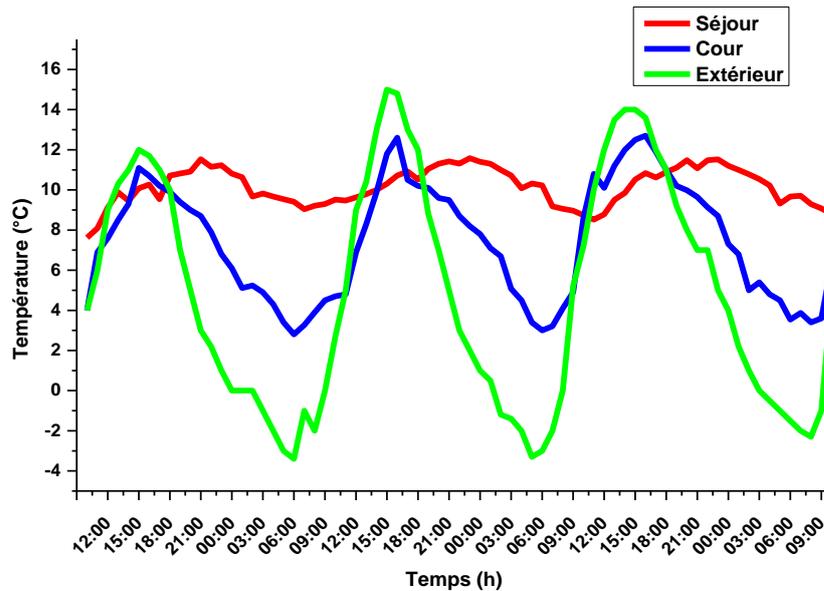


Figure 5.18 : Variations de température de l'air intérieur et extérieur des deux espaces témoins en période hivernale.

De plus, les températures extérieures atteignent leur maximum à 15h, et leur minimum vers 6h, en fluctuant entre 15 et -3.3°C. Cependant dans la cour, les températures fluctuent entre 12.6 et 2.8°C, en atteignant leur maximum à 16h et leur minimum entre 7h et 9h. En revanche, les températures intérieures ne dépassent pas les 11.6°C, cette valeur maximale s'atteint souvent vers minuit, cependant, celle minimale qui est de l'ordre de 8.5°C est atteinte vers 11h.

En observant les trois courbes de température tracées dans le graphique, les températures extérieures et celles de la cour s'augmentent de manière similaire, jusqu'à atteindre leurs valeurs maximales, puis elles commencent à diminuer graduellement pendant 16 heures, afin de toucher à leurs minimums. Toutefois, les températures de la cour sont généralement inférieures à celles extérieures pendant la journée (de 10h à 20h) avec un écart moyen de 1.39°C (l'écart maximal et celui minimal sont estimés à 3.2°C et 0.2°C, respectivement), et inversement pendant la

nuit, dont un écart moyen de 6.2°C est maintenu entre les deux ambiances (avec un écart maximal de 7.9°C et minimal de 0.8°C).

En revanche, les températures retenues à l'intérieur de la maison, notamment au séjour, se fluctuent d'une manière différente ; elles continuent à s'élever pendant les 9 heures qui suivent la diminution des températures d'air extérieures et celles de la terrasse. À partir de minuit, ces températures commencent à baisser lentement jusqu'à la mi-journée, au moment où la température de l'air est presque équivalente dans les trois ambiances thermiques considérées (vers midi).

En outre, les heures qui précèdent ce moment d'équilibre (entre 19h et midi) sont caractérisées par des températures supérieures à celles extérieures avec un écart moyen de 6.75°C (dont un écart maximal de 13.6°C , est marqué au deuxième jour, à 5h). Cependant, celles qui le suivent (entre midi et 19h) présentent des températures basses, avec un écart moyen de 2.11°C entre cette ambiance et celle extérieure (celui maximal est égal à 5.49°C), et de 1.47°C entre celle-ci et la cour (l'écart maximal est de 2.15°C , il est marqué au deuxième jour de mesure, à 14h).

Ces résultats s'expliquent, en effet, par l'inertie thermique des parois qui permet à la fois de ralentir l'échange énergétique entre l'ambiance thermique intérieure et l'environnement extérieur adjacent, de réduire les fluctuations quotidiennes de températures extérieures, et de stocker la chaleur et puis la restituer d'une manière diffuse une fois la température extérieure est basse.

Détaillons, la période de mesure est caractérisée par des journées plus ou moins fraîches, et des nuits très froides, ou la température s'accroît pendant le matin pour atteindre son maximum en après-midi (vers 15h), et diminue pendant la nuit pour atteindre son minimum vers 6h. Ces fluctuations de températures déterminent une amplitude thermique allant jusqu'à 18°C , qui permet de provoquer un transfert thermique de l'extérieur à l'intérieur de l'espace : lorsque la température extérieure s'élève (de 8h à 15h), des ondes de chaleur commencent à traverser les parois donnant sur l'extérieur, en se dirigeant graduellement vers l'intérieur. Cette chaleur transférée essentiellement par rayonnement et par convection, est ensuite accumulée dans ces parois grâce à leur inertie thermique et ainsi leurs épaisseurs (0.65m et 0.63m).

Une fois la température extérieure est basse (par rapport à celle intérieure, vers 19h), cette chaleur commence à être restituée d'une manière diffuse par convection, en se dirigeant vers les deux faces des parois, ce qui permet de réchauffer les deux espaces adjacents considérés. Ce phénomène est surtout remarquable pendant la nuit, lorsque les températures extérieures diminuent progressivement, en descendant en dessous de 0°C, le temps où celles de la cour baissent avec un taux moyen de 0.5°C par heure, en atteignant un minimum de 2.8°C, et celles du séjour continuent à augmenter graduellement jusqu'à atteindre un maximum de 11.58°C à minuit, avec un déphasage estimé égal à 8h.

Comme évoqué auparavant, l'inertie thermique, par son rôle, permet de ralentir les échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur, ce que signifie que les pertes de chaleur sont réduites. Ceci est clairement établi dans les résultats obtenus pendant la deuxième moitié de la nuit, où les températures sont amenées lentement vers le nouvel équilibre en adéquation avec l'ambiance thermique adjacente, elles diminuent graduellement jusqu'à atteindre un minimum de 8.52°C vers midi. En considérant les fluctuations de températures extérieures journalières, un équilibre thermique peut être considéré maintenu jour comme nuit, au séjour.

Enfin, ce phénomène de transfert thermique se déroulant à l'intérieur des parois peut être traité de façon plus précise par les températures radiantes de ces dernières, comme on le verra par la suite.

b. Température radiante (T_r)

1. Le séjour

Le graphe ci-dessous (Figure 5.19) présente les variations de la température radiante de quatre parois verticales de la salle de séjour en comparaison avec la température de l'air extérieur. La lecture des résultats présentés dans ce dernier montre des faibles fluctuations de la température radiante dans les murs intérieurs, avec une amplitude thermique moyenne de 2.72°C, et de 2.24°C, dans la paroi est et celle ouest, respectivement.

En outre, les températures radiantes de la paroi est atteignent leur minimum à 9h, et leur maximum vers 21h, en fluctuant légèrement entre 9.03 et 11.85°C. Cependant, les températures surfaciques de la paroi ouest fluctuent entre 8.92 et 11.89°C, ces valeurs sont obtenues vers 9h et 19h, respectivement. En globale, ces

températures sont inférieures aux températures extérieures pendant la journée, avec un écart moyen de 2°C, et supérieures à celles-ci pendant le soir et la nuit, avec un écart moyen de 12°C.

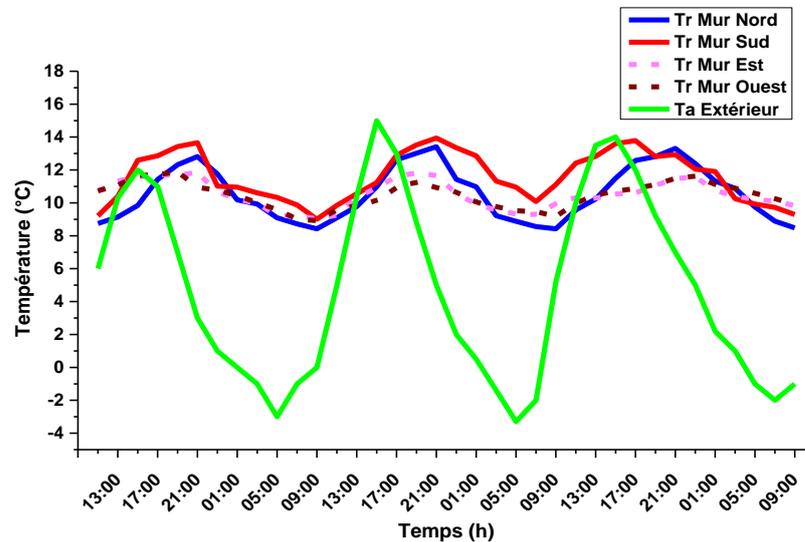


Figure 5.19 : Variations de la température radiante des parois verticales du séjour, en comparaison avec la température de l'air extérieur (période hivernale).

Également, les températures surfaciques de la paroi sud donnant sur la cour sont globalement supérieures à celles extérieures, elles fluctuent entre 9 et 13.94°C, dont la température minimale est atteinte à 9h, inversement à celle maximale obtenue vers 21h. L'amplitude moyenne est estimée pour cette paroi à 4.3°C.

De plus, la paroi donnant sur la rue commerçante (mur nommé nord), présente une température radiative maximale de 13.41°C obtenue à 21h, avec une amplitude moyenne de 4.6°C. La température minimale est atteinte à 9h, elle est de l'ordre de 8.4°C. En comparaison avec les températures extérieures, les températures retenues dans cette paroi sont inférieures, pendant la journée, avec un écart diurne moyen de 0.5°C, et supérieures en fin de journée et pendant la nuit, avec un écart nocturne moyen de 11.3°C.

Au niveau des parois horizontales, les températures radiatives (présentées dans le graphe ci-après ; figure 5.20) démontrent une amplitude moyenne de 2.6°C et de 4.5°C au plancher et au plafond, respectivement. En effet, le plancher présente des températures minimales de l'ordre de 7°C, obtenues entre 9h et 11h. Sa température surfacique maximale est égale à 11.27°C, elle est atteinte vers 19h. L'écart moyen entre les températures retenues dans cette paroi et celles extérieures

est égal à 6.7°C (ces dernières sont inférieures aux températures extérieures pendant la journée, avec un écart diurne moyen de 2.56°C , et inversement pendant la nuit, où l'écart nocturne moyen est estimé égal à 11°C).

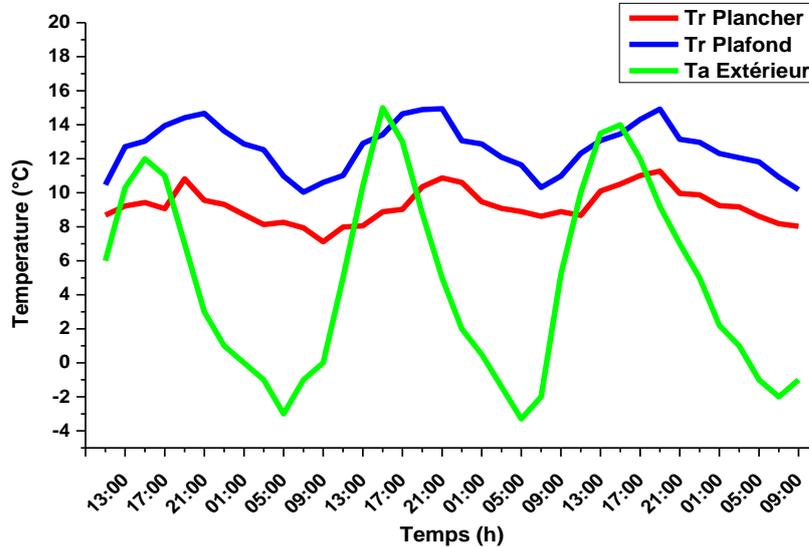


Figure 5.20 : Variations de la température radiante des parois horizontales du séjour, en comparaison avec la température de l'air extérieur (période hivernale).

En revanche, la température radiative maximale et celle minimale sont obtenues au plafond vers 21h et 7h, respectivement. Elles sont de l'ordre de 14.9°C et 10°C . Ces résultats sont supérieurs aux températures extérieures avec un écart moyen journalier de 7.1°C (l'écart minimal et celui maximal sont estimés à 1°C et 13.6°C , respectivement).

En observant les courbes tracées dans les deux graphiques précédents (Figure 5.19 et Figure 5.20), les températures radiantes montrent des allures plus ou moins similaires aux variations de températures extérieures, cependant, elles démontrent un temps de retard de 6h. De plus, la paroi Sud et le plafond présentent les meilleurs résultats, elles atteignent des températures radiatives plus élevées que celles des autres murs et de l'ambiance extérieure. Inversement, la température surfacique du plancher ne dépasse pas les 11.2°C , cette valeur maximale est considérée comme la plus basse des températures maximales retenues.

Comme expliqué précédemment, le transfert thermique correspond à un déplacement de flux de chaleur du plus chaud vers le plus froid, qui se fait principalement par convection, rayonnement et par conduction. Au niveau de la paroi, ce transfert se fait par convection entre l'air extérieur et la surface extérieure

de la paroi et par rayonnement entre cette dernière et l'irradiation solaire incidente. Une fois la chaleur est transférée à cette face, elle se propage en deux sens : la plus grande quantité d'énergie reçue est réémise vers sa source initiale (le milieu extérieur) par convection forcée, tandis qu'une petite quantité de cette dernière se propage lentement à l'intérieur de la paroi par conduction, afin d'arriver à sa face intérieure. En effet, la vitesse de transmission et le temps mis par ce flux de chaleur pour traverser la paroi dépend essentiellement, lors de ce phénomène, de la diffusivité thermique, la conductivité thermique, la capacité thermique et l'épaisseur cette dernière, autrement dit, de son inertie thermique par transmission. Cette petite quantité de chaleur est ensuite restituée dans l'espace par convection libre, lorsque sa température diminue.

En effet, les parois extérieures du séjour sont affectées par les températures de rayonnements solaires et celles extérieures ; la paroi sud s'expose au rayonnement solaire de 10h à 14h, celle nord subit à ces radiations de 15h30 à 16h30, tandis que le plafond reçoit le maximum de flux solaires, en s'y exposant de midi à 16h30. En revanche, les parois intérieures sont affectées uniquement par la température ambiante de l'espace et par celle des espaces adjacents, ce que justifient les résultats de température radiative obtenus.

Par ailleurs, la petite quantité de chaleur provenant des rayonnements solaires (direct et diffus) et des températures extérieures, se propage dans les parois avec un délai d'environ 6h, ceci est clairement établi à partir des résultats, dont les températures extérieures maximales (15°C) sont atteintes vers 15h, tandis que celles radiantes maximales (environ 14.9°C) sont obtenues à 21h. Ainsi, c'est pour cette raison que les températures ambiantes de l'espace considéré ne réagissent pas instantanément aux variations de températures extérieures.

Une fois le flux de chaleur est transféré à la face intérieure des parois, il commence à se propager graduellement dans l'espace par convection naturelle. Cette dernière n'est due qu'aux variations de la masse volumique causées par la différence de température, ce que justifie le faible taux d'accroissement des températures intérieures qui est estimé égal à $\pm 0.5^\circ\text{C/h}$, et les températures maximales retenues au séjour vers 23h, qui dévoilent que la température surfacique se propage avec un délai de 2h.

Une fois l'équilibre thermique est maintenu entre l'ambiance et les faces intérieures des parois, le sens de transfert thermique s'inverse ; le flux de chaleur provenant de la température d'air intérieur est reçu par les parois et se propage par conduction à son intérieur, afin d'être réémis vers l'ambiance extérieure. À ce moment-là, la température ambiante de l'espace considéré continue à baisser, et celles des parois commencent à augmenter.

Concernant le plancher, les températures basses retenues peuvent être traduites par la déperdition de chaleur à travers ce dernier, provoquée par la différence de température entre sa face intérieure et extérieure qui donne sur un espace non chauffé ni protégé (ses portes restent ouvertes pendant toute la journée).

Selon la norme ASHRAE 55 [24], il est recommandé que l'écart de la température radiante entre les parois horizontales ne dépasse pas 5°C, dans le cas d'un plancher chaud. Cependant, cet écart est limité à 14°C lorsqu'il s'agit d'un plancher plus froid que le plafond. En outre, pour les parois verticales, cet écart ne doit pas dépasser 23°C lorsque la température de l'air est inférieure à la température de la paroi, et 10°C dans le cas contraire (Tableau 5.6).

Tableau 5.6 : Limite d'asymétrie de la température radiante recommandé par ASHRAE 55 [24].

Asymétrie de la température radiante (°C)			
Plancher plus chaud que le plafond	Plancher plus froid que le plafond	Mur plus chaud que l'air	Mur plus froid que l'air
< 5	< 14	< 23	< 10

Tableau 5.7 : Asymétrie de températures radiantes des murs de séjour (période hivernale).

Asymétrie de la température radiante (°C)							
Mur plus chaud que l'air				Mur plus froid que l'air			
Mur Nord	Mur Sud	Mur Est	Mur Ouest	Mur Nord	Mur Sud	Mur Est	Mur Ouest
2.23	3.32	2.61	2.64	1.44	0.29	1.38	1.28

L'analyse de l'asymétrie de la température radiante a montré que les écarts de température, sur les trois jours de mesures, sont inférieurs aux limites recommandées par ASHRAE 55. L'écart maximal entre les températures radiantes retenues au plancher et celles obtenues au plafond est estimé à 4.91°C (le plancher est plus froid que le plafond). De plus, l'écart maximal entre la température ambiante du séjour et celle surfacique est estimé à 3.32°C dans le cas des murs plus chauds

que l'air, et à 1.44°C lorsque la température de l'air est supérieure à celle des parois (Tableau 5.7).

Enfin, le tableau ci-dessous (Tableau 5.8) synthétise les résultats des températures radiantes retenues dans toutes les parois du séjour, il ressort de ce dernier que les températures radiatives de l'ensemble des parois fluctuent entre 7.12 et 14.94°C, avec des températures moyennes allant de 9.21 à 12.61°C. Cette différence a été traduite par la position des parois (extérieure ou intérieure) ainsi que leurs orientations : la paroi est et ouest, et le plancher, sont protégées des conditions climatiques extérieures, tandis que le plafond et la paroi nord et celle sud (orientées nord-ouest et sud-est, respectivement), donnent sur extérieur. De plus, l'amplitude thermique dans ces parois varie entre 2.24 et 4.6°C, avec un déphasage thermique de 6h (dans les parois donnant sur extérieur).

Tableau 5.8 : Synthèse des résultats de température surfacique des parois du séjour (période hivernale).

Paroi	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{moy} (°C)	Amplitude (°C)	Déphasage (h)
Nord	8.41	13.41	10.56	4.6	6
Sud	9.01	13.94	11.58	4.3	6
Est	9.03	11.85	10.51	2.72	-
Ouest	8.92	11.89	10.47	2.24	-
Plancher	7.12	11.27	9.21	2.6	-
Plafond	10.03	14.94	12.61	4.5	6

En outre, les températures radiatives moyennes des parois varient entre 8.85 et 12.62°C (Figure 5.21), elles démontrent une amplitude journalière moyenne de 2.8°C. En comparaison avec les températures ambiantes de l'espace, ces dernières sont globalement supérieures avec un écart moyen de 0.8°C : l'écart maximal est estimé à 2.03°C. Cela permet de constater que ces résultats sont conformes aux limites d'asymétrie de température radiante recommandées par ASHRAE 55.

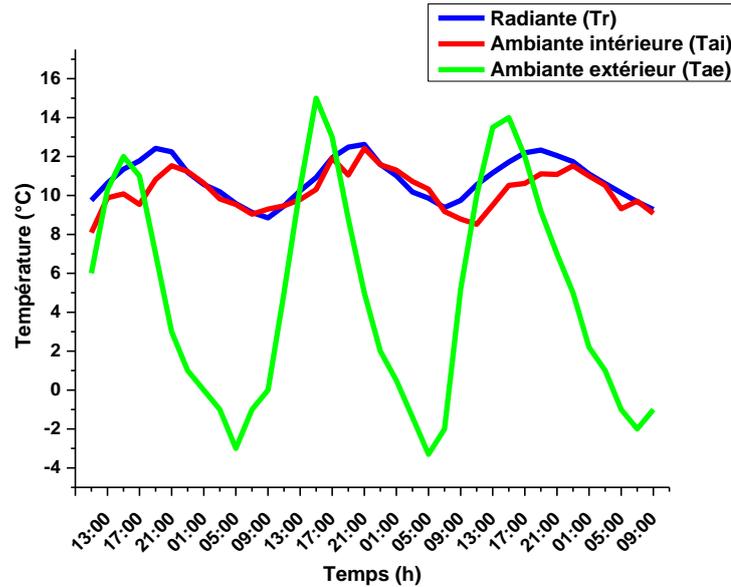


Figure 5.21 : Variations de température moyenne radiante du séjour, en comparaison avec la température ambiante de même espace, et la température de l'air extérieur (période hivernale).

2. La cour

Le graphique ci-dessous (Figure 5.22) présente les variations de température radiante de l'espace extérieur : la cour, sur les trois jours de mesure. La lecture de ce dernier montre que ces températures sont supérieures à celles extérieures avec un écart moyen journalier de 1.13°C (l'écart minimal et celui maximal sont estimés à 2.36°C et 0.11°C , respectivement). Ces dernières fluctuent entre -2.18°C et 16.4°C , tout en démontrant une amplitude thermique moyenne de 15.98°C .

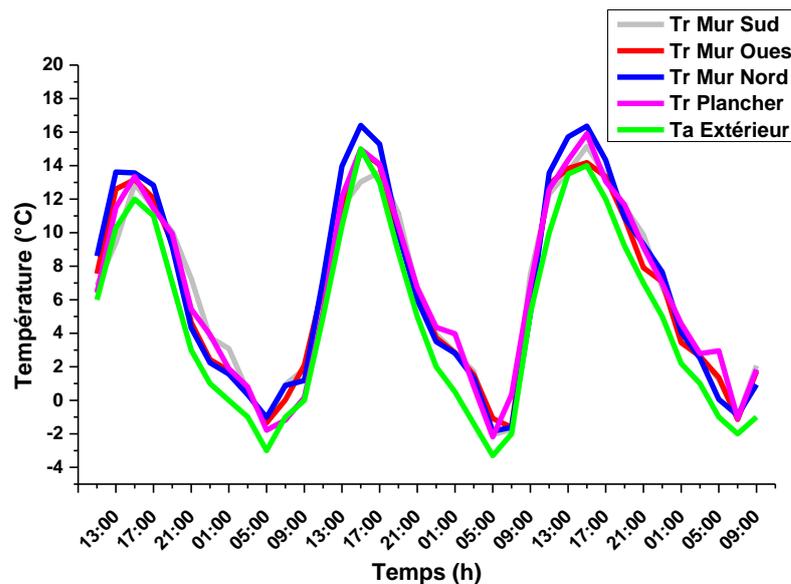


Figure 5.22 : Variations de température radiante des parois de la cour, en comparaison avec la température de l'air extérieur (période hivernale).

En effet, les températures de la paroi nommée nord (orientée sud-ouest) fluctuent entre -1.84 et 16.4°C (obtenus vers 5h et 15h, respectivement). Elles démontrent une amplitude moyenne de 16.71°C ; cette dernière est estimée pour les trois jours de mesure à 17.42°C , 18.2°C et 14.52°C . L'écart moyen journalier entre les températures retenues dans cette paroi et les températures extérieures est égal à 1.65°C , cet écart est considéré maximal, par rapport aux écarts aperçus dans le reste des parois.

En revanche, les températures de la paroi Sud (orientée Nord-Ouest) démontrent une amplitude moyenne de 15.37°C . Leurs valeurs minimales et maximales sont obtenues respectivement vers 5h et 15h, elles sont de l'ordre de -2°C et 15°C . Ces températures sont supérieures aux températures extérieures avec un écart moyen journalier de 0.73°C ; c'est le plus faible des écarts thermiques relevés.

Également, la paroi ouest (orientée nord-est) séparant l'espace considéré et le WC, présente une température radiative maximale de 14.89°C obtenue à 15h, avec une amplitude moyenne de 15.44°C . La température minimale est atteinte dans cette paroi à 7h, elle est égale à -1.61°C . En comparaison avec les températures extérieures, les températures retenues dans cette paroi sont supérieures, avec un écart moyen de 1.06°C .

De plus, les températures radiatives retenues dans le plancher démontrent une amplitude moyenne de 16.42°C . En effet, cette paroi horizontale présente des températures minimales de l'ordre de -2°C , obtenues vers 5h. Sa température surfacique maximale est égale à 15.9°C , elle est atteinte à 15h. L'écart journalier moyen entre les températures relevées dans cette paroi, et les températures extérieures est estimé égal à 1.08°C

En globale, les températures radiantes de cet espace ouvert montrent des allures similaires aux variations de températures extérieures, dont les températures maximales sont atteintes à 15h, et celles minimales sont retenues vers 5h. L'écart journalier entre ces dernières (extérieures et surfaciques), notamment celui diurne, peut être traduit par l'exposition de ces parois au rayonnement direct et diffus provenant du soleil, permettant de chauffer toute une partie de ces dernières, ceci est établi à partir résultats, dont la température radiante moyenne maximale est de

l'ordre de 15.5°C, tandis que celle moyenne maximale extérieure est égale à 13.6°C. Il est à noter que ces parois sont peintes en couleur blanche (enduit de chaux) qui permet de réfléchir le maximum d'énergie incidente.

Cependant, l'écart nocturne entre les températures extérieures et radiantes peut être traduit par le phénomène de dissipation thermique. Comme expliqué auparavant (Chap.3. § 3.1.1), la restitution de la chaleur stockée dans la paroi se fait lorsque la température extérieure est basse, dont le flux de chaleur se dirige vers les deux faces de la paroi. En outre, à la fin de la nuit, ce flux thermique change de direction, il se dirige de la face intérieure de la paroi (donnant sur un espace couvert qui présente des températures ambiantes supérieures à celle de la cour) vers sa face extérieure (la face considérée), en augmentant sa température jusqu'à 2°C.

En effet, l'analyse de l'asymétrie de la température radiante de cet espace (Tableau 5.9), démontre que les écarts de température sont inférieurs aux limites recommandées (23°C pour un mur plus chaud que l'air, et 10°C pour un mur plus froid que l'air). L'écart maximal entre la température ambiante de la cour et celle surfacique est estimé à 5.66°C dans le cas des murs plus chauds que l'air, et à 5.45°C lorsque la température de l'air est supérieure à celle des parois (Tableau 5.9).

Tableau 5.9 : Asymétrie de la température radiante des murs de l'espace extérieur (période hivernale).

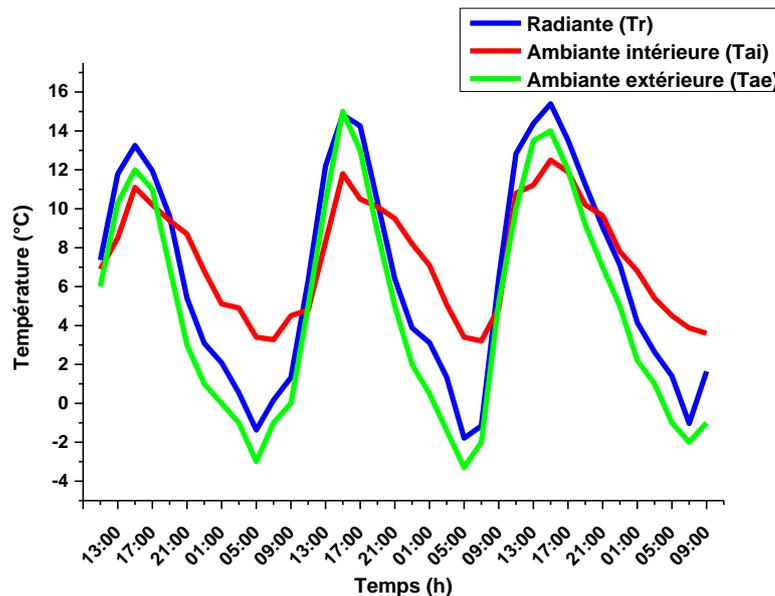
Asymétrie de la température radiante (°C)					
Mur plus chaud que l'air			Mur plus froid que l'air		
Mur Sud	Mur Ouest	Mur Nord	Mur Sud	Mur Ouest	Mur Nord
3.24	4.1	5.66	5.45	5.01	5.24

Enfin, le tableau ci-dessous (Tableau 5.10) synthétise les résultats des températures radiantes retenues dans toutes les parois de la cour ; il ressort de ce dernier que les températures radiatives de l'ensemble des parois fluctuent entre - 2.18 et 16.4°C, avec des températures moyennes de l'ordre de 6°C. Cette différence de température entre les parois est traduite par leurs orientations, ainsi que leurs durées d'insolation (influencées principalement par l'orientation et les masques solaires qui sont l'origine de l'ombre portée sur ces dernières) ; la paroi orientée nord-est (nommée ouest) présente les plus basses températures, contrairement à celle orientée sud-est (nommée nord).

Tableau 5.10 : Synthèse des résultats de température surfacique des parois de la cour (période hivernale).

Paroi	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{moy} (°C)	Amplitude (°C)
Nord	-1.84	16.4	6.66	16.71
Sud	-2.05	15.15	6.47	15.37
Ouest	-1.61	14.89	6.32	15.44
Plancher	-2.18	15.90	6.51	16.42

Ces résultats ont permis d'obtenir des températures radiantes moyennes variant entre -2 et 15°C (Figure 5.23) et démontrant une amplitude thermique journalière moyenne de 15.9°C (l'amplitude maximale est de 17°C). Ces températures radiantes sont supérieures aux températures ambiantes de même espace de 11h à 17h, avec un écart moyen de 2.16°C : l'écart maximal est estimé à 3.7°C et inversement durant le reste de la journée, où l'écart moyen de température est égal à 3.4°C. Ces écarts sont conformes aux limites d'asymétrie de température radiante recommandées par ASHRAE 55, présenté dans le tableau 5.6.

**Figure 5.23** : Variations de la température moyenne radiante de la cour, en comparaison avec les températures ambiantes intérieures et extérieures (période hivernale).

c. Humidité relative (HR%)

Le graphique suivant (Figure 5.24) présente les variations de l'humidité relative retenues dans les espaces témoins (séjour et cour) et à l'extérieur, sur les trois jours de mesures. Ce dernier démontre que l'humidité relative extérieure est maintenue entre 26 et 87%, tandis que celle de la cour est comprise entre 43 et

74%, ces valeurs sont obtenues vers 16h et entre 7h et 8h, respectivement. En revanche, les taux d'humidité relative relevés dans le séjour sont plus ou moins stables, ils varient entre 54 et 63%, en démontrant un écart journalier maximal de 8.1%.

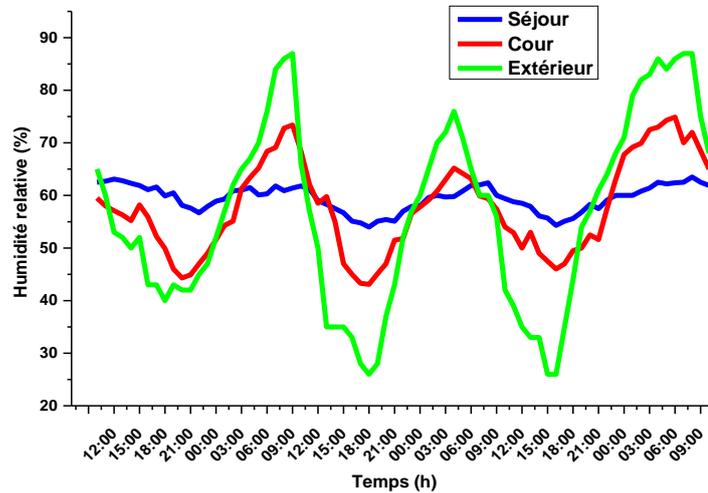


Figure 5.24 : Variations de l'humidité relative de l'air des deux espaces témoins en période hivernale, en comparaison avec l'hygrométrie extérieure.

En observant les courbes tracées dans ce graphe, les taux d'hygrométrie de l'air relevés dans la cour montrent des allures similaires aux variations d'humidité d'air extérieur. Ces dernières diminuent jusqu'à atteindre une valeur minimale en après-midi (entre 17h et 18h), puis ils commencent à augmenter graduellement afin de toucher à leurs maximums de bon matin, avant le coucher de soleil (notamment à 6h).

Toutefois, les taux d'humidité relative retenus dans cet espace sont supérieurs à ceux de l'extérieur pendant la journée avec un écart diurne moyen de 10.41% (l'écart maximal et minimal sont estimés à 2% et 24%, respectivement), et inversement pendant la nuit, où un écart nocturne moyen de 7% est maintenu entre les deux ambiances (l'écart maximal est égal à 17%, et celui minimal est de l'ordre de 0.4%).

En effet, ces résultats s'expliquent par la capacité de régulation de taux d'hygrométrie caractérisant la brique d'adobe des murs ; lorsque l'humidité relative de l'air augmente (notamment au-delà de 50%), un phénomène d'adsorption se manifeste sur la surface du matériau, en permettant la fixation et l'accumulation des molécules d'eau dans ses pores. En outre, ce phénomène est favorisé ainsi par une

baisse de la température de l'air : quand la température de l'air diminue, son hygrométrie augmente.

Cette eau stockée dans les pores du matériau hygroscopique est ensuite restituée à l'intérieur de l'espace sous forme de vapeur, quand l'humidité de l'air est faible, et inversement sa température. Ce phénomène dit désorption commence lorsque l'équilibre thermique entre la surface du matériau et la température extérieure est atteint, dont une évaporation d'eau se produise au cœur du matériau, permettant de la transporter vers sa surface. Une fois la température radiante est élevée au-dessus de celle de l'air, un séchage par diffusion se manifeste dans le matériau, ce processus est favorisé par l'air chaud qui s'infiltré à son intérieur.

Cet échange relatif à l'hygroscopicité de l'adobe a permis une stabilité d'hygrométrie au séjour, qui présente constamment une humidité de l'ordre de 58% (avec des variations de 10%) durant les trois jours de mesures. Au niveau de la cour (un espace ouvert sur extérieur), cette capacité d'absorption et de désorption de vapeur d'eau a permis de maintenir un taux d'humidité relative qui varie entre 43 et 74%, afin de réduire sa fluctuation par rapport à l'hygrométrie retenue à l'extérieur.

d. Température opérative (T_o)

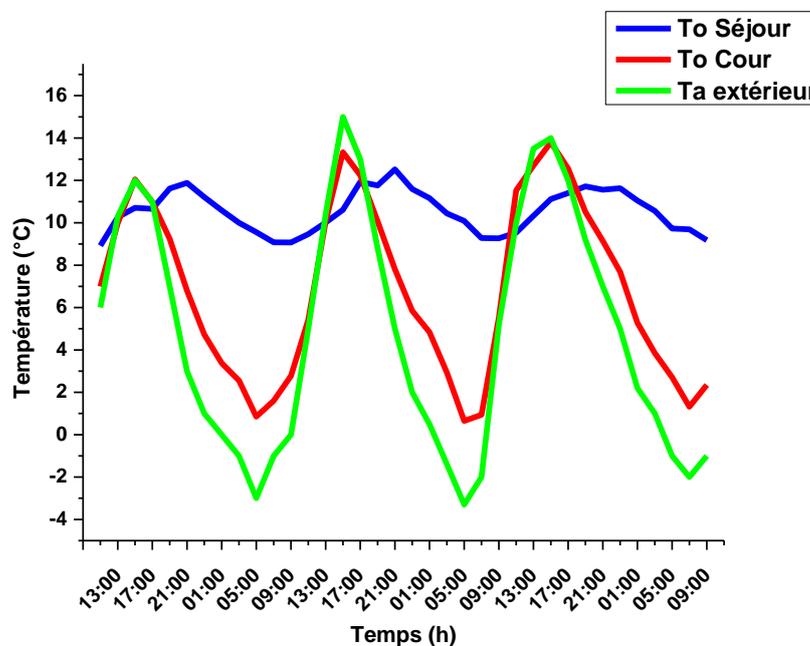


Figure 5.25 : Variations de la température opérative hivernale de deux espaces évalués, en comparaison avec la température de l'air extérieur.

Selon la norme ASHRAE 55 [24], dans le cas d'une vitesse d'air inférieure à 0.2m/s, la température opérative (T_o) est égale à la moyenne de la température

radiative et de la température de l'air (Eq 5.1). Le graphique précédent (Figure 5.25) présente les variations de la température opérative maintenue dans les deux espaces évalués. La lecture de ce dernier montre une faible fluctuation de température opérative au niveau du séjour, avec une amplitude thermique moyenne de 2.59°C (cette dernière est estimée pour les jours de mesures à 2.96°C, 2.45°C et 2.36°C, respectivement). Ces températures atteignent leur maximum vers 21h, et leur minimum à 9h, en fluctuant entre 8.92 et 12.52°C, leur valeur moyenne est estimée à 10.53°C.

$$T_o = AT_a + (1 - A) T_r \quad (\text{Eq 5.1})$$

Où :

- T_o : Température opérative, °C
- T_a : Température de l'air, °C
- T_r : Température moyenne radiante des parois, °C

Le facteur 'A' présente la fraction radiante, il peut être sélectionné du tableau suivant (Tableau 5.11) en fonction de la vitesse de l'air moyenne (V_a) :

Tableau 5.11 : Fraction radiante en fonction de la vitesse de l'air [24].

V_a (m/s)	< 0.2	0.2 à 0.6	0.6 à 1
A	0.5	0.6	0.7

En revanche, les températures opératives retenues au niveau de la cour présentent une forte amplitude thermique d'une moyenne de 11.8°C. Ces dernières fluctuent entre une température minimale de 0.65°C atteinte à 5h, et une température maximale de 13.33°C, obtenue vers 15h. La température opérative moyenne est estimée pour cet espace à 6.81°C.

En outre, les courbes de ces températures montrent des allures similaires à celles des courbes de températures ambiantes des deux espaces évalués (présentés dans la figure 5.18). Cependant, un écart moyen de 0.8°C est estimé entre ces deux températures : les températures opératives retenues au séjour sont supérieures à ses températures ambiantes (jour comme nuit), tandis que celles obtenues dans l'espace extérieur sont inférieures aux températures de l'air, avec un écart moyen de 2.5°C. En général, le séjour présente un environnement thermique plus chaud que celui de l'espace extérieur, à l'exception de l'après-midi, notamment de midi à 17h.

Selon la norme ASHRAE 55 [24], la température opérative est susceptible de varier, chaque deux heures, jusqu'à un maximum de 2.8°C (Tableau 5.12). L'analyse des variations de cette température dans le séjour a montré qu'elles sont toujours inférieures à la limite recommandée : la variation maximale pour un intervalle de deux heures est estimée pour cette espace à 1.3°C. Au niveau de l'espace extérieur (la cour), la limite est dépassée : une variation maximale de 6°C est estimée pour le même intervalle (2h). Ce résultat s'explique par l'exposition totale de cet espace ouvert aux conditions climatiques extérieures.

Tableau 5.12 : Limites de variation de température opérative en fonction du temps [24].

Temps (h)	0.25	0.5	1	2	4
Limite de variation de T_o	1.1	1.7	2.2	2.8	3.3

e. Confort adaptatif hivernal

La théorie du confort adaptatif d'ASHRAE 55 propose des plages de confort thermique susceptibles de varier selon l'historique météorologique de chaque contexte climatique. Ces plages de référence sont définies en fonction de la température extérieure moyenne ($T_{pma (out)}$) de 30 jours précédant les jours de mesures (Eq 5.2 et Eq 5.3), elles sont exprimées sur la base de température opérative. Il convient de noter que le choix de cette méthode a été basé sur trois paramètres recommandés dans l'ASHRAE 55 [24] : un isolement vestimentaire compris entre 0 et 1.5Clo, un métabolisme variant entre 1.0 et 2.0Met, et une température extérieure moyenne estimée supérieure à 10°C ; en considérant la température mensuelle du mois de décembre 2016, elle est égale à 10.3°C [340].

$$\text{Limite d'acceptabilité supérieure 80\% (}^{\circ}\text{C)} = 0.31 T_{pma (out)} + 21.3 \quad (\text{Eq 5.2})$$

$$\text{Limite d'acceptabilité inférieure 80\% (}^{\circ}\text{C)} = 0.31 T_{pma (out)} + 14.3 \quad (\text{Eq 5.3})$$

Sur la base des formules précédentes et de la température moyenne mensuelle du mois de décembre (10.3°C), la température opérative du confort se situe entre 17.5 et 24.5°C. La comparaison des températures opératives moyennes de trois jours, obtenues aux espaces investigués, avec cette plage du confort hivernal permet de constater que l'environnement thermique de ces derniers est inconfortable : la température de 17.5°C n'a jamais été atteinte.

En effet, la température opérative moyenne du séjour est inférieure à la limite inférieure du confort thermique, l'écart entre les deux est estimé à 7°C. L'inconfort est plus marqué dans cet espace entre 5h et 11h, où la température opérative est de l'ordre de 9°C. Contrairement, l'écart entre la température du confort adaptatif (17.5°C) et celle opérative du séjour (12 à 12.5°C) est minimal entre 18h et 22h, il est de l'ordre de 5°C.

Par ailleurs, l'écart entre la limite inférieure du confort et la température opérative moyenne de la cour (6.8°C) est égal à 10.7°C. L'inconfort est plus marqué dans cet espace vers 5h, où la température opérative touche les 0.5°C, cependant, l'après-midi est marqué par une température opérative atteignant les 13.8°C, ce qui conduit, en effet, à un minimum d'écart (3.7°C).

En conclusion, d'après les résultats de température opérative et les réponses subjectives des occupants, l'environnement thermique du séjour est inconfortable : cet espace démontre un PMV et un PPD hors plage d'acceptabilité (-1 et 15.52, respectivement), et des températures opératives hors plage du confort thermique.

En termes de source d'inconfort, les occupants ont déclaré trouver le sol de cet espace froid, cette perception s'explique par ses températures radiatives qui sont hors plage du confort thermique -recommandée pour le plancher inférieur par le standard 55 d'ASHRAE- qui se situe entre 19 et 29°C.

En revanche, les résultats des deux méthodes d'évaluation du confort thermique (qualitative et quantitative) sont contradictoires au niveau de la cour ; sur la base de PMV et de PPD (-0.3 et 7.62, respectivement), l'environnement thermique de cet espace est classé confortable (classe B), tandis qu'à la base de la méthode quantitative, ce dernier est jugé inconfortable. Cette contradiction peut être justifiée par l'exposition des enquêtés aux rayons solaires, qui permettent d'augmenter leur température corporelle, et par conséquent de maintenir une certaine homéothermie.

Concernant l'humidité relative, l'ANSI/ASHRAE 55 recommande qu'elle soit maintenue entre 30 et 60%. Sur la base de cette plage, il convient de constater que le séjour présente une hygrométrie qui s'inscrit dans la plage limitrophe du confort, et ainsi la cour (sauf pendant la nuit, évidemment). Néanmoins, cette dernière ne

peut être considérée confortable qu'à une température opérative comprise entre 17.5 et 24.5°C [24].

3.3.2.2 Période estivale

a. Température de l'air (T_a)

Le graphique ci-après (Figure 5.26) présente les résultats des températures de l'air retenues dans les espaces témoins en comparaison avec les températures extérieures, sur les trois jours types d'été (9, 10 et 11 juillet 2017). Comparées aux températures extérieures, les températures ambiantes du séjour présentent une faible amplitude thermique d'une moyenne de 4.6°C (elle est estimée pour les trois jours de mesures à 4.3°C, 4.7°C et 5.0°C). Ces températures oscillent entre 26.9°C, obtenue vers 7h et 31.9°C atteinte à minuit, tandis que les températures extérieures fluctuent entre 22.3 et 40°C (obtenues à 5h et 15h, respectivement), soit une amplitude thermique maximale de 17.7°C.

Cette fluctuation est également remarquable au niveau de la cour, où l'amplitude thermique minimale et celle maximale sont estimées à 8.1°C et 10.7°C, respectivement. Les températures ambiantes de cet espace fluctuent pendant les trois jours entre 25.9 et 36.9°C, en atteignant leur minimum à 6h et leur maximum vers 18h.

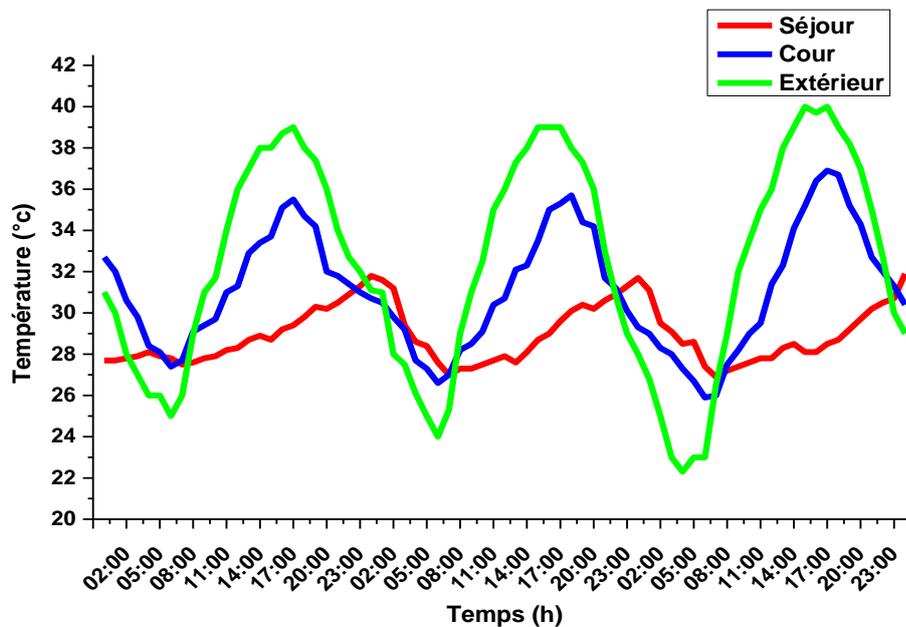


Figure 5.26 : Variations de la température de l'air intérieur et extérieur des deux espaces témoins en période estivale.

La lecture générale des oscillations de températures démontre que les températures mesurées dans le séjour sont supérieures à celles enregistrées par la station météorologique de minuit à 6h, avec un écart moyen de 3.36°C (l'écart maximal est obtenu à 4h, il est de l'ordre de 6.2°C), tandis qu'elles sont inférieures à celles-ci pendant le reste de la journée avec un écart maximal égal à 11.9°C (celui moyen est estimé à 7.5°C).

Au niveau de la cour, les températures ambiantes sont supérieures aux températures extérieures, notamment de minuit à 7h, avec un écart moyen de 2.8°C (l'écart maximal est généralement atteint vers 4h, il est égal à 5°C), alors qu'elles sont inférieures à celles-ci de 7h à minuit, avec un écart maximal ne dépassant pas les 5°C.

Comparées aux températures de l'air retenues au séjour, les températures ambiantes de cet espace ouvert sont inférieures pendant la nuit (notamment de 23h à 7h), et inversement pendant le reste de la journée, l'écart maximal nocturne et celui diurne entre celles-ci sont estimés à 2.4°C et 8.4°C, respectivement.

En fait, et comme expliqué en période hivernale, ces deux ambiances thermiques sont soumises aux variations quotidiennes de températures extérieures, dont l'amplitude peut atteindre les 18°C, et aux rayonnements solaires incidents favorisés par l'orientation sud-est de ces dernières et l'absence des masques solaires sur les parois. Ces phénomènes constituent les principales causes de surchauffe estivale dans l'habitat en milieu désertique.

Néanmoins, ces effets de fluctuation rapide de température extérieure et d'irradiation solaire sont atténués grâce à l'épaisseur des parois et l'inertie thermique par transmission des matériaux de construction qui les constituent (la brique l'adobe), qui a permis précédemment d'éviter les chutes brutales de températures intérieures en hiver. Il convient de noter que cet effet d'inertie repose essentiellement sur la faible diffusivité thermique du matériau (0.90 mm²/s), qui fait intervenir sa faible conductivité thermique (0.89W/m.K) et sa forte capacité thermique (987J/kg.K) permettant d'optimiser davantage la quantité de chaleur qu'il faut lui transférer pour augmenter sa température.

En été, cette capacité de stocker l'énergie thermique et de la restituer d'une manière diffuse permet d'éviter la surchauffe, tout en offrant un amortissement et

un déphasage important des variations et des apports thermiques externes : la température extérieure maximale de 40°C atteinte à 15h est amortie et déphasée dans le temps, d'où une température maximale de 31.9°C est obtenue au séjour vers minuit.

En effet, l'énergie dissipée dans le séjour en fin de journée, permet d'obtenir des températures ambiantes dépassant les températures extérieures pendant la nuit, avec un écart atteignant les 6.2°C, marqué à 4h, entre la température intérieure et extérieure minimale (28.5°C et 22.3°C, respectivement). La restitution de cette chaleur dans l'espace (rafraîchissement de la structure) se fait par convection forcée par la ventilation nocturne (vitesse de l'air), cette dernière, quant à elle, permet d'évacuer l'air chaud vers l'extérieur, afin de rafraîchir la pièce.

Outre, la compacité du tissu urbain, la couleur claire de parois extérieures (beige ou blanche) et la faible hauteur sous plafond (2.6m), contribuent davantage à l'obtention de ces résultats ; le premier paramètre permet de réduire la surface exposée aux conditions climatiques extérieures (soit 3/6 des parois) et par conséquent de limiter le transfert de chaleur ; le deuxième permet de réfléchir un max d'énergie incidente. Tandis que le dernier paramètre accélère le renouvellement de l'air intérieur assuré par la grande fenêtre et la porte aménagés dans la pièce.

Ainsi, une partie de l'énergie stockée dans la paroi, notamment dans celle séparant le séjour et la cour, repart vers la cour quand ses températures baissent (le flux de chaleur se dirige vers les deux faces de parois), cela justifie les températures obtenues dans cet espace pendant la nuit, qui sont globalement supérieures à celles extérieures. Cependant, les températures basses marquées pendant la journée peuvent être traduites par le ratio H/L qui permet d'obtenir l'ombrage sur plusieurs parties de cet espace pendant la journée, et de l'ombrager totalement à partir de 17h.

Enfin, ces résultats de températures de l'air permettent de déterminer les deux paramètres dynamiques relatifs à l'inertie thermique des parois d'adobe : le facteur d'amortissement (f) et le temps de déphasage thermique (Φ). En effet, le rapport entre l'amplitude de températures intérieures et extérieures (f) est estimé à 0.28, tandis que le décalage du temps entre la température du pic de l'extérieure (40°C)

et celle intérieure de séjour (31.9°C) est égal à 9h. Ce déphasage thermique peut être déterminé avec précision par les températures radiatives, comme on le verra par la suite.

b. Température radiative (T_r)

1. Le Séjour

Le graphique ci-après (Figure 5.27) présente les variations de température radiative (T_r) des parois verticales de la pièce de vie, en comparaison avec les températures de l'air extérieur (T_a). La lecture générale des oscillations de ces températures démontre une faible fluctuation des températures surfaciques, qui sont globalement supérieures aux températures extérieures pendant la nuit (de 22h à 7h) et inférieures à celles-ci durant la journée (de 7h à 22h).

En outre, les températures radiatives des parois intérieures (nommées Est et Ouest) présentent les plus faibles amplitudes. Dans la paroi est, ces températures fluctuent entre 27.89 et 29.82°C, elles démontrent une amplitude thermique journalière moyenne de 1.24°C. Au niveau de la paroi ouest, les températures radiatives varient entre 28.08 et 29.86°C, l'amplitude thermique journalière moyenne est estimée pour cette paroi à 1.28°C. La température surfacique maximale est généralement atteinte dans ces parois à minuit, tandis que celle minimale est obtenue vers 8h du matin.

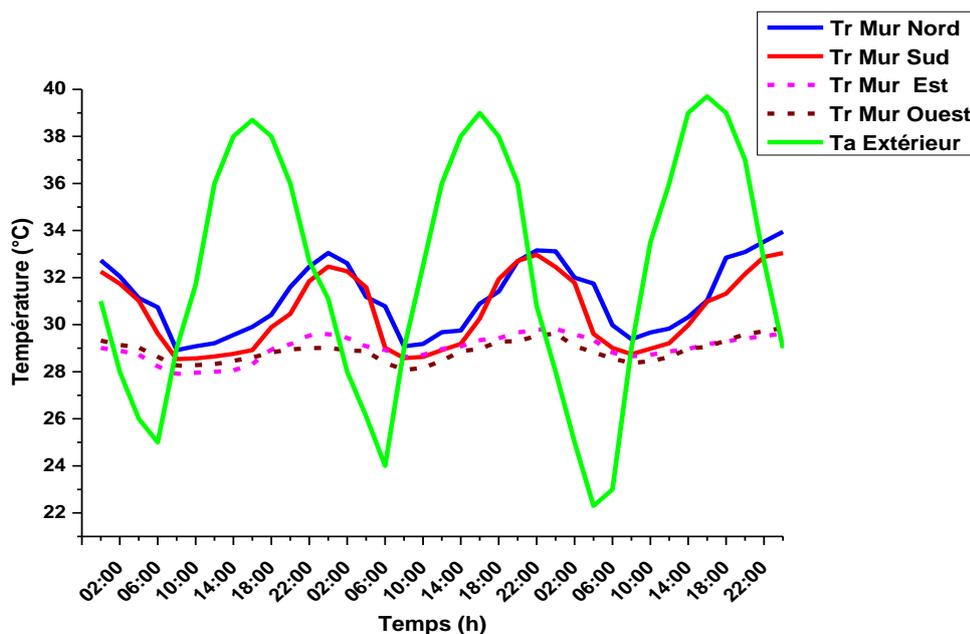


Figure 5.27 : Variations de la température radiante des parois verticales du séjour, en comparaison avec la température de l'air extérieur (période estivale).

De plus, ces parois présentent les plus faibles températures : l'écart diurne entre celles-ci et les températures extérieures est égal à 9.82°C et 9.83°C (dans la paroi Est et Ouest, respectivement). Cependant, l'écart nocturne moyen ne dépasse pas les 5.5°C , il est estimé à 4.67°C sur la paroi Est, et à 4.45°C sur celle Ouest.

Au niveau des parois verticales extérieures (nommée Nord et Sud), les températures surfaciques démontrent une amplitude thermique moyenne de l'ordre de 4.2°C . Elles fluctuent dans la paroi Nord entre 28.92 et 33.95°C , et entre 28.54 et 33.04°C sur la paroi Sud. La température surfacique maximale est généralement atteinte dans ces parois entre 22h et minuit, tandis que celle minimale est obtenue à 8h.

Par ailleurs, ces parois démontrent les plus faibles écarts, entre leurs températures radiatives et les températures extérieures : l'écart diurne est égal à 5.94°C dans la paroi Nord et à 6.50°C sur celle Sud, tandis que les écarts nocturnes sont estimés à 5.36°C et 4.81°C , dans la paroi nord et sud, respectivement.

D'après le graphique ci-dessous (Figure 5.28), les températures radiantes des parois horizontales démontrent une amplitude thermique moyenne de 0.93°C et de 4.62°C au plancher et au plafond, respectivement. De plus, le plancher bas présente des températures fluctuant entre 27.49 et 28.82°C , tandis que les températures retenues au plafond varient entre 29.02 et 34.14°C . La température surfacique maximale et celle minimale sont atteintes au plancher à 22h et 6h et à minuit et 8h au plafond, respectivement.

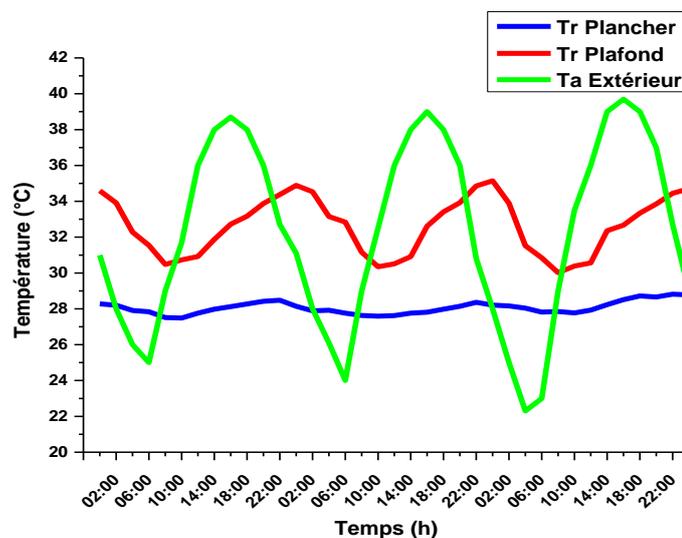


Figure 5.28 : Variations de température radiante des parois horizontales du séjour, en comparaison avec la température de l'air extérieur (période estivale).

En effet, les températures radiantes marquées au plancher sont supérieures aux températures de l'air extérieur pendant la nuit, notamment entre 2h et 6h, et inversement durant le reste de la journée, l'écart moyen diurne est estimé à 10.78°C, tandis que celui nocturne est égal à 3.85°C. En revanche, les températures radiatives retenues au plafond sont supérieures à celles extérieures de 22h à 8h avec un écart moyen de 5.51°C, et inférieures à celles-ci de 8h à 22h, avec un écart moyen égal à 5.43°C.

Comme expliqué précédemment, la température surfacique de la paroi dépend essentiellement de sa position (intérieure ou extérieure), son orientation, son degré d'exposition au rayonnement solaire, et ainsi à sa couleur. Cela explique la différence de température obtenue entre les parois, dont le plafond et la paroi nord (orientée nord-ouest) démontrent les températures les plus élevées, et inversement les parois intérieures (plancher, paroi est, et celle ouest).

Ces températures radiatives sont ainsi liées aux caractéristiques thermiques du matériau constituant l'enveloppe de la pièce (notamment son inertie thermique) et de son épaisseur. Ces deux paramètres permettent un amortissement du flux de chaleur (parvenant des rayonnements solaires directs et diffus et des températures extérieures) transféré de la surface externe de la paroi à sa surface interne, et un déphasage thermique. Ceci est clairement établi dans résultats, où la température extérieure maximale (40°C) est atteinte vers 15h, tandis que celle radiante maximale (33 à 34°C) est obtenue entre 22h et minuit.

Outre, ces phénomènes sont également remarquables dans les températures ambiantes du séjour, qui ne réagissent pas instantanément avec la variation de températures extérieures : la température extérieure maximale est obtenue à 15h, tandis que celle intérieure est atteinte à minuit.

Contrairement à la période hivernale, la propagation de chaleur dans l'espace pendant l'été (une fois transféré à la face intérieure de la paroi) se fait par convection forcée par la vitesse de l'air (ventilation naturelle nocturne) ; ceci est clairement établi à partir des résultats, dont la température intérieure et celle surfacique des parois extérieures atteignent leur maximal au même temps ou dans un délai d'au max 1h entre les deux. Il convient de noter que cet effet de ventilation naturelle a

permis un taux d'accroissement des températures intérieures variant entre 0.6 et 1.6°C.

Quant aux parois intérieures, elles sont affectées par la température ambiante de l'espace considéré et celle des espaces adjacents. Cela justifie les températures radiatives basses obtenues dans ces dernières, et ainsi les faibles amplitudes thermiques.

Comparés aux limites d'asymétrie de la température radiante recommandées par le standard 55 d'ASHRAE (Tableau 5.13), les écarts de température entre ces parois sont, sur les trois jours de mesures, conformes aux normes. L'écart maximal entre les températures radiantes retenues au plancher et celles obtenues au plafond est estimé à 5.93°C (la limite recommandée est de 14°C). Également, l'écart maximal entre la température ambiante de séjour et celle surfacique est estimé à 5.04°C dans le cas des murs plus chauds que l'air, et à 2.78°C lorsque la température de l'air est supérieure à celle des parois (les limites recommandées sont de 23°C et 10°C, respectivement).

Tableau 5.13 : Asymétrie des températures radiantes des murs de séjour (période estivale).

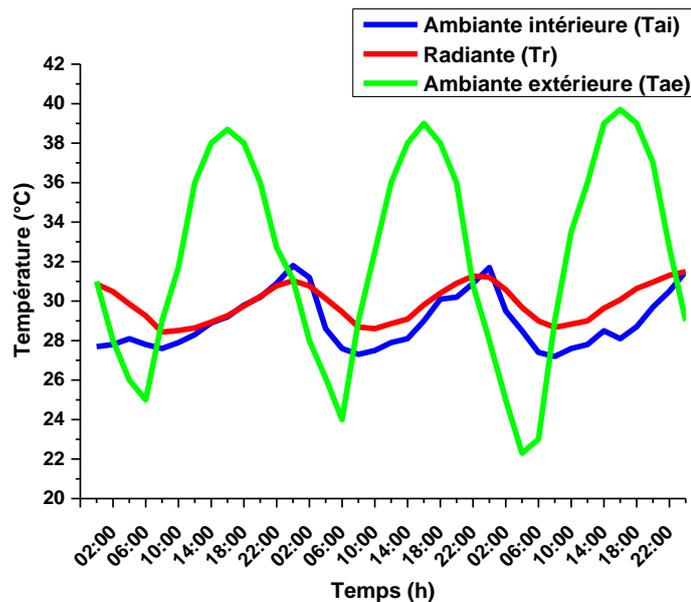
Asymétrie de la température radiante (°C)						
Mur plus chaud que l'air				Mur plus froid que l'air		
Mur nord	Mur sud	Mur est	Mur ouest	Mur sud	Mur est	Mur ouest
5.04	4.56	1.95	1.67	0.28	2.19	2.78

Le tableau ci-dessous (Tableau 5.14) synthétise les résultats des températures radiatives, il ressort de ce dernier que les températures radiatives moyennes varient dans l'ensemble des parois entre 28.06 et 31.63°C. Le déphasage thermique et le facteur d'amortissement ont été calculés pour les parois extérieures en considérant leurs températures radiatives et les températures de l'air extérieur (maximales et minimales). Les résultats obtenus sont en accord avec à ceux maintenus par la prise en considération des températures ambiantes du séjour, dont le facteur amortissement et le déphasage thermique ont été estimés de 0.26 et 9h, respectivement.

Tableau 5.14 : Synthèse des résultats de la température surfacique des parois du séjour (période estivale).

Paroi	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{moy} (°C)	Amplitude (°C)	Φ (h)	f
Nord-Ouest	28.92	33.95	31.12	4.26	9	0.26
Sud-Est	28.54	33.04	30.51	4.24	9	0.25
Est	27.89	29.82	29.00	1.24	-	-
Ouest	28.08	29.86	28.88	1.28	-	-
Plancher	27.49	28.82	28.06	0.93	-	-
Plafond	29.02	34.14	31.63	4.62	8	0.27

En outre, les températures surfaciques sont estimées variées dans cette pièce de vie entre 28.43 et 31.49°C (Figures 5.29), elles démontrent une amplitude moyenne de 2.65°C. Comparées aux températures ambiantes, ces températures sont supérieures de 4h à 22h avec un écart moyen de 0.95°C. Cet écart peut être traduit par l'effet de la ventilation naturelle nocturne qui permet de réduire les températures ambiantes jusqu'à 3°C (dans les cas d'une vitesse d'air égale à 0.7m/s), pendant la nuit, et par les apports solaires directs qui entraînent une augmentation des températures surfaciques des parois extérieures, notamment des parois verticales Nord et Sud et du plafond, et par conséquent de températures moyennes radiatives. Il est à noter que ces écarts sont conformes aux limites d'asymétrie de la température radiante recommandée par le standard 55 d'ASHRAE.

**Figure 5.29** : Variations de la température moyenne radiante du séjour, en comparaison avec la température ambiante du même espace, et la température de l'air extérieur (période estivale).

2. La Cour

Le graphique ci-après (Figure 5.30) présente les variations des températures surfaciques des quatre parois de la cour extérieure, l'analyse des résultats obtenus montre bien que ces températures fluctuent entre 24.47 et 55.14°C, en présentant une amplitude thermique moyenne de 24.7°C. Ainsi, elles sont supérieures aux températures de l'air retenues à l'extérieur, jour comme nuit, avec un écart moyen journalier variant entre 1.8 et 15.15°C

En effet, la paroi ouest démontre les températures radiatives les plus basses, elles fluctuent entre 24.18 et 47.07°C (obtenues à 6h et à midi, respectivement), avec une amplitude thermique journalière moyenne de 20.61°C, cette dernière est estimée pour les trois jours de mesures à 19.3°C, 19.93°C et 22.6°C. L'écart diurne moyen entre les températures obtenues sur cette paroi et celles extérieures et égales à 7.18°C, tandis que celui nocturne ne dépasse pas 2.2°C.

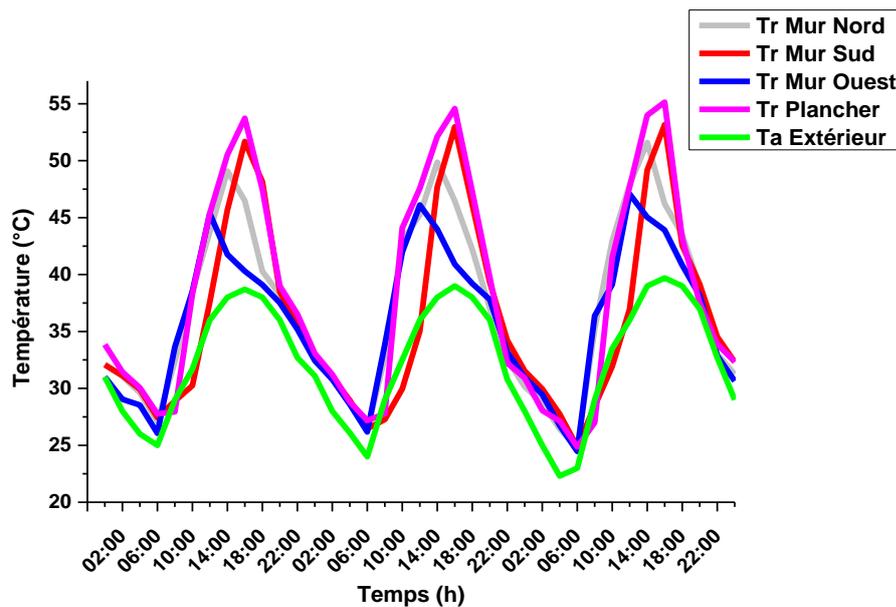


Figure 5.30 : Variations de la température radiante des parois de la cour, en comparaison avec la température de l'air extérieur (période estivale).

Sur la paroi nord séparant la cour et le séjour (orientée sud-est), les températures radiatives fluctuent entre 26.31 et 51.59°C (marquées respectivement à 6h et à 14h). Elles démontrent une amplitude thermique maximale de 26.82°C. Ces températures sont supérieures aux températures extérieures avec un écart maximal de 11.59°C (celui minimal est égal à 2.1°C).

Outre, les températures radiatives retenues dans la paroi verticale sud (orientée nord-ouest) démontrent une amplitude moyenne de 26.35°C, en fluctuant entre une température minimale de 24.86°C, obtenue à 6h, et une température maximale égale à 53.16°C marquée à environ 16h. L'écart journalier maximal entre les températures relevées dans cette paroi et les températures extérieures est estimé égal à 13.27°C.

Contrairement à la paroi ouest, le plancher bas démontre les températures radiatives les plus élevées, qui fluctuent entre 24.86 et 55.14°C (marquées à 6h et à 16h, respectivement), l'amplitude thermique maximale est égale à 30.28°C (obtenue au dernier jour de mesure). En comparaison avec les températures extérieures, les températures retenues dans cette paroi sont supérieures, avec un écart moyen maximal de 15.15°C et minimal de 2.89°C.

En effet, ces températures sont dues aux rayonnements provenant directement du soleil, et de ceux diffusés par l'atmosphère ou réfléchis par les surfaces des parois. Ces rayonnements entraînent une augmentation de températures surfaciques au-delà des températures extérieures.

Comme évoqué, les parois de cette espace ouvert s'exposent aux radiations solaires directes de 7h à 16h ; la paroi ouest s'expose à ces radiations de 7h à 12h, celle nord de 8h à 14h, celle sud d'environ 14h à 17h, tandis que le plancher reçoit le maximum de flux solaires, en s'y exposant de 10h à 16h. Cela justifie le décalage du temps entre les températures radiatives maximales et entre celles-ci et les températures extérieures maximales.

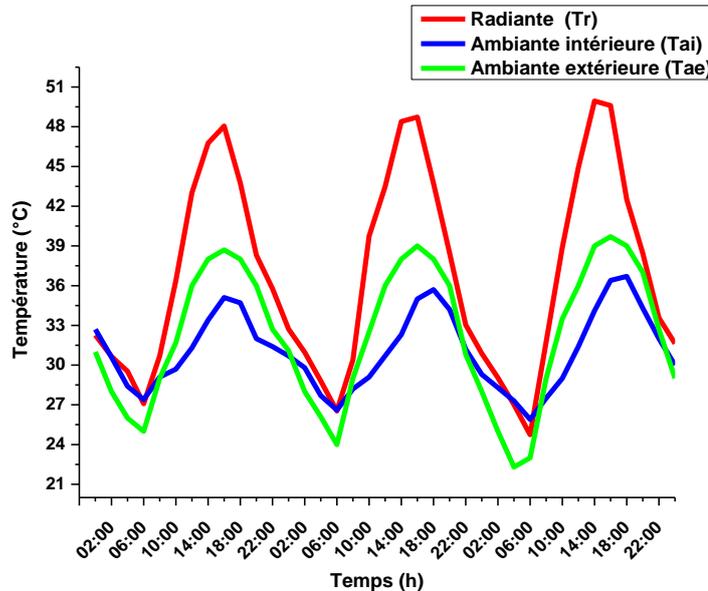
En revanche, les températures surfaciques obtenues pendant la nuit produisent principalement des températures extérieures. Néanmoins, elles peuvent être affectées par la chaleur restituée par la paroi elle-même, ce qui explique les écarts obtenus entre les deux températures (radiante et extérieure).

Comparées aux limites d'asymétrie de la température radiante recommandée par ASHRAE 55, ces résultats sont jugés conformes à la norme (Tableau 5.15), dont l'écart maximal entre les températures radiatives des parois verticales et celles ambiantes est égal à 17.98°C pendant la journée, et à 1.69°C, pendant la nuit (les limites recommandées sont 23°C et 10°C, respectivement).

Tableau 5.15 : Asymétrie de la température radiante des murs de l'espace extérieur (période estivale).

Asymétrie de la température radiante (°C)					
Mur plus chaud que l'air			Mur plus froid que l'air		
Mur sud	Mur ouest	Mur nord	Mur sud	Mur ouest	Mur nord
17.98	15.67	17.57	1.04	1.69	1.13

Enfin, le graphique ci-après (Figure 5.31) synthétise ces résultats en représentant les variations de température moyenne radiante. Il ressort de ce dernier que ces températures fluctuent entre 24.74 et 49.9°C, avec une amplitude moyenne de 22.7°C. Elles sont supérieures aux températures ambiantes de cet espace extérieur avec un écart maximal de 16°C et minimal de 0.3°C, qui sont conformes aux limites d'asymétrie de la température radiante recommandées par ASHRAE 55.

**Figure 5.31** : Variations de la température moyenne radiante de la cour, en comparaison avec la température ambiante du même espace, et la température de l'air extérieur (période estivale).

De plus, ces écarts permettent de constater que les températures ambiantes ne sont pas trop affectées par les températures surfaciques, et cela peut être justifié par la faible vitesse de l'air qui permet de ralentir davantage le transfert des flux de chaleur provenant des parois. Également, il peut être traduit par la différence de hauteur entre le point de mesure de la température ambiante (0.6m du sol) et le point de mesure de la température surfacique (centre de la paroi) qui diffère d'une paroi à une autre (la hauteur minimale est de 1.5m). Il est à noter que l'appareil de mesure de température de l'air (Thermo-hygrographe) est placé dans un endroit

ombragé, inversement au pyromètre infrarouge, qui mesure les températures radiantes dans des points ensoleillés.

c. Humidité relative (HR %)

La lecture du graphique d'hygrométrie présenté ci-dessous (Figure 5.32) démontre que le taux d'humidité relative est plus ou moins stable au séjour, il fluctue légèrement, pendant les trois jours de mesure entre 41 et 45.3% : l'écart journalier moyen est estimé à 3%, en revanche, l'hygrométrie de la cour est maintenue entre 31.8 et 44%, elle présente un écart journalier maximal de 12.3%. À l'extérieur, l'humidité relative de l'air ne dépasse pas 40%, elle diminue pendant la journée jusqu'à atteindre un taux minimal de 13%. Cette fluctuation démontre un écart plus important que ceux maintenus aux espaces évalués, il est d'une moyenne de 21%.

En effet, l'hygrométrie de l'air obtenue dans la cour montre une allure similaire à celle enregistrée à l'extérieur. Elle augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale à 6h, puis elle commence à diminuer graduellement afin de toucher à sa valeur minimale en après-midi, plus précisément à 18h. Néanmoins, ces taux sont supérieurs aux taux d'humidité de l'air extérieur, dont un écart moyen de 16.8% est maintenu entre les deux (l'écart maximal et celui minimal sont égaux à 5.1% et 21.6%, respectivement).

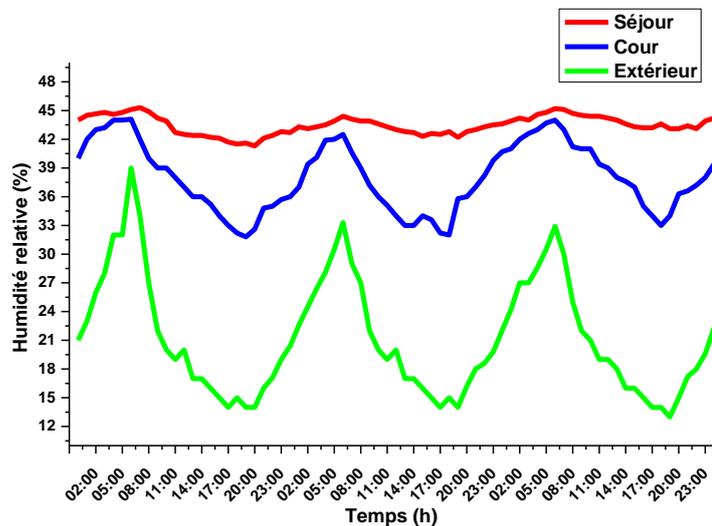


Figure 5.32 : Variations de l'humidité relative de l'air des espaces témoins, en comparaison avec l'hygrométrie extérieure (période estivale).

Comparée aux niveaux d'hygrométrie retenus à l'extérieur et dans la cour, l'humidité relative du séjour est plus importante, jour comme nuit. Elle reste élevée, même au moment où l'espace reçoit le maximum des apports externes (de 10h à

17h). Cela se justifie principalement par l'effet régulateur hygrométrique de l'adobe : comme détaillé auparavant, ce matériau local absorbe et restitue l'humidité de l'air en fonction de l'humidité et de la température ambiante (transfert couplé de chaleur et d'humidité), grâce à sa capacité d'absorption et de désorption de vapeur d'eau. Cette capacité a permis également de réduire la fluctuation d'hygrométrie au niveau de la cour, ceci est clairement établi dans les résultats (Figure 5.32), où l'écart maximal d'humidité de l'air extérieur est égal à 25%, tandis que celui relevé dans la cour ne dépasse pas 13%.

d. Température opérative (T_o)

Le graphique ci-après (Figure 5.33) présente les variations de la température opérative (T_o) dans les espaces évalués, calculée à l'aide de l'équation (Eq 5.1), avec une vitesse de l'air (V_a) considérée inférieure à 0.2m/s (vu qu'aucune mesure de vitesse de l'air n'a été réalisée dans ces espaces), donc un facteur 'A' égal à 0.5, ce qui veut dire que la température opérative est la moyenne de la température radiante (T_r) et celle ambiante (T_a). En fait, ce choix de vitesse de l'air donne le maximum de températures opératives.

La lecture de ce graphique fait ressortir que les températures opératives maintenues dans la pièce de vie (séjour), sont supérieures aux températures extérieures pendant la nuit (de minuit à 6h), avec un écart moyen de 2.8°C et inférieures à celles-ci pendant la journée avec un écart variant entre 1 et 10.6°C (marqués à 8h et à 16h, respectivement). Ces températures oscillent, sur les trois jours, entre 27.9 et 31.5°C (obtenue à 6h et à minuit), avec une valeur moyenne égale à 29.4°C.

En revanche, les températures opératives de la cour sont similaires aux températures extérieures prélevées par le service météorologique. Néanmoins, elles démontrent une valeur maximale (43°C) et minimale (25.30°C) légèrement supérieures à celles extérieures (40°C et 22.3°C), avec un écart moyen de 2.5°C. Ces valeurs sont obtenues respectivement à 16h et 6h, elles présentent une amplitude thermique moyenne égale à 15.4°C et une moyenne de 33.91°C.

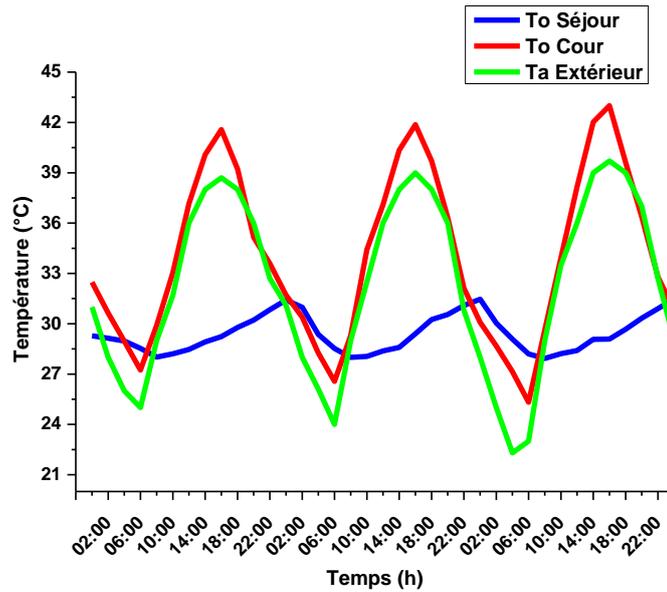


Figure 5.33 : Variations de la température opérative estivale des espaces évalués, en comparaison avec la température de l'air extérieur.

Comparés aux températures ambiantes, les températures opératives calculées pour les deux espaces évalués sont supérieures, jour comme nuit, avec un écart maximal de 6°C marqué dans la cour et de 1.5°C obtenu au séjour. Cela permet de constater que les températures radiatives influent négativement sur les températures opératives pendant la période estivale.

En pratique, 2.8°C est le différentiel maximum de température opérative recommandée pour un intervalle deux heures [24], cette limite n'a pas été dépassée au séjour, dans lequel la variation maximale est égale à 1.6°C. Réciproquement, les températures opératives de la cour présentent un différentiel maximal de 5.12°C, cette valeur, considérée hors norme, découle de l'exposition de la cour à ciel ouvert à la variation quotidienne de température extérieure, et aux rayonnements solaires.

e. Confort adaptatif estival

La plage du confort adaptatif est définie, pour la période de mesure (du 9 au 11 juillet), selon les équations 5.2 et 5.3, et en fonction de la température extérieure moyenne ($T_{pma (out)}$) de sept jours précédant cette période (du 2 au 8 juillet 2017), qui est égale à 30.1°C et qui est supérieure à la température moyenne de 30 jours précédant la même période (28.01°C). La prise en considération de cette température a permis de limiter la plage du confort thermique entre 23.63 et 30.63°C.

La comparaison des températures opératives obtenues au séjour et dans la cour, avec la plage de confort définie selon le standard 55 d'ASHRAE (Figure 5.34), démontre que le comportement thermique du séjour est confortable pendant toute la journée sauf entre 22h et minuit, où les températures opératives atteignant les 31.5°C.

En revanche, le comportement thermique de la cour n'est confortable que pendant la nuit, notamment de minuit à 8h du matin, où les températures fluctuent entre 25 et 30°C. En effet, l'environnement thermique de cet espace est plus frais que celui du séjour entre minuit et 6h, l'écart de température entre ces ambiances touche les 3°C.

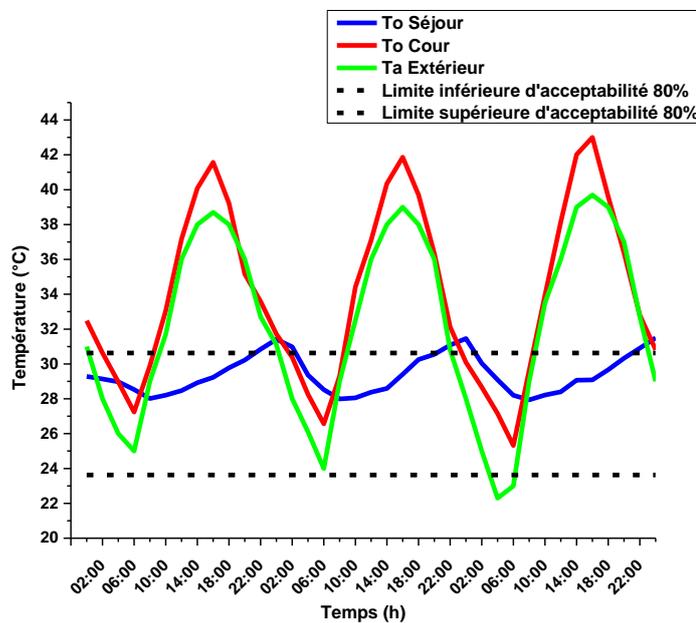


Figure 5.34 : Comparaison des températures opératives obtenues aux espaces évalués avec la plage de confort thermique définie selon ASHRAE 55.

Au niveau du séjour, les résultats obtenus à l'aide de la méthode quantitative viennent affirmer ceux obtenus avec la méthode qualitative : l'environnement thermique de cet espace est confortable pendant la journée, il démontre un indice de vote moyen prévisible (PMV) et un pourcentage prévisible d'insatisfaits (PPD) qui s'inscrivent dans la plage d'acceptabilité (0 et 5, respectivement), et des températures opératives se situant dans la zone du confort adaptatif.

Toutefois, les résultats des deux méthodes d'évaluation du confort thermique (qualitative et quantitative) sont contradictoires au niveau de la cour à ciel ouvert ; sur la base de PMV et de PPD (0 et 5, respectivement), l'environnement thermique

de cet espace est classé confortable, tandis que sur la base de la méthode quantitative, ce dernier est jugé inconfortable (la température opérative est estimée à 35°C à l'heure d'enquête, et également la température ambiante). Cette contradiction peut être justifiée par l'acclimatation des sujets au microclimat dans lequel ils vivent, et plus particulièrement à la chaleur, ainsi par le maintien d'une température corporelle constante ; aucun gain ni perte de chaleur par convection n'est maintenu, lorsque l'environnement est à la même température que la peau (environ 35°C).

En outre, l'humidité relative de l'air joue un rôle important dans la sensation du confort de l'individu ; un espace humide peut sembler plus chaud qu'un espace où la température est plus élevée, mais l'air sec. Le taux optimal d'humidité relative se situe, comme indiqué auparavant, entre 30 et 60% [24]. L'hygrométrie des deux espaces témoins s'inscrit dans cette plage, elle fluctue dans la cour entre 31.8 et 44%, et entre 41 et 45.3% au séjour. Cela permet de constater que le confort hygrothermique est maintenu dans ces espaces.

3.3.3 Discussion

En climat désertique froid de la ville de Laghouat - qui est caractérisé par des températures annuelles comprises entre 8.4 et 32.2°C et une humidité relative inférieure à 60%- , particulièrement, la compacité, l'orientation nord-sud, l'inertie thermique et la ventilation naturelle, sont le cœur de la conception bioclimatique qui permet de se protéger de forte chaleur d'été et de se réchauffer en hiver, afin de limiter ou d'éviter le recours à un éventuel appoint de climatisation ou de chauffage.

En effet, ces stratégies passives, notamment celle de l'inertie thermique, sont recommandées pour toute région dotée d'un climat chaud caractérisé par de fortes variations thermiques journalières. Cette stratégie a pour principale qualité d'amortir ces variations en créant un déphasage thermique, elle sollicite des matériaux présentant de faibles diffusivités et conductivités thermiques, et de fortes effusivités et capacités thermiques, à savoir la brique d'adobe, qui concoure, selon la littérature, à la régulation de deux facteurs, la température de l'air et l'hygrométrie [17, 272], bien qu'il n'a pas de propriété isolante [17].

Les résultats de cette étude empirique (faite suivant la norme internationale ASHRAE 55) viennent, en fait, confirmer cette théorie ; dans une pièce de vie dotée de deux murs (de 0.65m et 0.63m d'épaisseur), orientée nord-ouest et sud-est, exposés aux conditions extrêmes d'hiver (une température oscillant entre -3.3 et 15°C, et une humidité relative variant entre 26 et 87%), la température opérative et l'humidité relative fluctuent entre 8.92 et 12.52°C, et 54 et 63%, respectivement.

Outre, les températures obtenues ne s'inscrivent pas dans la plage du confort hivernal recommandée, pour ce contexte climatique, par ASHRAE 55, qui est limitée entre 17.5 et 24.5°C, mais l'amortissement des variations de température extérieure est bien remarquable, dont l'amplitude thermique extérieure est égale à 17.7°C, tandis que celle intérieure ne dépasse pas les 4°C.

De même, des résultats similaires à ces résultats, ont été obtenus dans une étude évaluant le comportement thermique des maisons Ghadamsis d'adobe, qui a démontré une température ambiante fluctuant entre 11 et 16°C, dans une chambre située au rez-de-chaussée et dotée d'une seule paroi extérieure (de 70cm d'épaisseur) donnant sur le patio, pendant que la température extérieure oscille entre 7 et 18°C [225]. Sur le même contexte climatique, des températures ambiantes de l'ordre de 12°C ont été retenues dans un espace avec des murs donnant sur extérieur, au moment où la température extérieure varie entre 4 et 23°C [255]. Les résultats de ces deux études ont été classés hors plage du confort thermique, comme ceux de notre étude.

Parlons des températures radiatives, les parois extérieures de l'espace évalué démontrent de faibles températures pendant la nuit. L'écart entre celles-ci et la température de l'air ambiant est supérieur à 1°C, ce que provoque un effet de paroi froide, affirmant le caractère non isolant de la brique d'adobe, qui a été démontré également par l'étude de EL-FGAIER [349] dans laquelle la température interne des parois a diminué jusqu'à -5°C.

Concernant l'hygrométrie, il est reconnu que la brique d'adobe permet d'obtenir une humidité relative stable de l'ordre de 50% avec des variations de 5 à 10% [279]. Ce constat est cohérent avec les résultats d'hygrométrie obtenus à l'intérieur de la maison d'adobe étudiée, pendant la période hivernale, où l'humidité relative maximale est égale à 63%, tandis qu'une hygrométrie de 87% est atteinte

à l'extérieur. Ainsi, il est cohérent avec les taux d'humidité relative retenus aux maisons Ghadamsis, qui démontrent une moyenne de 50% [255].

Pendant la période estivale, la température extérieure oscille entre 22.3 et 40°C, et l'hygrométrie entre 13 et 40%. Les parois d'adobe ont permis une stabilité de température intérieure (27.9 à 31.5°C) et d'hygrométrie (41 à 45.3%), afin d'assurer un confort hygrothermique, dont la plage est limitée entre une température opérative de 23.63 à 30.63°C et une humidité relative de 30 à 60%. Cela permet de constater que la brique de terre crue favorise le confort d'été bien que celui d'hiver.

En effet, les études du comportement thermique des maisons Ghadamsis appuient encore ce constat, elles démontrent que, dans un espace situé au rez-de-chaussée, les températures fluctuent entre 29 et 32°C [225], tandis que, dans un autre situé en étage, elles sont de l'ordre de 28°C [255]. La différence entre ces résultats est traduite par les températures extérieures qui oscillent entre 35 et 45°C, et entre 20 et 40°C, durant la période de mesure de la première et la deuxième étude, respectivement, et ainsi par l'emplacement des espaces évalués (rez-de-chaussée et étage). Une troisième étude faite en 2015, sur les mêmes exemples, a démontré que le confort hygrothermique est maintenu, dans ces derniers, avec une température fluctuant entre 29 et 30°C et une hygrométrie variant entre 49 et 58% (la température extérieure augmente à 38.6°C, au moment où l'humidité diminue à 26%) [254].

De plus, dans la maison yéménite de Shibām, des températures fluctuant entre 30 et 34°C ont été retenues, pendant que les températures extérieures varient entre 28.2 et 47.4°C [153]. Également, dans une maison ksourienne d'Ouargla, la brique d'adobe a permis d'obtenir des températures considérées inconfortables, qui sont de l'ordre de 38°C (la plage du confort, recommandée pour cette région, est limitée entre 24 et 32°C), et une hygrométrie variant entre 44 et 48% [261]. Bien que le confort thermique n'est pas maintenu dans ce cas, l'atténuation des variations des températures extérieures est bien remarquable (ces dernières fluctuent entre 30 et 58°C) [261].

Concernant les deux phénomènes d'inertie thermique, le facteur d'amortissement (f) et le déphasage thermique (Φ), ils sont estimés, pour les deux parois extérieures de la pièce de vie évaluée dans notre étude, à 0.26 et 9h,

respectivement. Ces parois sont d'une épaisseur de 0.63m et 0.65m, elles sont construites de briques d'adobe caractérisées par une conductivité thermique de 0,895w/m.K, une diffusivité égale à 0,907 mm²/s et une chaleur spécifique de 987j/kg.K.

Ces résultats sont très proches à ceux présentés dans l'étude de GOODHEW et GRIFFITHS [287], dans laquelle une paroi d'adobe de 0.4m d'épaisseur, caractérisée par une conductivité thermique de 1.3w/m.K, une diffusivité thermique de 1.012mm²/s et une chaleur spécifique de 880j/kg.K, démontre un déphasage thermique de 9h et un facteur d'amortissement égal à 0.3 [287].

4. Simulation thermique dynamique (STD)

Comme expliqué dans la première partie de thèse (Chap.2. §4), la technologie BPS (Building Performance Simulation) représente un véritable enjeu pour la construction, elle s'inscrit dans l'idée de 'construire avant de construire', c'est-à-dire réaliser le projet en virtuel, par des outils de modélisation et de simulation thermique dynamique (STD) et évaluer ses performances thermiques et énergétiques avant son exécution, pour assister les concepteurs dans leurs choix.

Ces outils de STD sont apparus comme un remède contre la surconsommation énergétique dans le secteur du bâtiment. Ils permettent de réduire l'impact environnemental du bâtiment, tout en optimisant son efficacité énergétique par la prise en considération de plusieurs paramètres, notamment ses caractéristiques (enveloppe, la masse thermique, les protections solaires, les systèmes CVC, Etc.), et les caractéristiques du contexte climatique dans lequel il s'inscrit.

Également, ils permettent l'étude des performances thermiques d'un bâtiment déjà existant, afin d'aider ses acteurs à préconiser les mesures correctives réduisant sa consommation énergétique et par conséquent, son impact environnemental.

L'un des outils de STD les plus répandus au plan international est EnergyPlus, cet outil est disponible librement (open source), il a été développé par le département de l'énergie (DOE) des États-Unis, sur la base des capacités des outils de simulation BLAST et DOE-2. Il permet de prévoir le comportement énergétique

du bâtiment, tout en fournissant des données de performance environnementale telle que ; le confort thermique (les températures d'air, radiantes et opératives, l'humidité relative, etc.) et visuel, la consommation énergétique, l'émission CO₂, et plusieurs d'autres, dans des intervalles de temps, infra-horaires, horaires, quotidiens, mensuels, et annuels.

La section suivante du travail s'attache, à l'évaluation du comportement thermique de la maison vernaculaire étudiée à l'aide de la version 1.2.2 de ce logiciel, à la validation du modèle numérique par la comparaison de ses résultats de température de l'air avec les mesures expérimentales, et à l'estimation des besoins énergétiques en chauffage de l'espace intérieur étudié.

4.1 Processus de simulation par EnergyPlus (version 1.2.2)

La simulation thermique dynamique par EnergyPlus est basée, en premier lieu sur la description détaillée de l'objet d'étude (la maison ksourienne) qui peut être effectuée par l'importation de sa géométrie modélisée en 3D à l'aide de Google Sketchup, ou comme ce cas de figure, par l'introduction de ses caractéristiques (géométrie, système constructif, orientation par rapport au Nord, ouvertures, scénario d'occupation, etc.) et celle de son voisinage immédiat (le Ksar), directement sous le logiciel, en utilisant des valeurs numériques (Figure 5.35) .

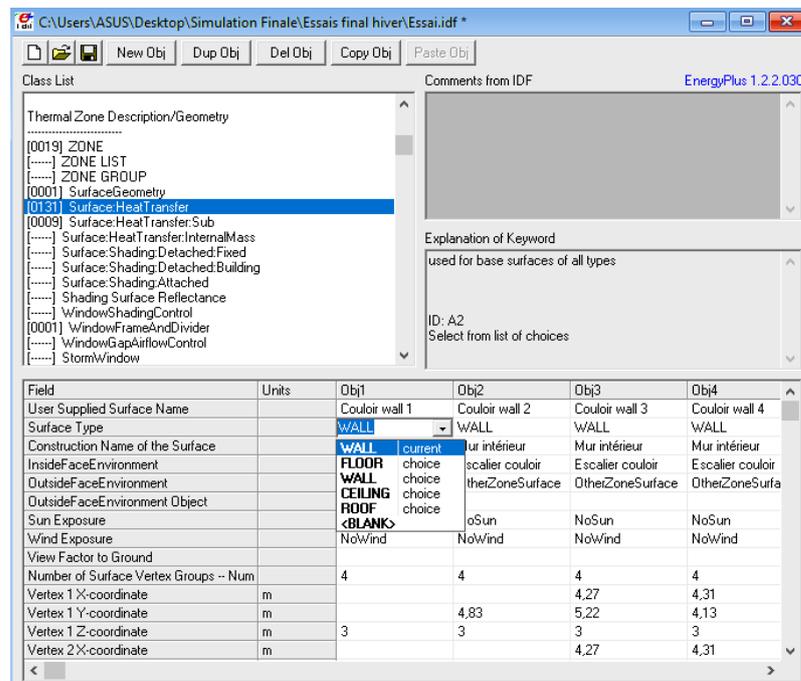


Figure 5.35 : Introduction des éléments constructifs de modèle numérique.

En effet, il est pratiquement impossible de reproduire numériquement à l'identique le Ksar réel, le modèle retenu a été considéré avec 19 zones thermiques, dix (10) entre eux présentent les îlots du ksar (Figure 5.36), les patios des maisons ksouriennes n'ont pas fait l'objet d'une modélisation. Le RDC de la maison étudiée a été modélisé comme une seule zone thermique, tandis que chaque pièce de la maison présente une zone thermique ; escalier, hall, trois chambres, cuisine, cour et WC (Figure 5.36).

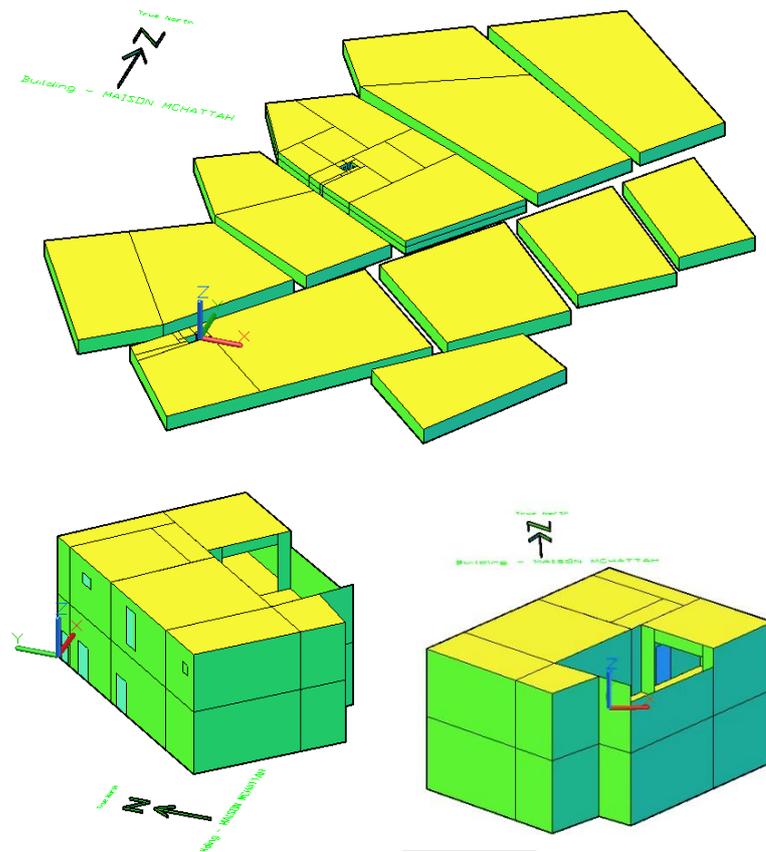


Figure 5.36 : Résultat de la modélisation géométrique de l'objet d'étude par EnergyPlus.

Pour l'enveloppe de la maison et les caractéristiques thermo-physiques de ses matériaux de construction, ce sont les caractéristiques présentées dans le DTR C3-T [348] qui sont considérées pour tous les matériaux (Tableau 5.16 et 5.17), à l'exception de la brique d'adobe, qui a fait l'objet d'une caractérisation thermo-physique déterminant sa densité, sa conductivité thermique et sa chaleur spécifique (Tableau 5.16). Il est à noter que les épaisseurs des parois ont été variées en variant l'épaisseur des adobes (Figure 5.37).

Tableau 5.16 : Eléments constructifs et matériaux de construction de la maison modélisée [Auteur, 348, 278].

Elément constructif	Matériau de construction	Densité (kg/m ³)	Conductivité thermique (W/m.K)	Chaleur spécifique (J/kg.K)
Mur extérieur	Mortier d'enduit en argile	600	0.17	600
	Adobe	2567.6	0.89	987
	Mortier de terre	1200	0.5	1200
	Mortier de chaux	1800	0.87	1080
Mur intérieur	Mortier d'enduit en argile	600	0.17	600
	Adobe	2567.6	0.89	987
	Mortier d'enduit en argile	600	0.17	600
Plafond	Badigeon à la chaux	1800	0.32	1080
	Couche de terre	1700	1.15	1080
	Roseau	200	0.06	2088
	Tronc de peuplier	390	0.085	1140
Plancher intermédiaire	Pavage en terre cuite	2000	0.47	936
	Mortier de terre	1200	0.5	1200
	Couche de terre	1700	1.15	1080
	Roseau	200	0.06	2088
	Tronc de peuplier	390	0.085	1140
Plancher de RDC	Pavage en terre cuite	2000	0.47	936
	Mortier de terre	1200	0.5	1200
	Sable	1800	1.2	792

Tableau 5.17 : Caractéristique thermo-physique des matériaux des ouvertures (porte et fenêtre) [348].

Matériau	Epaisseur (m)	Conductivité thermique (W/m.K)	Transmission solaire	Réflectance solaire	Emissivité
Vitrage	0.003	0.9	0.873	0.081	0.84
Bois	0.05	0.15	-	-	-

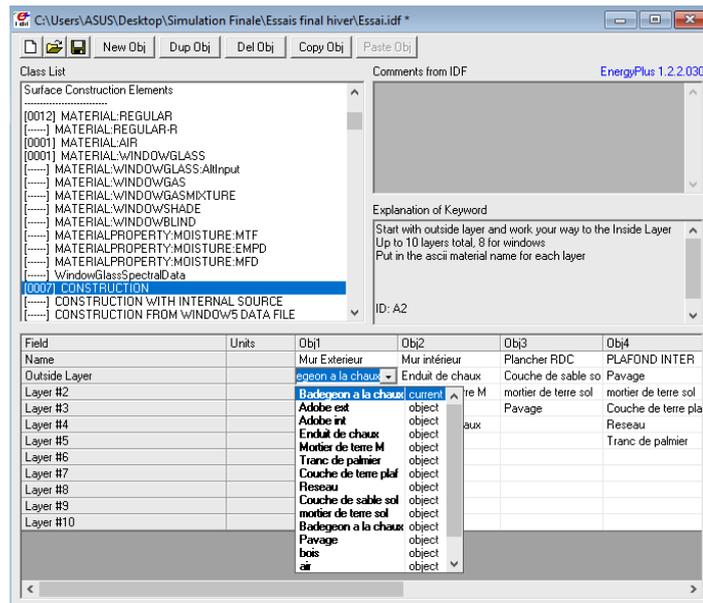


Figure 5.37 : Introduction des matériaux de construction sur EnergyPlus.

De plus, la programmation de la ventilation naturelle de la maison est faite selon les scénarios saisonniers d'occupation présentés auparavant. L'outil Energyplus calcule ce paramètre en fonction de la dimension des ouvertures, leurs états (ouverte ou fermé ; 1:0), le degré de leur ouverture (de 0,1 à 1), de la vitesse et la direction du vent, et de la pression atmosphérique. Les ouvertures de la maison sont programmées totalement ouvertes (1) de 18h à 8h pendant la période estivale et de 10h à midi en hiver (Figure 5.38).

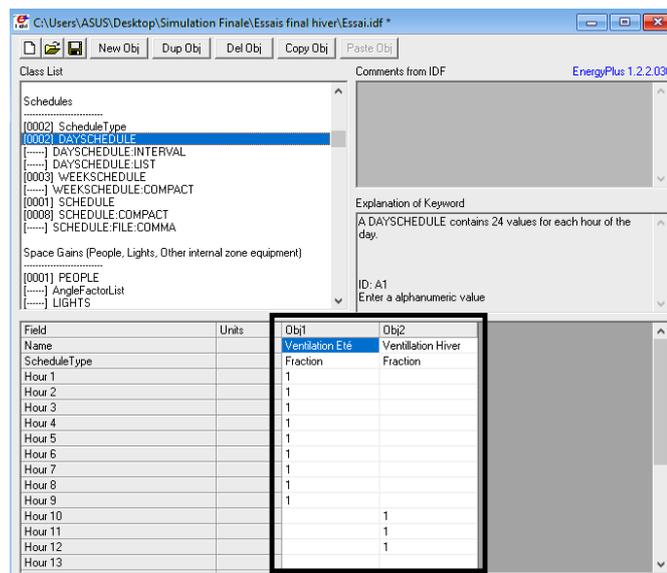


Figure 5.38 : Programmation de ventilation naturelle sur EnergyPlus.

En outre, l'environnement du travail d'EnergyPlus repose également sur l'introduction des données géographiques de la région d'étude (la ville de

Laghouat), et de ses données météorologiques horaires qui se présentent dans un fichier au format «.epw» (Figure 5.39), généré par logiciel Meteonorm 7.3. Ce fichier présente le point clé de ce processus, il permet de maîtriser aux mieux les incertitudes générées par celui-ci. Ce dernier contient : la température sèche, la température de point de rosée, la vitesse du vent, la direction du vent, la pression atmosphérique, le rayonnement net, le rayonnement direct et le rayonnement diffus, de la période 1991-2010.

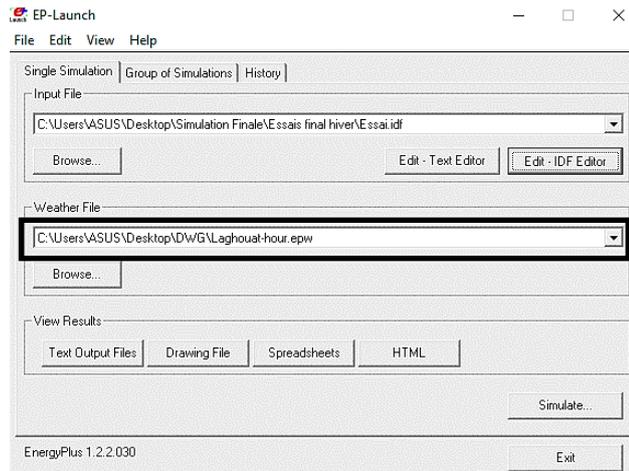


Figure 5.39 : Introduction du fichier météo de Laghouat.

Également, les données météorologiques de périodes de simulation sont parmi les données d'entrée nécessaires pour la simulation thermique numérique par cet outil (Figure 5.40). La simulation a été effectuée pour les mêmes périodes de mesure (du 7 au 10 janvier, et du 9 au 11 juillet 2017), les données climatiques de ces dernières ont été fournies de la station météorologique de la ville.

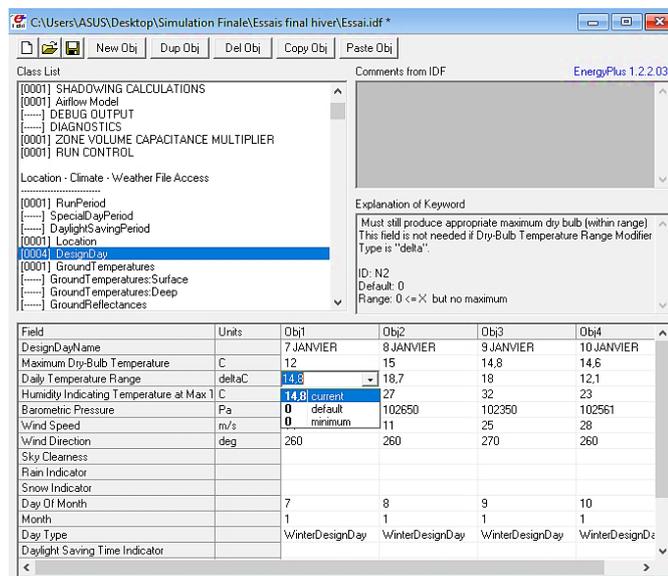


Figure 5.40 : Introduction des données climatiques de la période de simulation.

4.1.1 Hypothèses de modélisation

Comme il s'est avéré que la reproduction à l'identique la maison étudiée est très difficile, voire impossible, une série des hypothèses de modélisation a été choisie afin d'être prise en compte lors de la validation des résultats par EnergyPlus. Ces hypothèses sont classées en deux catégories ; l'enveloppe thermique et le modèle numérique.

En effet, la modélisation du Ksar objet d'étude, en onze (11) zones thermiques (une zone égale à un îlot), ne considère pas la différence de hauteur entre les bâtiments, et par conséquent, les masques solaires dus au voisinage proche et lointain de la maison étudiée. Cette hypothèse peut engendrer une certaine incertitude sur les résultats de simulation, particulièrement sur les températures de l'air de la cour.

La deuxième hypothèse porte sur les dimensions de la maison, l'outil EnergyPlus ne prend pas en considération l'épaisseur des parois et des planchers pendant la modélisation, c'est pour cela que le choix de dimension peut impliquer des incertitudes sur les résultats de simulation. Le choix des faces extérieures des parois permet un volume habitable supérieur à la réalité, notamment dans les cas des bâtiments ayant une épaisseur de paroi importante (plus de 30cm). Contrairement, le choix des faces intérieures des parois conduit à un modèle dont le volume habitable est inférieur à la réalité. Le choix est alors porté sur le milieu de paroi.

Une autre hypothèse sur l'enveloppe thermique à considérer concerne les différentes couches constituant le plancher intermédiaire et le plafond. EnergyPlus ne prend pas en compte le réseau porteur horizontal (poutres et les poutrelles en troncs de peuplier) dans la modélisation, il le considère comme les autres couches posées sur toute la surface du plancher, pour cela, seules les poutrelles ont été modélisées, et avec une faible épaisseur (5 cm). De plus, l'état du bâti n'a pas été considéré (enduit extérieur et mortier de liaison décollé, mur fissuré, adobe désintégré), l'outil suppose que la maison est en parfait état. Cette hypothèse est soumise aux incertitudes de performance thermique de l'enveloppe, mais son impact sur le comportement thermique de la maison reste minime.

En outre, des fenêtres en verre avec encadrement en bois ont été considérées dans la modélisation, tandis qu'en réalité, seule la grande fenêtre de séjour présente ces caractéristiques, le reste de fenêtres ne sont pas faites de cadre et de vitrage, elles sont bouchées par un tissu provoquant des pertes thermiques dues aux infiltrations d'air extérieur pendant l'hiver. Cette hypothèse peut engendrer une enveloppe thermique plus performante que la réalité.

De plus, pendant la période d'étude, les portes de l'intérieur de la maison sont laissées ouvertes, créant un mouvement d'air entre les pièces. La modélisation de la maison avec 7 zones thermiques (une zone égale à une pièce) ne considère par ce mouvement d'air, elle suppose que toutes les portes restent fermées, tant qu'aucune ventilation n'est programmée. Cette hypothèse a l'avantage de permettre l'évaluation de comportement thermique de chaque espace séparément, ainsi, son impact sur les résultats est négligeable.

Les pertes d'infiltration sont modélisées par un débit constant (par défaut) sous toutes les conditions, or la pression, exercée par l'effet du vent sur l'enveloppe extérieure de la maison, a un impact significatif sur le débit d'infiltration. L'incertitude de cette hypothèse sur les résultats de simulation est très faible, car la maison est implantée dans un tissu urbain compact, étroit et profond, ce que rend le vent souvent très faible.

Également, les apports internes dus aux équipements de la maison (four à bois, télévision, microordinateur, réfrigérateur, etc.), ne sont pas pris en considération lors de la simulation. Ces derniers peuvent participer au confort thermique hivernal, alors l'incertitude correspondante doit être prise en compte.

Sur EnergyPlus, la modélisation de la ventilation naturelle peut être effectuée par la programmation des heures d'ouvertures des portes et des fenêtres. Néanmoins, elle ne permet pas de faire le choix entre ces derniers (toutes les portes et les fenêtres de la maison s'ouvrent à l'heure de ventilation). Cette hypothèse peut procréer une certaine incertitude sur les résultats de simulation, surtout en hiver.

4.2 Résultats et analyses

4.2.1 Période hivernale

Le graphique ci-après (Figure 5.41) présente les variations des températures intérieures et extérieures, sur les trois jours d'évaluation d'hiver, obtenues par la simulation thermique dynamique. La lecture de ce dernier démontre une fluctuation de température d'air intérieur, notamment celle du séjour, entre une valeur minimale de 8.5°C obtenue à 8h, et une température maximale de 11.37°C atteinte à 18h. Les températures obtenues dans cet espace démontrent une amplitude maximale de 2.83°C, marquée au deuxième jour de simulation, sa valeur minimale est égale à 2.48°C, elle est marquée au dernier jour de simulation. L'amplitude thermique moyenne est estimée pour la période de simulation à 2.64°C.

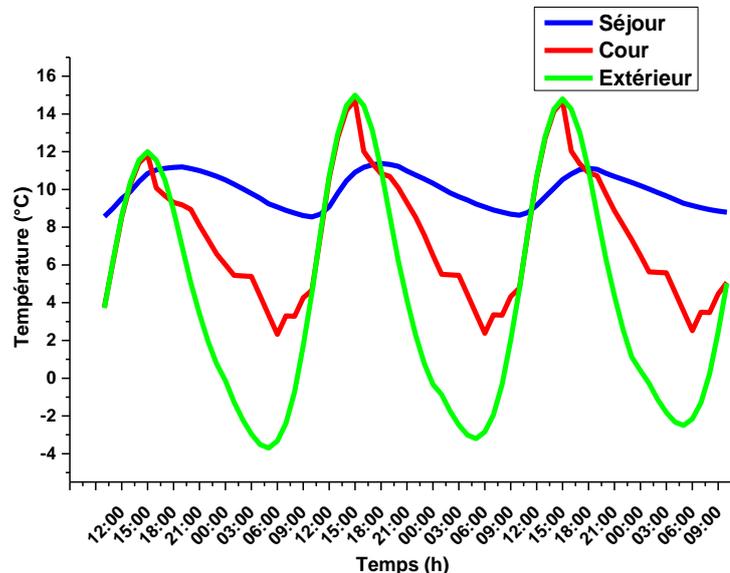


Figure 5.41 : Variations de la température de l'air simulée, en hiver.

Contrairement, les températures retenues dans la cour présentent une forte amplitude thermique atteignant les 12.4°C (elle est estimée pour les trois jours de simulation à 8.14°C, 12.41°C et 12.3°C, respectivement). Ces températures fluctuent pendant la période d'étude entre 2.32°C, obtenue à 6h, et 14.37°C obtenue à 15h.

Cette fluctuation est également remarquable à l'extérieur, où l'amplitude thermique peut atteindre les 18.7°C. Les températures de l'air extérieur fluctuent entre -3.7 et 15°C, obtenue à 5h et 15h, respectivement. Ces températures sont supérieures à celles obtenues dans la cour pendant toute la période de simulation,

l'écart diurne entre ces dernières ne dépasse pas les 0.3°C, tandis que celui nocturne touche les 7°C.

En revanche, les températures de l'air extérieur ne sont supérieures à celles de séjour qu'entre midi et 18h, l'écart maximal est estimé, pour cet intervalle, à 3.69°C, il est marqué à 15h. Pendant le reste de la journée, les températures extérieures restent inférieures à celles obtenues au séjour, avec un écart maximal de 12.24°C, marqué au deuxième jour de simulation à 5h.

La comparaison de ces résultats hivernaux avec ceux obtenus par les mesures in situ (Figure 5.42), démontre que la simulation a la même tendance que les mesures, mais les pics de température au cours de la journée sont moins marqués au séjour et plus marqués dans la cour et à l'extérieur. L'écart de température entre les résultats va jusqu'à 4.4°C au niveau de la cour et à l'extérieur, tandis qu'il ne dépasse pas les 1.22°C au séjour.

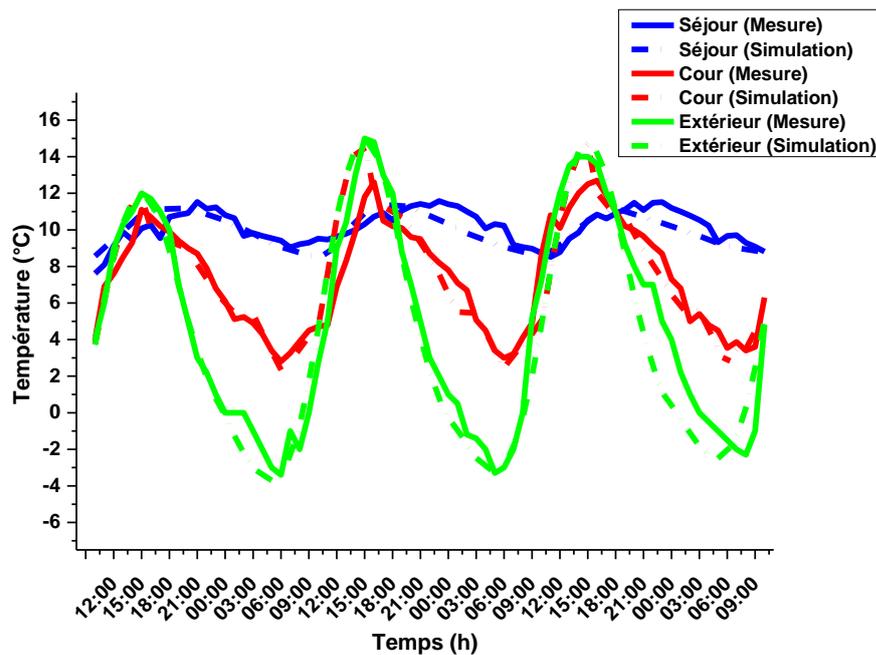


Figure 5.42 : Comparaison de la température de l'air mesurée et celle simulée, en période hivernale.

Le faible écart observé dans les températures de l'air de la pièce de vie peut être expliqué par les pertes de chaleur dues à l'infiltration de l'air, qui a déjà été déclaré comme source d'inconfort par l'un des occupants pendant l'enquête. De plus, la non-prise en considération des apports internes peut également être à l'origine de cet écart ; à cela s'ajoute l'ouverture de toutes les portes et les fenêtres programmée de 10h à midi, lors de l'aération de l'espace.

En revanche, les 4°C d'écart observés dans la cour, particulièrement au deuxième jour de mesure à 14h (9.9°C mesurée, et 14°C simulée), et à l'extérieur, au dernier jour de mesure à 22h (7°C mesurée par la station météorologique, et 2.56°C simulée) peut être dus à l'interpolation des données de fichier météo permettant de compléter les données par un pas de temps ; les pas de temps courts de type « 10 min » ou moins (nombre de pas de calcul égal à 6 ou plus) augmentent la précision des résultats. Le pas de temps considéré pour cette simulation est de type « 60 min » [350].

4.2.2 Période estivale

Le graphique ci-dessous (5.43) présente les variations de température de l'air résultant par simulation thermique, dans les espaces témoins et à l'extérieur, sur les trois jours d'étude. La lecture générale de ce graphique indique une forte fluctuation des températures extérieures avec une amplitude thermique journalière atteignant les 18°C, cette fluctuation est, également, remarquable au niveau de la cour, où l'amplitude thermique est estimée variée entre 8 et 11.34°C, avec une moyenne de 9.28°C. Contrairement, les températures retenues dans la salle de séjour présentent une faible amplitude thermique par rapport aux autres ambiances. Cette dernière est égale à 4.66°C (elle est estimée, pour les trois jours de mesures, à 4.11°C, 4.43°C et 4.97°C, respectivement).

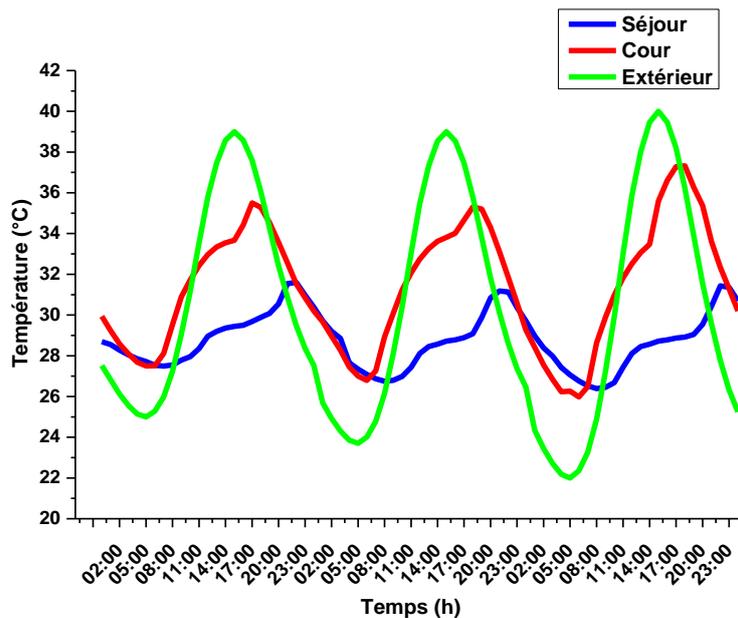


Figure 5.43 : Variations de la température de l'air simulée, en été.

En effet, les températures extérieures atteignent leur minimum vers 5h, et leur maximum à 15h, en fluctuant entre 22 et 40°C. Cependant dans la cour, les températures fluctuent entre 25.98 et 37.32°C, en atteignant leur minimum à 6h et leur maximum vers 17h. En revanche, les températures intérieures ne dépassent pas les 31.6°C, cette valeur maximale s'atteint souvent vers 23h, cependant, celle minimale, qui est de l'ordre de 26.3°C, est atteinte vers 7h.

En observant les trois courbes de température tracées dans le graphique, les températures de l'air obtenues dans la cour sont généralement inférieures à celles extérieures pendant la nuit (de minuit à 8h) avec un écart moyen de 3.19°C (l'écart minimal et celui maximal sont estimés à 2.5°C et 3.98°C, respectivement), et inversement pendant la journée, où un écart moyen de 3.29°C est maintenu entre les deux ambiances (avec un écart minimal de 2.68°C et maximal de 3.7°C).

La comparaison de ces résultats numériques avec les résultats expérimentaux (Figure 5.44), démontre que la simulation a la même tendance que les mesures, mais les pics de température au cours de la journée sont moins marqués, notamment au séjour. L'écart de température entre les résultats de cette espace et ceux de la cour ne dépasse pas les 2°C, tandis qu'il atteint, dû à l'interpolation des données du fichier météo, les 5°C à l'extérieur.

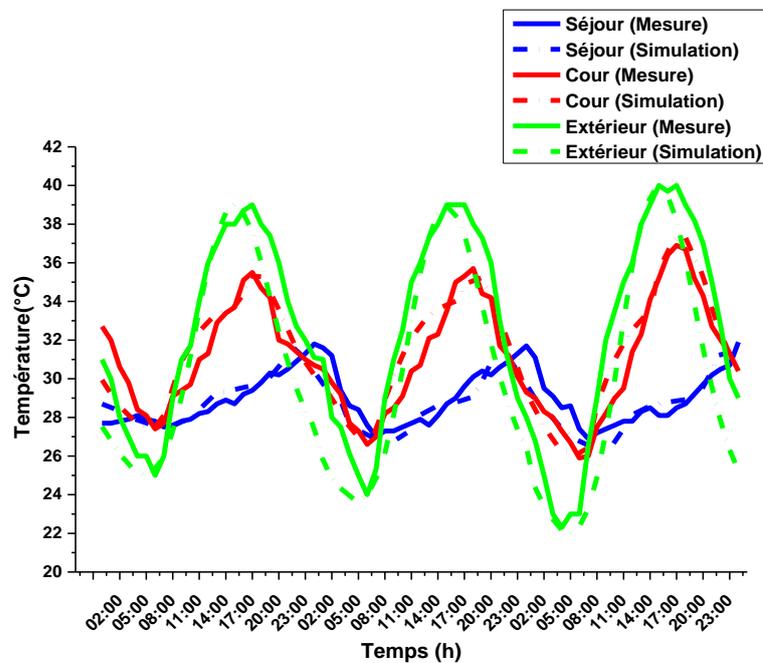


Figure 5.44 : Comparaison de la température de l'air mesurée et celle simulée, en période estivale.

Cet écart observé dans les températures de l'air de la pièce de vie, notamment pendant la journée, se traduit par l'homogénéité des matériaux de construction qui a été présumé par l'outil de simulation Energyplus. Cependant, la réalité présente un état de vieillissement important. L'écart diurne de température dans ce même espace s'explique par la ventilation naturelle programmée par l'ouverture de toutes les portes, contrairement à la réalité, dans laquelle la ventilation est assurée par les ouvertures de l'intérieur de la maison, et non pas par la porte d'entrée.

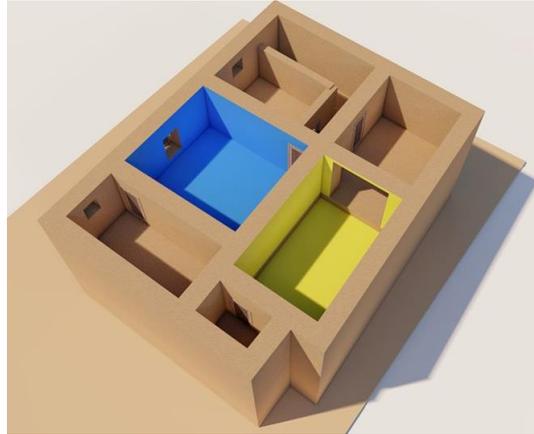


Figure 5.45 : Le modèle numérique de la maison.

Quant au cas de la cour, l'écart de température peut être expliqué par la non-prise en considération des masques solaires dus au voisinage (le Ksar a été modélisé en considérant la même hauteur), ainsi que ceux créés par la paroi verticale séparant les deux espaces témoins (Figure 5.45). Également, il peut être traduit par la non-prise en compte des apports internes de chaleur, notamment ceux dus au four au bois. Il est à noter que l'incertitude obtenue peut être liée également, au positionnement de l'instrument de mesure et sa précision.

4.3 Discussion

EnergyPlus est un outil de simulation thermique dynamique permettant l'estimation de performance thermique et énergétique de bâtiments existants ou en phase de conception, afin d'identifier les voies d'amélioration. Cet outil a fait l'objet de plusieurs validations, à travers la comparaison de ses données avec ceux obtenus expérimentalement [350].

Les résultats de cette simulation numérique viennent, en fait, confirmer la crédibilité de l'outil EnergyPlus. En considérant l'équation ci-après (Eq 5.4) [9], la comparaison des résultats montre un faible pourcentage d'erreur de 3.40% entre

les données de simulation et de celles d'expérimentation (Tableau 5.18). Cette erreur s'est traduite par plusieurs paramètres qui n'ont pas été pris en considération lors de la modélisation à savoir : l'infiltration de l'air, les apports internes, le vieillissement de l'enveloppe du bâtiment, les masques solaires, etc. Ces derniers ont été présentés auparavant comme hypothèses de modélisation, justifiant l'incertitude des résultats.

$$\text{Pourcentage d'erreur (\%)} = \frac{\text{Valeur mesurée} - \text{Valeur simulée}}{\text{Valeur mesurée}} \times 100 \quad (\text{Eq.5.4})$$

Tableau 5.18 : Comparaison des résultats de simulation et de mesures.

Période	Espace	T° moy de mesure (°C)	T° moy de simulation (°C)	Erreur (%)	Erreur moy (%)
Hivernale	Séjour	10.16	9.96	1.96	4.32
	Cour	7.42	7.50	1.07	
	Extérieur	4.82	4.34	9.95	
Estivale	Séjour	28.94	28.74	0.69	2.49
	Cour	31.04	31.34	0.96	
	Extérieur	32.34	30.45	5.84	

En effet, des résultats, similaires à ceux-ci, ont été obtenus dans une étude évaluant le comportement thermique des maisons vernaculaires de la Casbah d'Alger, qui a démontré un écart allant jusqu'à 3.86% entre les données de simulation et celles obtenues expérimentalement [351]. De plus, un écart de température de 2°C entre les résultats de simulation numérique par l'outil EnergyPlus et les mesures expérimentales a été estimé, dans une étude évaluant l'efficacité énergétique d'un établissement scolaire à Miliana, Algérie [352].

Enfin, la crédibilité de l'outil EnergyPlus en termes de température ambiante permet de calculer les besoins énergétiques en chauffage, pour l'espace témoin (Séjour), pendant la période d'évaluation (3 jours). En considérant une température de confort égale à 24°C, les besoins énergétiques sont estimés à 46.655kW, avec une moyenne de 315W par heure. Comparé aux besoins énergétiques en chauffage d'une pièce de vie faisant partie d'une maison contemporaine construite en brique, sur le même contexte climatique (la ville de Laghouat), l'espace étudié est économe en énergie : les besoins en chauffage pour une seule journée d'hiver sont estimés pour l'habitat contemporain à 35.28kW [9].

5. Conclusion

Ce chapitre découle d'une étude expérimentale menée sur le comportement thermique des habitations vernaculaires de Ksar Zgag El-Hadjadj à Laghouat. Le choix s'est porté sur une maison surélevée sur un socle commercial, traditionnellement appelée « Leâlli », cette dernière est considérée parmi les cas les plus défavorables du Ksar, ce que permet d'agir sur les performances thermiques de la brique d'adobe. L'étude est effectuée dans deux espaces présentant le centre vital de la maison, l'un intérieur couvert (séjour) et l'autre extérieur à ciel ouvert (cour).

La pré-enquête menée auprès des trois habitants de la maison objet d'étude, visant à prédire leur perception globale à l'égard de l'espace bâti, tout en vérifiant la faisabilité et l'acceptabilité de l'étude, a démontré la satisfaction des individus vis-à-vis de l'environnement thermique de leur maison, où aucune climatisation n'est requise en été, et un simple feu de bois est susceptible d'être utilisé pour assurer le confort thermique des sujets acclimatés au froid, en hiver .

De plus, cette pré-enquête démontre l'insatisfaction des enquêtes vis-à-vis de l'état du bâti vernaculaire. Ce dernier présente, selon ses habitants, une vulnérabilité croissante à l'eau, engendrant des désordres structuraux, notamment une décomposition des adobes des murs qui subissent des infiltrations d'eau, cette situation a mené plusieurs maisons Ksouriennes à l'effondrement.

Ensuite, l'enquête effectuée (le 8 janvier et le 9 juillet 2017) auprès de mêmes sujets (trois personnes, dont l'isolement vestimentaire est compris entre 0.5 et 1Clo et le métabolisme est limité entre 1 et 1.2Met), sur la base d'un questionnaire proposé par la norme internationale ASHRAE 55 et en fonction de nomadisme quotidien et saisonnier, a démontré que l'environnement thermique des espaces considérés est classé confortable en été (classe A), avec des facteurs PMV et PPD égaux à 0 et 5, respectivement.

En revanche, seul l'environnement thermique de l'espace extérieur (la cour) est jugé confortable en hiver (particulièrement pendant la matinée), avec un vote moyen prévisible global égal à -0.3 et un pourcentage d'insatisfait égal à 7.62, la sensation de confort thermique dans cet espace est classée B selon ASHRAE 55.

De plus, le PMV et le PPD de la pièce de vie (séjour) sont hors plage d'acceptabilité (-1 et 15.52, respectivement), l'espace est classé inconfortable.

À la différence de la méthode qualitative subjective, la méthode quantitative objective de confort thermique consiste à mesurer simultanément les grandeurs physiques des ambiances thermiques étudiées qui permettent de déterminer les températures opératives de ce dernier (température ambiante et moyenne radiante). Dans cette étude, les mesures expérimentales sont effectuées pendant trois jours des mois les plus critiques de l'année (janvier et juillet), pour lesquelles la plage du confort est définie selon la norme ASHRAE, cette dernière est limitée entre 17.5 et 24.5°C et entre 26.63 et 30.63°C, respectivement.

En effet, cette approche adaptative a démontré que le comportement thermique des deux espaces étudiés est inconfortable en hiver, jour comme nuit. Des températures opératives fluctuant entre 8.92 et 12.53°C et entre 0.65 et 13.33°C sont retenues au séjour et dans la cour, respectivement. Néanmoins, l'amortissement et l'atténuation de fluctuation de la température extérieure, qui fluctuent entre -3.3 et 15°C, sont bien remarquables dans les deux espaces.

En revanche, le comportement thermique des espaces étudiés est classé confortable en été, notamment pendant les heures de l'occupation (le séjour pendant la journée, et la cour pendant la nuit). Des températures opératives oscillant entre 27.9 et 31.5°C sont obtenues au séjour, cependant, dans la cour les températures opératives atteignant les 42°C en après-midi, ceci est dû aux rayonnements solaires directs affectant les températures radiantes ; en fin de journée, ces températures diminuent jusqu'à atteindre 25°C. Les températures extérieures fluctuent pendant les trois jours de mesure entre 22.3 et 40°C.

En outre, le standard ASHRAE 55 recommande que l'humidité relative de l'air soit maintenue entre 30 et 60%. Les mesures de cette grandeur physique démontrent qu'à l'intérieur de la maison (au séjour comme dans la cour), l'hygrométrie s'inscrit dans la plage de confort en été, elle fluctue entre 44 et 45% au séjour, et entre 31.8 et 44% dans la cour, tandis qu'à l'extérieur, elle diminue jusqu'à 13%. Cependant, seul le séjour s'inscrit dans la plage limitrophe d'hygrométrie pendant l'hiver, l'humidité relative de l'air de cet espace fluctue entre

54 et 63%, tandis qu'elle oscille entre 43 et 74% dans la cour, et entre 26 et 87% à l'extérieur.

Ces résultats de température et d'humidité relative permettent de constater que le confort hygrométrique est maintenu dans la maison vernaculaire pendant la période estivale, et ce grâce aux caractéristiques thermiques des matériaux constituant l'enveloppe de la maison, notamment de l'adobe, et sa capacité à régulariser l'humidité de l'air.

Ce matériau présente une conductivité thermique de 0.89 W/m.K, une diffusivité thermique égale à 0.9mm²/s et une capacité thermique de 987J/kg.K : des valeurs qui sont déterminées par des essais de caractérisation réalisés sur un échantillon d'adobe extrait du Ksar. Il a permis un déphasage thermique égal à 9h, été comme en hiver, et un facteur d'amortissement de l'ordre de 0.26.

La maison en question a, ensuite, fait l'objet d'une simulation thermique dynamique par l'outil EnergyPlus, afin de valider un modèle numérique sur la base des températures de l'air, ce qui permet de faire une estimation des besoins énergétiques en chauffage. La simulation montre un faible pourcentage d'erreur moyen de 3.40% entre les données de simulation et de celles d'expérimentation, confirmant la crédibilité de l'outil Energyplus. Les besoins énergétiques en chauffage de l'espace intérieur, sont estimés pour la période de l'étude, à 46.655kW, démontrant que la maison vernaculaire étudiée, considérée défavorable, est économe en énergie.

Enfin, ce chapitre permet de valider l'efficacité énergétique des matériaux de l'architecture vernaculaire, notamment celle de l'adobe. Bien que la maison étudiée présente des inconvénients sur le plan bioclimatique (emplacement, organisation spatiale, orientation, dimension des ouvertures, etc.), son enveloppe thermique permet d'assurer le confort thermique pendant la période estivale et d'atténuer la fluctuation de température extérieure en hiver.

Néanmoins, ce matériau présente, comme expliqué dans la partie état de l'art et comme déclaré par les enquêtés, des désavantages certains, qui sont à l'origine des dégradations et de l'effondrement de l'habitat de Ksar Zgag El-Hadjadj, et qui se résument dans sa vulnérabilité à l'eau. Sur ce, le chapitre suivant sera consacré à l'amélioration des caractéristiques mécaniques et hydriques de l'adobe,

notamment sa résistance à la compression et son absorption d'eau capillaire, en vue de son utilisation dans la réhabilitation du bâti vernaculaire de l'ancien Ksar de Laghouat, tout en conservant ses propriétés thermiques. Cette amélioration pourra, également, contribuer à la revalorisation de ce matériau de construction, et par conséquent à la réduction de l'impact environnemental de l'habitat du milieu désertique.

CHAPITRE 6

ADOBE : DE L'ÉCHELLE IN-SITU À L'ÉCHELLE DU LABORATOIRE

CHAPITRE 6 :

ADOBE : DE L'ÉCHELLE IN-SITU À L'ÉCHELLE DU LABORATOIRE

Le présent chapitre a pour objectif de revaloriser le premier matériau de construction de la région de Laghouat, il porte sur l'étude de l'effet de l'ajout minéral, notamment de poudre de verre, sur les caractéristiques thermomécaniques et hydriques de l'adobe. Dans ce contexte, deux types d'adobe fabriqués manuellement, sont caractérisés, afin d'être comparés avec l'ancien adobe extrait du Ksar Zgag El-Hadjadj. La différence entre ces derniers persiste dans les matières premières utilisées : le premier type est issu d'une terre, prélevée du gisement, mélangée avec de l'argile, tandis que le deuxième consiste en un adobe recyclé.

À cet effet, la première section de ce chapitre est destinée à la caractérisation de ces quatre échantillons de matières premières (adobe recyclé, terre, argile et poudre de verre), utilisées pour la fabrication de l'adobe. La connaissance des propriétés et de spécificités de ces derniers est, en effet, essentielle pour l'identification des performances comptabilisées pour la confection du matériau. Les essais de caractérisation physico-chimique et géotechnique sont effectués selon les recommandations des normes internationales, permettant de faire la classification de ces produits.

La seconde section du chapitre s'attache à la présentation du processus de fabrication des adobes stabilisés en envisageant quatre teneurs (en poids) poudre de verre (5, 10, 15, et 20%), et des différentes méthodes expérimentales considérées pour l'identification des propriétés thermomécaniques et hydriques des adobes fabriqués.

Enfin, les résultats de caractérisation sont discutés dans la dernière section du chapitre, afin de comprendre l'effet des différents dosages d'ajout minéral sur la résistance en compression, l'absorption capillaire, la conductivité, la diffusivité et la capacité thermique des adobes qui font, ensuite, l'objet d'une analyse d'impact environnemental (par SimaPro), déterminant ainsi leur effet sur la santé humaine, l'écosystème, le climat et les ressources naturelles.

1. Matières premières : origine, échantillonnage et caractérisation

L'adobe est l'une des techniques de construction en terre crue ; il est composé d'un mélange de terre sablo-argileuse constituant 55 à 75% de sable, 10 à 28% de limon, 15 à 18% d'argile et de l'eau dont la teneur est limitée entre 15 et 30% [214]. Ces matières premières étaient extraites, au passé, du site de construction : la terre se trouvait souvent sous les terres arables entourant le ksar de Zgag El-Hadjadj, tandis que l'eau était extraite d'Oued M'zi. Le choix de ces gisements était essentiellement basé sur leur emplacement par rapport au Ksar afin de limiter le transport du matériau.

De plus, l'adobe peut être stabilisé par l'ajout de produits naturels (d'origine végétale ou animale), de produits synthétiques, ou des minéraux, afin d'améliorer ses caractéristiques mécaniques et sa durabilité vis-à-vis de l'eau. Le choix du matériau de substitution est porté, dans cette étude, sur les déchets de verre ; un matériau minéral à base d'Oxyde de Silicium (SiO_2 ; le composant principal du sable), utilisé sous formes diverses et variées (vaisselle, emballage, décoration, écran, pare-brise, etc.).

Le verre constitue, par son recyclage, une source de matière première pour nombreuses applications. La valorisation de ce matériau, chimiquement inactif, dans le domaine de bâtiment, notamment pour la stabilisation des matériaux de construction, constitue une alternative, à la fois, écologique et économique, permettant l'élimination de ses déchets abandonnés en quantités importantes, et par conséquent la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Ainsi, elle permet la limitation de l'usage des sables naturelles pour la fabrication d'autres matériaux de construction.

En effet, plusieurs sont les travaux de recherche effectués sur l'utilisation de ce matériau – qui peut être recyclé plusieurs fois à 100% sans perte de qualité – comme ajout pour la production de divers matériaux de construction, et particulièrement le béton (autoplaçant et haute performance) et la brique de terre comprimée [353]. Ces derniers ont démontré que le verre post-consommation transformé en poudre peut être considéré comme un excellent ajout qui apporte des effets bénéfiques à savoir ; le poids léger, la résistance élevée, le renforcement, la durabilité et la meilleure performance thermique. Cependant, aucune recherche

n'est faite sur l'utilisation de poudre de verre comme ajout dans la stabilisation la brique d'adobe.

1.1 Les terres

La zone d'extraction choisie pour cette étude est située aux alentours du Ksar, ce gisement était, selon les habitants du Ksar, l'un des principales sources de terre utilisée pour la fabrication de l'adobe, au passé ; la localisation géographique ce dernier est présentée dans la figure 6.1. Ce choix permet, en fait, de réduire significativement le coût de transport pour ce type de matériau pondéreux. Il convient de noter que les habitants du Ksar déclarent trouver les terres de la ville de Laghouat, très pauvres en argile, par rapport aux autres régions de la wilaya.

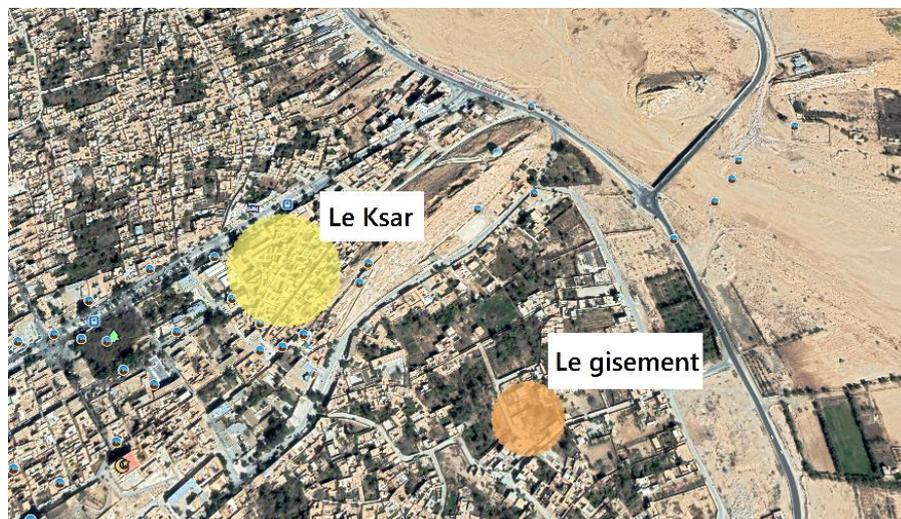


Figure 6.1 : Localisation du gisement de terre par rapport au Ksar.

Le prélèvement d'échantillon de terre (échantillon A) a été effectué sur une profondeur d'environ 0.7m, après l'enlèvement de la couche de terre végétale riche en matière organique. En effet, la terre prélevée a fait l'objet d'un examen visuel permettant l'estimation de la proportion de sable et de fine, ainsi, un essai de cigare a été effectué permettant d'estimer la proportion de l'argile ; un cigare de terre a été réalisé et écrasé avec le pouce (Figure 6.2), l'écrasement de cette dernière a permis de former des morceaux de 13cm, ce qui a montré que la terre est ,en principe, adéquate pour la production de l'adobe⁶².

⁶² La terre idéale est celle qui permet de réaliser des cirages de 5 à 15cm de longueur, au-delà elle est très argileuse [354].

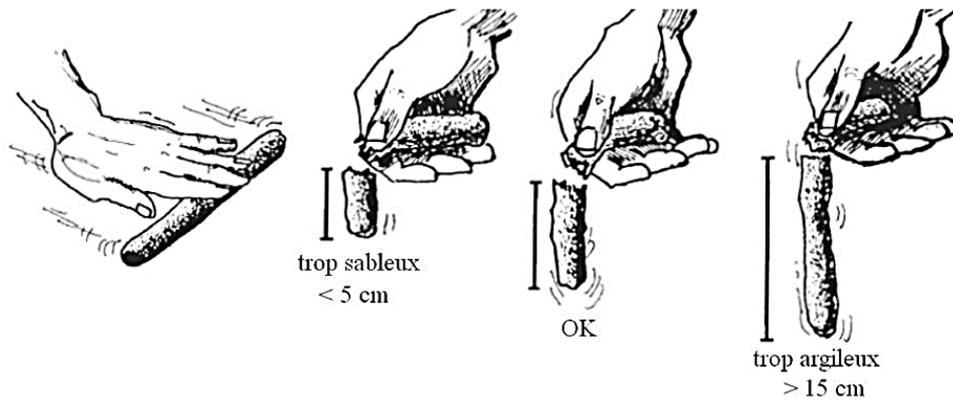


Figure 6.2 : Essai de cigare [354].

Par ailleurs, le deuxième échantillon de terre (échantillon B) est celui récupéré de l'une des maisons en ruine du Ksar. Cette maison se situe dans la partie haute du Ksar, sur le même îlot que la maison objet d'étude (Figure 6.3). Les adobes ont été rattrapés d'un mur effondré de cette dernière, à environ 1.8m de hauteur, afin d'éviter les terres salées.



Figure 6.3 : Lieu d'extraction des adobes à recycler.

L'adobe extrait de la maison ksourienne a fait l'objet d'un broyage et d'un tamisage à 4mm (Figure 6.4), pour éviter de se retrouver avec des cailloux. La réutilisation de cet adobe ruine permet, en outre, une économie du transport et un nettoyage du Ksar.

Ensuite, ces échantillons de terre ont été analysés dans le laboratoire de génie civil de l'université de Laghouat, dans l'unité de recherche « Matériaux, Procédés et Environnement » de l'université de Boumerdes, ainsi que dans le laboratoire du CETIM (Centre d'Étude et de services Technologiques de l'Industrie des matériaux de construction) à Boumerdes (Algérie), et le laboratoire des travaux publics

d'Ouargla (LTP sud), afin de les identifier et vérifier leur adéquation pour la production de la brique d'adobe.



Figure 6.4 : Broyage et tamisage des adobes.

1.1.1 Caractéristiques géotechniques et physiques

L'identification des caractéristiques géotechniques et physiques des échantillons de terre (A et B) est faite par quatre tests ; la densité absolue, l'analyse granulométrique, limites d'Atterberg, et l'essai au bleu de méthylène. Le mode préparatoire s'est fixé pour ces derniers de façon permettant d'effectuer une comparaison entre eux.

1.1.1.1 Masse volumique absolue (NF EN 196-6)

Cette caractéristique physique est identifiée par la méthode du Voluménoètre Le Chatelier. Cette dernière consiste à mesurer la masse volumique absolue d'un échantillon de sol en l'immergeant dans l'alcool (Éthanol) et en mesurant le volume déplacé (Figure 6.5). Les résultats de cet essai, présentés dans le tableau ci-après (Tableau 6.1), démontrent que les deux échantillons de terre prélevés ont des densités absolues similaires. Cette dernière est supérieure à l'optimum des terres moulées qui est limité entre 1200 et 2100kg/m³ [214].



Figure 6.5 : Méthode du Volumétre Le Chatelier.

Tableau 6.1 : Masse volumique absolue des échantillons de terre crue [Auteur].

Echantillon	Ps (kg/m ³)
A	2531
B	2567

1.1.1.2 Granulométrie (NF P94-057 / ISO 13320-1)

Cet essai permet de déterminer la taille et le pourcentage de différentes familles de grains constituant les échantillons représentatifs, en les faisant passer à travers des tamis aux maillages de plus en plus fins. L'analyse granulométrique par tamisage (permettant de déterminer la distribution des grains de dimension supérieure à 0.08mm) a été menée selon la norme NF P94-057 (Figure 6.6), tandis que l'analyse granulométrique par diffraction laser, qui permet de déterminer la distribution des particules fines (de dimension inférieure à 0.08mm) a été effectuée selon la norme ISO 13320-1, par le granulomètre laser Mastersizer 2000 (Figure 6.7) ; ce dernier permet de mesurer la distribution granulométrique des poudres (de 2 mm à 0.2nm). Il est à noter que le poids des échantillons de départ a été fixé à 3kg.



Figure 6.6 : Essai d'analyse granulométrique par tamisage.



Figure 6.7 : Granulomètre laser Mastersizer 2000.

Le graphique ci-après (Figure 6.8) présente les résultats obtenus suite aux essais de granulométrie par tamisage, effectués sur les deux échantillons de terre. Ces derniers permettent de déterminer la quantité de graviers et de sable grossier présente dans les échantillons ; ils révèlent que la terre prélevée du gisement (terre A) est constituée d'un pourcentage plus faible de gravier (5.66%) par rapport à celui trouvé dans la terre recyclée (terre B). Cependant, la quantité de sable grossier est équivalente dans les deux sols, elle est de l'ordre 36%.

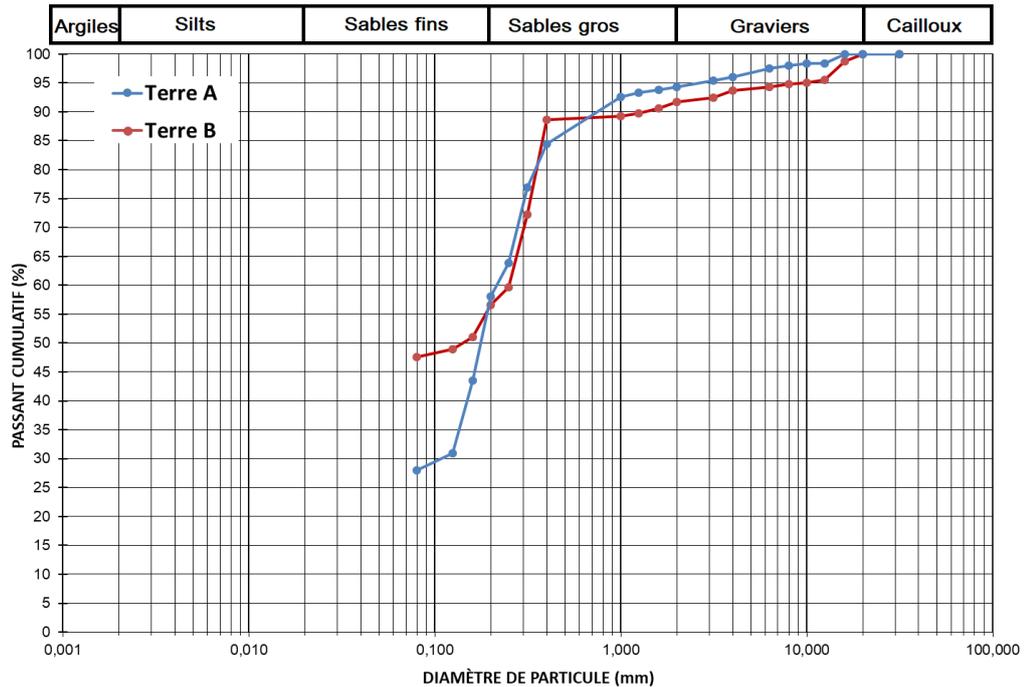


Figure 6.8 : Analyse granulométrique par tamisage des échantillons de terre.

Les résultats de l'analyse granulométrique par laser (présentés dans les figures 6.9 et 6.10), démontrent que la terre B contient une quantité d'argile plus importante que celle présente dans la terre A. Ainsi, les particules les plus grossières de terre A sont de diamètre $120.226\mu\text{m}$, tandis que les plus fines sont de $0.138\mu\text{m}$ de diamètre, la majorité des particules correspondent à un diamètre de $27.45\mu\text{m}$.

En revanche, les particules les plus grossières de terre B sont de diamètre $104.713\mu\text{m}$, tandis que les plus fines sont de $0.209\mu\text{m}$ de diamètre : la majorité des particules correspondent à un diamètre de $17.750\mu\text{m}$. Les diamètres correspondant aux pourcentages 10%, 50% et 90%, pour les deux échantillons de terre, sont indiqués dans le tableau 6.2.

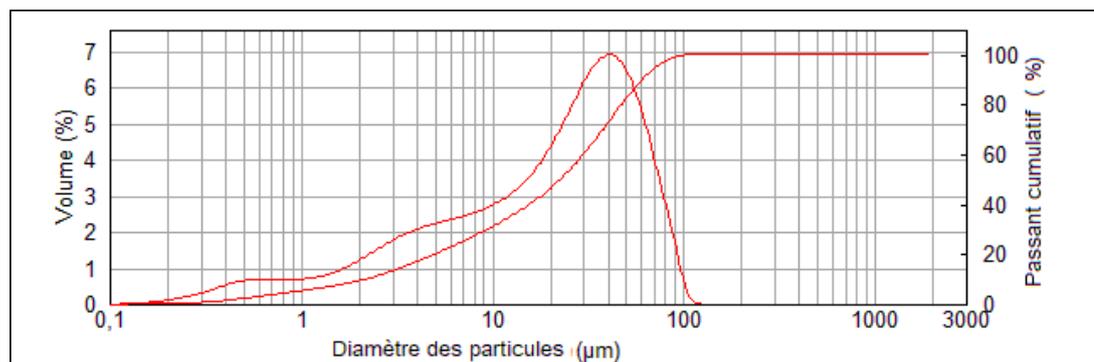


Figure 6.9 : Analyse granulométrique par laser de la terre A.

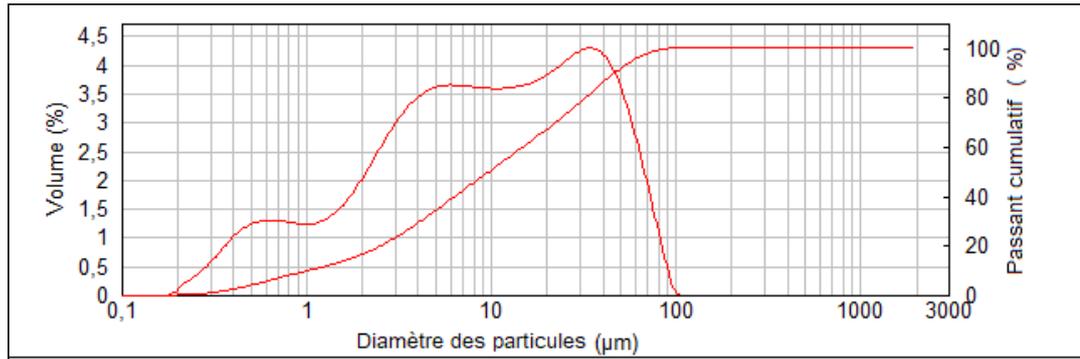


Figure 6.10 : Analyse granulométrique par laser de la terre B.

Tableau 6.2 : Distribution de la taille des grains de terre A et B.

Echantillon	d ₁₀ (µm)	d ₅₀ (µm)	d ₉₀ (µm)
A	2.179	22.727	61.019
B	1.041	9.777	46.982

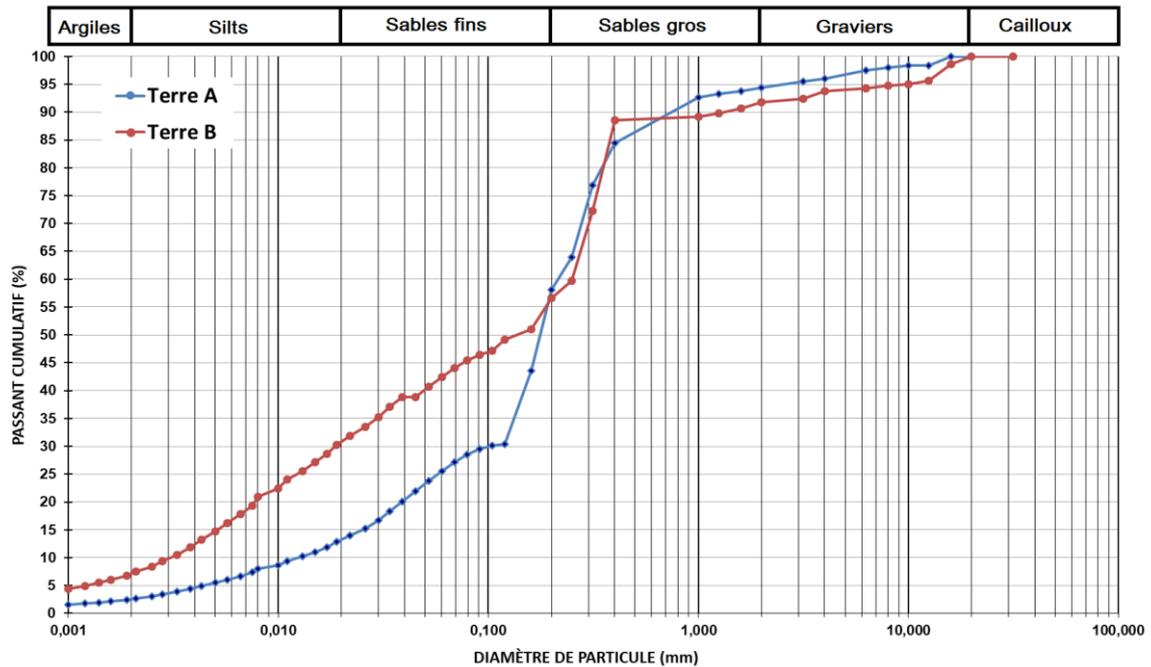


Figure 6.11 : Analyse granulométrique des deux échantillons de terre étudiés.

Les courbes d'assemblage des analyses granulométriques par tamisage et par laser, présentées dans la figure ci-dessus (Figure 6.11), démontrent que la terre prélevée du gisement est de type sableux, elle est constituée de 80.3% de sable (36.25% de sable grossier et 44.09% de sable fin), de 11.3% de limons, et de 2.7% d'argile (Tableau 6.3). Comparée aux limites normatives des proportions des composants d'adobe, cette terre est très riche en sable et très pauvre en argile [214]. En revanche, la terre provenant du recyclage d'adobe et de type sablo-limoneux, elle est constituée de 59% de sable (35.16% de sable gros et 24.73% de sable fin), et de 24.5% de silt : des pourcentages qui s'inscrivent dans les limites

d'adobe recommandées [214]. Cependant, cette terre est pauvre en argile, elle constitue 7.5% de cette dernière.

Tableau 6.3 : Pourcentages des différentes familles de grain dans les échantillons de terre.

Echantillon	Gravier (%)	Sable (%)	Limon (%)	Argile (%)
A	5.7	80.3	11.3	2.7
B	8.2	59.8	24.5	7.5

1.1.1.3 Activité argileuse

Comme expliqué dans la première partie de la thèse (Chap.3. §1.1.1), les argiles confèrent aux terres une capacité d'absorption de l'eau, jouant un rôle important dans la cohésion de ces dernières et entraînant parfois des phénomènes de gonflement, de retrait et de fissuration. L'évaluation des activités des argiles a été faite, dans cette étude, par deux essais ; les limites d'Atterberg et l'essai au bleu de méthylène.

a. Limites d'Atterberg (NF P94/051)

Cet essai permet de déterminer les limites de liquidité ainsi que les indices de plasticité des échantillons représentatifs (dont le diamètre est inférieur à 0.4mm). Il s'effectue selon la norme NF P94/051 en deux phases ; la recherche de la limite de liquidité (W_L) à l'aide de l'appareillage de Casagrande (Figure 6.12), puis la recherche de la limite de plasticité (W_P) par la formation de cigares de 3mm (Figure 6.12).



Figure 6.12 : Essai des limites d'Atterberg.

Les résultats obtenus de cet essai (présentés dans le tableau 6.4), révèlent que les terres analysées possèdent une faible activité argileuse, elles sont de type faiblement argileux, peu plastique, possédant un indice de plasticité inférieur à 5% et une limite de liquidité inférieure à 30% (Figure 6.13). Néanmoins l'activité

argileuse de la terre recyclée (B) est plus élevée que celle de la terre A, cela confirme davantage les résultats de l'analyse granulométrique.

Tableau 6.4 : Limites d'Atterberg des échantillons de terre.

Echantillon	Limite de liquidité W_L	Limite de plasticité W_P	Indice de plasticité I_p
A	23.33	19.67	3.66
B	20.52	15.56	4.96

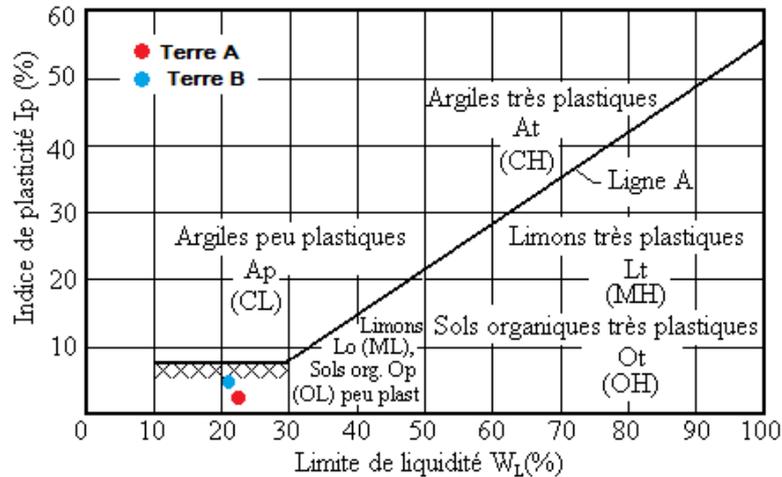


Figure 6.13 : Classification des échantillons de terre sur l'abaque de Casagrande.

b. Essai au bleu de méthylène (NF P 18-592)

L'essai au bleu au méthylène, permet de révéler la présence des fines de nature argileuse, qui ont la capacité d'absorber la solution et d'en déterminer la concentration. Il consiste à mesurer la quantité de solution de bleu de méthylène absorbée par 100g de fines de diamètre inférieur à 0.08mm, cet essai a été effectué selon la norme NF P18-592.

Les valeurs au bleu de Méthylènes obtenues pour les deux échantillons de terre (Tableau 6.5), permettent de constater que les terres analysées (A et B) sont de type limoneux sensible à l'eau, ces résultats viennent confirmer les résultats obtenus par les limites d'Atterberg.

Tableau 6.5 : Valeurs au bleu de Méthylène des terres analysées.

Echantillon	VBS	Classification du sol
A	1.28	Limoneux peu plastique et sensible à l'eau
B	1.83	Limoneux peu plastique et sensible à l'eau

1.1.2 Composition chimique et minéralogique

L'analyse de la composition chimique des échantillons a été effectuée au laboratoire du Centre d'Etudes et de Services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de construction (CETIM) à Boumerdes, à l'aide de la fluorescence X à dispersion de longueur d'onde. Les résultats de cette dernière (présentés dans le tableau 6.6) révèlent la présence d'un taux important de Dioxyde de Silicium (SiO_2) dans les deux terres analysées (72.86% pour la terre A, et 68.75% pour la terre B), ce taux s'explique par la présence des granulats essentiellement siliceux, notamment le sable. Le taux de ce composant chimique est plus élevé dans la terre A, due à la quantité importante de sable qu'elle contient.

Tableau 6.6 : Composition chimique des échantillons de terre (par Fluorescence X).

Echantillon	Teneurs %										
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	P_2O_5	TiO_2	PF
A	72.86	4.37	1.73	8.05	0.97	0.19	1.40	0.14	0.21	0.30	9.78
B	68,75	6,08	2,44	10,22	1,07	0,08	1,61	0,14	0,23	0,4	8,98

De plus, la teneur en Oxyde de Calcium (CaO) est plus faible dans la terre recyclée. L'Alumine (Al_2O_3) et l'Oxyde de Fer (Fe_2O_3) sont également présents dans ces échantillons, mais en proportion moindre. Les autres oxydes sont présents avec des teneurs très faibles. Il convient de noter que les pertes au feu sont relativement élevées (9.78% et 8.98%, pour le sol A et B, respectivement), cela permet de constater que le Calcium est principalement présent sous forme de Calcite.

En effet, la différence de teneur entre les deux fractions est très faible, cela permet de confirmer que la terre A était, au passé, la matière première utilisée pour la production des adobes. Ceci est également remarquable dans les résultats des essais précédents.

Une autre analyse chimique a été effectuée au laboratoire des travaux publics d'Ouargla (LTP Sud), selon la NF P15-461 (pour les insolubles), BS 1377 (pour les sulfates), NF P15-461 (pour les carbonates), et la méthode de MOHR pour les chlorures (Figure 6.14). Les résultats de cette dernière sont présentés dans le tableau ci-après (Tableau 6.7), ils démontrent que la terre A présente une teneur des insolubles plus grande que celle trouvée dans la terre provenant du recyclage

d'adobe et une teneur en Carbonate de Calcium (CaCO_3) plus faible que celle-ci. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par la fluorescence X.



Figure 6.14 : Méthodes traditionnelles d'analyse chimique.

Tableau 6.7 : Composition chimique des échantillons de terre (par titration).

Echantillon	Teneurs %						
	Insolubles	SO_3^{-2}	SO_4^{-2}	$\text{CaSO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	CaCO_3	Cl-	NaCl
A	69.59	0.36	0.43	1.93	16	0.38	0.063
B	63.15	0.38	0.46	2.08	20	0.254	0.416

La composition minéralogique des échantillons de terre a été déterminée, au laboratoire de l'unité de recherche Matériaux, Procédés et Environnement de l'université de Boumerdes, par la technique de diffraction X, qui s'effectue par la fluorescence X à dispersion d'énergie. Cette dernière permet de déterminer les phases minérales cristallisées présentes dans les échantillons.

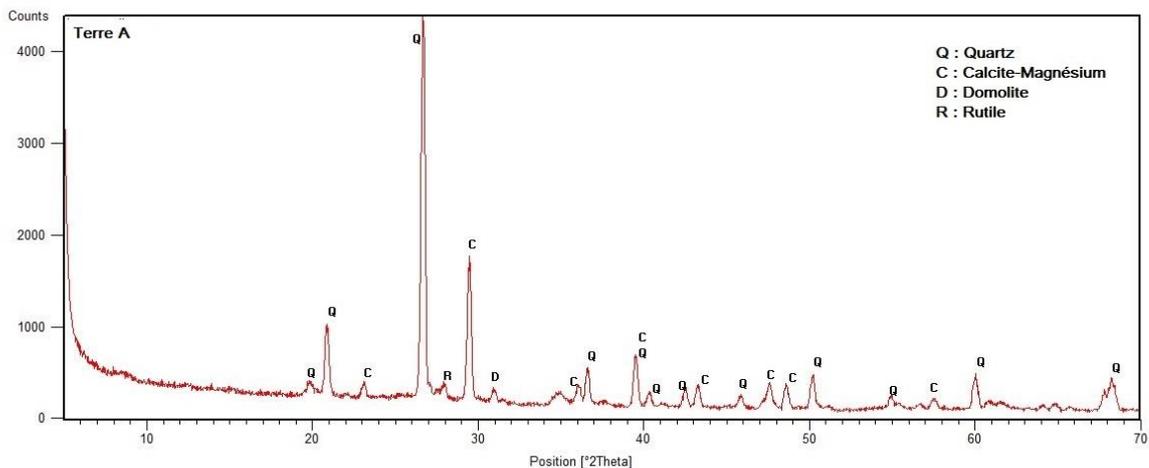


Figure 6.15 : Analyse minéralogique de la terre A.

La figure ci-dessus (Figure 6.15) présente la composition minéralogique la terre A, il ressort de cette dernière que le sol A contient un taux important de Quartz, ceci s'explique par le pourcentage élevé de sable constituant cette terre. De plus, il comprend une quantité appréciable de Calcite, sa partie argileuse est composée d'un faible pourcentage de Dolomite et de Rutile.

Également, le spectre DRX de la terre B, présenté dans la figure 6.16, montre que ce sol contient un pourcentage important de Quartz, et d'une proportion moindre de Calcite, cependant sa partie argileuse est présentée par une teneur faible d'Almandine et d'Illite.

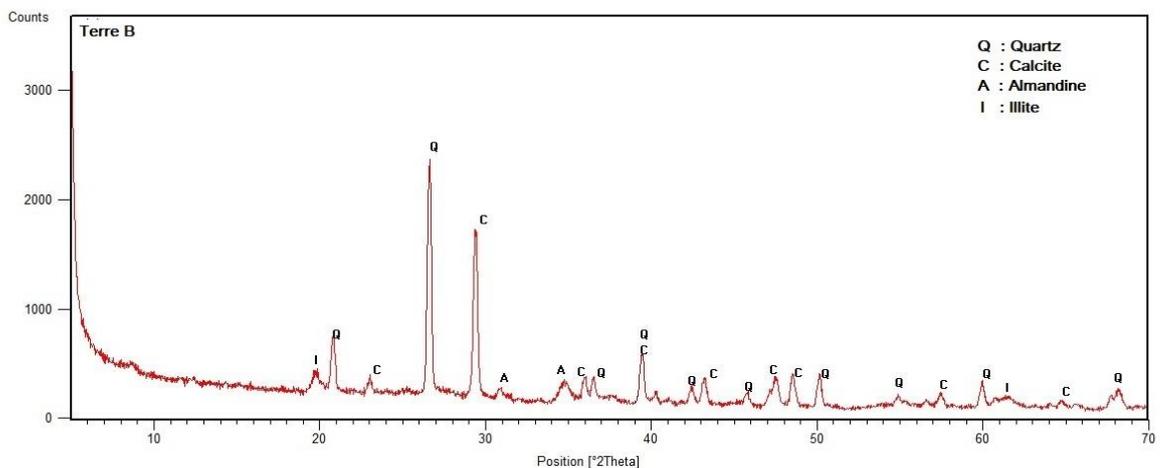


Figure 6.16 : Analyse minéralogique de la terre B.

1.2 L'argile

Dans le but de fixer le pourcentage d'argile dans les deux échantillons de terre à 7.5%, on a décidé de rajouter une quantité d'argile à la terre A, dans laquelle le pourcentage d'argile est égal à 2.7%. L'argile verte utilisée provient de la région de Boukhanfous qui occupe la partie nord de la ville (Figure 6.17), elle a été prélevée directement d'un gisement inexploité, sous forme de blocs qui ont été séchés à l'air libre, broyés, puis tamisés à 4mm (Figure 6.18), afin d'être caractérisés.

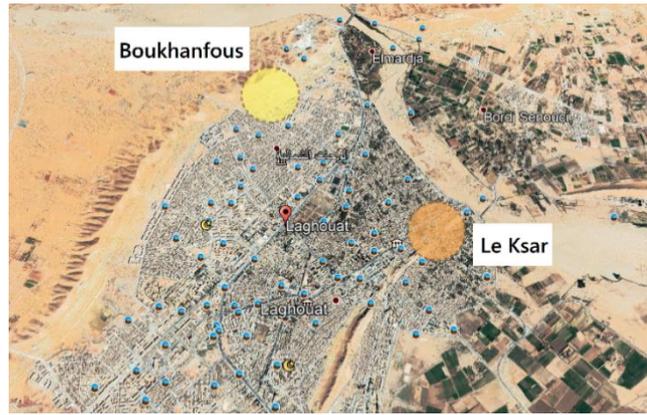


Figure 6.17 : Localisation du gisement naturel d'argile.



Figure 6.18 : Argile verte provenant du gisement de Boukhanfous.

1.2.1 Masse volumique absolue (NF EN 196-6)

La masse volumique absolue de l'argile prélevée a été déterminée par la méthode du Voluménomètre le Chatelier. Les résultats de cet essai ont démontré que l'argile analysée possède une densité élevée qui est égale à 2643kg/m^3 (Tableau 6.8) et qui s'inscrit dans les limites de la densité de l'Illite ($2700\text{-}2800\text{kg/m}^3$) et celle de Montmorillonite ($2000\text{-}2700\text{kg/m}^3$) [355].

Tableau 6.8 : Masse volumique absolue de l'argile verte.

Echantillon	Ps (kg/m^3)
Argile	2643

1.2.2 Granulométrie par diffraction laser (ISO 13320-1)

Les résultats de cet essai sont exprimés dans le graphique présenté ci-dessous (Figure 6.19), ils révèlent que les particules les plus grossières présentes dans l'argile sont de diamètre $91.201\mu\text{m}$, tandis que les plus fines sont de diamètre $0.182\mu\text{m}$. La majorité des particules correspondent à un diamètre de $20\mu\text{m}$. Il est à noter que cette analyse a également permis de déterminer la surface spécifique de

l'échantillon, cette dernière est égale à $1520\text{cm}^2/\text{g}$. Les diamètres des pourcentages 10%, 50% et 90%, pour cet échantillon, sont indiqués dans le tableau 6.9.

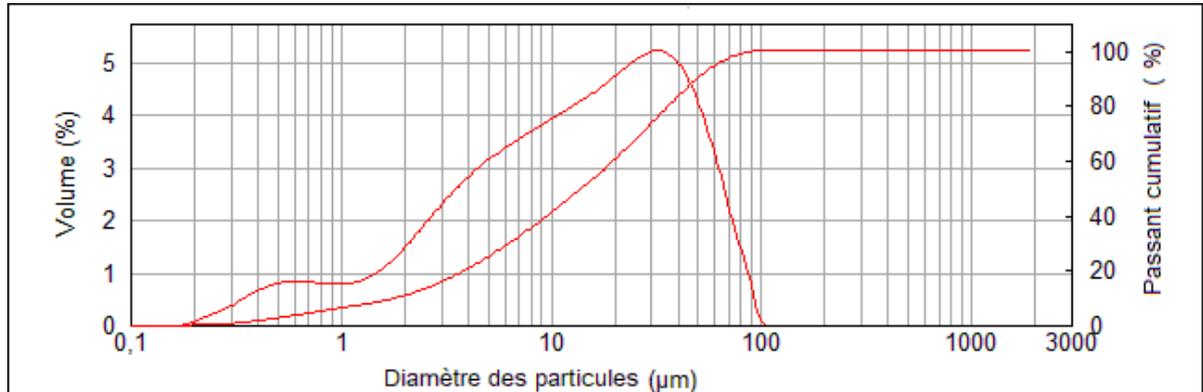


Figure 6.19 : Analyse granulométrique d'argile.

Tableau 6.9 : Distribution de la taille des grains d'argile.

Echantillon	d_{10} (μm)	d_{50} (μm)	d_{90} (μm)
Argile	1.838	14.18	50.314

1.2.3 Limites d'Atterberg (NF P94/051)

Les limites de plasticité et de liquidité de l'argile sont déterminées selon la méthode norme NF P94/051 (Figure 6.20). Les résultats de l'essai sont regroupés dans le tableau 6.10, ils démontrent que l'argile utilisée est très plastique (Figure 6.21), elle a tendance à être l'Illite [355].



Figure 6.20 : Essai des limites d'Atterberg d'argile.

Tableau 6.10 : Limites d'Atterberg d'argile.

Echantillon	Limite de liquidité W_L	Limite de plasticité W_p	Indice de plasticité I_p
Argile	74.97	22	52.97

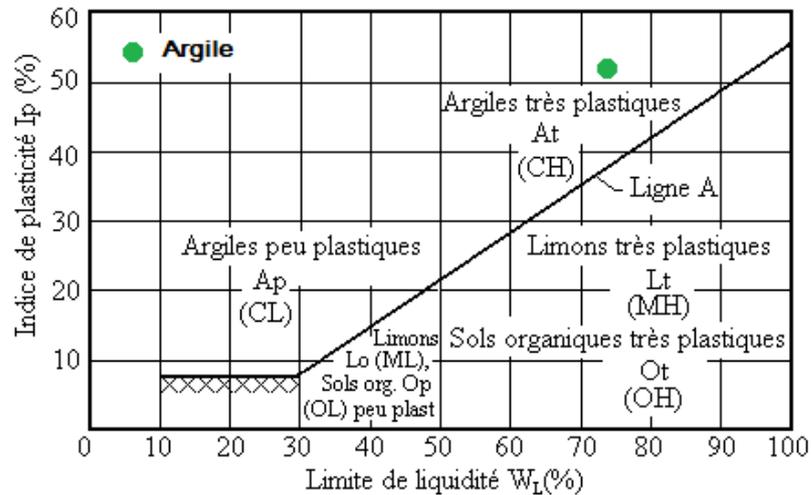


Figure 6.21 : Classification de l'argile sur l'abaque de Casagrande.

En comparant l'indice de plasticité obtenu avec les intervalles de potentiel de gonflement (Tableau 6.11), cette argile est très gonflante : une des caractéristiques d'illite.

Tableau 6.11 : Potentiel de gonflement en fonction de l'indice de plasticité [355].

I_p (%)	Potentiel de gonflement
< 12	Faible
12-25	Moyen
25-40	Elevé
>40	Très élevé

1.2.4 Essai au bleu de méthylène (NF EN 933-9)

L'essai au bleu de méthylène de l'argile révèle une valeur de 7.56 qui s'inscrit dans l'intervalle [6-8] de VBS (Tableau 6.12), confirmant ainsi la nature argileuse de l'échantillon.

Tableau 6.12 : Classification du sol en fonction de VBS [355].

VBS	Classification du sol
0-0.2	Sableux (insensible à l'eau)
0.2-2.5	Limoneux (peu plastique et sensible à l'eau)
2.5-6	Limono-argileux (de plasticité moyenne)
6-8	Argileux
>8	Très argileux

1.2.5 Composition chimique et minéralogique

La composition chimique de l'argile a été déterminée par titration, comme présenté précédemment, au LTP sud, Ouargla. Les résultats de cette dernière

(présentés dans le tableau 6.13) révèlent que l'argile verte présente une teneur élevée des insolubles et une teneur importante en Carbonate de Calcium (CaCO_3), en revanche, les autres oxydes sont présents avec des teneurs très faibles (moins de 1%).

Tableau 6.13 : Composition chimique de l'argile verte (par titration).

Echantillon	Teneurs %						
	Insolubles	SO_3^{-2}	SO_4^{-2}	$\text{CaSO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	CaCO_3	Cl-	NaCl
Argile	82.9	0.06	0.08	0.36	14	0.14	0.024

De plus, l'analyse chimique de l'argile par fluorescence X (effectuée au laboratoire CETIM, tableau 6.14), démontre la présence d'un taux important de dioxyde de silicium (SiO_2) dans ce sol, ainsi d'Alumine (Al_2O_3) et l'Oxyde de Fer (Fe_2O_3). Les autres oxydes sont présents avec des teneurs faibles (K_2O , CaO , MgO).

Tableau 6.14 : Composition chimique de l'argile verte (par fluorescence X).

Echantillon	Teneurs %										
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	P_2O_5	TiO_2	PF
Argile	55.45	15.86	9.03	2.02	2.21	0.65	4.14	0.21	0.09	0.84	9.53

Le résultat de l'analyse minéralogique effectuée par la fluorescence X à dispersion d'énergie révèle que ce sol contient un pourcentage élevé d'Illite, et des traces de Calcite, Kaolinite, Quartz et de Vermiculite (Figure 6.22).

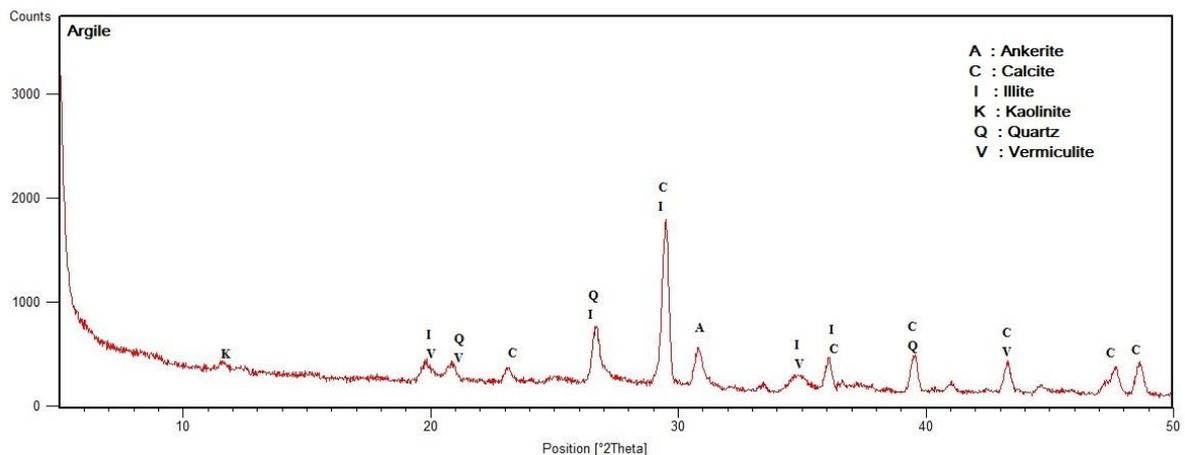


Figure 6.22 : Analyse minéralogique de l'argile.

1.3 La poudre de verre

La poudre de verre utilisée dans cette étude est issue de la récupération des déchets du verre blanc à vitrage. Cette dernière a été broyée au laboratoire de génie

civil de l'université de Laghouat à l'aide de l'appareil MICRO-DEVAL (Figure 6.23), afin d'être caractérisée, puis utilisée.

En effet, ce choix de verre est inspiré de l'étude d'IDIR [356], qui démontre que le verre blanc présente une grande activité pouzzolanique par rapport aux autres types de verre ; il peut réagir davantage en présence de l'eau avec la terre argileuse, qui favorise le durcissement du matériau à long terme.



Figure 6.23 : Broyage du verre blanc à vitrage.

1.3.1 Granulométrie par diffraction laser (ISO 13320-1)

L'analyse granulométrique de la poudre de verre (par laser), dont les résultats sont présentés dans le graphique ci-après (Figure 6.24), démontre que les particules les plus grossières présentes dans l'échantillon sont de diamètre 60.256 μm , tandis que les plus fines sont de diamètre 0.182 μm . La majorité des particules correspondent à un diamètre de 9.917 μm (Tableau 6.15).

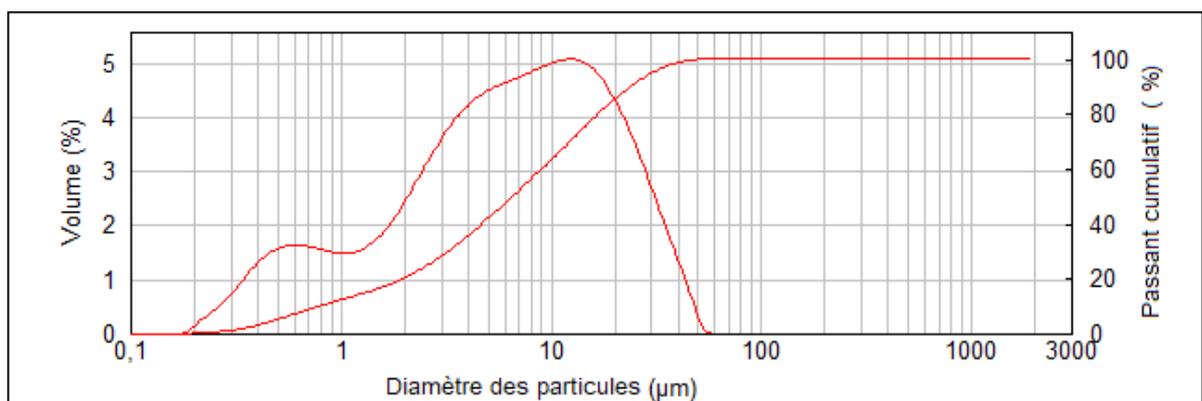


Figure 6.24 : Analyse granulométrique de la poudre verre.

Tableau 6.15 : Distribution de la taille des grains de la poudre de verre.

Echantillon	d_{10} (μm)	d_{50} (μm)	d_{90} (μm)
Poudre de verre	0.802	6.613	23.974

1.3.2 Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques du verre sont présentées dans le tableau 6.16. La masse volumique absolue est déterminée selon la norme NF EN 196-6, tandis que la surface spécifique est donnée par diffraction laser (lors de l'analyse granulométrique).

Tableau 6.16 : Caractéristiques physiques de la poudre de verre.

Echantillon	Masse volumique absolue (kg/m ³)	Surface spécifique (cm ² /g)
Poudre de verre	2400	2590

1.3.3 Composition chimique

L'analyse chimique (par fluorescence X) de la poudre de verre (Tableau 6.17) révèle une teneur importante de Silice (73.64 %) ; l'Oxyde de Sodium (Na₂O) et de Calcium (CaO) sont également présents en pourcentages élevés. Les autres oxydes sont présents avec des teneurs très faibles.

Tableau 6.17 : Composition chimique de la poudre de verre (par fluorescence X).

Echantillon	Teneurs %										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	PF
Poudre de verre	73.64	1.42	0.38	9.08	1.43	0.27	0.01	11.62	0.01	0.05	2.09

En revanche, l'analyse chimique par titration révèle un pourcentage très élevé des insolubles (Tableau 6.18), une teneur moindre en Sulfite de Calcium hémihydraté (CaSO₃.H₂O), ainsi que des traces d'autres oxydes (Sulfate, Chlore, et Chlorure de Sodium).

Tableau 6. 18 : Composition chimique de la poudre de verre (par titration).

Echantillon	Teneurs %						
	Insolubles	SO ₃ ⁻²	SO ₄ ⁻²	CaSO ₃ .H ₂ O	CaCO ₃	Cl-	NaCl
Poudre de verre	95.79	0.37	0.45	2.02	0	0.034	0.056

1.4 L'eau de gâchage

L'eau utilisée est une eau potable provenant du laboratoire de génie civil de l'université de Laghouat. L'analyse chimique de cette eau est présentée dans le

tableau ci-après (Tableau 6.19), cette dernière démontre que l'eau est dépourvue d'excès de Sulfate et d'Acides [357].

Tableau 6.19 : Composition chimique de l'eau [357].

Echantillon	Concentrations (mg/l)								
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	PH
Eau	156	51	86	6	151.7	17.5	480	100.7	7.5

2. Production de l'adobe

Après avoir assuré la caractérisation des différents composants de l'adobe, il devient possible de fabriquer les éprouvettes nécessaires pour cette étude à partir de ces derniers. Étant donné la facilité et la simplicité de fabrication de l'adobe, la confection de ce matériau est faite manuellement, selon la technique traditionnelle.

2.1 Matériel spécifique

Pour la confection des éprouvettes nécessaires pour les essais fixés par le programme expérimental de cette étude, un moule traditionnel en bois a été conçu, formant un volume de 10×10×8cm³. Cette forme régulière permet de faciliter le démoulage et le découpage du matériau, et d'assurer une certaine économie en matière première. Il est à noter que les dimensions des adobes ne sont pas fixes, elles peuvent être adaptées pour faciliter leur mise en œuvre (une brique d'adobe de 28×12×8cm peut peser jusqu'à 3.5kg), ou pour un besoin architectural spécifique, autrement dit, le choix des dimensions de moules d'adobe dépend essentiellement des besoins techniques et formels [354].

2.2 Mélanges

D'après GUILLAUD et HOUBEN [17], l'adobe est une technique qui se fait avec une terre à l'état plastique, dont la teneur en eau est limitée entre 15 et 30%, néanmoins, c'est la nature de la terre utilisée qui décide la teneur optimale pour les adobes. Dans cette étude, la détermination de la teneur en eau optimale, pour chaque mélange, a été guidée par un expert d'adobe (ancien bâtisseur), elle a été basée sur l'ajout graduel des faibles pourcentages d'eau (3%) jusqu'à obtenir la consistance d'une pâte mi-molle (technique traditionnelle). En effet, la teneur (en poids) en eau optimale a été fixée à 20% et à 18%, pour la terre A et B, respectivement. Cependant, cette teneur a été soumise à un réajustement selon le

pourcentage de la poudre de verre ajoutée au mélange, vu que cet additif minéral nécessite un surplus d'eau ; une remarque qui a été faite par l'expert de l'adobe .

Comme expliqué précédemment, la teneur en argile a été fixée, pour cette étude, à 7.5% . Pour cela un dosage de 5% (en poids) d'argile a été rajouté à la terre A. Ce choix a été motivé par l'idée de l'économie circulaire limitant le gaspillage et la surconsommation des matières premières.

Pour les teneurs en poudre de verre, le choix s'est basé sur les travaux de IZEMMOUREN [353], visant à déterminer l'effet des ajouts minéraux sur la durabilité de la brique de terre comprimée (vu qu'aucune étude n'est faite sur la stabilisation de l'adobe par cet ajout) ; celle-ci a démontré que l'ajout d'une teneur de 20% à 30% en poudre de verre permet d'obtenir une durabilité et une résistance à la compression supérieures. Cependant, la teneur en poudre de verre s'est limitée, dans notre étude, à 20% (Tableau 6.20), afin de préserver l'aspect naturel du matériau et d'étudier l'effet des faibles teneurs en cet additif sur le comportement thermo-mécanique et hygrométrique du matériau.

Tableau 6.20 : Compositions des mélanges étudiés.

Echantillon		Argile (%) (par rapport au poids de terre)	Poudre de verre (%) (par rapport au poids de mélange terre et argile)	Eau (%) (par rapport au poids total de mélange)
Terre A	1	5	0	20
	2	5	5	22
	3	5	10	22.5
	4	5	15	23
	5	5	20	24
Terre B	1	0	0	18
	2	0	5	18.5
	3	0	10	19
	4	0	15	19.5
	5	0	20	20

De plus, la conductivité thermique des matériaux de construction dépend fortement de leur porosité, donc l'ajout d'une teneur importante en poudre de verre peut influencer négativement sur cette propriété thermique, en réduisant la porosité du matériau. Notre étude s'est fixé le dosage, en poids, de cet ajout minéral entre 0 et 20%, le tableau ci-dessus (Tableau 6.20) présente la composition des différents mélanges employés.

Pour faciliter la lecture des résultats, les mélanges utilisés ont fait l'objet d'une codification ; le système de codification retenu est composé d'une série de lettres majuscules, présentant la première lettre de chaque élément du mélange. La codification des mélanges est présentée dans le tableau 6.21. Il convient de noter que l'ancien adobe du ksar (version 0 d'adobe) est inclus dans l'étude.

Tableau 6.21 : Codification des mélanges étudiés.

Code	Désignation
AEK	Adobe extrait du Ksar
AAPV	Adobe à base de terre A (prélevé du gisement) stabilisé par la poudre de verre
ABPV	Adobe à base de terre B (provenant du recyclage d'adobe) stabilisé par la poudre de verre

2.3 Processus de fabrication de l'adobe

Pour produire une quantité d'adobe suffisante, pour les essais fixés par le programme expérimental de cette étude, 25kg de terre A, 28kg de terre B, 1.25kg d'argile et 3.6kg de poudre de verre ont été employés. Ces composants ont été tamisés à 4 mm, afin d'éviter la présence des mottes de terre gênantes, et de faciliter l'opération du malaxage, tandis que la poudre de verre a été tamisée à 0.2mm. Ensuite, pour assurer les meilleures conditions de malaxage, ces derniers ont fait l'objet d'un séchage à l'étuve pendant 24h à 64°C.

Une fois prêts à l'emploi, ces matériaux ont été divisés en plusieurs quantités, selon la composition des mélanges et les teneurs en argile et en poudre de verre (Figure 6.25), chaque composition a été mélangée manuellement à sec, pendant trois minutes, afin d'assurer son homogénéité.



Figure 6.25 : Mélange des compositions à sec.

Par ailleurs, ces mélanges ont été mis sous forme d'un tas, sur un sol couvert d'un grand film en plastique, puis malaxés avec de l'eau (dont le volume total est égal à 12 litres) qui a été versée au milieu du tas formé. Le malaxage a été fait par la technique traditionnelle, avec les pieds (Figures 6.26) pendant dix minutes jusqu'à l'homogénéisation des pâtes. Une fois homogènes, ces composites ont été couverts avec un film plastique et laissés reposer pendant 24h, pour que toute l'argile ait gonflé et pour détruire les petites mottes de terre sèches.



Figure 6.26 : Malaxage traditionnel à petite échelle.

La dernière étape de fabrication de l'adobe consistait à remplir manuellement le moule en bois (huilé pour être imperméable), tout en essayant de tasser la matière dans les coins, sans la compacter. Puis, le surplus de matière est enlevé et le dessus de la brique est remouillé et lissé à la main (Figure 6.27). Le démoulage a été effectué en soulevant le moule verticalement, afin d'éviter la déformation de la brique. Le moule est lavé après chaque moulage, pour faciliter le démoulage.



Figure 6.27 : Identification des adobes.

L'opération de moulage/démoulage est faite directement sur l'air de séchage, pour éviter la déformation de l'adobe lors du transport. Les adobes fabriqués ont été identifiés par un bout de papier et laissés sécher (Figure 6.27).

2.4 Conditions de cure

L'endroit dans lequel les mélanges ont été préparés et les adobes ont été fabriqués, se trouve dans un sous-sol, où la température ambiante fluctuait, pendant la période de cure, entre 22 et 25°C. Le choix d'un tel endroit, a permis d'éviter les rayons solaires qui peuvent favoriser la fissuration du matériau (Figure 6.28). Il convient de noter que la fabrication des adobes a été effectuée en mois de mars, afin de garantir un séchage doux.

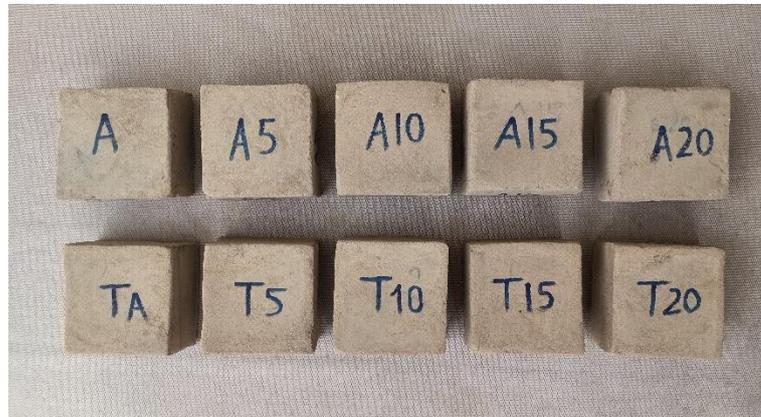


Figure 6.28 : Échantillons d'adobe après le séchage.

En effet, les briques fabriquées ont été retournées, lors du séchage, d'un quart de tour sur la tranche, pour leur assurer un séchage uniforme, évitant leur déformation et fissuration sous l'effet de séchage différentiel.

3. Caractérisation des adobes

En vue d'étudier l'effet de l'ajout minéral, notamment la poudre de verre, sur les propriétés thermomécaniques et hydriques de la brique d'adobe, trois essais de caractérisation sont programmés ; un essai thermique permettant de déterminer la conductivité thermique (λ) de l'adobe, ainsi sa diffusivité thermique (α) et sa chaleur spécifique (C_p), un essai mécanique servant à déterminer la résistance à la compression sèche (R_c) du matériau et un essai hydrique déterminant son absorption capillaire (C_b).

3.1 Propriétés thermiques

Les caractéristiques thermiques des échantillons d'adobe (conductivité thermique, diffusivité thermique et chaleur spécifique) sont déterminées par la méthode TPS (Transient Plane Source), selon la norme ISO 22007-2. Cette dernière consiste à mesurer l'évolution de la température entre deux éprouvettes (de 4x4x2cm) du matériau à caractériser (Figure 6.29), par une sonde à chocs thermiques produisant un échauffement de ces dernières (Figure 6.29). L'identification de la conductivité thermique se fait par le traitement mathématique intégré dans un logiciel fourni, ainsi la diffusivité thermique et la chaleur spécifique.



Figure 6.29 : Appareillage de la méthode de la Sande Plane Transitoire (TPS).

3.2 Résistance à la compression sèche (BS EN 772-1)

Cet essai a été mené selon la norme BS EN 772-1, qui consiste à soumettre un bloc de 5x5x5cm à une compression simple jusqu'à la rupture (Figure 6.30), la vitesse de chargement considérée est de 12.5kg/s [214]. Pour effectuer cet essai, les adobes (âgés de 60 jours) ont été découpés par l'appareil de cisaillement (Figure

6.30), et séchés à l'étuve pendant 24h à 64°C. La résistance à la compression est donnée par la formule suivante [353] :

$$R_c = 10 \times \frac{F}{S} \quad (\text{Eq 6.1})$$

Où :

- **R_c** : Résistance à la compression du matériau, MPa
- **F** : Charge maximale supporté par le matériau, kN
- **S** : Surface moyenne des faces d'essai, cm²



Figure 6.30 : Essai d'écrasement des éprouvettes d'adobe.

3.3 Absorption d'eau capillaire (NF XP 13-901)

Cet essai permet de décrire l'aptitude du matériau à absorber de l'eau par capillarité, tout en déterminant la quantité d'eau absorbée au bout d'une durée de temps (10 minutes) et le coefficient d'absorption capillaire. D'après la norme NF XP 13-901, l'essai consiste à tremper une face lisse du matériau dans 5mm d'eau, en le posant sur des cales, le niveau de l'eau doit être maintenu constant (Figure 6.31) [214]. Le coefficient de l'absorption de l'eau est donné par la formule ci-après [353].

$$C_b = \frac{100 \times (M_h - M_d)}{S \sqrt{t}} \quad (\text{Eq 6.2})$$

Où :

- **C_b** : Coefficient d'absorption capillaire, g/cm².√mn

- $M_h - M_d$: Masse d'eau absorbée par le bloc d'adobe, g
- S : Surface de la face immergée du bloc, cm^2
- t : Durée d'immersion du bloc, mn

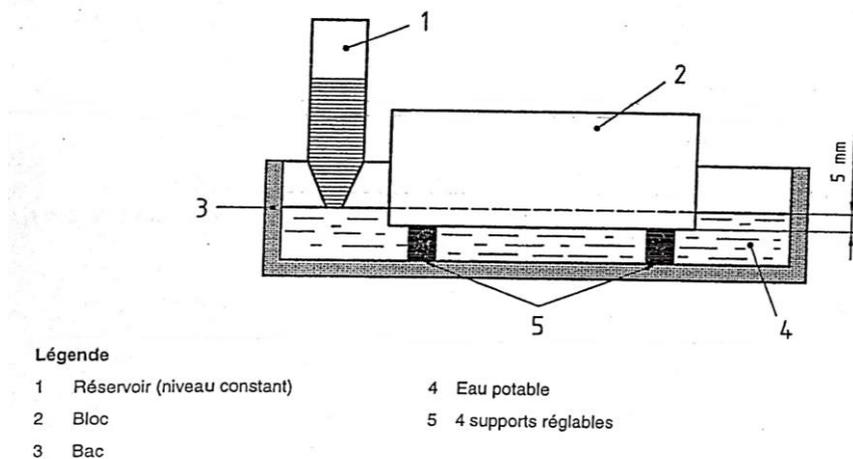


Figure 6.31 : Principe de l'essai d'absorption capillaire [353].

La pose directe du bloc d'adobe dans l'eau peut lui causer une désagrégation directe (les matériaux terres ne résistent pas à l'absorption de l'eau), pour cela on a choisi de surélever la brique d'adobe et la poser sur un socle de sable en contact direct avec le bain d'eau. L'eau monte et s'infiltré progressivement dans le matériau par capillarité, permettant l'augmentation de sa masse sans désagrégation. Le coefficient de l'absorption capillaire est calculé selon la formule précédente (Eq 6.2).

4. Résultats et discussion

Afin d'étudier l'influence de l'ajout minéral sur les caractéristiques thermomécaniques et hydriques des adobes, quatre dosages en poudre de verre ont été considérés (5, 10, 15 et 20%). Les briques ont été fabriquées manuellement (selon la technique traditionnelle) et conservées dans une chambre à température ambiante de 22 à 25°C, pendant 60 jours. Les résultats de caractérisation de ces briques sont présentés est discutés par la suite.

4.1 Effet de la poudre de verre sur les propriétés thermiques

4.1.1 Conductivité thermique (λ)

L'effet de la poudre de verre sur la conductivité thermique de l'adobe est présenté dans la figure 6.32. La lecture des résultats révèle que la conductivité thermique diminue légèrement avec l'augmentation du dosage de la poudre de

verre, jusqu'à 15% ; au-delà de cette teneur, la conductivité thermique commence à augmenter. En effet, la conductivité thermique d'AAPV a diminué de 1.00 à 0.84W/m.K tandis que celle d'ABPV a diminué de 0.94 à 0.80W/m.K, le taux d'évolution est estimé à 15%, pour les deux échantillons.

En outre, la conductivité thermique de l'AAPV et l'ABPV, à une teneur nulle de poudre de verre, est supérieure à celle de l'ancien adobe (AEK), avec un faible écart de 0.13 pour l'AAPV qui peut être traduit par la différence entre la granulométrie des deux échantillons, et de 0.05 pour l'ABPV. De plus, la conductivité thermique de l'AAPV est supérieure à celle de l'ABPV, ceci est dû à la différence de la quantité de sable entre les deux terres (A et B), selon l'analyse granulométrique de ces dernières : le taux de sable dans la terre A (80,9%) est supérieur à celui dans la terre B (59,8%). Le sable fin rend, notamment, le matériau plus conducteur à la chaleur, en réduisant sa porosité ; le taux de sable fin est plus élevé dans l'AAPV, il est de l'ordre de 44%.

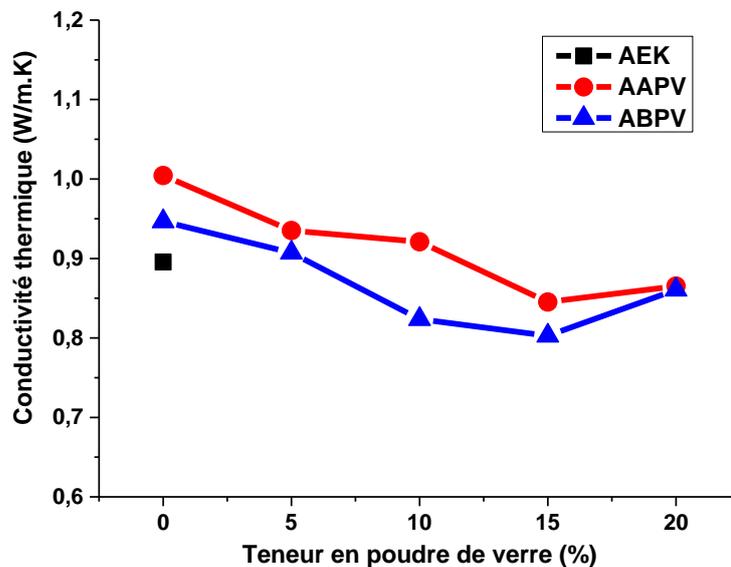


Figure 6.32 : Influence des différentes teneurs en poudre de verre sur la conductivité thermique de l'adobe.

Enfin, la diminution de la conductivité thermique des adobes en mesure que leurs teneurs en poudre de verre augmentent, peut être justifiée par les propriétés thermiques de cet ajout, notamment par sa faible conductivité thermique. Néanmoins, une teneur élevée en cette addition (au-delà de 15%) peut entraîner

une réduction de la porosité de l'adobe, et par conséquent, une augmentation de sa conductivité thermique.

4.1.2 Chaleur spécifique (C_p)

La figure 6.33 représente l'influence du taux de la poudre de verre sur la capacité thermique volumique des adobes. Les résultats obtenus permettent de constater que la chaleur spécifique d'AAPV et d'ABPV diminue avec l'augmentation de la quantité de la poudre de verre, les meilleures capacités thermiques sont obtenues à une teneur de 15%, dont une valeur respective égale à 0.937 et 0.787Mj.m³.K est atteinte dans l'AAPV et l'ABPV ; le taux de diminution est estimé à 18.5% et 27.13%. Au-delà de cette teneur (15%), la capacité thermique volumique des adobes commence à augmenter de nouveau : la teneur 20% en poudre de verre a permis d'augmenter la conductivité thermique à 0.86 W/m.k, pour l'AAPV comme pour l'ABPV.

En effet, l'interprétation des résultats obtenus obéit aux mêmes critères d'évaluations cités auparavant (conductivité thermique). La chaleur spécifique de l'AAPV et l'ABPV, à une teneur nulle en poudre de verre (1.15Mj.m³.K et 1.08Mj.m³.K, respectivement), est supérieure à celle de l'adobe extrait du Ksar (AEK) qui est de l'ordre de 0.987Mj.m³.K. L'AAPV présente les capacités thermiques massiques les plus élevées, ceci est dû à sa teneur élevée en sable fin.

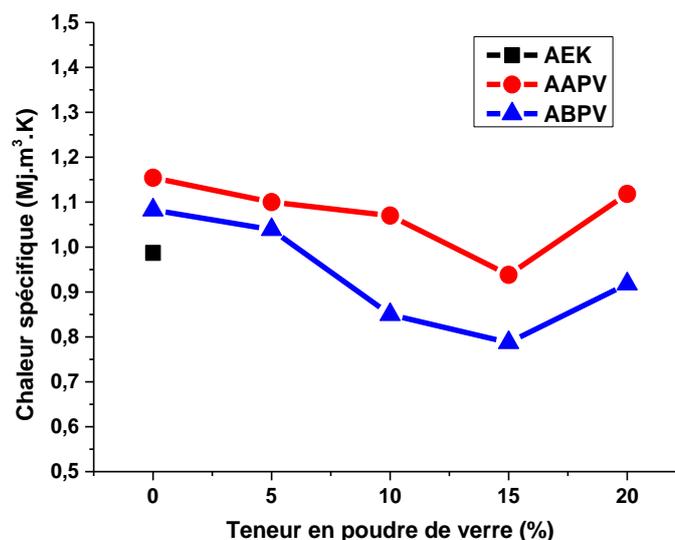


Figure 6.33 : Influence des différentes teneurs en poudre de verre sur la chaleur spécifique de l'adobe.

4.1.3 Diffusivité thermique (α)

À la différence des autres propriétés thermiques, et comme présenté dans la l'histogramme ci-après (Figure 6.34), la diffusivité thermique des adobes augmente d'une façon non remarquable, avec l'augmentation de la teneur en poudre de verre jusqu'à 15%. Au-delà de cette teneur, la diffusivité commence à diminuer. Les valeurs maximales obtenues sont respectivement 0.901mm²/s et 1.019mm²/s, pour l'AAPV et l'ABPV, tandis que celle minimale sont de l'ordre de 0.870mm²/s. L'interprétation des résultats de la diffusivité thermique obtenus obéit aux mêmes critères d'évaluations cités auparavant ; la réduction de la conductivité et la capacité thermique entraîne une augmentation de la diffusivité thermique des adobes.

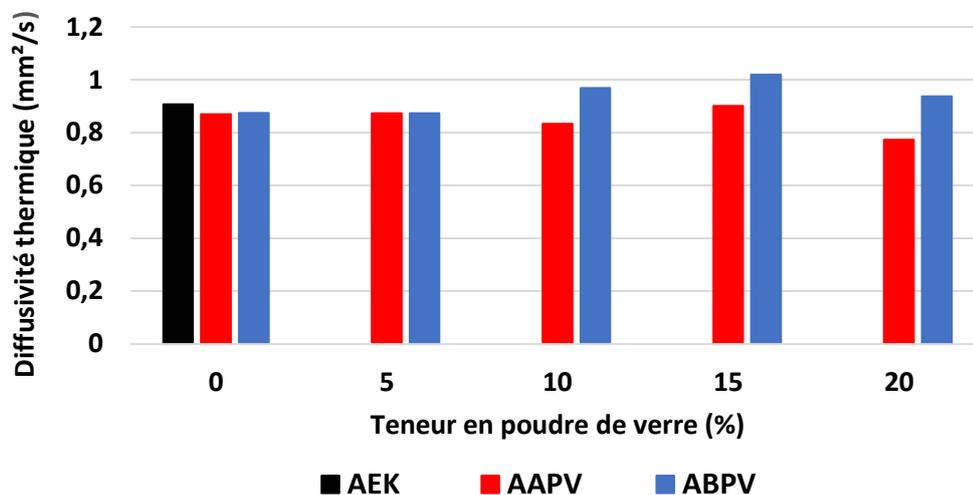


Figure 6.34 : Influence des différentes teneurs en poudre de verre sur la diffusivité thermique de l'adobe.

4.2 Effet de la poudre de verre sur la résistance à la compression (R_c)

La figure 6.35 illustre l'évolution de la résistance à la compression en fonction de la teneur en poudre de verre, la lecture de cette dernière démontre que l'ancien adobe (AEK) présente la plus faible des résistances (1.10MPa) en comparaison avec l'AAPV et l'ABPV (2.1MPa et 1.41MPa) à une teneur en verre nulle. La résistance de ces derniers augmente en fonction de dosage de PV jusqu'à 5%, cette teneur donne les meilleures résistances ; 2.88MPa et 2.51MPa pour l'AAPV et l'ABPV, respectivement (avec une évolution de 137% et 176%). À partir de cette teneur, la résistance en compression diminue jusqu'à atteindre une valeur minimale

à 15%, qui est de l'ordre de 2.73MPa pour l'AAPV et de 1.79MPa pour l'ABPV. Au-delà de ce taux, la résistance commence à augmenter.

L'augmentation de la résistance en compression de l'AAPV et l'ABPV, avec l'augmentation de la teneur en poudre de verre, peut être expliquée par l'effet pouzzolanique résultant de la réaction de la Silice (SiO_2) avec l'oxyde de Calcium (CaO) en présence de l'eau. Selon IDIR [356], cet effet est favorisé davantage par la présence du sable ; notons que la substitution du sable par la poudre de verre donne, également, de meilleures résistances, dans le cas des bétons. Cependant, cette activité pouzzolanique est limitée à 5% de teneur en poudre de verre, et ce à cause de l'insuffisance de la quantité d'oxyde de calcium (CaO) : la quantité importante de poudre de verre n'a pas suffisamment d'oxyde de calcium pour l'activité pouzzolanique [353]. Au-delà de 15%, c'est la porosité du matériau qui contribue à l'augmentation de sa résistance : une teneur importante en poudre de verre permet de réduire cette dernière et par conséquent de renforcer mécaniquement le matériau. Ces données viennent confirmer les résultats de conductivité thermique.

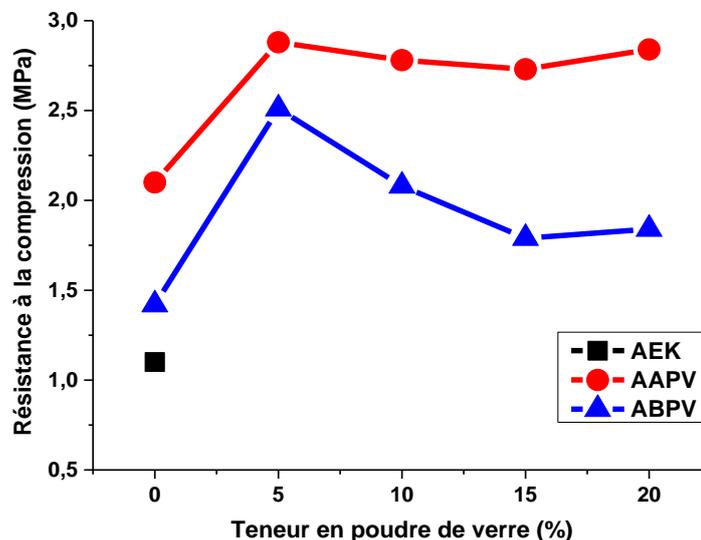


Figure 6.35 : Influence des différentes teneurs en poudre de verre sur la résistance à la compression de l'adobe.

De plus, le taux d'évolution élevé marqué dans l'ABPV (176%), peut être traduit par sa teneur en oxyde de Calcium (CaO) qui est, d'après les résultats des analyses chimiques, plus élevée que celle de l'AAPV (10.22% et 8.05%).

En outre, les résistances à la compression des AAPV sont supérieures à celles des ABPV, ceci est dû, comme expliqué auparavant, à la quantité de sable qui varie d'une terre à une autre (A et B) ; le sable rend le matériau plus résistant aux forces compressives, en réduisant sa porosité. Ainsi, la résistance de l'adobe AEK augmente après son recyclage (par l'ajout de l'eau) de 1.14MPa à 1.42MPa, cette augmentation peut être justifiée par la bonne dispersion des particules d'argile au sein de la matrice assurant une meilleure cohésion du matériau.

4.3 Effet de la poudre de verre sur l'absorption capillaire (C_b)

Les résultats de coefficient d'absorption capillaire en fonction de la teneur en poudre de verre (des adobes âgés de 60 jours) sont illustrés par l'histogramme ci-dessous (Figure 6.36). Ils montrent bien l'effet favorable de cet ajout minéral sur la propriété hydrique des briques : le coefficient d'absorption capillaire de ce matériau diminue en mesure que sa teneur en poudre de verre augmente. Une diminution maximale de l'ordre de 33.4% est marquée à une teneur de 5%, dans l'ABPV (de 9.49 à 6.32g/cm².mn), tandis que pour l'AAPV, elle est égale à 14.3% (de 8.86 à 7.59g/cm².mn). Ceci peut être traduit par la réaction pouzzolanique accélérée dans les deux échantillons d'adobe [356, 353].

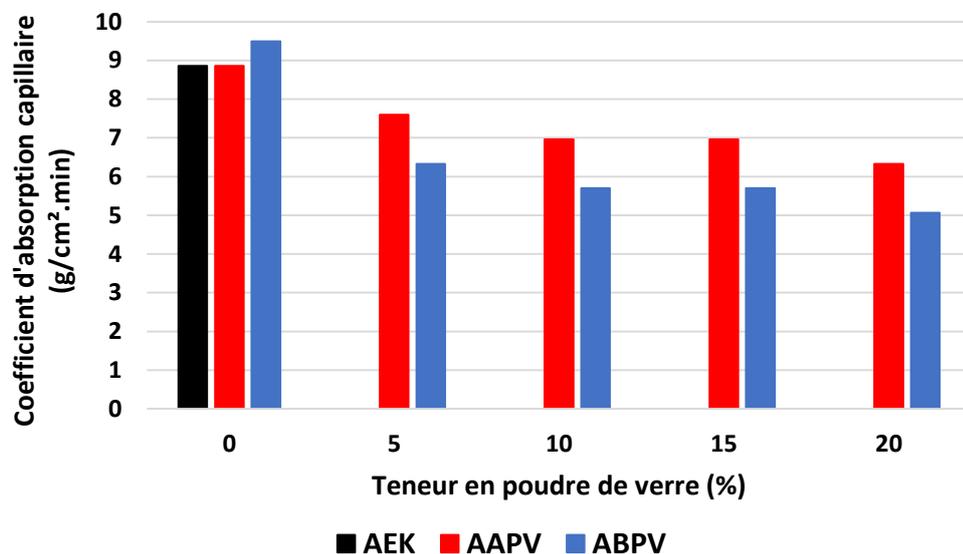


Figure 6.36 : Influence des différentes teneurs en poudre de verre sur le coefficient de l'absorption capillaire de l'adobe.

Au-delà d'une teneur en poudre de verre de 5%, le coefficient d'absorption capillaire des briques décroît légèrement jusqu'à atteindre une valeur minimale à 20%, qui est égale à 6.32 et 5.06 g/cm².mn, pour l'AAPV et l'ABPV, respectivement.

La différence marquée entre ces échantillons peut être expliquée par la granulométrie de leurs matières premières (terre A et terre B) ; le pourcentage des grains fins est plus élevé dans l'AAPV. Ainsi, elle peut être traduite par la nature des argiles vertes rajoutées à cette terre (A) ; l'Illite est la plus absorbante des argiles [358].

5. Discussion

Selon le rapport d'actualisation des connaissances sur l'architecture de terre [214], publié après 22 ans de la publication de "*Traité de construction en terre*" [17], l'un des ouvrages pionniers de techniques de construction en terre, l'adobe est un matériau caractérisé par une conductivité thermique limitée entre 0.3 et 1.5W/m.k, une capacité thermique volumique allant de 720 à 2100kj/m³.K et une résistance en compression de 0.4 à 5.0MPa.

En comparaison avec ces normes, l'adobe de Ksar Zgag El-Hadjadj (AEK) présente de bonnes qualités thermiques ($\lambda = 0.90\text{W/m.K}$ et $C_p = 987\text{kJ/m}^3.\text{K}$) qui s'inscrivent dans l'intervalle de conductivité thermique et de chaleur spécifique considérée pour les briques de terre crue. Cela a déjà été approuvé dans le chapitre précédent par l'évaluation du comportement thermique d'une maison ksourienne construite par ce matériau. En revanche, cette brique a de mauvaises qualités mécaniques, la résistance en compression de cette dernière est de l'ordre de 1.14MPa ; une valeur qui, selon GUILLAUD et HOUBEN [17], ne s'inscrit pas dans l'intervalle de résistance en compression destinée à l'édification des ouvrages d'un à deux niveaux (20 à 25MPa).

La stabilisation de cet adobe (qui a fait l'objet d'un recyclage) avec une teneur de 15% en poudre de verre, a permis de réduire sa conductivité thermique jusqu'à 0.80W/m.K. Cette teneur a également entraîné une diminution de conductivité thermique du deuxième échantillon d'adobe, issu d'une terre prélevée du gisement, de 1.00 à 0.84W/m.K. En comparant ces résultats, avec ceux obtenus par l'ajout d'autres types de minéraux, la poudre de verre a donné de meilleures conductivités thermiques ; à titre d'exemple, l'ajout de 10% de polymère renforcé aux fibres de verre a permis de diminuer la conductivité thermique des adobes de 0.86 à 0.68W/m.K [332]. Cependant, l'ajout de 12% de ciment a conduit à l'augmentation de cette propriété thermique de 1.14 à 1.4W/m.K [21] et de 0.79 à 1.10W/m.K [335].

Ainsi, la stabilisation de l'adobe avec 12% de chaux a engendré une augmentation de la conductivité thermique de ce dernier de 0.79 à 0.97W/m.K [335].

En outre, en termes de résistance en compression, l'ajout de 5% de poudre de verre a permis l'augmentation de cette propriété mécanique de 1.14 à 2.51MPa, pour l'adobe recyclé et de 2.10 à 2.88MPa, pour le nouveau échantillon d'adobe ; des résultats qui s'inscrivent dans l'intervalle de résistance en compression indiqué auparavant. Comparés aux résultats des études antérieures cherchant à étudier l'influence des ajouts minéraux sur la résistance à la compression des adobes, les résultats obtenus dans cette étude semblent encourageants.

Une teneur de 10% en polymère renforcé aux fibres de verre a entraîné une augmentation de résistance d'adobe de 1.41 à 2.05MPa [332], 12% de chaux a amélioré la résistance des briques de 2.2 à 3.2MPa [23]. De plus, une teneur de 25% en gypse et en Phosphogypse a permis d'augmenter la résistance du matériau respectivement de 1 à 4.25 et 4.5MPa [330], une teneur de 20% en poudre de marbre a permis une faible augmentation de résistance en compression de 1.09 à 1.76MPa [331]. Contrairement, l'ajout d'une teneur de 10% en ciment blanc, en chaux industrielle et en chaux artisanale a permis de réduire la résistance de la brique respectivement de 1.9 à 1.85, 1.05 et 0.6MPa [328].

Quant à l'absorption capillaire des adobes, l'ajout de 20% de poudre de verre a entraîné une diminution importante de cette propriété hydrique ; de 8.86 à 6.32g/cm².mn, dans le nouvel adobe (AAPV) et de 9.49 à 5.03g/cm².mn, dans l'adobe recyclé (ABPV). Comparés aux résultats obtenus de la stabilisation des adobes par les ajouts minéraux, la poudre de verre a permis de meilleurs résultats ; l'ajout de 10% de polymère renforcé aux fibres de verre a permis d'augmenter le coefficient d'absorption des adobes de 9.62 à 15.6% [332], l'ajout de 15% de chaux a entraîné une réduction à cette propriété de 15.7 à 10.2% [329], ainsi, une teneur de 10% en ciment l'a réduit de 15.7 à 12.5% [329].

Enfin, la stabilisation de l'adobe, un matériau 100% naturel, aux minéraux est un procédé qui peut remettre en question le caractère écologique du matériau, dont une étude d'impact environnemental s'avère indispensable ; sur ce, la partie suivante de chapitre est consacrée à l'étude de l'impact environnemental des adobes stabilisés à la poudre de verre.

6. Impact environnemental de l'adobe stabilisé à la poudre de verre

L'estimation des impacts environnementaux des adobes stabilisés à la poudre de verre est faite à l'aide de l'outil SimaPro version 9.1.0.7. Ce dernier est développé par l'entreprise Pré Consultant sur la base de EcoInvent, ELCD, USLCI (des bases de données de matériaux et de procédés de fabrication) et plusieurs d'autres bases internationalement reconnues (Figure 6.37.a) [359], il permet d'effectuer un bilan de matière, d'énergie, de rejets et de déchets d'un produit, sur une phase ou sur l'ensemble de son cycle de vie, en incluant plusieurs méthodes d'évaluation de l'impact environnemental ; ReCiPe, Impact 2002+, Eco-Indicator 99, BEE, etc. (Figure 6.37.b).

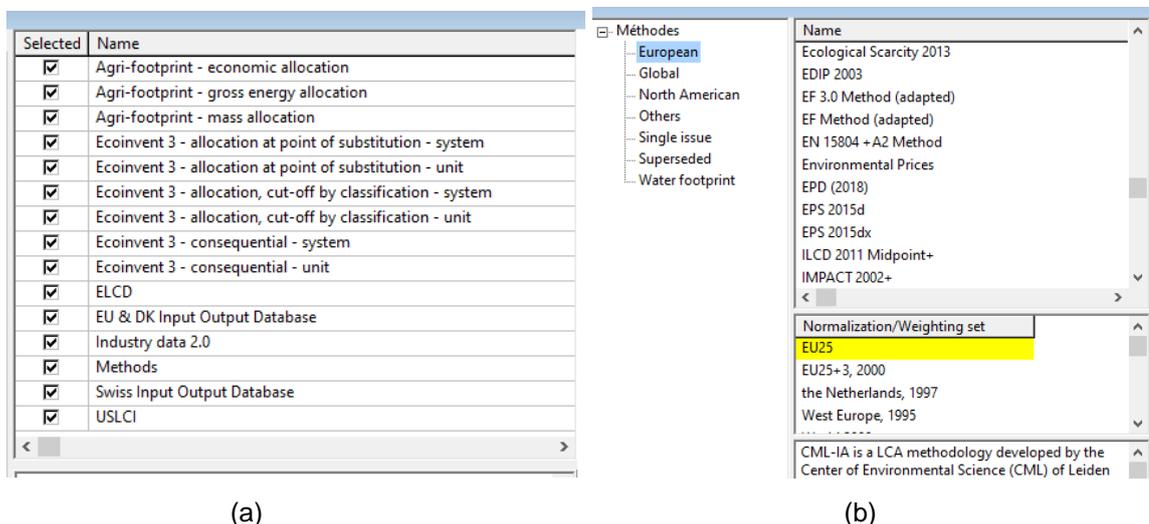


Figure 6.37 : Concepts de l'outil SimaPro. (a) : Bases des données, (b) : Méthodes d'évaluation.

Afin d'établir une comparaison entre une teneur de 5% et une autre de 20% en ajout minéral, une analyse cycle de vie partielle a été effectuée par cet outil, selon la norme ISO14040 [306], en considérant une seule étape de cycle de vie du matériau ; la production. L'estimation des impacts est essentiellement basée sur la masse du matériau à produire, le type et la masse de ses matières premières, et leurs procédés d'extraction (recyclage, nature, etc.). Elle comporte quatre étapes : la détermination des objectifs d'étude, l'inventaire du cycle de vie qui consiste à définir les données des matières et d'énergies entrantes et sortantes, l'évaluation des impacts environnementaux (choix de méthode), et enfin l'interprétation des résultats (Figure 6.38).

En effet, l'inventaire du cycle de vie présente l'étape la plus essentielle de l'analyse, dont le poids de matériau, l'extraction et la transformation de ses matières premières ainsi que leurs masses et leurs caractéristiques, jouent un rôle primordial dans la détermination des impacts environnementaux.

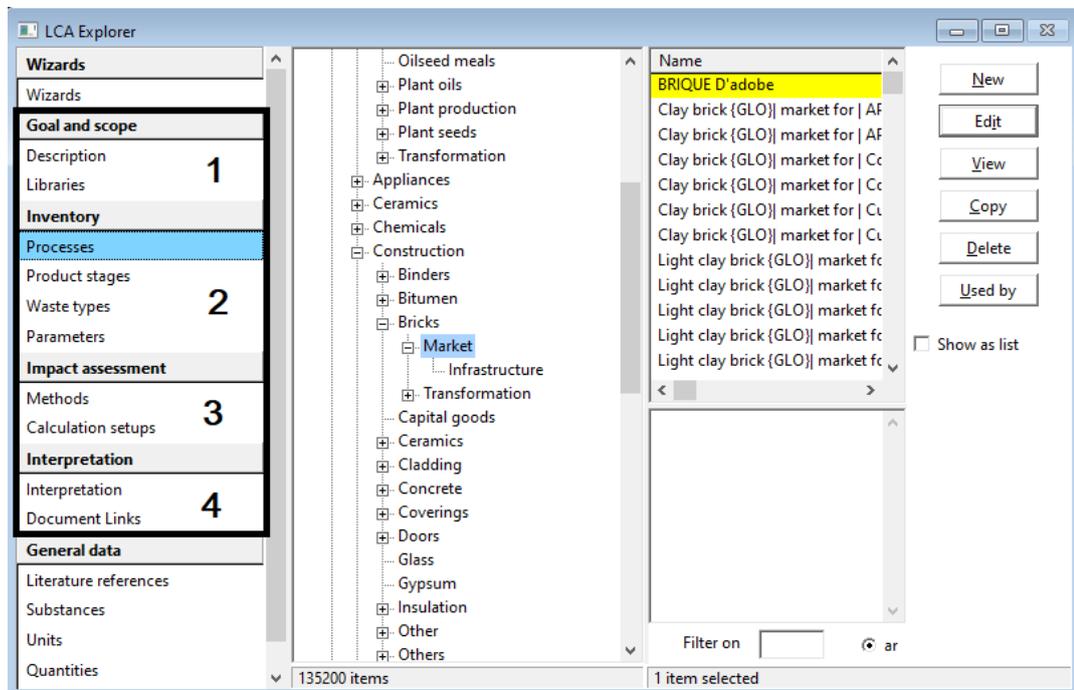


Figure 6.38 : Étapes d'ACV de l'outil SimaPro.

6.1 Modélisation avec SimaPro

Dans cette étude, l'estimation est faite sur deux échantillons d'AABP, avec différents teneurs en poudre de verre (5 et 20%) et en eau ; le premier mélange constitue 90kg de terre issue de recyclage d'adobe en ruine, 4.5kg de poudre de verre (post-consommation) et 17.5 litres d'eau provenant d'Oued M'zi (Figure 6.40, Tableau 6.22), tandis que le deuxième échantillon est constitué de 79kg de terre, 18.5kg de poudre de verre et de 19 litres d'eau. Ces quantités permettent de produire 93.8kg, elles sont fixées afin de pouvoir comparer les résultats de cette étude aux résultats obtenus par l'étude de CHRISTOFORO [16] qui cherche à déterminer l'impact environnemental d'une même quantité d'adobe paillé.

Les composants d'adobe sont regroupés en deux catégories ; les produits extraits de la nature (l'eau) et les matériaux reconnus de la technosphère (la brique d'adobe et la poudre de verre). Le processus de recyclage de verre post-consommation est choisi sur la base des données d'EcoInvent 3.6 (EcoInvent 2019). Cette bibliothèque permet l'accès à un large éventail de données, afin de

choisir le processus pertinent. Cependant, le mode de fabrication considéré est celui traditionnel, où aucune machine n'est utilisée.

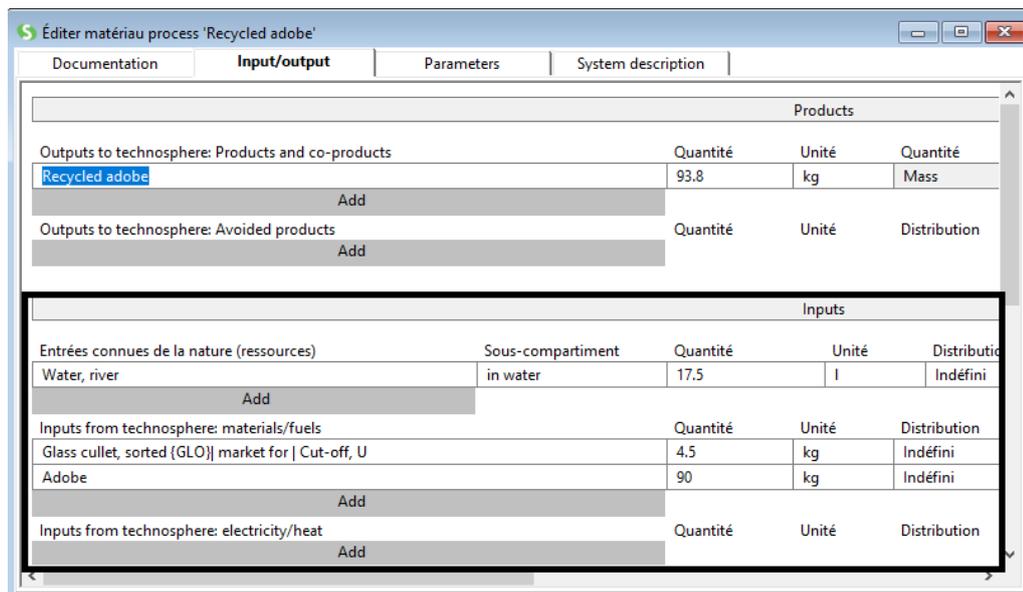


Figure 6.39 : Introduction des données du matériau sur SimaPro.

Tableau 6.22 : Composition des échantillons à évaluer.

Echantillon	Terre (kg)	Poudre de verre (kg)	Eau (l)
ABPV 5%	90	4.5	17.5
ABPV 20%	79	18.5	19

Les méthodes d'évaluation d'impact environnemental considérées dans cette étude sont ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04/ World (2010) H et IMPACT 2002+ V2.15 ; le choix de ces méthodes est motivé par leurs différentes catégories d'impact données pour la brique et plusieurs d'autres matières premières utilisées pour la production de ce matériau [313]. Les résultats sont obtenus pour 1kg de chaque échantillon, ils sont présentés par la suite.

6.2 Résultats et discussion

Le tableau ci-après (Tableau 6.23) présente les résultats d'analyse d'impact environnemental d'un kilogramme d'adobe recyclé avec deux teneurs en poudre de verre (5 et 20%) en comparaison avec l'adobe paillé et la brique cuite moderne. La lecture de ce dernier révèle que l'augmentation de la teneur de poudre de verre entraîne une réduction de la qualité environnementale de l'adobe, en contribuant à l'augmentation de ses impacts environnementaux. Cette augmentation est essentiellement due au cycle de recyclage du verre qui passe par plusieurs étapes,

du ramassage jusqu'à l'affinage, et qui nécessite l'usage de machines électriques consommant l'énergie et émanant de GES.

Tableau 6.23 : Résultats d'analyse d'impact environnemental (méthode ReCiPe 2016) [Auteur, 16].

Impact environnemental	ABPV 5%	ABPV 20%	Adobe paillé	Brique de terre cuite
Potentiel de réchauffement climatique (kg éq.CO ₂)	2.2×10 ⁻²	9.06×10 ⁻²	1.76×10 ⁻³	0.318
Potentiel d'acidification (kg éq. So ₂)	7.27×10 ⁻⁵	2.99×10 ⁻⁴	1.52 ×10 ⁻⁵	7.27×10 ⁻⁴
Potentiel d'eutrophication (kg éq. N)	9.99×10 ⁻⁶	4.11×10 ⁻⁵	8.31 × 10 ⁻⁷	3.28×10 ⁻⁶
Potentiel d'appauvrissement de couche d'ozone (kg éq. CFC-11)	3.02×10 ⁻⁸	1.24×10 ⁻⁷	8.72 ×10 ⁻¹³	7.48×10 ⁻⁸
Potentiel d'épuisement des combustibles fossiles (Mj)	0.195	0.803	4.9 × 10 ⁻²	3.55
Potentiel d'écotoxicité marine (kg éq DCB.)	2.12×10 ⁻³	8.7×10 ⁻³	1.94×10 ⁻⁵	1.26×10 ⁻²
Potentiel d'écotoxicité terrestre (kg éq DCB.)	0.226	0.928	0.871	1.32
Potentiel d'écotoxicité humaine (kg éq DCB.)	2.29×10 ⁻³	1.19×10 ⁻²	1.95×10 ⁻⁴	9.54×10 ⁻³

En comparant les résultats de quatre matériaux, l'adobe paillé présente les plus faibles impacts environnementaux, ce dernier démontre d'après l'étude de CHRISTOFORO [16], un potentiel de réchauffement climatique de l'ordre de 1.76×10⁻³kg éq.CO₂, et un très faible potentiel d'appauvrissement de couche d'ozone de l'ordre de 8.72 ×10⁻¹³kg éq. CFC-11. Cependant le potentiel de toxicité terrestre de ce dernier est élevé (0.871kg éq DCB) par rapport au l'adobe stabilisé avec 5% de poudre de verre (0.226 kg éq DCB), qui est classé en deuxième position sur le plan environnemental avec un potentiel de réchauffement climatique égal à 2.2×10⁻² kg éq.CO₂ et un potentiel d'appauvrissement de couche d'ozone de l'ordre de 3.02 ×10⁻⁸kg éq. CFC-11, et un potentiel d'écotoxicité humaine de 2.29×10⁻³kg éq DCB).

De plus, les trois échantillons d'adobe (paillé, stabilisé par ajout poudre de verre) montrent un faible impact environnemental en comparaison avec la brique de terre cuite ; ce matériau est caractérisé, sur la base d'EcolInvent 3.6, par un potentiel de réchauffement climatique de 0.318kg éq.CO₂, un potentiel d'épuisement de

combustibles fossiles de 3.55MJ et un potentiel d'écotoxicité terrestre égale à 1.32kg éq DCB.

Sur la base de la méthode IMPACT 2002+ V 2.15, ces impacts sont classés en quatre catégories de dommage ; écosystème, changement climatique, santé humaine et ressources naturelles. Les résultats de cette méthode, présentés dans les figures ci-après (Figure 6.40), démontrent que l'adobe a un faible impact sur les quatre catégories environnementales, malgré sa teneur élevée en poudre de verre, ce dernier reste bien plus écologique que la brique de terre cuite utilisée à nos jours. Néanmoins, avec une teneur de 20% d'ajout minéral, l'impact de ce matériau local sur l'écosystème est estimé plus élevé que celui de la brique.

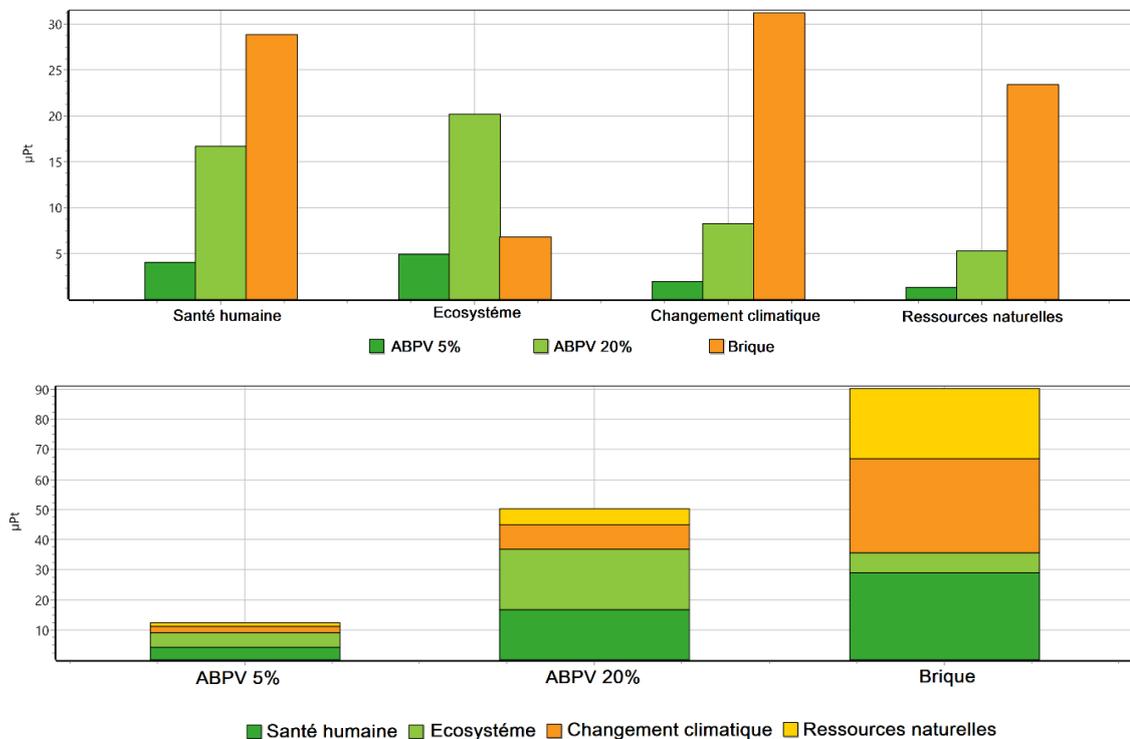


Figure 6.40 : Résultats d'analyse d'impact environnemental (méthode IMPACT 2002+).

Enfin, cette analyse a permis de constater que l'adobe à faible pourcentage de verre est le meilleur choix sur le plan environnemental, cet échantillon démontre le plus faible impact quant sur la santé humaine (2.87×10^{-8} AVCI⁶³), l'écosystème (0.0671PAF.m².an⁶⁴), le climat (0.02kg éq.CO₂) et les ressources naturelles (0.195MJ) (Annexe VII).

⁶³ Années de vie corrigées de l'incapacité : un indicateur évaluant le fardeau de maladies.

⁶⁴ Fraction d'espèces potentiellement disparues par m² par an : un indicateur évaluant l'impact d'un produit sur la biodiversité.

7. Conclusion

Ce chapitre découle d'une étude expérimentale menée sur la revalorisation de la brique d'adobe de Ksar Zgag El- Hadjadj à Laghouat, à travers l'amélioration de ses caractéristiques thermomécaniques et hygrométriques. Le choix de substitution est porté sur la poudre de verre issu de recyclage de verre blanc à vitrage post-consommation. Ce choix est motivé par l'impact environnemental et économique positif de recyclage de ce produit minéral. Le réemploi du verre permet en premier lieu l'élimination de ses déchets non biodégradables, et par conséquent la maîtrise des émissions de gaz à effet de serre, et en second lieu, la limitation de l'usage des matières premières naturelles comme le sable ou le granulats calcaire (la pierre), ou artificielles comme le ciment portland, pour la fabrication d'autres matériaux de construction, tels que le béton.

L'étude a été menée sur deux échantillons d'adobe âgés de 60 jours, fabriqués manuellement selon la technique traditionnelle, l'un est issu de recyclage des adobes récupérés d'une maison ksourienne en ruine, tandis que l'autre est fait d'un sol prélevé de l'un des anciens gisements de terre locaux. Le pourcentage de l'argile est fixé pour les deux types de terre à 7.5%, cependant, la teneur en verre s'est variée entre 0 et 20%, avec un pas de 5, soient quatre taux : 5, 10, 15 et 20%.

Les résultats de l'étude expérimentale ont permis de constater que la stabilisation des briques d'adobe par la poudre de verre fait réduire, d'une façon légère, leurs conductivités thermiques, et par conséquent, leurs capacités thermiques volumiques, jusqu'à une teneur de 15% ; au-delà de cette teneur, la porosité du matériau commence à s'affecter, entraînant une augmentation de leurs propriétés thermiques.

En outre, à 60 jours, cet ajout minéral augmente la résistance en compression de l'adobe jusqu'à une teneur de 5% ; cette augmentation est due à l'effet pouzzolanique provenant de la réaction de silice (SiO_2) avec l'oxyde de calcium (CaO) en présence de l'eau. À partir de la teneur 15% en poudre de verre, la porosité du matériau commence à diminuer (grâce à la de poudre de verre) entraînant le renforcement de ce dernier.

Par ailleurs, cette réaction pouzzolanique accélérée à une teneur de 5% en poudre de verre a permis de réduire le coefficient d'absorption capillaire des adobes

AAPV de 8.86 à 7.59g/cm².mn et ABPV de 9.46 à 6.32g/cm².mn. Au-delà de cette teneur, un faible taux de diminution est relevé, permettant une valeur minimale d'absorption respective de 6.32 et 5.06g/cm².mn, pour l'AAPV et l'ABPV, à un dosage égal à 20%.

Ensuite, ces échantillons d'adobe ont fait l'objet d'une analyse d'impact environnemental à l'aide de l'outil SimaPro. Cette dernière a démontré que l'impact environnemental du matériau augmente en mesure que sa teneur en poudre de verre augmente, néanmoins, il reste bien plus écologique que la brique cuite moderne.

Enfin, ces résultats démontrent que la réhabilitation des maisons vernaculaires effondrées de Ksar Zgag El-Hadjadj demeura possible, tout en évitant toute sorte de gaspillage de matières premières et en nettoyant le Ksar, par la réutilisation des terres en ruines et de verre post-consommation à faible pourcentage (5%). Ces composants permettent la production des briques d'adobe d'une résistance en compression de 2.5MPa, une conductivité thermique de 0.90W/m.K, un coefficient absorption capillaire égal à 6.32g/cm².mn et à faible impact environnemental.

Conclusion : bilan de l'étude empirique

Comme toutes zones arides, Laghouat est une ville dans laquelle la recherche du confort thermique dans l'habitat nécessite la sollicitation de la compacité du plan, l'orientation nord-sud, des matériaux de construction à forte inertie thermique et la ventilation naturelle ; des solutions passives qui sont trouvées dans les maisons vernaculaires à patio de ksar Zgag El-Hadjadj (le secteur sauvegardé de la ville de Laghouat) pour faire face aux aléas climatiques.

Afin d'agir sur l'efficacité énergétique des matériaux de construction de cette architecture, notamment de la brique d'adobe, une maison vernaculaire toute différente a été choisie pour l'étude du confort thermique, cette dernière est traditionnellement appelée «Leâlli», elle est parmi les cas défavorables du ksar, en termes d'emplacement, de forme et d'orientation. L'étude s'est faite sur deux espaces de cette dernière (la pièce de vie et la cour) qui sont occupés en permanence, été comme hiver.

L'évaluation du comportement thermique de ces espaces, selon la méthode qualitative faisant partie de l'approche adaptative analytique d'ASHRAE 55 (qui consiste à interroger les habitants sur leurs appréciations subjectives du confort) a démontré l'adaptation physiologique des occupants de la maison aux conditions climatiques défavorables de leur région, notamment celles d'hiver, où une satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique de la cour a été marquée ($PMV=-0.3$), contrairement à celui du séjour qui a été jugé légèrement froid ($PMV=-1$). En été, les habitants ont déclaré trouver l'environnement thermique des deux espaces confortable ($PMV=0$), cet environnement a été évalué en fonction du nomadisme quotidien des enquêtés ; la pièce de vie pendant l'heure de canicule et la cour pendant la nuit.

Par ailleurs, la méthode quantitative du confort thermique, consistant à déterminer les températures opératives des espaces considérées en mesurant leurs températures ambiantes et radiantes, a révélé que la brique d'adobe permet d'atténuer la fluctuation de la température extérieure, en été comme hiver. Comparé aux plages du confort définies pour la ville de Laghouat selon ASHRAE 55 (17.5 à 24.5°C en l'hiver, et 26.63 à 30.63°C en été, avec une humidité relative limitée entre 30 et 60%), le comportement thermique des espaces évalués est considéré inconfortable en hiver, et inversement en été. Le facteur d'amortissement est estimé

pour les parois d'adobe (d'une épaisseur moyenne de 0.6m) à 0.26, avec un déphasage thermique égal à 9h.

Ces résultats ont également été obtenus par la simulation thermique dynamique réalisée à l'aide d'Energyplus, qui a démontré un faible pourcentage d'erreur de 3.40% confirmant la crédibilité du logiciel en termes de température de l'air et permettant l'estimation des besoins énergétiques en chauffage du séjour qui sont de l'ordre de 46.655kW.

Bien qu'il soit un matériau à performance hygrothermique élevée, l'adobe présente des faiblesses aux sollicitations mécaniques et hydriques, ce qu'a conduit une grande partie du Ksar Zgag El-Hadjadj à l'effondrement. La stabilisation de ce matériau, en vue de sa réutilisation pour la réhabilitation des maisons Ksouriennes, par la poudre de verre a dévoilé que cet ajout de nature minérale permet une augmentation de la résistance à la compression du matériau, et la diminution de son absorption d'eau capillaire et sa conductivité thermique, de meilleurs résultats ont été obtenus par l'ajout d'une teneur de 5% de cette addition, à l'adobe recyclé et au nouvel échantillon d'adobe. Cette teneur a marqué le plus faible impact environnemental ; l'impact environnemental de l'adobe augmente en mesure que sa teneur en poudre de verre augmente.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

1. Liminaire

"Évaluation de l'incidence de brique d'adobe sur le comportement thermique de l'habitat vernaculaire de Ksar Zgag El-Hadjadj à Laghouat, et étude de l'effet de la poudre du verre sur le comportement thermomécanique et hydrique de ce matériau" étaient les objectifs principaux de ce travail de recherche.

Pour mener à bien l'étude présumée, trois hypothèses ont été posées ; la première suggère que l'obtention du confort thermique recherché s'attache à l'application des stratégies passives. En revanche, la seconde hypothèse suggère que le matériau de construction est le premier et le plus essentiel élément sollicité, il peut apporter, seul, tout le confort espéré, et que sa dégradation pourrait influencer ses performances thermiques. Enfin, la dernière hypothèse porte sur l'effet de la poudre de verre sur les propriétés finales de l'adobe, elle suggère qu'un pourcentage bien déterminé de cet ajout minéral permet d'optimiser les caractéristiques de ce matériau.

Pour réaliser cette étude, un cadre méthodologique a été élaboré, il se base sur une méthodologie descriptive adoptant une approche mixte, qui allie la méthode qualitative basée sur l'observation documentaire et la méthode quantitative fondée sur la collecte de données empiriques. Deux aspects de recherche ont été investis :

- L'aspect architectural a exploré le cas d'étude (Ksar Zgag El-Hadjadj) dans sa réalité matérielle et formelle, il est basé sur l'analyse morphologique et environnementale. Les données exploitées dans le cadre de cette analyse sont les cartes, les photos et les plans archivés (fournis par la direction de la culture) ou établis par nous-mêmes (relevés architecturaux). Cet axe a, également, exploré la maison vernaculaire, en termes d'efficacité énergétique ; le cadre méthodologique élaboré, à cet effet, s'est appuyé sur l'approche adaptative de la norme ASHRAE 55, qui fait solliciter l'enquête sociologique, les mesures par instrumentation et la simulation numérique (par EnergyPlus). Les données exploitées dans cette partie d'étude sont les relevés architecturaux, les rapports de questionnaire, les relevés de la température radiante et de la température

et l'humidité relative de l'air, ainsi, les données météorologiques archivées de la ville (fournies par la station météorologique).

- L'aspect génie civil a abordé le matériau de construction « adobe », et les effets de la poudre de verre sur ses propriétés finales, ainsi que son impact environnemental, à la base des essais de caractérisation et de simulation numérique (par SimaPro). Les données exploitées dans le cadre de cette étude sont, les caractéristiques physiques et géotechniques des matières utilisées pour la production d'adobe, ainsi leurs compositions chimiques et minéralogiques, les caractéristiques thermiques, mécaniques et hydriques de l'adobe produit (avec différentes teneurs en poudre de verre), et le processus de sa production (mélange, quantité, transport, malaxage, etc.).

Les résultats et les conclusions obtenues à l'égard de ces deux aspects de recherche, ainsi des propositions de recherche qui s'inscrivent dans la continuité de ce travail, sont présentés ci-dessous, après la présentation des limites qui définissent les champs d'application de cette étude et les conditions de sa validité.

2. Limites d'étude

Les résultats de ce travail de recherche sont subordonnés à trois limites ;

- les résultats qui se rapportent à la deuxième partie de l'aspect architectural (comportement thermique de l'habitat vernaculaire) ne sont valables qu'au contexte d'étude, l'ancien Ksar de Laghouat ; par contre, les résultats de l'analyse environnementale du Ksar peuvent être généralisés aux autres contextes, notamment ceux caractérisés par un climat aride, dont les établissements humains vernaculaires présentent des caractères climatiques et socioculturels se rapprochant de ceux du cas étudié.
- Les résultats qui se rapportent à l'aspect génie-civil, notamment à la stabilisation de l'adobe par ajout de la poudre de verre, ne sont valables que pour la brique d'adobe de Ksar Zgag El-Hadjadj, à cause de sa spécificité granulaire, ainsi que sa composition chimique et minéralogique et au type de verre utilisé (sa composition chimique, et sa finesse).

- Les résultats qui se rapportent à l'étude de l'impact environnemental du matériau, ne sont valables que pour le processus de fabrication d'adobe considéré (technique traditionnelle), ainsi, pour le dosage des différentes matières premières (terre, argile, eau, poudre de verre) fixé dans cette étude.

3. Résultats et synthèses

Les conclusions auxquelles le présent travail de recherche a abouti peuvent être présentées en deux volets ; le premier volet aborde les conclusions qui se rapportent à l'étude de l'efficacité énergétique d'une habitation vernaculaire de Ksar Zgag El-Hadjadj à Laghouat, traditionnellement appelée « Leâlli ». Le choix de cette dernière a été, essentiellement, basé sur son accessibilité, ainsi que sur les désavantages qu'elle présente en termes d'emplacement, de forme, d'organisation spatiale et d'orientation, qui permettent de bien cerner l'effet de la brique d'adobe sur son comportement thermique.

L'étude s'est effectuée sur deux espaces présentant le centre vital de la maison ; la salle de séjour et la cour. Elle a été basée sur l'approche adaptative analytique d'ASHRAE 55, qui allie :

- La méthode qualitative basée sur l'enquête qui vise à prédire l'appréciation globale de trois occupants de la maison, à l'égard des conditions thermiques des espaces étudiés, et la détermination des facteurs PMV et PPD (vote moyen prévisible et pourcentage des personnes insatisfaites, respectivement) relatifs à chacun de ces derniers ;
- Et la méthode quantitative adaptative basée sur les mesures des facteurs environnementaux affectant le confort thermique : température et humidité relative de l'air, ainsi que la température radiative. Cette méthode vise à déterminer la température opérative permettant le classement de la situation thermique des espaces.

Puis, le deuxième volet présente les conclusions de la stabilisation de la brique de terre crue par ajout de la poudre de verre, qui a été effectué sur deux échantillons de cette dernière; le premier est extrait d'une maison ksourienne en ruine, tandis que le deuxième constitue un nouvel adobe provenant d'un sol local (gisement situé à proximité du Ksar, qui est, selon les habitants, l'un des principales sources de

terre utilisée, au passé, pour la fabrication de l'adobe). Quatre pourcentages d'ajout ont été considérés dans ce travail de recherche : 5, 10, 15, et 20 %, le choix de ces teneurs en poids a été motivé par l'idée de la préservation de l'aspect naturel du matériau.

3.1 Performance thermique de l'habitat vernaculaire

Les résultats de la méthode qualitative ont démontré la satisfaction de la majorité des habitants (qui possèdent un taux métabolique entre 1.0 et 1.2Met et un taux d'isolement vestimentaire entre 0.91 et 0.98Clo), vis-à-vis des conditions thermiques de la cour, pendant le mois le plus critique de la période hivernale (janvier). L'appréciation globale (PMV) a été estimée à -0.3 sur l'échelle d'ASHRAE. Elle a abouti à un pourcentage de personnes insatisfaites inférieur à 10, permettant de juger l'ambiance thermique "confortable", et de la classer en type "B", sur la base des intervalles de PMV et de PPD recommandées par la norme considérée ; il est considéré confortable toute ambiance thermique présentant un PMV situé entre -0.7 et +0.7 et un PPD inférieur à 15, et classé B, toute ambiance thermique démontrant un PMV situé entre -0.5 et +0.5 et un PPD situé entre 6 et 10.

Cette sensation du bien-être a été traduite par le maintien l'homéothermie assuré principalement par les échanges thermiques par radiation ; les corps de sujets cèdent la chaleur sous forme de rayonnement solaire direct, ainsi, par l'activité physique effectuée dans le cadre de la vie domestique, et les tenues vestimentaires créant une résistance aux échanges thermiques.

Quant à la salle de séjour, les conditions thermiques ont été jugées légèrement froides, les réponses des sujets étaient coïncidentes à la valeur -1 de l'échelle d'appréciation thermique d'ASHRAE, conduisant à un pourcentage de personnes insatisfaites de 15.52. Ces valeurs permettent de classer cet espace intérieur "Inconfortable" ; un classement qui a été traduit par l'absence de toute sorte de chauffage, ainsi que par la déperdition énergétique liée aux ponts thermiques entre le plafond de l'espace inférieur non chauffé, et le sol de l'espace étudié, et à l'état dégradé de la fenêtre et sa mauvaise isolation, ainsi que par son simple vitrage orienté nord-ouest (direction des vents froids). Cette interprétation a été guidée par les sources d'inconfort déclarées par les enquêtés (un sol froid et une fraîcheur ressentie devant la fenêtre).

CONCLUSION GENERALE

En été, notamment en juillet ; le mois le plus critique de cette saison, et en fonction du nomadisme quotidien (séjour pendant la journée et la cour durant la nuit), les espaces considérés ont été jugés confortables, par les trois enquêtés qui présentent un taux d'isolement vestimentaire compris entre 0.51 et 0.58Clo et un taux métabolique compris entre 1.0 et 1.2Met. Ces sujets ont déclaré trouver l'environnement thermique de ces espaces neutre, le vote moyen prévisible global est dans l'intervalle [-0.7, +0.7] et le pourcentage de personnes insatisfaites (PPD) est inférieur à 15, ils sont de l'ordre de 0 et 5, respectivement. Les paramètres qui ont participé à cette sensation du bien-être sont, selon les enquêtés, la ventilation nocturne et l'opération de mouillage du sol faite avant une heure de l'occupation de la cour.

Par ailleurs, les résultats de l'approche adaptative du confort thermique ont dévoilé qu'en période hivernale, notamment du 7 au 10 janvier 2017, l'environnement thermique des espaces témoins est classé inconfortable. La pièce de vie a démontré une température de l'air fluctuant entre 8.5 et 11.6°C et une température moyenne radiante oscillant entre 8.85 et 12.62°C ; ces valeurs ont permis une température opérative située entre 8.92 et 12.53°C et hors plage de confort thermique, qui est limitée, pour ce mois critique, selon la norme ASHRAE 55, entre 17.5 à 24.5°C. Quant à l'espace ouvert (la cour), la température de l'air a dévoilé une amplitude thermique de 8.2°C, en fluctuant entre 2.8 et 12.6°C, tandis que sa température moyenne radiative était comprise entre -2 et 15°C. Ces valeurs ont permis une température opérative située hors plage de confort ; elle fluctuait entre 0.65 et 13.3°C.

Néanmoins, en considérant la fluctuation de la température extérieure (entre -3.3 et 15°C), qui a démontré une amplitude thermique atteignant les 18.3°C, un équilibre thermique peut être considéré maintenu au séjour, jour comme nuit ; et ce grâce à l'inertie thermique de son enveloppe, notamment de la brique d'adobe constituant ses parois et leur épaisseur (entre 0.57 et 0.65m), qui ont permis de ralentir les échanges thermiques entre l'intérieur et l'extérieur, et de réduire la déperdition énergétique, ce qui évite la chute brutale de température.

En outre, les résultats de l'humidité relative de l'air, pour la même période, ont démontré une fluctuation entre 26 et 87% à l'extérieur, et entre 43 et 74% à l'espace ouvert (la cour), tandis qu'au séjour, le taux d'hygrométrie était varié entre 54 et

CONCLUSION GENERALE

63%. En effet, ces résultats ont été traduits par la capacité de régulation hygrométrique caractérisant la brique d'adobe, qui a permis de, plus ou moins, stabiliser l'hygrométrie de la salle de séjour et de réduire la fluctuation de celle de la cour, par rapport à l'extérieur. Enfin, il convient de noter que l'hygrométrie de l'espace intérieur (séjour) s'inscrit dans la plage d'humidité relative recommandée par ASHRAE (30 à 60%).

En été, et particulièrement du 9 au 11 juillet 2017, les résultats de mesures in situ, ont démontré que l'environnement thermique des espaces évalués est confortable pendant son occupation (l'intérieur pendant la journée et la cour pendant la nuit). La salle de séjour a dévoilé une température ambiante oscillant entre 26.9 et 31.6°C, et une température radiative fluctuant entre 28.43 et 31.49°C. Ces dernières ont permis d'avoir une température opérative située entre 27.9 et 31.5°C. Sur la base de la plage du confort thermique qui est limitée, pour cette période, entre 23.63 et 30.63°C, la situation d'inconfort n'a été marquée, dans cette espace, qu'entre 22h et minuit.

En effet, l'effet de fluctuation rapide de la température extérieure (de 22.3 à 40°C), et d'irradiation solaire a été atténué grâce à l'épaisseur des parois et l'inertie thermique par transmission de leur essentiel matériau de construction (la brique d'adobe). Cet effet d'inertie repose essentiellement sur la faible diffusivité thermique du matériau (0.90 mm²/s), qui fait intervenir sa faible conductivité thermique (0.89W/m.K) et sa forte capacité thermique volumique (0,987 Mj/m³.K).

De plus, cette capacité de stocker l'énergie thermique et de la restituer d'une manière diffuse, a permis d'éviter la surchauffe, tout en offrant un amortissement et un déphasage important des variations et des apports thermiques externes : la température extérieure maximale de 40°C atteinte à 15h a été amortie et déphasée dans le temps, d'où une température maximale de 31.9°C est obtenue au séjour vers minuit. Le facteur d'amortissement (f) et le temps de déphasage thermique (Φ) ont été estimés à 0.26 et 9h, respectivement.

Au niveau de la cour, les températures de l'air et celles moyennes radiantes ont marqué une fluctuation entre 25.9 et 36.9°C, et entre 24.7 et 49.9°C, respectivement. Les températures opératives obtenues en fonction de ces dernières oscillaient entre 25.32 et 43°C ; les conditions thermiques de cet espace

CONCLUSION GENERALE

n'étaient confortables que pendant la nuit, notamment de minuit à 8h du matin, et ce est dû à son exposition aux radiations solaires directes qui ont permis d'augmenter sa température ambiante et radiative.

Par ailleurs, les taux d'hygrométrie qui ont été obtenus dans ces espaces s'inscrivent dans la plage d'humidité relative recommandée par ASHRAE 55 ; l'humidité relative de l'air était variée entre 31 et 44% dans la cour, et entre 41 et 45.3% au séjour, tandis que l'hygrométrie de l'air extérieur a marqué une fluctuation entre 13 et 40%.

Au niveau de la cour, les résultats des deux méthodes d'évaluation de confort thermique (qualitative et quantitative) sont contradictoires, en période hivernale comme estivale. En hiver, et sur la base de PMV et de PPD (-0.3 et 7.62, respectivement), l'environnement thermique de cet espace est classé confortable (classe B), tandis que sur la base de la méthode quantitative analytique, ce dernier est jugé inconfortable. Cette contradiction peut être justifiée par l'exposition des enquêtés aux rayons solaires, qui permettent d'augmenter leur température corporelle, et par conséquent de maintenir une certaine homéothermie. En été, l'environnement thermique de cet espace est classé confortable sur la base de PMV et de PPD (0 et 5, respectivement), tandis que sur la base de la méthode quantitative, ce dernier est jugé inconfortable (la température opérative est estimée à 35°C à l'heure d'enquête, et également la température ambiante). Cette contradiction peut être expliquée par l'acclimatation des sujets au microclimat dans lequel ils vivent, et plus particulièrement, à la chaleur, ainsi par le maintien d'une température corporelle constante ; aucun gain ou perte de chaleur par convection n'est maintenu, lorsque l'environnement est à la même température que la peau (environ 35°C).

La dernière partie de ce volet se rapporte à la conclusion dégagée de la simulation thermique dynamique effectuée par l'outil EnergyPlus. Les résultats de cette simulation ont permis la validation de modèle numérique simulé. Ils ont démontré la crédibilité de ce logiciel en termes de température de l'air, puisqu'un faible pourcentage d'erreur qui est de 4.32% a été marqué pour les résultats de la période hivernale, et de 2.49% pour les résultats de la période estivale. Ce pourcentage a été justifié, en hiver, par la non-prise en considération des pertes de chaleur dues à l'infiltration de l'air et des apports internes. Cependant, en période

estivale, ce pourcentage a été traduit par l'homogénéité des matériaux de construction qui a été présumé par l'outil de simulation Energyplus, cependant, la réalité présente un état de vieillissement important, et par la non-prise en considération des masques solaires dus au voisinage (le Ksar a été modélisé en considérant la même hauteur).

En effet, ce faible pourcentage a permis de faire une estimation des besoins énergétiques en chauffage de la pièce de vie, pour les trois jours de mesure, qui étaient de l'ordre de 46kW. Comparé aux besoins énergétiques d'un espace faisant partie d'une maison contemporaine située dans le même contexte climatique (la ville de Laghouat), cet espace a été considéré économe en énergie.

En global, les résultats de ce volet ont permis de confirmer l'hypothèse de démarrage présumant le rôle majeur joué par le matériau de construction adobe sur le confort thermique et l'économie d'énergie de l'habitat vernaculaire.

3.2 Stabilisation de l'adobe par ajout de la poudre de verre

Les résultats de cet axe d'étude ont révélé que la résistance à la compression de la brique d'adobe (âgée de 60 jours) a augmenté en mesure que sa teneur en poudre de verre augmente. Une teneur en poids de 5% en poudre de verre a donné les meilleurs résultats, pour les deux échantillons d'adobe étudiés (AAPV, qui est produit de la terre de gisement, et APBV, qui provient d'un adobe recyclé). Elle a permis d'augmenter la résistance à la compression de l'AAPV de 2.10 à 2.88MPa, et celle de l'APBV de 1.42 à 2.51MPa. Ces résultats ont été expliqués par l'effet pouzzolanique résultant de la réaction de silice (SiO_2) avec l'oxyde de calcium (CaO) en présence de l'eau.

Au-delà de cette teneur, la résistance à la compression de ce matériau a marqué une diminution, qui a été traduite par l'insuffisance de la quantité d'oxyde de calcium (CaO) nécessaire pour l'activité pouzzolanique ; à une teneur de 15% en poudre de verre, des valeurs minimales de résistance ont été observées, elles sont de l'ordre de 2.73MPa pour AAPV et de 1.79MPa pour APBV. Au-delà de 15%, la résistance des adobes à la compression commence à augmenter de nouveau, ceci est dû à la porosité du matériau : la teneur importante en poudre de verre permet de réduire cette dernière et par conséquent renforcer le matériau.

CONCLUSION GENERALE

En termes de conductivité thermique, les résultats ont démontré que cette propriété thermique a diminué légèrement avec l'augmentation du dosage de la poudre de verre, jusqu'à 20%, la résistance d'AAPV a diminué de 1.00 à 0.84W/m.K, tandis que celle d'ABPV a diminué de 0.94 à 0.80W/m.K. Ces résultats ont été expliqués par les propriétés thermiques de cet ajout minéral, notamment par sa faible conductivité thermique. En revanche, au-delà d'une teneur de 15% de ce stabilisant, la conductivité thermique des adobes a commencé à augmenter, ceci est dû à la réduction de leurs porosités.

Par ailleurs, les résultats de l'effet de l'incorporation de la poudre de verre sur l'absorption capillaire de l'adobe ont révélé que cette propriété hydrique diminue avec l'augmentation de la teneur en poudre de verre. Cet ajout a permis la diminution du coefficient d'absorption capillaire de l'échantillon AAPV de 8.86 à 6.32 g/cm².mn, et celle de l'AABP de 9.49 à 5.06 g/cm².mn. Ces résultats, considérés meilleurs, ont été obtenus à une teneur de 20% en poudre de verre ; ils ont, également, été expliqués par la réaction pouzzolanique accélérée dans les deux échantillons et par la diminution de leur porosité.

La dernière partie de ce volet se rapporte à la conclusion dégagée de l'étude de l'impact environnemental des échantillons d'adobe (de 5 et 20% de poudre de verre). Les résultats de cette analyse effectuée à l'aide de l'outil SimaPro, ont démontré que l'augmentation de la teneur de poudre de verre a entraîné une réduction de la qualité environnementale de l'adobe. Elle a contribué à l'augmentation de ses impacts l'environnementaux, grâce, essentiellement, au recyclage du verre qui nécessitait l'usage de machines électriques consommant l'énergie et émanant de GES. Néanmoins, malgré sa teneur élevée en poudre de verre, l'adobe reste bien plus écologique que la brique de terre cuite utilisée à nos jours ; il présente un faible impact sur la santé humaine, l'écosystème, le climat, et les ressources naturelles.

Globalement, les résultats de ce volet ont permis de constater que l'adobe à faible pourcentage de verre (5%) est le meilleur choix. Il a une meilleure résistance à la compression, une faible absorption capillaire en comparaison avec les adobes extraits du Ksar (AEK), des propriétés thermiques identiques à celle de l'AEK, et une meilleure qualité environnementale. Ainsi, ces résultats viennent confirmer l'hypothèse proposée présumant que la poudre de verre permet d'optimiser la

résistance mécanique de l'adobe, ainsi que sa sensibilité à l'eau ; toutefois, une teneur importante de cet ajout peut influencer négativement les propriétés thermiques et la qualité environnementale du matériau.

Enfin, la réhabilitation des maisons vernaculaires effondrées du Ksar Zgag El-Hadjadj demeura possible, tout en évitant toute sorte de gaspillage de matières premières et en nettoyant le Ksar, par la réutilisation des adobes ruinés et de verre blanc à vitrage post-consommation avec un faible pourcentage (5%).

4. Perspectives

Le présent travail de recherche est une modeste contribution au champ thématique très large de l'architecture vernaculaire de terre, qui a tenté d'apporter quelques éléments de réponses aux questions formulées à son début. Pour sa poursuite, trois pistes méritent d'être développées :

La première piste consiste à perfectionner l'étude par l'incorporation de nouvelles variables qui peuvent influencer le comportement thermique de l'habitat vernaculaire de Ksar Zgag El-Hadjadj. Les principales variables à intégrer sont les stratégies bioclimatiques, l'emplacement de la maison par rapport au Ksar et les transformations du cadre bâti de ce patrimoine.

La seconde piste consiste à stabiliser les adobes physiquement par une correction granulaire qui permet de fixer le pourcentage de chaque fraction granulaire selon les normes (55 à 75% de sable, 10 à 28% de limon, et 15 à 18% d'argile), puis à étudier l'effet de la poudre de verre sur ses propriétés finales.

La dernière piste proposée porte sur l'analyse du cycle de vie des adobes stabilisés à la poudre de verre, elle consiste à étudier l'impact environnemental de ce matériau en phase d'exploitation, afin de déterminer ses effets sur la santé humaine.

REFERENCES

REFERENCES

- [1] B. RUDOLFSKY, *Architecture without architect: an introduction to nonpedigreed architecture*, NewYork: The museum of modern art, 1964, p. 128.
- [2] P. OLIVER, *Encyclopedia of Vernacular Architecture of the World: Cultures and habitats*, London: Cambridge University press, 1997, p. 2384.
- [3] P. FREY, *Learning from vernacular; towards a new vernacular architecture*, Arles: Actes sud, 2010, p. 238.
- [4] M. PARENT, «L'architecture vernaculaire rurale; ses modes de conservation et ses limites à l'adaptation,» *Monumentum*, Vols. 1 sur %2XV-XVI, 1977.
- [5] J.-M. HUYGEN, *La poubelle de l'architecte*, Arles: Actes sud, 2008, p. 184.
- [6] M. GODFRAIN, «L'architecture vernaculaire, quand l'habitat se fond dans son environnement,» *Le monde*, 2014.
- [7] S. GUINDANI et U. DEOPPER, *Architecture vernaculaire; territoire, habitat, et activités productives*, Lausannes: presses polytechnique et universitaire Romandes, 1990, p. 281.
- [8] A. RAPOPORT, *Pour une anthropologie de la maison*, Paris: Dunod, 1972, p. 221.
- [9] D. BENCHEIKH et M. BEDERINA, «Assessing the duality of thermal performance and energy efficiency of residential buildings in hot arid climate of Laghouat, Algeria,» *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol. 11, p. 143–162, 2019.
- [10] APRUE, «la situation énergitique régionale,» *Ministere de l'énergie et des mines*, Alger, 2015.
- [11] V. OLGAY, *Design with climate, bioclimatic approach to architectural regionalism*, Princeton: Princeton university press, 1963, p. 224.
- [12] D. GAUZIN-MULLER, *Architecture écologique*, Paris: le moniteur, 2008, p. 288.
- [13] C. ALEXANDRE, *A pattern language : Towns, buildings, construction*, Oxford: Oxford university press, 1977, p. 1171.
- [14] D. GANDREAU et L. DELBOY, «Inventaire de l'architecture de terre,» *CRAterre-ENSAG*, Grenoble, 2012.
- [15] S. TRACHTE, *Matériau, matière d'architecture soutenable : choix responsable des matériaux de construction, pour une conception globale de l'architecture soutenable*, Louvain: Press universitaire de Louvain, 2012, p. 538.
- [16] E. CHRISTOFOROU, A. KYLILI, P. FOKAIDES et I. IOANNOU, «Cradle to site life cycle assesment (LCA) of adobe bricks,» *Journal of cleaner production*, pp. 443-452, 2016.
- [17] H. GUILLAUD et H. HOUBEN, *Traité de construction en terre*, Paris: Parenthèse, 1995, p. 239.
- [18] D. GAUZIN-MULLER, *L'architecture de terre aujourd'hui*, Grenoble: CRAterre, 2016.
- [19] F. YANG, B. ZHANG et Q. MA, «Study of Sticky Rice-Lime Mortar Technology for the Restoration of Historical Masonry Construction,» *Accounts of Chemical Research*, vol. 43, n° 16, pp. 936-944, 2010.
- [20] D. HUMPHREY, D. B. MARTINSON, K. MANT et M. ALI, «Performance characteristics of enhanced soil blocks: a quantitative review,» *Building research and information*, vol. 43, n° 12, pp. 253-262, 2015.

REFERENCES

- [21] K. DAO, M. OUEDRAOGO, Y. MILLOGO, J. E. AUBERT et M. GOMINA, «Thermal, hydric and mechanical behaviours of adobes stabilized with cement,» *Construction and building materials*, vol. 158, pp. 84-96, 2018.
- [22] J. C. MAUREL et Y. MILLOGO, «Microstructural characterization and mechanical properties of cement stabilised adobe,» *Materials and structures*, vol. 45, n° 19, pp. 1311-1318, 2012.
- [23] Y. MILLOGO, M. HAJAJI et R. OUEDRAOGO, «Microstructure and physical properties of lime clayey adobe bricks,» *Construction and building materials*, vol. 22, n° 112, pp. 2386-2392, 2008.
- [24] ANSI/ASHRAE, *ASHRAE Standard 55; Thermal environmental conditions for human occupancy*, Atlanta: American society of heating , refrigerating and air-conditioning engineers, 2017, p. 52.
- [25] T. JOHANSSON, N. NAKICENOVIC, A. PATWARDHAN et L. GOMEZ-ACHEVERRI, *Global energy assessment : toward a sustainable future*, New-York: Cambridge university press, 2012, p. 1865.
- [26] D. H. CARTON, P. SERVIGNE, A. SINAI et R. STEVENS, *Petit traité de résilience locale*, Paris: Charles Léopold Mayer, 2015.
- [27] S. GUIDANI, «Espaces ruraux et architecture vernaculaire : un patrimoine européen ?,» chez *Lieux d'Europe ; Mythes et limites*, Paris, la maison des sciences de l'homme, 2008, p. 284.
- [28] H. SEZGIN, «A propos de l'architecture vernaculaire,» chez *ICOMOS International committee on vernacular architecture - 2nd session*, Plodiv, 1979.
- [29] P. OLIVER, «Ethics and vernacular architecture,» chez *Ethics and the built environment*, New-York, Routledge, 2000, p. 256.
- [30] H. FATHY, *Architecture for the poor : An Experiment in Rural Egypt*, Chicago: University of Chicago press, 2000, p. 366.
- [31] E. COLE, *Grammaire de l'architecture*, Paris: Dessain et Tolra, 2003, p. 352.
- [32] J. WELLS, «Le style néoclassique,» 1847. [En ligne]. Available: <https://www.montrealguidecondo.ca/news/le-style-neoclassique/>. [Accès le 21 10 2020].
- [33] E. MERCER, *English vernacular houses; a study of traditional farmhouses and cottages*, London: H.M. Stationery Office, 1975, p. 246.
- [34] C. LASSURE, «L'architecture vernaculaire; essai de définition,» *L'architecture vernaculaire*, n° 103, 1983.
- [35] L. ASQUITH et M. VILLINGA, *Vernacular architecture in the twenty-first century ; theory, education and practice*, London: Taylor and Francis, 2006, p. 294.
- [36] J.-P. LOUBES, *Traité d'architecture vernaculaire*, Paris: Sextant, 2010.
- [37] J. NASR, *la rien en architecture*, Paris: l'Harmattan, 2011, p. 266.
- [38] M. MAGLIOZZI, *Art brut, architectures marginales : un art du bricolage*, Paris: l'Harmattan, 2008, p. 266.
- [39] ICOMOS, «Extrait de la charte du patrimoine bâti vernaculaire,» Mexique, 1999.
- [40] J. QUILLIEN, «Saisir l'insaisissable – des «patterns» aux «séquences», dans l'œuvre de Christopher Alexander,» 2006. [En ligne]. Available: <http://archive.mcxapc.org/docs/conseilscient/0701quillien.pdf>. [Accès le 19 août 2019].
- [41] R. BRUNSKILL, *illustrated handbook of vernacular architecture*, London: Faber & Faber, 1970, p. 292.
- [42] H. GLASSIE, *Folk Housing in Middle Virginia: A Structural Analysis of Historic Artifacts*, Tennessee: University of Tennessee press, 1976, p. 246.

REFERENCES

- [43] D. UPTON, «Outside the Academy: A Century of Vernacular Architecture Studies, 1890-1990,» *Studies in the History of Art*, vol. 35, pp. 199-123, 1990.
- [44] S. LOW, *On the plaza: politics of public space and culture*, Austin: University of Texas press, 2000, p. 296.
- [45] S. LOW et D. LAWRENCE-ZUNIGA, *Anthropology of Space and Place: Locating Culture*, Malden: Wiley-Blackwell, 2003, p. 436.
- [46] S. KENT, *Domestic Architecture and the Use of Space: An Interdisciplinary Cross-Cultural Study*, 2 éd., New-York: Cambridge University press, 1993, p. 202.
- [47] J. K. KOWALSKI, *Mesoamerican Architecture As a Cultural Symbol*, New-York: Oxford university press, 1999, p. 432.
- [48] J. MOORE, *Architecture & Power Ancient Andes: The Archaeology of Public Buildings*, New-york: Cambridge university press, 1996, p. 276.
- [49] J. MOORE, *the prehistory of home*, Los anglès: university of California press, 2012, p. 267.
- [50] R. SAMSON, *The Social Archaeology of Houses*, Edingburg: Edinburgh University press, 1991, p. 200.
- [51] R. WILK, «Little house in the jungle: The causes of variation in house size among modern Kekchi Maya,» *Journal of Anthropological Archaeology*, vol. 2, n° 12, p. 99:116, 1983.
- [52] R. WILK, «Built environment and consumer decision,» chez *Domestic architecture and the use of space : An Interdisciplinary Cross-Cultural Study*, Cambridge, cambredge university press, 1993, pp. 34-42.
- [53] G. H. BRUNDTLAD, «Notre avenir à tous,» Nairobi, 1987.
- [54] E. COABST, «L'insoutenable responsabilité des hommes,» chez *Géopolitique du développement durable*, Paris, presses universitaires de france, 2005, p. 365.
- [55] ONU, «Rapport sur la mise en oeuvre des objectifs de developpement durable,» New-York, 2016.
- [56] S. VIDIELLA, S. LECHAUGUETTE et D. A. CANAL, *Atlas d'architecture écologique*, Paris: Place des Victoires, 2011, p. 719.
- [57] C. MACKIE, «The Development of Traditional Housing in the Isle of Lewis: Social and Cultural Influences on Vernacular Architecture,» *Béaloideas*, vol. 74, pp. 65-102, 2006.
- [58] T. SMORODINSKAYA, K. EVANS-ROMAINE et H. GOSCILO, *Encyclopedia of contemporary russian culture*, London: Routledge, 2007, p. 727.
- [59] V. POLENOV, «Russian village,» 1989. [En ligne]. Available: <https://www.wikiart.org/fr/vassili-polenov/russian-village-1889>. [Accès le 1 9 2019].
- [60] S. PFIRMAN et R. BELL, «Poles Together,» 1970. [En ligne]. Available: <http://ccnmtl.columbia.edu/projects/poles/slideshows/igloo.html>. [Accès le 9 12 2019].
- [61] A. Wyatkin, «Chukchi Yaranga,» 2017. [En ligne]. Available: <https://www.nomads.org/chukchi.html>. [Accès le 15 9 2019].
- [62] L. TOLSTOY, *Hadj Mourad*, New-York: Cosiomp, 2006, p. 93.
- [63] «Vieilles maisons. Habitations traditionnelles des peuples du monde,» 2018. [En ligne]. Available: <https://anobti.ru/fr/ancient-dwellings-traditional-dwellings-of-the-peoples-of-the-world.html>. [Accès le 16 9 2019].
- [64] L. CALLEBAT, *le de architectura de vitruve*, Paris: les belles lettres, 2017, p. 464.
- [65] L. B. ALBERTI, *L'art d'édifier*, paris: Le Seuil, 2004, p. 512.
- [66] C. L. D. S. MONTESQUIEU, *De l'esprit des lois*, Geneve: Barillot et Fils, 1748, p. 1086.
- [67] C. MOLLER, *Architectural environment and our mental health*, New-York: Horizon press, 1968, p. 159.

REFERENCES

- [68] C. COOPER, «The house a symbol of self,» chez *Designing for human behavior : architecture and behavioral sciences*, Pennsylvania, Stroudsburg, Pa., Dowden, Hutchinson & Ross, 1974, pp. 130-146.
- [69] C. JUNG, «Approaching the unconscious,» chez *Man and His Symbols*, New-York, Dell, 1968, pp. 1-94.
- [70] J. LANG, *Creating Architectural Theory: The Role of the Behavioral Sciences in Environmental Design*, New-york: Van Nostrand Reinhold, 1987, p. 278.
- [71] J. JANSSENS, «Looking at Buildings,» Lund, 1984.
- [72] J. D. PORTEOUS, *Environmental Aesthetics: Ideas, Politics and Planning*, London: Psychology press, 1996, p. 290.
- [73] A. IBRAHIM, N. ABU-OBEID et F. AL-SIMADI, «the effect of personality traits on architectural aesthetics' Evaluation: Familiar And Non-Familiar Environments As Evaluated By Architectural And Non-Architectural Students,» *Architectural Science Review*, vol. 45, n° 13, pp. 197-210, 2002.
- [74] C. LASSURE et M. SEEMANN, «vocabulaire italien-fraçais de la'architecture rurale en pierre sèche,» *L'Architecture rurale*, 1979.
- [75] C. LASSURE, «Les Trulli ou casedde d'alberobello (province Bari, Italie),» 2011.
- [76] M. A. VIARO et A. ZIEGLER, *Habitat traditionnel dans le monde : éléments pour une approche*, Paris: Unesco, 1983, p. 112.
- [77] C. CAMERON, «Room Size, Organization of Construction, and Archaeological Interpretation in the Puebloan Southwest,» *Journal of Anthropological Archaeology*, vol. 18, n° 12, pp. 201-239, 1999.
- [78] A. CARSWELL, *The Encyclopedia of Housing*, 2 éd., New-York: Sage, 2012, p. 928.
- [79] E. ALLEN, *Stone Shelters*, New-York: MIT press, 1969, p. 222.
- [80] M. MAUSS, «Morphologie saisoniere. Extrait d'« Essai sur les variations saisonnières des sociétés eskimo.,» *Socio-anthropologie*, vol. Habiter, n° 135, pp. 187-202, 2015.
- [81] E. CURTIS, «Special Collections,» Juillet 1899. [En ligne]. Available: <https://digitalcollections.lib.washington.edu/digital/collection/harriman/id/191>.
- [82] A. LAURE, «Gordes : Un village entre ciel et pierres,» 2015. [En ligne]. Available: https://www.gordes-village.com/admin-upload/fichiers/anwu8ps8-BROCHURE_GORDES_210x190_web.pdf. [Accès le 23 9 2019].
- [83] S. PREUIL, «L'habitat rural khmer dans la région de Seim Reap : un modele architectural en évolution?,» *Architecture vernculaire*, Vols. 1, 2011, pp. 234-238.
- [84] S. KENT, «the cultural revolution in architecture,» chez *Culture, Meaning, architecture : critical reflections on the work of Amos Rapoport*, New-york, Routledge, 2000, pp. 268-277.
- [85] L. RAGLAN, *The temple and the house*, New-York: Routledge & K.Paul, 1964, p. 218.
- [86] P. DEFFONTAINES, *L'homme et sa maison*, Paris: Gaullimard, 1972, p. 256.
- [87] P. OLIVER, *Shelter, sign and symbol*, London: Barrie & Jenkins, 1975, p. 228.
- [88] M. SAHLIN, *Tribesmen (foundation of modern anthropology)*, New Jersey: Prentice Hall, 1968, p. 118.
- [89] L. H. MORGAN, *Houses and House-Life of the American Aborigines*, Washington: Government printing office, 1881, p. 310.
- [90] D. SNOW, *The iroquois (Peoples of America)*, Oxford: Wiley- Blackwell, 1994, p. 290.
- [91] D. SNOW, «The architecture of Iroquois longhouse,» *Northeast anthropology*, vol. 53, pp. 61-84, 1997.

REFERENCES

- [92] J. DICKINSON et B. YONG, Brève histoire socioéconomique de Québec, 3 éd., Québec: Septentrion, 2003, p. 452.
- [93] J. MAXWELL, *America's Fascinating Indian Heritage*, New-York: Readers Digest, 1978, p. 416.
- [94] C. HAROLD, «Navajo Home – Hogans or Hohrahn,» 2011. [En ligne]. [Accès le 27 10 2019].
- [95] C. ZICCARELLI, «Une éthnie mystérieuse : les Toraja d'Insonésie,» *Le Cardilogue*, n° %1338, 2011.
- [96] P. MANURUNG, «Daylighting and architectural concept of traditional architecture : the tongkonan in Toraja, Indonesia,» *ITU Journal of the faculty of architecture*, vol. 14, pp. 111-126, 2017.
- [97] E. K. JULISTIONO et L. S. ARIFIN, «the sustainable traditional structural system of tongkonan in celebes, Indonesia,» chez *the 2005 world sustainable building conference in tokyo, Japan, 27-29 september*, Rotterdam, 2005.
- [98] R. YELLAND, «History made for tomorrow : Hakka Tulou,» *Sustainability*, vol. 5, pp. 4908-4919, 2013.
- [99] J. WIDODO, «Typological and Morphological Adaptations of Hakka Diaspora's Settlements in Cosmopolitan Southeast Asia: West Kalimantan case,» chez *Living in a Hakka Country- Life and Culture of Hakka People in Southeast Asia*, Taiwan, Hakka Cultural Development Center, 2013, pp. 242-252.
- [100] UNESCO, «Fujian Tulou : world heritage conventions (WHC) advisory body evaluation report n°1113,» UNESCO Heritage center, Paris, France, 2008.
- [101] Z. HAMMAMI, «l'architecture trogloditique vertical et la mise en valeur touristique aux matmata (sud-est tunisien). Note de recherche,» chez *Fabrique du tourisme et expériences patrimoniales au Maghreb, XIXe-XXIe siècles*, Rabat, Centre Jacques-Berque, 2018, pp. 204-219.
- [102] «Ecosynth,» 2011. [En ligne]. Available: <https://ecosynth.wordpress.com/2011/06/09/au-sujet-des-maisons-en-paille/#jp-carousel-1817>. [Accès le 21 10 2019].
- [103] R. BRUNSKILL, *Systematic procedure for recording english vernacular architecture*, London: Ancient Monuments Society, 1966, p. 82.
- [104] C. T. ALEC, *The Pattern of English Building*, London: Faber & Faber, 1987, p. 480.
- [105] R. LENTILE, M. NARETTO et B. CALOGERO, «Authenticité et sauvegarde de l'architecture vernaculaire quelle 'esprit de lieu',» chez *Proceeding della 16e assemblée générale et symposium : Finding the spirit of place – between the tangible and the intangible*, Québec, 2008.
- [106] C. MASSET, «Hashtagvoyage,» 2017. [En ligne]. Available: <https://www.hashtagvoyage.fr/castle-combe-cotswolds/>. [Accès le 28 10 2019].
- [107] S. KAMURAN et O. ILKAY, «The vernacular houses of Harran and cultural heritage, Turkey,» *international journal of academic research*, pp. 148-157, 2011.
- [108] OLIVER, «The adobe beehive homes of Harran, Turkey were built around 1750,» 2018. [En ligne]. Available: <http://naturalhomes.org/beehive-harran-turkey.htm>. [Accès le 22 10 2019].
- [109] M. SOGOBA, «Tata Somba, Batammaliba Architecture at its Height,» 2019. [En ligne]. Available: <https://www.culturesofwestafrica.com/tata-somba-batammaliba-architecture/>. [Accès le 28 10 2019].
- [110] A. ADEDOKUN, «Learning from traditional architecture: the example of somba,» *journal of civil environmental research*, vol. 3, n° 113, pp. 126-130, 2013.

REFERENCES

- [111] SEKITAR, «Sekitar,» 2013. [En ligne]. Available: <https://www.flickr.com/photos/sekitar/9599707219/>. [Accès le 30 10 2019].
- [112] P. KAUSHIK, «Amusing planet,» 2014. [En ligne]. Available: <https://www.amusingplanet.com/2013/12/ganvie-village-on-lake.html>. [Accès le 29 10 2019].
- [113] «kapadokya-yeralti-sehirleri,» 2017. [En ligne]. Available: <https://www.kapadokyadayim.com/wp-content/uploads/2016/11/kapadokya-yeralt%C4%B1-%C5%9Fehirleri.jpg>. [Accès le 29 10 2019].
- [114] K. E. LAUREN, «Art and humanities,» 2016. [En ligne]. Available: <https://www.khanacademy.org/humanities/ap-art-history/indigenous-americas/a/mesa-verde-cliff-dwellings>. [Accès le 29 10 2019].
- [115] A. LIEBARD et A. DE HERDE, *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique*, Antony Cedex: le moniteur, 2005, p. 778.
- [116] J.-P. OLIVA et S. COURGEY, *La conception bioclimatique . des maisons confortables et économes en neuf et en réhabilitation*, Mens: Terre vivante, 2006, p. 239.
- [117] M. A. VIARO et A. ZIEGLER, *Habitat traditionnel dans le monde : éléments pour une approche*, Paris: Unesco, 1983, p. 112.
- [118] P. Oliver, *Encyclopedia of Vernacular Architecture of the World: Cultures and habitats*, London: Cambridge University press, 1997, p. 2384.
- [119] F. RUBEL et M. KOTTEK, «Observed and projected climate shift 1901-2100 depicted by world maps of the Koppen-Geiger climate classification,» *Meteorologische Zeitschrift*, vol. 19, n° 12, pp. 135-141, 2010.
- [120] J. BITTEL et V. CANDAS, «Thermal Exchanges in Man,» chez *Agache's Measuring the Skin*, Switzerland, Springer, Cham, 2017, pp. 1265-1269.
- [121] A. QUESNOT, J. C. CHANUSSOT et I. CARBEL, «La cryothérapie en rééducation: revue de littérature,» *Kinésithér Scient*, n° 1412, pp. 39-48, 2001.
- [122] E. ARENS et H. ZHANG, «The skin's role in human thermoregulation and comfort,» chez *From thermal and moisture transport in fibrous material*, Cambridge, Woodhead publishing, 2006, pp. 560-602.
- [123] C. BATIER, *Confort thermique et énergie dans l'habitat social en milieu méditerranéen : d'un modele comportemental de l'occupant vers des stratégies architecturales*, Université de Montpellier, 2016, p. 283.
- [124] A. BIGOURET, *Caractérisation des différentes interindividuelles de jugement thermosensoriel à partir de mesure biophysiques cutanés*, Lyon: Institut des nanotechnologies, 2012, p. 389.
- [125] A. JOHNSON, *Biomechanics and Exercise Physiology: Quantitative Modeling*, New-York: CRC press, 2007, p. 688.
- [126] P. O. FANGER, *Thermal Comfort: analysis and applications in environmental engineering*, New-York: McGraw-Hill, 1972, p. 256.
- [127] ANSI/ASHRAE, «Thermal Comfort,» chez *ASHRAE: Fundamentals Handbooks*, Atlanta, American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineer, 2009, pp. 9.1-9.27.
- [128] F. THELLIER, F. MONCHOUX et J. P. BEDRUNE, «le confort dans le bâtiment : n'oublions pas l'habitant!,» *La Revue 3E.I*, pp. 22-30, 2012.
- [129] L. Lipu insulation material co., «INSULATION BASICS,» 2019. [En ligne]. Available: <https://www.lipubw.com/news/insulation-basics>. [Accès le 23 9 2019].
- [130] AFNOR, *NF EN ISO 7730*, Denis: AFNOR, 2006.

REFERENCES

- [131] A. GAGGE, A. FOBELETS et L. BERGLUND, «A Standard Predictive Index of Human Response to the Thermal Environment,» *ASHRAE Transactions*, vol. 92, pp. 709-731, 1986.
- [132] A. STOLWIJK, «A mathematical model of physiological temperature regulation in man,» NASA, Washington, 1971.
- [133] K. PARSONS, *Human thermal environment : the effect of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort, and performance*, London: Taylor and Francis, 2003, p. 527.
- [134] M. BONTE, *Influence du comportement de l'occupant sur la performance énergétique du bâtiment*, Toulouse: Université Paul Sabatier, 2014, p. 206.
- [135] M. HUMPHREYS et N. FERGUS, «The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in everyday thermal environments,» *Energy and Buildings*, vol. 34, n° 16, pp. 667-684, 2002.
- [136] R. DE DEAR , G. BRAGER et D. COOPER, «Developping an adaptive model of thermal comfort and preference, final report ASHRAE RP-884,» American society of heating, refrigerating, and air-conditioning engineers, Atlanta, 1997.
- [137] K. MCCARTNEY et N. FERGUS, «Developing an adaptive control algorithm for Europe,» *Energy and building*, pp. 623-635, 2002.
- [138] ISO7730, «Moderate thermal environments — Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort,» International Organization for Standardization, Geneva, 2005.
- [139] ISO7243, «Ambiance chaude- estimation de la contrainte thermique de l'homme au travail, basé sur le l'indice WBGT,» AFNOR, Denis, 2017.
- [140] ISO11079, «Ergonomie des ambiances thermiques- Détermination et interprétation de la contrainte liée au froid en utilisant l'isolement thermique résidu du vêtement (IREQ) et les effets du refroidissement local,» AFNOR, Deniz, 2007.
- [141] B. MOUJALLED , *Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés*, Lyon: L'Institut des Sciences Appliquées, 2007.
- [142] CEN EN 15251, *Indoor environmental input parameters for design and assesment of energy performance of buildings-addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*, Brussel: Comité européen de normalisation, 2007.
- [143] B. OLESEN, «the philosophy behind EN15251 : indoor environment criteria for design,» *Energy and buildings*, vol. 39, pp. 740-749, 2007.
- [144] T. HOYT, S. SCHIAVON, F. TARTARINI, T. CHEUNG, K. STEINFELD, A. PICCIOLI et D. Moon, «Thermal comfort tool,» 2019. [En ligne]. Available: <https://comfort.cbe.berkeley.edu/>. [Accès le 30 10 2019].
- [145] A. REOTZEL, A. TSANGRASSOULIS, A. DRAKOU et G. DE SQUEIRA, «Comparison of the EN15251 and ASHRAE Standard adaptive thermal comfort models in the context on Mediterranean climate,» chez *Architecture & Sustainable Development (vol.1): 27th International Conference on Passive and Low Energy Architecture*, Louvain-la-Neuve, Presses universitaire de Louvain, 2011, pp. 583-588.
- [146] M. VITRUVIUS, *les dix livres de VITRUVÉ*, vol. 5, Paris, 1837, p. 336.
- [147] P. SUPIC, «L'aspect bioclimatique de l'habitat vernaculaire,» *Architecture & Behaviour*, vol. 10, n° 11, pp. 27-47, 1994.
- [148] J. GANDINI, «The ksar of Ait Benhaddou,» 2019. [En ligne]. Available: <https://www.gandini-bb.com/en/experiences/ait-benhaddou.html%20/>. [Accès le 2 11 2019].
- [149] B. HIBOUCHE, «SlideShare,» 2017. [En ligne]. Available: <https://www.slideshare.net/boudjemaahibouche/ksar-ghardaia>. [Accès le 02 11 2019].

REFERENCES

- [150] K. AL-SALLAL, «The balanced synthesis of form and space in the vernacular house of Sana'a :bioclimatic and functional analysis,» *Architectural science review*, pp. 419-428, 2001.
- [151] M. A. KASHANI, *Sustainability indicator of iranien vernacular architecture*, Famagusta: Eastern mediterranean university, 2013.
- [152] M. HAJ HUSSEIN, *Investigation sur la qualité des ambiances hygrothermiques et lumineuses des habitat palestiniens*, Université de Bordeaux 1, 2012, p. 338.
- [153] F. M. AL-SHIBAMI, *Themal comfort and energy efficiency in Yemeni houses*, School of architecture studies, univarsity of Sheffield, 2004.
- [154] A. MONSHIZADE, «The desert city as ancient living example of ecocity. Case study : Yazd,» chez *7th International Ecocity Conference.Academic and Talent Scouting Session*, SanFrancisco, 2008.
- [155] ONU-habitat et OIF/IFDD, «Conception architecturale durable en milieu tropical ; principe et applications pour l'Afrique de l'Est,» ONU-Habitat et OIF/IFDD, Quebec, 2015.
- [156] M. J. MAHDAVINEJAD, M. HAQSHENAS, M. FAKHARI et B. NEGAR, «Thermal behaviour of domed roofs, case study : historical dome-shaped roof of Isphahan,» *Armanshahr* , vol. 6, n° 110, pp. 67-76, 2013.
- [157] H. NAJAFI, «news,» 2013. [En ligne]. Available: <https://www.tasnimnews.com/fa/news/1394/09/10/932161/%D9%BE%D8%B4%D8%AA-%D8%A8%D8%A7%D9%85%D9%87%D8%A7%DB%8C-%DB%8C%D8%B2%D8%AF/photo/1>. [Accès le 18 2 2019].
- [158] OPVM, «Planchers des constructions traditionnelles dans la vallée de M'Zab,» OPVM, Ghardaia, 2013.
- [159] K. PATOWARY, «Manhattan of the Desert: Shibam, Yemen,» 2012. [En ligne]. Available: <https://www.amusingplanet.com/2012/05/manhattan-of-desert-shibam-yemen.html>.
- [160] B. DIMITROFF, «La ville fortifiée de Beni Isguen,» 2018. [En ligne]. Available: <https://maison-monde.com/ville-fortifiee-de-beni-iguen-algerie/>. [Accès le 28 10 2019].
- [161] O. SPAARGAREN et J. DECKER, «Factors of soil formation: climate,» *Encyclopedia of soil in the environment*, pp. 512-520, 2005.
- [162] L. ROUSSEL, «8 meilleures destinations pour l'été 2017,» 2017. [En ligne]. Available: <http://www.efap-etudiants.org/8-meilleures-destinations/>. [Accès le 15 02 2020].
- [163] T. STASINOPOULOS, «The four elements of santorini architecture lessons in vernacular sustainability,» chez *PLEA 2006 - the 23rd conference on passive and low energy architecture*, Geneva, 2006.
- [164] A. BILJANI et A. HIRA, «portfolio.cept,» 2014. [En ligne]. Available: [https://portfolio.cept.ac.in/archive/oia-santorini-settelment-climate-and-culture/#prettyPhot1\[rel-1331177944\]/5/](https://portfolio.cept.ac.in/archive/oia-santorini-settelment-climate-and-culture/#prettyPhot1[rel-1331177944]/5/). [Accès le 2 12 2019].
- [165] F. MOHD et S. MOHD, «Rumah Tradisional Melayu: Antara Seni, Sains & Realiti,» *Majalah sains*, pp. <https://www.majalahsains.com/rumah-tradisional-melayu-antara-seni-sains-kuno-realiti/>, 2016.
- [166] G. RODRIGUEZ, *Modélisation de la réponse de l'architecture au climat local*, Bordeaux: Université sciences et technologies, 2013.
- [167] P. HARMAN, «Malay houses,» 2018. [En ligne]. Available: <https://alchetron.com/Malay-houses>. [Accès le 9 12 2019].
- [168] M. MAUSS, «Essais sur les variations sainsonnières des sociétés Eskimos, étude porphologie sociale,» chez *Sociologie et anthropologie*, Paris, Presses Universitaires de France, 2013, pp. 387-475.

REFERENCES

- [169] M. LEE et G. REINHARDT, Eskimos architecture: dwelling and structure in the early historic period, Fairbank: University of Alaska press, 2003, p. 231.
- [170] Y. LABRECHE, «Habitations, camp et territoires des Inuits de la région de Kangiqsujuaq-Sallit, Nunavik,» *Inuit studies*, vol. 27, n° 11-2, pp. 155-190, 2003.
- [171] C. HELLYBERG, «Dwelling of the inuit culture,» 2019. [En ligne]. Available: <https://visitgreenland.com/about-greenland/dwellings-inuit-culture/>. [Accès le 23 11 2019].
- [172] SARAH, «Wordless Wednesday IV: A glimpse into the past,» 2011. [En ligne]. Available: https://sarahontheroaddotcom.files.wordpress.com/2011/08/2011-08-14_002.jpg. [Accès le 23 8 2019].
- [173] AIA, «Official guide to the 2007 AIA construct documents,» John Wiley & Sons, New Jersey, 2009.
- [174] S. VISITSAK, [Thèse], Texas: University A & M, 2007.
- [175] B. GIVONI, Climate consideration in building and urban design, Oxford: John Wiley & Sons, 1998, p. 480.
- [176] S. SZOKOLAY, «Climate analysis based on the psychrometric chart,» *International Journal of ambient energy*, vol. 7, n° 14, pp. 171-182, 1986.
- [177] C. MAHONEY, I.D.A, Educational project, Nigeria :the determination of standars for thermal comfort, London: Tropica advisory service, department of tropical studies, architectural association, 1967.
- [178] S. SZOKOLAY, Introduction to architectural science : the basis of sustainable design, Oxford: Elsevier, architectural press, 2004, p. 327.
- [179] N. AL-ALZRI, N. Z. AL-RAWHANI et Y. ZURIGAT, «Development of bioclimatic chart for passive building design in Muscat-Oman,» chez *International conference on renewable energies and power quality (ICREPO'12)*, Santiago de Compostela, 2012.
- [180] M. KABORE, [Thèse], Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement, Université Grenoble Alpes, 2015.
- [181] S. VISITSAK et J. HABERL, «An analysis of design strategies for climate controlled residences in selected climates,» chez *SimBuild 2004, IBPSA-USA National Conference Boulder, CO*, 2004.
- [182] M. MILNE, R. LIGGET et Y. BHATTACHAYRA, «Climate Consultant 4.0 develops deign guidelines for esach unique climate,» 2009.
- [183] B. GIVONI, Man, Climate and architecture, New-York: John Wily & Sons, 1969, p. 483.
- [184] M. HUMPHREY, «Outdoor temperatures and comfort indoors,» *Batiment International, Building Research and Practice*, vol. 6, n° 12, pp. 92-105, 1978.
- [185] A. AULICIEMS, «Psycho-physiological criteria for global thermal zones of buliding design,» *International Journal of Biometeorology*, vol. 26, n° 18, pp. 69-86, 1983.
- [186] A. SAYIGH et A. MARAFIA, «Thermal comfort and the development of bioclimatic concept in building design,» *Renwlable and sustainable energy review*, vol. 2, n° 11, pp. 3-24, 1998.
- [187] A. AULICIEMS et S. SZOKOLAY, Thermal comfort, Brisbane: PLEA in association with Dept. of Architecture, University of Queensland, 2007, p. 68.
- [188] A. KONYA, Design primer for hot climates, New-York: Architectural press, 2013, p. 132.
- [189] O. KOENIGSBERGER, T. INGERSOLL, A. MAYHEW et S. SZOKOLAY, Manual of Tropical Housing and Building: Climatic Design, Hyderabad: Universities press, 2013, p. 335.
- [190] J. CLARCKE, Energy Simulation in Building Design, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001, p. 384.

REFERENCES

- [191] K. BUNDARSKI, T. MIELCZYNSKI et H. KOCZYK, «Thermal comfort and energy consumption of the ecological house- simulation analysis of DOMTRZON,» *Technical transactions*, vol. 3, n° 1B, pp. 11-22, 2014.
- [192] H. SHARMA, E. MONNIER, G. MANDIL, P. ZWOLINSKI et S. COLASSAON, «Comparison of the environmental assessment methodology in hybrid energy simulation software,» *Science direct*, vol. 80, pp. 221-227, 2019.
- [193] F. GUARINO, M. CELLURA, S. LONGO, T. GULOTTA, M. MISTRETTA, G. TUMMINIA, M. FERRARO et V. ANTONUCCI, «Integration of building simulation and life cycle assessment : A TRYNIS application,» *Energy Procedia*, vol. 101, pp. 360-367, 2016.
- [194] J. SOUSA, «Energy simulation software for buildings : review and comparison,» p. 12, 2012.
- [195] J. HAND et S. CITHERLET, «A method for multiple-view assessment of building performance in Esp-r,» chez *Seventh international IBPSA*, Rio de Janeiro, 2001.
- [196] K. FROST, «The application of RADIANCE to daylight simulation,» chez *Building simulation conference*, Adelaide, Australia, 1993.
- [197] USDE, Getting started with ENERGYPLUS essentials, Basic concept manual - essential information you need about running ENERGYPLUS, U.S Department of Eenergy;, 1996.
- [198] T. H. Q. HUANG, A. ZHANG et Q. ZHANG, «Simulation based decision support tools in the early desing stages of green building -A review,» *Sustainability*, vol. 10, 2018.
- [199] T. SALOMON, R. MIKOLASEK et B. PEUPORTIER, «Outil de simulation thermique du batiment, COMFIE,» 2005.
- [200] A. YORK, DOE-2 reference manual (version 2.1A) Group WX-4, Los Alamos, New Mexico: Los Alamos scientific laboratory, 1981, p. 994.
- [201] C. PENG et X. WU, «Case study of carbon emissions from a building's life cycle based on BIM and Ecotect,» *Advances in material science and engineering*, p. 15, 2015.
- [202] EDSL, «edsitas,» 2019. [En ligne]. Available: <https://www.edsltas.com/tas-engineering/>.
- [203] R. ANGER et L. FONTAINE, *Batir en terre, du grain du sable à l'architecture*, Paris: Belin litterature et revues, 2009, p. 224.
- [204] J. BEAUCHAMP, «argiles,» 2015. [En ligne]. Available: <https://www.u-picardie.fr/beauchamp/mst/argiles.htm>. [Accès le 2 1 2020].
- [205] E. PRUD'HOMME, *Rôle du cation alcalin et des renforts minéraux et végétaux sur les mécanismes de formation degéopolymères poreux ou denses*, Université de Limoges, 2011.
- [206] H. VAN DAMME, «La terre, un béton d'argile,» *Pour la science*, vol. 423, pp. 51-57, 2013.
- [207] H. XIA, E. HERNANDEZ PEREZ et T. DUNN, «The impact of grain-coating chlorite on the effective porosity of sandstones,» *Marine and Petroleum Geology*, vol. 115, 2020.
- [208] S. LE PRIELLEC, «J'ai testé pour vous la construction en terre crue,» 2017. [En ligne]. Available: <https://www.novabuild.fr/reportages/jai-teste-pour-vous-construction-en-terre-crue>. [Accès le 1 2 2020].
- [209] S. BALDIT DE BARRAL, «Bellastock 2017 : les techniques de construction en terre les plus punks,» 2017. [En ligne]. Available: <https://makesense.org/article/bellastock-construction-en-terre/>.
- [210] T. A. PHUNG, *Formulation et caractérisation d'un composite terre-fibres végétales : la bauge*, Univesité de Caen Normandie, 2018, p. 180.
- [211] World-habitat, «Building with earth,» 2019. [En ligne]. Available: <https://www.world-habitat.org/world-habitat-awards/winners-and-finalists/building-with-earth/#outline>. [Accès le 1 3 2020].

REFERENCES

- [212] P. DOAT, A. HAYS, H. HOUBEN, S. MATUK et F. VITOUX, *Construire en terre*, France: CRAterre, 1979, p. 265.
- [213] R. ANGER, L. FONTAINE et H. HOUBEN, *Écrivains, Ma terre première pour construire demain*. [Performance]. 2010.
- [214] M. MOEVUS, L. FONTAINE, A. ROMAIN et P. DOAT, «Projet : béton d'argile environnemental (B.A.E),» CRAterre-ENSAG, Grenoble, 2013.
- [215] H. SCHROEDER, «Modern earth building codes, standards and normative development,» chez *Modern earth building*, Cambridge, Woodhead Publishing Ltd, 2012, pp. 72-109.
- [216] H. HOUBEN et S. BOUBEKEUR, CRAterre-ENSAG et CDI, 1998, p. 142.
- [217] C. COSTA, A. CERQUIERA, F. ROCHA et A. VELOSA, «The sustainability of adobe construction : past to future,» *International journal of architectural heritage*, pp. 639-647, 2018.
- [218] K. BEEBE, «Ancient Palestinian dwellings,» *The Biblical Archaeologist*, vol. 31, n° 12, pp. 37-58, 1968.
- [219] J. GUILLEUX, «Antikforever,» 2015. [En ligne]. Available: <http://antikforever.com/Syrie-Palestine/Phenicien%20Cananeen/Images/jericho03b.jpg>. [Accès le 4 1 2020].
- [220] H. SCHROEDER, *Sustainable building with earth*, New-York: Spring international publishing, 2016, p. 560.
- [221] A. S. STEEN, B. STEEN et E. KOMATSU, *Built by hand: vernacular buildings around the world*, Utah: Gibbs Smith Publisher, 2003, p. 472.
- [222] J. F. BRETON et J. C. DARLES, «Shibam,» *Storia della Citta*, vol. 14, pp. 63-86, 1980.
- [223] J. ALABID, A. TAKI et B. PAINTER, «Control of daylight and natural ventilation in traditional architecture of Ghadames, Libya,» *21st Century human habitat*, vol. Sustainability and development, pp. 131-140, 2016.
- [224] A. SAADAOU, «Ghadames à l'époque Ottomane, contribution à l'étude de l'architecture saharienne maghrébine,» chez *Carrefours saharien, vues des rives du Sahara*, Oran, CRASC, 2016, pp. 333-350.
- [225] A. F. SHAHRAN, D. REBA et M. KRKLJES, «Thermal comfort, adaptability and sustainability of vernacular single family house in Libya,» *Tehnicki vjesnik*, vol. 24, n° 16, pp. 1959-1968, 2017.
- [226] J.-L. LE QUELLEC, «Ghadamés, le port du désert,» *Le saharien*, vol. 226, pp. 3-21, 21 3 2018.
- [227] P. CHAPUIS, «Patrimoine -Ghadames (Libye),» 2004. [En ligne]. Available: <https://patrickchapuis.photoshelter.com/gallery-image/PATRIMOINE-Ghadames-Lybie-HERITAGE-Ghadames-Lybia/G0000yeFTNZiBZEw/I0000uCIaVA6rw2A/27>. [Accès le 3 1 2020].
- [228] M. BERTAGNIN et A. OULD SIDI, *Manuel pour la conservation de Tombouctou*, Paris: UNESCO, 2014, p. 92.
- [229] F. SOFLAIE, M. SHOKOUHIAN et S. M. M. SHEMIRANI, «Traditional iranian courtyards as microclimate modifiers by considering orientation, dimensions, and proportions,» *Frontiers of architectural research*, vol. 5, n° 15, pp. 225-238, 2016.
- [230] J. ROUHI, A. AVETA et B. G. MARINO, «the influence of iranian islamic architecture on the jewish house (west sabat house) of bam citadel,» *International journal of heritage architecture*, vol. 1, n° 11, pp. 89-98, 2017.
- [231] G. STEINMETZ, «L'ancienne citadelle d'Arg-é Bam a été reconstruite à l'identique,» 2003. [En ligne]. Available: <https://www.nationalgeographic.fr/histoire/lancienne-citadelle-darg-e-bam-ete-reconstruite-lidentique>. [Accès le 5 1 2020].
- [232] N. GUELIANE, *Qu'est-ce qu'un Ksar pour un Mozabite?*, Rabat, 2019.

REFERENCES

- [233] I. MAHROUR, «Contribution a l'élaboration d'une typologie "Umranique" des Ksour dans le Gourara,» *Insaniyat*, Vols. 1 sur 251-52, pp. 197-219, 2011.
- [234] A. CHAPOLIN et O. PLIEZ, «Un Sahara, des Sahara-s. Lumières sur un espace déclaré « zone grise »,» *Geoconfluence*, 2017. [En ligne]. Available: <http://geoconfluences.ens-lyon.fr/actualites/eclairage/un-sahara-des-sahara-s>. [Accès le 17 6 2020].
- [235] Y. TERKI, *De terre et d'argile*, Alger: Les presses de l'imprimerie En Nakhla, 2013, p. 176.
- [236] CNRA, «Sites Historiques,» 2017. [En ligne]. Available: <http://cnra.dz/atlas/sites-historiques/>. [Accès le 8 1 2020].
- [237] M. COTE, *La ville et le désert*, Paris: Karthala et IREMAM, 2005, p. 312.
- [238] M. BENCHERIF et S. CHAOUICHE, «La maison urbaine à patio, réponse architecturale aux contraintes climatiques du milieu aride chaud,» *Sécheresse*, vol. 24, n° 13, pp. 203-213, 2013.
- [239] S. RAYANE KADRI, S. CHAOUICHE et A. H. BENAMEUR, «Quelles formes de réhabilitation pour le Ksar d'Ouargla? Des objectifs urbains, patrimoniaux et sociaux,» *Le cahiers du Crasc*, n° 132, pp. 131-152, 2016.
- [240] T. BACHIR-CHEFIF et M. AICHE, «Ksar Taghit: earthen architecture between authenticity and changes,» chez *Vernacular and earthen architecture, conservation and sustainability*, New-York, Taylor & Francis, 2018, pp. 64-68.
- [241] A. AHRIZ, N. ZEMMOURI et S. FEZZAI, «Ksour of the Sahara desert as a great lesson of sustainable urban design in hot desert oases,» *International journal of advances in scientific research and engineering*, vol. 11, pp. 109-118, 2017.
- [242] A. A. N. ALABSI, D. X. SONG et H. W. GARFIELD, «Sustainable adaptation climate of traditional buildings technologies in the hot dry regions,» *Procedia engineering*, vol. 169, pp. 150-157, 2016.
- [243] N. GUELIANE, «Performances energetiques du patrimoine architectural mozabite,» *Annales du patrimoine*, vol. 17, pp. 57-70, 2017.
- [244] T. SALOMON et S. BEDEL, *La maison des négas watts*, paris: Terre vivante, 2004, p. 148.
- [245] R. HASEHDASH HASEH, M. KHAKZAND et M. OJAGHLOU, «Optimal thermal characteristics of the courtyard in the hot and arid climate of Isfahan,» *Buildings*, vol. 8, n° 112, 2018.
- [246] S. TESHNEHDEL, M. BAHARI et S. MIRNEZAMI, «Traditional courtyards as a microclimate in the improvement of human thermal comfort condition,» *Landscape architecture and regional planning*, vol. 4, n° 13, pp. 53-60, 2019.
- [247] M. A. DJERADI, «L'architecture Ksourienne (Algérie) entre signes et signifiants,» *l'architecture vernaculaire*, Vols. 1 sur 236-37, 2013.
- [248] H. A. ABDULKAREEM, «Thermal comfort through the microclimates of the courtyards. A critical review of the middle-eastern courtyard house as a climatic response,» *Procedia-social and behavioral sciences*, vol. 216, pp. 662-674, 2016.
- [249] S. HAOUÏ, «Contribution à la connaissance et à la préservation des architectures ksouriennes, cas : le touat Gourara (sud-ouest de l'Algérie),» chez *Congés mondial des études sur le moyen-orient et l'Afrique du nord*, Barcelone, 2010.
- [250] A. BENNADJI, *Adaptation climatique ou culturelle en zones arides. Cas du sud-est algérien*, Marseille: Université de Provence-Aix Marseille, 1999.
- [251] A. RAVERAU, *Le M'Zab, une leçon d'architecture*, Paris: Sindbad, 2003, p. 221.
- [252] H. BENCHEIKH et R. AMEUR, «The effects of green spaces (palme trees) on the microclimate in arid zones, case study :Ghardaia,» *Energy procedia*, vol. 18, pp. 10-20, 2004.

REFERENCES

- [253] N. GUILIANE, «The vernacular architectural heritage, lever of the development of sustainable architecture,» *International journal of human settlements*, vol. 1, n° 13, pp. 25-35, 2017.
- [254] J. ALABID et A. TAKI, «Bioclimatic housing design to desert architecture: a case study of Ghadames, Libye,» *HVAC & R research*, vol. 20, n° 17, pp. 760-769, 2014.
- [255] I. AHMAD, E. KETRISH et S. M. ABUGHRES, «Thermal analysis of the architecture of old and new houses at Ghadames,Libye,» *Building*, vol. 20, n° 11, pp. 39-42, 1985.
- [256] M. A. EALIWA, A. H. TAKI, A. T. HOWARTH et M. R. SEDEN, «An investigation into thermal comfort in the summer season of Ghadames,Libye,» *Building and environment*, vol. 36, pp. 231-237, 2001.
- [257] A. A. BAESSA, «An evaluation of space planning design of house layout to the traditional houses in Shibam, Yemen,» *Asian culture and history*, vol. 2, n° 12, pp. 15-24, 2010.
- [258] A. BAKIR et M. I. MEDAHJI, «Sustainability and value of bulding and constructing residential buildings in Wadi-Hadramaout- A case study of shibam Hadramaout Buildings,» *Journal of science and technology*, vol. 20, n° 12, pp. 1-21, 2015.
- [259] M. LEYLIAN, A. AMIRKHANI, M. R. BEMANIAN et M. ABEDI, «Design principales in the hot and arid climate of Iran, the case of Kashan,» *Internation journal of academic research*, vol. 2, n° 15, pp. 278-283, 2010.
- [260] Z. ZAMANI, S. HEIDARI, M. AZMOODEH et M. TELEGHANI, «Energy performances and summer thermal comfort of traditional courtyards buildings in a desert climate,» *Environmental profress & sustainable energy*, vol. 38, n° 16, 2019.
- [261] S. ABDOU et M. BOUMAZA, «Investigation sur l'integration climatique dans la maison traditionnelle du Ksar de Ouargla,» *Sciences and technologies*, pp. 121-129, 2004.
- [262] M. A. EBEN SALEH, «Adobe as a thermal regulation material,» *Solar & wind technology*, vol. 7, n° 14, pp. 407-416, 1990.
- [263] M. A. PORTA-GANDRA, E. RUBIO et J. L. FERNANDEZ, «Economic feasibility of passive abient comfort in Baja California dwellings,» *Building and environment*, vol. 37, pp. 993-1001, 2002.
- [264] H. BINCI, O. AKSOGAN, M. N. BODUR, E. AKCA et S. KAPUR, «Thermal isolation and mechanical properties of fibre reinforced mud bricks as wall materials,» *Construction and building materials*, vol. 21, pp. 901-906, 2007.
- [265] F. ALRASHED, M. ASIF et S. BUREK, «The role of vernacular construction techniques and materials for developing zero-energy homes in various desert climates,» *Buildings*, vol. 7, pp. 2-19, 2017.
- [266] A. H. ALGIFRI, S. M. BIN GADHI et B. T. NIJAGUNA, «Thermal behavior of adobe and concrete houses in Yemen,» *Renewable energy*, vol. 2, n° 16, pp. 597-602, 1992.
- [267] S. MARTIN, F. MAZARRON et I. CANAS, «Study of thermal environment inside rural houses of Navapalos (Spain): the advantages of ruse buildings of high thermal inertia,» *Construction and building material*, vol. 24, pp. 666-676, 2010.
- [268] N. FEZZAOUI, M. BENYAMINE, S. LARBI, B. Draoui et C. A. ROULET, «Impact of traditional and modenr building materials on the thermal behavior and energy consumption of a courtyard house in the hot dry climate,» chez *International conferecne on construction materials and structures (ICCMATS)*, Johannesburg, 2014.
- [269] N. MATARI, A. MAHI et M. LACHI, «Effet de l'enveloppe du batiment sur le confort thermique, application au climat aride,» chez *Congrés français du thermique SFT 2015, la thermique de l'habitat et de la ville*, La rochelle, 2015.

REFERENCES

- [270] A. DATTA et B. MUSTAFA, «a comparative study of the thermal performance of mud and brick houses in bangladesh,» chez *Building the future- sustainable and resilient environment*, Sri Lanka, 2016.
- [271] A. MICHEAL, M. PHILOKYPRO, S. THRAVALOU et L. IONNOU, «The role of adobes in the thermal performance of vernacular dwellings,» chez *TERRA Lyon*, 2016.
- [272] G. GIUFFRIDA, R. CAPONETTO et F. NOCERA, «Hygrothermal properties of raw earth materials : a literature review,» *Sustainability*, vol. 11, n° 15342, 2019.
- [273] J. M. PUPILLE, «Comprendre l'inertie thermique, la diffusivité, l'effusivité et leurs incidences sur le confort,» 2019. [En ligne]. Available: <https://passivact.fr/Concepts/files/InertiesThermiques-Comprendre.html>. [Accès le 20 2 2020].
- [274] L. CHAHWANE, *Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments*, Université de Grenoble, 2011.
- [275] A. BABU et S. SABOOR, «Study of unsteady state thermal characteristics of homogeneous and composite walls of buildings an insulating materials for passive cooling,» chez *3rd International high performance buildings conference*, Purdue, 2014.
- [276] E. OUEDRAOGO, D. BOUREIMA, T. S. M. Ky et A. Ouedraogo, «Determination of parameters influencing thermal comfort in a building,» *Science journal of energy engineering*, vol. 6, n° 13, pp. 42-48, 2018.
- [277] BBS, «Inertie thermique quèsaco?,» 2018. [En ligne]. Available: <http://www.bbs-slama.com/linertie-thermique-quesaco/>. [Accès le 24 2 2020].
- [278] M. HEGGER, V. AUCH-SHWELK, M. FUCHS et T. ROSENKRANZ, *Construire, Atlas des matériaux*, Lausanne, Suisse: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2009.
- [279] G. MINKE, *Building with Earth, Design and Technology of a Sustainable Architecture*, Berlin: Birkhauser Publishers for Architecture, 2006, p. 208.
- [280] Y. CHIHAB, M. GAROUM et N. LAROUCSI, «Energy performance of earthen walls in a hot climate of Morocco,» *International journal of innovative technology and exploring engineering*, vol. 8, n° 112, 2019.
- [281] P. M. TOURE, Y. DIEYE, P. M. GUEYE, V. SAMBOU, S. BOUDIAN et S. TIGUAMPO, «Experimental determination of time lag and decrement factor,» *Case studies in construction materials*, vol. 11, 2019.
- [282] N. C. BALAJI, M. MANI et B. V. VANTAKARMA REDDY, «Dynamic thermal performance of conventional and alternative building wall envelope,» *Building engineering*, vol. 21, pp. 373-395, 2019.
- [283] B. M. PATIL et S. VALSSON, «Analysis of thermal behavior of materials and construction techniques in the building envelope,» *international journal of architecture, engineering, and construction*, vol. 7, n° 14, pp. 23-40, 2018.
- [284] E. MALAKTOU, I. IOANNOU et M. PHYLOKIPRO, «Investigating the thermal properties of earth based materials: the case of adobes,» chez *10th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin. Natural and Anthropogenic Hazards and Sustainable Preservation*, New-York, Springer, Cham, 2018, pp. 95-103.
- [285] S. SHAIK, K. K. GORANTLA et A. B. T. PUTTARANGA SETTY, «Investigation of building walls exposed to periodic heat transfer conditions for green and energy efficient building construction,» *Procedia technology*, vol. 23, pp. 496-503, 2016.
- [286] F. EL-FGAIER, Z. LAFHAJ, E. ANTCZAK et C. CHAPISEAU, «Dynamic thermal performance on three types of fired earth brick,» *Applied thermal engineering*, vol. 93, pp. 377-383, 2015.
- [287] S. GOODHEW et R. GRIFFITHS, «Sustainable earth walls to meet the building regulations,» *Energy and buildings*, vol. 37, pp. 451-459, 2005.

REFERENCES

- [288] T. SALOMON et C. AUBERT, *Fraicheur sans Clim'*, Mens: Terre vivante, 2007, p. 82.
- [289] O. MANSOURI, R. BELARBI et F. BOURBIA, «Albedo effect of external surfaces on the energy loads and thermal comfort in buildings,» *Energy Procedia*, pp. 571-577, 2017.
- [290] A. BENSAYEH, A. FOUFA ABDESSEMED et H. BENCHEIKH, «M'Zabite heritage in southern algeria: what bioclimatic lessons can be learned to optimize thermal comfort?,» *MATEC Web of conference*, vol. 278, 2019.
- [291] A. RAVEREAU, *L'atelier de désert*, Marseille: Parentheses, 1981.
- [292] F. CHAMPIRE, *Étude expérimentale du comportement hydro-mécanique de la terre crue compactée pour la construction*, Université de Lyon,, 2017.
- [293] D. MEDEJLAKH, *Caractérisation multi-échelle du comportement thermohydrrique des enveloppe hygrosopique*, Univesité de Limoges/Constantine, 2016.
- [294] Y. JANNOT, «Sorpton,» 2013. [En ligne]. Available: <http://www.thermique55.com/principal/sorpton.pdf>. [Accès le 12 2 2020].
- [295] J. CALABRIA, W. VASCONESLOS et A. BOCCACCINI, «Microstructure and chemical degradation of adobe and clay bricks,» *Ceramics international*, pp. 665-671, 2009.
- [296] M. HAMIANE, I. DJEFOUR, H. MERABET, D. BOUALLALA, A. ZEKAGH, Y. TERKI et M. SAIDI, «Design of Adobe Bricks of Local Raw Materials forUse in the Monuments of Earthen Architecture (Case of Adrar Hospital) Algeria,» *Civil Engineering and Architecture*, vol. 4, n° 14, pp. 147-152, 2016.
- [297] K. A. J. OUEDRAOGO, *Stabilisation de matériaux de construction durables et écologiques a base de terre crue par des liants organiques et/ou minéraux a faibles impacts environnementaux*, Toulouse: Univesité de Paul Sabatier, 2019.
- [298] B. WELDON, P. BANDINI, M. MCGINNIS, E. DAVILA et D. GARCIA VERA, «Laboratory study on the strength behaviour of two laterally loaded adobe walls,» *Infrastructures*, vol. 4, n° 11, pp. 1-10, 2018.
- [299] D. MEDJELEKH, L. ULMET et F. DUBOIS, «Characterization of hygrothermal transfers in the unfired earth,» *Energy Procedia*, vol. 139, pp. 487-492, 2017.
- [300] F. EL-FGAIER, Z. LAFHAJ, C. CHAPISEAU et E. ANTCZEK, «Effect of sorption capacity on thermo-mechanical propertes of unfired clay bricks,» *Building engineering*, vol. 6, pp. 86-92, 2016.
- [301] U. AL-AQTASH, P. BANDINI et S. COOPER, «Numerical approach to model the effect of moisture in adobe masonry walls subjected to in-plane loading,» *International journal of architectural heritage*, vol. 11, pp. 805-815, 2017.
- [302] L. MICCOLI, U. MULLER et P. FONTANA, «Mechanical behaviour of earthen material : a comparison between earth block masonry, rammed earth and cob,» *Construction and building materials*, vol. 61, pp. 327-339, 2014.
- [303] T. MARTINS, J. FERNANDEZ et H. VARUM, «Influence of moisture in the mechanical propertes of load-bearing adobe masonry walls,» *International journal of architectural heritage*, pp. 841-854, 2018.
- [304] F. JOVE-SANDOVAL, M. BARBERRO-BARRERA et N. F. MEDINA, «Assesment of the mechanical performance of three varieties of pine needles as natural reinforcement of adobe,» *Construction and building materials*, vol. 187, pp. 205-213, 2018.
- [305] E. PORTUGUEZ, *Gouttes millimétriques d'eau en milieu confiné: comportement au cours du séchage*, Université de limoges, 2016.
- [306] ISO14040, *Environmental management, Life Cycle assesment- Principles and Framworks*, Brussels: International standars organisation, 2006.

REFERENCES

- [307] S. O. ISMAILA, K. T. ORIOLOWO et O. G. AKANBI, «Work capacity assesment of nEGERIAN BRILAYERS,» *Management science letters*, vol. 2, pp. 263-272, 2012.
- [308] V. BADINO, G. A. BLENGINI, S. NOCCO et K. ZAVAGLIA, «LCA of clay tiles and bricks for assesing sustainability of bio-architecture,» chez *1st international conference on Advances in mineral resources management and environmental geotechnology (AMIREG2004)*, Hania, Greece, 2004.
- [309] L. CABEZA, L. RINCON, V. VILARINO, G. PEREZ et A. CASTELL, «Life cycle assesment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector : a review,» *Renwlable a,d sustainable energy reviews*, vol. 29, pp. 394-416, 2014.
- [310] A. CHEL et G. N. TIWARI, «Thermal performance ans embodied energy analysis of passive house- cas study of Vault roof mud-house in India,» *Applied energy*, vol. 86, pp. 1956-1969, 2009.
- [311] A. SHUKLA, G. N. TIWARI et M. S. SODHA, «Embodied energy analysis of adobe house,» *renewable energy*, vol. 34, pp. 755-761, 2009.
- [312] A. McEWAN, H. HSU-KIM, N. ROBINS, N. HAGAN, S. HALABI, O. BARRAS, D. RITCHER et J. VANDENBERG, «Residential metal contamination and potential health risks of exposure in adobe brick houses in Potosi, Bolivia,» *Science of the total environment*, vol. 562, pp. 237-246, 2016.
- [313] S. KUMBHAR, N. KULKARNI, A. RAO et B. RAO, «Environmental life cycle assesment of traditiona bricks in western Maharashtra, India,» *Energy procedia*, vol. 54, pp. 260-269, 2014.
- [314] A. P. OLUKOYA OBAFEMI et S. KURT, «Environmental impacts of adobe as a building material ;the north Cyprus traditional building case,» *Case studies in construction materials*, pp. 32-41, 2016.
- [315] G. CALATAN, A. HEGYI, C. DICO et C. Mircea, «Experimental research on the recyclability of the clay material used in the fabrication of adobe brick type masonry units,» *Procedia enegineering*, vol. 54, pp. 260-269, 2017.
- [316] M. STAUB et J. P. GOURC, «Possibilités de réduction des emissions de gaz a effet de serre liées au stockage de déchets,» *Déchets sciences et techniques*, n° 152, pp. 8-16, 2008.
- [317] MATET, «Inventaire national des émissions de gaz à effet de serre de l'année 2000,» Ministère de l'aménagement du territoire, de l'environnement et du tourisme, Alger, 2010.
- [318] H. GUILLAUD, «Tradition et modernité des cultutres constructives de l'architecture de terre: panorama mondial et enjeux actuels sur la recherche, la formation, la documentation et la normalisation,» chez *CONVEGNO SEMINARIO DI STUDI HABITAT E ARCHITETTURA DI TERRA Le potenzialità delle tradizioni costruttive, Dec 1994*, Roma,Italie, 2018.
- [319] A. VISSAC, A. BOUGRES, D. GANDREAU, R. ANGER et L. FONTAINE, Argiles et biopolymères: les stabilisants naturels pour la construction en terre, Grenoble: CRAterre, 2017, p. 76.
- [320] Y. XIAO, X. FU, H. GU, F. GAO et S. LIU, «Properties, Characterization, and Decay of Sticky Rice-Lime Mortars from the Wugang Ming Dynasty City Wall (China),» *Materials Characterization*, vol. 90, pp. 164-172, 2014.
- [321] P. ZHAO, M. JACKSON, Y. ZHANG, G. LI, P. M. MONTEIRO et L. YANG, «Material characteristics of ancient Chinese lime binder and experimental reproductions with organic admixtures,» *Construction and Building Materials*, vol. 84, pp. 477-488, 2015.
- [322] D. SOW, A. CHAFADINE, S. GAYE et I. K. CISSE, «Integration of agricultural waste in local building materials for the exploitation: application with rice straw,» *Research journal of applied sciences*, vol. 7, n° 115, pp. 3030-3035, 2014.

REFERENCES

- [323] P. LERWATTANARUK et J. CHOKSIRIWANNA, «The physical and thermal properties of adobe bricks containing bagasse for earth construction,» 2011.
- [324] X. LIU, M. HU, S. KE, C. FU, X. GUO et X. YE, «A novel rammed earthen material stabilized with steel slags,» *construction and building materials*, vol. 189, pp. 1134-1139, 2018.
- [325] I. CHANG, J. IM, A. K. PRASIDHI et G. C. CHO, «Effects of Xanthan gum biopolymer on soil strengthening,» *Construction and building material*, vol. 74, pp. 65-72, 2015.
- [326] A. A. CORREA, L. M. MENDES, N. P. BARBOSSA, T. D. p. PROTASIO, N. D. A. CAMPOS et G. H. D. TONOLI, «Incorporation of bamboo particles and "synthetic termite saliva" in adobe,» *construction and building materials*, vol. 98, pp. 250-256, 2015.
- [327] B. BHARATH, R. MAHESHWAR, J. A. PATHAN et R. PATEL, «Studies on stabilized adobe blocks,» *International journal of research in engineering and technology*, vol. 3, n° 16, pp. 259-264, 2014.
- [328] A. ZEBAIR, F. FOUCHAL et A. HAMOUINE, «Sustainability of the stabilized earth blocs under chemical attack's effects and environmental conditions,» *Construction and building materials*, vol. 212, pp. 787-798, 2019.
- [329] M. MALKANTHI, N. BALTHAZAAR et A. A. PERERA, «Lime stabilization for compressed stabilized earth blocks with reduced clay and silt,» *Case studies in construction materials*, 2020.
- [330] N. DEGIRMENSI, «The using of waste phosphogypsum and natural gypsum in adobe stabilization,» *Construction and building materials*, vol. 22, pp. 1220-1224, 2008.
- [331] B. AYSE PEKRIOGLO, «The effects of waste marble dust and polypropylene fiber contents on mechanical properties of gypsum stabilized earthen,» *Construction and building materials*, vol. 134, pp. 556-562, 2017.
- [332] M. R. GANDIA, F. C. GOMES, A. R. CORREA, M. C. RODRIGUEZ et R. F. MENDES, «Physical, mechanical and thermal behavior of adobe stabilized with glass fiber reinforced polymer waste,» *construction and building materials*, vol. 222, pp. 168-182, 2019.
- [333] V. SHARMA, B. MARWAHA et H. VINYAK, «Enhancing durability of adobe by natural reinforcement for propagating sustainable mud housing,» *International journal of sustainable built environment*, vol. 5, pp. 141-155, 2016.
- [334] I. TURKMEN, E. EKINCI, F. KANTRACI et T. SARICI, «The mechanical and physical properties of unfired earth brick stabilized with gypsum and Elazig Ferrochrome slag,» *International journal of sustainable built environment*, vol. 6, pp. 565-573, 2017.
- [335] M. SAIDI, S. A. CHERIF, B. ZAGHMATI et A. SEDIKI, «Stabilization effects on the thermal conductivity and sorption behavior of earth bricks,» *Construction and building materials*, pp. 566-577, 2018.
- [336] D. BENCHEIKH et M. BEDERINA, «The Rehabilitation effects on the thermal behaviour of Algerian earthen built heritage,» *MATEC Web of Conferences*, vol. 02049, n° 1149, 2018.
- [337] E. AROUR, «Découpage administratif de l'Algérie & monographie,» 10 2014. [En ligne]. Available: <http://decoupageadministratifalgerie.blogspot.com/2014/10/cartegeographiqueLAGHO UAT.html>. [Accès le 18 5 2020].
- [338] B. ROUGHI, «Mémoire, Documentation et Archives de Laghouat,» Overblog, 2017. [En ligne]. Available: <http://roughibachir.over-blog.com/2017/01/cartes-et-plans-de-la-ville-de-laghouat-d-apres-des-sources-bibliographiques.html#>. [Accès le 02 06 2020].
- [339] A. ZAKAGH, «Plan permanent de sauvegarde et de mise en valeur de secteur sauvegardé,» Direction de la culture de la wilaya de Laghouat, Laghouat, 2011.
- [340] L. office nationale de la météorologie, «données climatique de la ville de Laghouat entre 2008-2018,» ONM, Laghouat, 2019.

REFERENCES

- [341] C. T. WADE, «Aridité est semi-aridité : acceptions, contenus et évolutions,» *Innovation, environnement, développement*, 2010.
- [342] جامعة صالح: قسنطينة مقاربية لترميم القصور الصحراوية بمنطقة الأغواط دراسة حالة قصر تاويالة, التخي ب. 3, بونيندر قسنطينة, 2018, p. 267.
- [343] «Le catastrophe de Laghouat,» *Journal Les Actualités Françaises*, 1948. [En ligne]. Available: <https://www.ina.fr/video/AFE85002140>. [Accès le 18 5 2020].
- [344] A. MECHETTAH, «Catastrophe d'El Gharbia -1ère Partie,» *OverBlog*, 2009. [En ligne]. Available: <http://sidielhadjaissa.over-blog.com/article-catastrophe-d-el-gharbia-1ere-partie-par-a-mechattah-37707039.html>. [Accès le 22 5 2020].
- [345] B. HMED, «Le blog des anciens sportifs de laghouat,» *OverBlog*, [En ligne]. Available: <http://ancienssportifsdelaghouat.over-blog.com/archive/2014-07/>. [Accès le 5 5 2020].
- [346] L. Sjade, «ALGÉRIE : AU TEMPS DE LA COLONISATION,» *Centreblog*, [En ligne]. Available: lilasjade.centerblog.net/voir-photo?u=http://lilasjade.l.i.pic.centerblog.net/o/78c5a76d.jpg. [Accès le 10 5 2020].
- [347] P. JOUDIOU, «Galicca,» *Galicca*, [En ligne]. Available: <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b531603065.item>. [Accès le 6 4 2020].
- [348] CNERIB, *RÉGLEMENTATION THERMIQUE DU BÂTIMENT (DTR C3-T)*, Alger : Ministre de l'Habitat et de l'Urbanisme, 2011.
- [349] F. EL-FGAIER, *Conception, production et qualification des briques en*, Lille, France: L'ECOLE CENTRALE DE LILLE, 2013.
- [350] C. SPITZ, *Analyse de la fiabilité des outils de simulation et des incertitudes de métrologie appliquée à l'efficacité énergétique des bâtiments*, Grenoble: Université de Grenoble, 2012, p. 196.
- [351] M. BENCHEKROUN, S. CHERGUI, F. RUGGIERO et S. DI TURI, «Indoor Microclimate Conditions and the Impact of Transformations on Hygrothermal Comfort in the Old Ottoman Houses in Algiers,» *International Journal of Architectural Heritage*, 2019.
- [352] S. KHELDJ et H. BENCHEIKH, «Impact of a Retrofitting Project on Thermal Comfort and Energy Efficiency of a Historic School in Miliana, Algeria,» *International Journal of Architectural Heritage*, 2019.
- [353] W. IZEMMOUREN, *Effet des ajouts minéraux sur la durabilité des*, Biskra: Université Mohamed Khider, 2016, p. 173.
- [354] P. DELLOT, *Les adobes, production est mise en oeuvre*, Cavaillon, Vaucluse: Association le village, 2015, p. 129.
- [355] M. CHRETIEN, *Compréhension des mécanismes de retrait-gonflement des sols argileux : approche sur site expérimental et analyse de sinistres sur constructions individuelles*, Bordeaux: Université Bordeaux 1, 2010, p. 372.
- [356] R. IDIR, *Mécanismes d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique*, Quebec, Canada: UNIVERSITE DE SHERBROOKE, 2009, p. 278.
- [357] B. BELHADJ, *Contribution à la valorisation des matériaux et des déchets locaux pour la formulation de bétons de sables légers isolants-porteur destinés à la construction en milieux aride (cas de la ville de Laghouat)*, Laghouat: Université Amar Téliidji, Laghouat, 2016, p. 122.
- [358] F. HERNOT, *L'argile, son utilisation dans l'officine*, Angers: Université d'Anger, 2016, p. 139.
- [359] L. M. GUDELO GUTIERREZ, *Aide à la décision en conception préliminaire par l'estimation du poids de la performance environnementale*, Bordeaux: École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2016, p. 238.

REFERENCES

- [360] E. OLACIA, A. L. PISELLO, V. CHIODO, S. MAISANO, A. FRAZZICA et L. CABEZA, «Sustainable adobe bricks with seagrass fibres, mechanical and thermal properties characterization,» *construction and building materials*, vol. 239, 2020.
- [361] M. OUEDRAOGO, K. DAO, Y. MILLOGO, E. AUBERT, A. MESSAN, M. SEYNOU, L. ZERBO et M. GOMINA, «Physical, thermal and mechanical properties of adobes stabilized with fonio (*Digitaria exilis*) straw,» *Building engineering*, vol. 23, pp. 250-258, 2019.
- [362] Y. MILLOGO, J. C. MOREL, E. AUBERT et K. CHAVAMI, «Experimental analysis of pressed adobe blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers,» *construction and building materials*, vol. 52, pp. 71-78, 2014.
- [363] J. NAKAMATSU, S. KIM, J. AYARZA, E. RAMIREZ, M. ELGEGREN et R. AGUILAR, «Eco-friendly modification of earthen construction with carrageenan: water durability and mechanical assesment,» *Construction and buildign materials*, vol. 139, pp. 193-202, 2017.
- [364] R. AGUILAR, J. NAKAMATSU, E. RAMIREZ, M. ELGEGREN, J. AYARZA, S. KIM, M. PANDO et L. O.-S. MARTIN, «The potential use of chitosan as a biopolymer additive for enhanced mechanical properties and water resistance of earthen construction,» *construction and building materials*, vol. 114, pp. 625-637, 2016.
- [365] Y. MILLOGO, A. D. SERE, A. FABRI et J. C. MOREL, «Earth blocks stabilized by cow dung,» *Materials and Structures*, vol. 49, pp. 4583-4594, 2016.
- [366] A. LUC, *Ambiances architecturales et urbaines*, Marseille: Parenthèse, 1998, p. 251.
- [367] L. GRESILLON, *Sentir Paris: bien-être et valeur des lieux*, Paris: Quae, 2005.
- [368] A. KADRI, *Tower bulding in Wadi Hadramaout*, Latvia: Noor publishing, 2018.
- [369] O. A. OLISSAN, *Influence de la fenestration rn vitre sur le confort thermique des batiments en climat tropical et humide : cas de la bande cotiere du Benin*, Université de Liege, 2017.
- [370] AIA, *The Architect's Handbook of Professional Practice*, Hoboken: John Wiley & Sons, 2013, p. 1187.
- [371] *Loi n° 98-04 du 20 Safar 1419 correspondant au 15 juin 1998 relative à la protection du patrimoine culturel*, Alger, 1998.
- [372] C. DURAND-DELACRE, *Visite à Laghouat*, Alger: Marcel Léon & Cie, 1924, p. 62.
- [373] P. CHARLES, *Algérie et Sahara: le général Margueritte*, Paris: Direction du Spectateur militaire, 1882, p. 468.

ANNEXES

ANNEXE I**Synthèses bibliographiques****Tableau A.1** : Normes et réglementations de construction en terre [215].

Pays	Document	Type	Sol	Technique	Système	Echelle
Afrique	ARS 671-683 (1996)	S		EB	EBM	R
Australie	CSIRO Bulletin 5,4th ed. (1995)	ND	E	EB, CSEB, EMM	RE, EBM	N
Australie	EBAA (2004)	ND	E	EB, EMM	EBM, RE	N
Brazil	NBR (1984-96)	S		CSEB		N
Brazil	NBR 13553 (1996)	S			CSRE	N
Columbia	NTC 5324 (2004)	S		CSEB		N
France	AFNOR XP.P13-901 (2001)	S		EB		N
Allemagne	LehmbauRegeln (2009)	S	E	C, LC, EB, EM, CP	RE, C, EBM , EP, EI, WL	N
Allemagne	RL 0803 (2004)	ND		EP		N
Allemagne	TM 01 (2008)	ND		EP		N
Allemagne	TM 02 (2011)	D		EB		N
Allemagne	TM 03 (2011)	D		EMM		N
Allemagne	TM 04 (2011)	D		EP		N
Allemagne	TM 05 (2011)	ND	E			N
Inde	IS : 2110 (1998)	S	E, ES		RE	N
Inde	IS : 13827 (1998)	S		EB	EBM, RE	N
Inde	IS 1725 (2011)	D		CSEB		N
Kenya	KS02-1070 (1999)	S		CSEB		N
Kirghizstan	PCH-2-87 (1988)	S	E, ES		RE	N

ANNEXES

New Zélande	NZS 4297-9 (1998)	S		E, EB	RE, EBM, EP	N
Nigeria	NIS 369 (1997)	S		CSEB		N
Nigeria	NBC 10.23 (2006)	BC	E		EBM, RE	N
Pérou	NTE E.080 (2000)	S		EB	EBM	N
Spain	MOPT Tapial (1992)	ND	E		RE	N
Spain	UNE 41410 (2008)	S		CEB		N
SriLanka	SLS 1382 parts 1-3 (2009)	S		CSEB	EBM	N
Switzer land	Regelnzum Bauen mit Lehm (1994)	ND	E	EB, LE, EM	EBM, RE, EI, WL	N
Tunisie	NT 21.33, 21.35 (1998)	S		CEB		N
Turquie	TS (1985-97)	S		CSEB		N
USA	UBC, Sec. 2405 (1982)	BC			EBM	L
USA	14.7.4 NMAC (2006)	BC		EB, EMM	EBM, RE	L
USA	ASTM E2392/E2392M (2010-16)	S	E	EB, EM	C, EBM, RE, EM, WL	N
Zimbabwe	SAZS 724 (2001)	S	E		RE	N

S : Normes publiées par des organismes nationaux de normalisation ou des organisations spécialisées qui ont passé une procédure prédéfinie d'approbation et sont reconnues par une autorité étatique de construction.

BC : Codes du bâtiment émis par les organismes nationaux de normalisation avec un ou plusieurs chapitres sur la construction en terre.

ND : Document normatif délivré par des organisations spécialisées qui ont passé une procédure d'agrément prédéfinie mais ne sont pas reconnus par une autorité étatique de construction.

N : nationale, L : locale, R : régionale.

C : bauge, CP : panneaux d'argile, E, ES : Terre, Terre stabilisé par ciment,

EB : bloc de terre, CEB : adobe, bloc de terre comprimé, CSEB : bloc de terre comprimé stabilisé, PEB : bloc de terre coulé,

EBM : maçonnerie de bloc de terre, EM : mortier de terre, EP : plâtre de terre, EMM : maçonnerie de mortier de terre, ESM : mortier de terre pulvérisateur,

EI : remplissage de terre, WD : Torchis, PEI: remplissage de terre allégée, LC: Terre allégée,

RE : pisé, CSRE : pisé stabilisé par ciment, WL : revêtement des parois.

Tableau A.2 : Synthèse bibliographique sur la stabilisation de l'adobe.

Type de produit	Réf.	Stabilisant	(%)	Fc (MPa)	λ (W/m.K)	Absorption d'eau (%)
Produits naturels d'origine végétale	[360]	Herbier marin (3cm)	0	1.67	0.82	-
			0.5	2.64	0.76	
			1.5	2.63	0.74	
			3	2.49	0.72	
		Paille (3cm)	0.5	2.82	0.73	
			1.5	1.88	0.68	
	3		1.80	0.55		
	[361]	Paille de fonio	0	2.6	1.1	$g/m^2.s^{1/2}$
			0.2	2.8	0.95	0.18
			0.4	2.9	0.95	0.185
			0.6	2.5	0.88	0.19
			0.8	2.4	0.57	0.18
			1	2.3	0.38	0.17
	[362]	Fibre de KénaF (30mm)	0	2.45	1.67	12
			0.2	2.8	1.56	5
			0.4	2.85	1.52	4.5
			0.8	2.7	1.43	5
		Fibre de KénaF (60mm)	0.2	2.2	1.47	11
			0.4	2.65	1.42	7
	0.8		1.8	1.3	11	
	[322]	Paille de riz	0	0.79	0.33	-
			1	0.6	0.22	
			2	0.45	0.18	
			3	0.55	0.15	
			4	0.85	0.08	
			5	0.79	0.06	
	[323]	Bagasse	0	1.57	0.71	-
			1	2.0	0.65	
2			2.12	0.62		
3			2.40	0.54		
6			3.15	0.45		
Balle de riz		1	1.77	0.65		
		2	1.86	0.64		
		3	2.19	0.57		
		6	2.15	0.54		
		[363]	Cargeenan	0	2.1	
0.5	3.9					
[364]	Chitosan		0	2.1		
			3	3.9		
[365]	Bouse de vache	0	2.1	-	-	
		1	2.48		6.5	
		2	2.57		6.15	
		3	2.8		5.65	
[325]	Gomme Xanthan	0	0.4	-	-	
		0.5	3.0			
		1	3.7			

ANNEXES

			1.5	4.2		
Produits synthétiques	[324]	Scories d'acier	0	2.8	0.19	-
			10	4.0	0.20	
			15	4.5	0.21	
			20	5.4	0.22	
			25	6.16	0.23	
Produits minéraux	[329]	Chaux	5	1.2	-	15.7
			10	1.6		12.8
			15	1.2		10.2
		Ciment	8	2.1		12.5
			10	2.3		14.3
			Ciment + chaux	3+7		3.5
		5+5		5.5		10.1
	7+7	3.0		10.2		
	[332]	Polymère renforcé aux fibres de verre	0	1.41	0.86	9.62
			2.5	1.32	0.79	12.82
			5	1.62	0.74	15.21
			7.5	1.7	0.72	15.23
			10	2.05	0.68	15.6
	[328]	Ciment blanc (CB)	0	1.9	-	-
			10	1.85		
		Chaux industrielle (CI)	10	1.05		
		Chaux artisanale (CA)	10	0.6		
		CB+ CI	10	2.4		
	CB + CA	10	2.1			
	[21]	Ciment	0	2.2	1.1	kg/m ² .s ^{1/2}
						0.25
			2	2.6	0.98	0.50
			4	2.8	0.90	0.54
			8	3.0	1.2	0.47
			12	3.2	1.4	0.44
	[335]	Ciment	0	-	0.79	-
			5		0.8	
8			0.96			
10			1.07			
12			1.1			
Chaux		5	0.79			
		8	0.93			
		10	0.96			
		12	0.97			
[331]	Poudre de marbre + Fibre polymère	0+0	1.09	-	-	
		10+0	1.63			
		10+0.5	3.47			
		10+1	2.92			
		10+1.5	2.79			
		10+2	2.97			
		20+0	1.76			
		20+0.5	2.43			
		20+1	2.15			
20+1.5	2.04					

ANNEXES

Produits minéraux			20+2	1.96		
	[327]	Chaux	10	2.51	-	18.18
			12	2.71		16.78
		Ciment + chaux	8 + 3	4.43		12.35
			5+10	3.12		13.49
	[22]	Ciment	0	2.5	-	29
			4	4.6		23
			6	5.6		25
			8	6.0		27
			10	6.05		29
			12	6.5		29.5
	[23]	Chaux	0	2.3	-	28
			4	3.2		23
			6	3.3		22.5
			8	3.4		20
			10	3.5		15
			12	3.2		18
	[330]	Gypse	0	1	-	-
			5	1.2		
			10	3		
			15	4.5		
			20	4.6		
		Phosphogypse	25	4.8		
5			1.1			
10			3.0			
15			3.0			
20			4.0			
Mélange de produits	[326]	Particules de Bambou + Salive synthétique de termite	0+0	0.6	-	100
			0+1	0.72		15
			2+0	0.51		100
			4+0	0.8		100
			6+0	0.96		17.2
			2+1	1.01		15
			4+1	1.01		15.9
			6+1	1.14		16
	[333]	Ciment	0	0.95	-	24
			2.5	1.2		53
		Ciment + Fibre de pin de l'Himalaya	2.5+0.5	1.75		8
			2.5+1	2.25		10
			2.5+1.5	2.05		23
			2.5+2	1.3		21
		Ciment + Fibre de GrewiaOptiva	2.5+0.5	1.85		7
			2.5+1	2.35		9
	2.5+2		3	11		
[334]	Fibre de paille + Gypse+ Scories de ferrochrome	1+0+0	4.24	-	kg/m ² .s ^{1/2}	
		1+10+0	4.85		2	
		1+0+10	3.84		1.84	
		1+5+5	4.1		2.04	
						1.86

ANNEXE II**Détermination des limites de la zone de confort thermique et des zones de contrôle potentiel de la ville de Laghouat selon la méthode de SZOKOLAY****a) La température moyenne annuelle**

$$T_m = \Sigma T_m / 12 = 20.37^\circ\text{C}$$

b) La température neutre

$$T_n = 17.6 + (0.31 \times T_m) = 23.91^\circ\text{C}$$

c) L'amplitude moyenne pour le mois le plus chaud (juillet)

$$dT_m = T_{\text{moy max}} - T_{\text{moy min}} = 14.6^\circ\text{C}$$

d) Limite de zone de confort

$T_1 = T_n + (A_{hn} - 12) \times 0.025 \times (T_n - 14) - 2$, Où A_{hn} représente l'humidité absolue de point de neutralité, elle est égale à 12g/kg.

$$T_1 = 21.91^\circ\text{C}$$

$$T_2 = T_1 + 4$$

$$T_2 = 25.91^\circ\text{C}$$

$$T_3 = T_1 + 0.2 \times (T_1 - 14)$$

$$T_3 = 23.49^\circ\text{C}$$

$$T_4 = T_2 + 0.2 \times (T_2 - 14)$$

$$T_4 = 28.29^\circ\text{C}$$

- Les points 1 et 2 correspondent à la ligne de 12 g/kg d'humidité absolue, les points 3 et 4 correspondent à celle de 4g/kg.

e) Limite de zone de contrôle potentiel pour la période froide : zone de chauffage solaire passif

$T_5 = T_n + 0.36 - 0.025 \times H_v$, Où H_v représente la moyenne journalière totale d'irradiation solaire en Wh/m^2 , d'une surface vertical sud pour le mois le plus froid, elle est égale à 3640 Wh/m^2 .

$$T_5 = 15.17^\circ\text{C}$$

- Le point 5 correspond à la ligne de saturation HB= 100%.

f) Limite de zone de contrôle potentiel pour la période chaude

1. Effet de masse

$$T6 = T2 + 0.5 (dTm)$$

T6 = 33.21°C , ce point correspond à la ligne 12g/kg d'humidité absolue.

$$T7 = T6 - 0.05 (T6 - 14)$$

T7 = 32.24°C , ce point correspond à la ligne 14g/kg d'humidité absolue.

$$T8 = T6 + 0.2 (T6 - 14)$$

T8 = 37.05°C , ce point correspond à la ligne 4g/kg d'humidité absolue.

2. Effet de masse avec ventilation naturelle

$$T9 = T2 + 0.8 (dTm)$$

T9 = 37.59°C , ce point correspond à la ligne 12g/kg d'humidité absolue.

$$T10 = T9 - 0.05 (T9 - 14)$$

T10 = 36.41°C , ce point correspond à la ligne 14g/kg d'humidité absolue.

$$T11 = T9 + 0.2 (T9 - 14)$$

T11 = 42.30°C , ce point correspond à la ligne 4g/kg d'humidité absolue.

3. Ventilation naturelle- mouvement d'air sur la surface de la peau

$$T12 = T2 + 5$$

T12 = 30.91°C , ce point correspond à la ligne 12g/kg d'humidité absolue.

$$T13 = T12 + 0.1 (T12 - 14)$$

T13 = 32.60°C , ce point correspond à la ligne 4g/kg d'humidité absolue.

T14 = T1 = 21.91°C , ce point correspond à la courbe de 90% d'humidité relative.

$$T15 = T12 - 0.18 (T12 - 14)$$

T15 = 27.86°C , ce point correspond à la à la courbe de 90% d'humidité relative.

4. Refroidissement évaporatif direct

$$T16 = Tn + 12$$

T16 = 35.91°C , les limites de cette zone sont tracées à partir des lignes de température humide de point 2 et 3.

5. Refroidissement évaporatif direct

$$T17 = Tn + 15$$

T17 = 38.91°C , ce point correspond à la ligne 14g/kg d'humidité absolue.

ANNEXE III**Questionnaire de l'enquête de comportement thermique**

Saison : <input type="checkbox"/> Hiver <input type="checkbox"/> Eté	Température extérieure : <input style="width: 100%;" type="text"/>	Température intérieure : <input style="width: 100%;" type="text"/>
Age : <input style="width: 100%;" type="text"/>	Sexe : <input style="width: 100%;" type="text"/>	Maladies : <input style="width: 100%;" type="text"/>
Tenue vestimentaire :		
Tricot à manches longues <input type="checkbox"/>	Robe <input type="checkbox"/>	Chaussettes épaisses <input type="checkbox"/>
Tricot demi-manche <input type="checkbox"/>	Short <input type="checkbox"/>	Chaussettes légères <input type="checkbox"/>
Tricot à manches courtes <input type="checkbox"/>	Survêtement <input type="checkbox"/>	Sandale <input type="checkbox"/>
Pull-over à manches longues <input type="checkbox"/>	pantalon <input type="checkbox"/>	Boots <input type="checkbox"/>
Kechabia <input type="checkbox"/>	Chandail <input type="checkbox"/>	Claquette <input type="checkbox"/>
Chemise à manches longues <input type="checkbox"/>	Veston <input type="checkbox"/>	Escarpin <input type="checkbox"/>
Djellaba <input type="checkbox"/>	Jaquette <input type="checkbox"/>	Mocassin <input type="checkbox"/>
Chemise en coton <input type="checkbox"/>	Pyjamas <input type="checkbox"/>	Pantoufles <input type="checkbox"/>
Autres :		
.....		
Niveau d'activité :		
Repos, Couché <input type="checkbox"/>	Activité légère, debout <input type="checkbox"/>	
Repos, assis <input type="checkbox"/>	Activité moyenne, debout <input type="checkbox"/>	
Activité sédentaire, assis <input type="checkbox"/>	Activité soutenue <input type="checkbox"/>	
Position :		

ANNEXES

Appréciation global :			
Très Froid	<input type="checkbox"/>	Légèrement chaud	<input type="checkbox"/>
Froid	<input type="checkbox"/>	Chaud	<input type="checkbox"/>
Légèrement froid	<input type="checkbox"/>	Très chaud	<input type="checkbox"/>
Neutre	<input type="checkbox"/>		
Élément ajusté ou contrôlé dans l'espace :			
Fenêtre	<input type="checkbox"/>	Ventilateur	<input type="checkbox"/>
Porte donnant sur intérieur	<input type="checkbox"/>	Chauffage	<input type="checkbox"/>
Porte donnant sur extérieur	<input type="checkbox"/>	Autres :	
Climatiseur	<input type="checkbox"/>	
Source d'inconfort :			
Humidité	<input type="checkbox"/>	Chaleur/froid de parois	<input type="checkbox"/>
Sècheresse	<input type="checkbox"/>	Fenêtre inutile	<input type="checkbox"/>
Vitesse de l'air	<input type="checkbox"/>	Tenue vestimentaire inappropriée	<input type="checkbox"/>
Rayonnement solaire	<input type="checkbox"/>	Autres :	
Chauffage/climatisation	<input type="checkbox"/>	

Tableau A.3 : Détails d'isolement vestimentaire des enquêtés [24].

	Jeune homme		Homme âgé		Femme	
	Tenue	Met	Tenue	Met	Tenue	Met
Hiver	Slip	0.04	Caleçon long	0.15	Culotte+ soutien-gorge	0.04
	pantalon	0.24	Pantalon léger	0.15	Caleçon long	0.15
	T-shirt	0.08	Maillot de corps	0.04	Maillot de corps	0.04
	Tricot a manche long	0.34	Chemise manche longue	0.25	Haut de sous-vêtement long	0.2
	Veste	0.17	Djellaba	0.33	Robe d'hiver à manche longue	0.46
	Chaussette	0.02	Chaussette	0.02	Chaussette à genoux	0.06
	Chaussure de sport	0.02	Pantoufle	0.03	Pantoufle	0.03
Été	Slip	0.04	Caleçon court	0.1	Culotte	0.03
	Maillot de corps	0.04	Pantalon léger	0.15	Soutien-gorge	0.01
	Tricot a manche courte	0.17	Maillot de Corps	0.04	Maillot de corps	0.04
	Pantalon léger	0.15	Djellaba légère	0.29	Jupon	0.16
	Veste	0.1	Tabouret en bois	0	Robe d'été	0.29

ANNEXE IV**Tableaux récapitulatifs des mesures expérimentales****Tableau A.4** : Résultats de mesure de température et d'humidité relative, en période hivernale.

Jour	Temps (h)	Température de l'air (°C)			Humidité relative de l'air (%)		
		Séjour	Cour	Extérieur	Séjour	Cour	Extérieur
07/01/2017	10 :00	7,62	4	4	62,5	59,5	65
	11 :00	8,09	6,9	6	62,7	58	60
	12 :00	9,12	7,6	9	63,1	57,1	53
	13 :00	9,88	8,5	10,3	62,8	56,3	52
	14 :00	9,46	9,3	11	62,3	55,2	50
	15 :00	10,08	11,1	12	61,9	58,2	52
	16 :00	10,27	10,7	11,7	61,1	55,9	43
	17 :00	9,54	10,2	11	61,6	52,2	43
	18 :00	10,71	9,9	10	59,9	49,9	40
	19 :00	10,82	9,4	7	60,5	46	43
	20 :00	10,91	9	5	58,1	44,3	42
	21 :00	11,53	8,7	3	57,6	44,9	42
	22 :00	11,15	7,9	2,2	56,7	47	45
	23 :00	11,23	6,8	1	57,9	49	47
24 :00	10,81	6,1	0	58,9	51,6	52	
08/01/2017	01 :00	10,63	5,11	0	59,3	54,3	57
	02 :00	9,67	5,24	0	60,9	55,1	62
	03 :00	9,82	4,9	-1	61	61,3	65
	04 :00	9,67	4,3	-2	61,5	63,4	67
	05 :00	9,54	3,4	-3	60,1	65,2	70
	06 :00	9,41	2,8	-3,4	60,3	68,4	76
	07 :00	9,04	3,27	-1	61,8	69,1	84
	08 :00	9,21	3,9	-2	60,9	72,8	86
	09 :00	9,3	4,5	0	61,4	73,4	87
	10 :00	9,52	4,7	2,7	61,8	68,4	66
	11 :00	9,47	4,8	5	61,2	62,1	57
	12 :00	9,63	6,9	9	59	58,5	50
	13 :00	9,79	8,3	10,4	58,3	59,8	35
	14 :00	10	9,9	13	57,5	55	35
	15 :00	10,31	11,8	15	56,7	47	35
	16 :00	10,72	12,6	14,8	55,1	45	33
	17 :00	10,92	10,5	13	54,8	43,3	28
	18 :00	10,52	10,2	12	54	43,1	26
	19 :00	11,05	10,1	8,8	55,1	45,1	28
	20 :00	11,3	9,6	7	55,4	47	37
	21 :00	11,42	9,5	5	55,1	51,5	43
	22 :00	11,31	8,7	3	57	51,8	52
	23 :00	11,58	8,2	2	57,9	56,6	57
	24 :00	11,4	7,8	1	58	57,8	60
09/01/2017	01 :00	11,3	7,1	0,5	59,6	59,1	65
	02 :00	11	6,7	-1,2	60	60,8	70
	03 :00	10,72	5,07	-1,4	59,7	63	72
	04 :00	10,08	4,5	-2	59,8	65,2	76
	05 :00	10,32	3,4	-3,3	60,8	64,2	71
	06 :00	10,23	3	-3	61,9	63,2	65
	07 :00	9,18	3,21	-2	62	59,9	60
	08 :00	9,06	4,1	0	62,4	59,4	60
	09 :00	8,97	4,9	5,2	60	57,4	56

ANNEXES

	10 :00	8,74	8,6	7,2	59,4	54	42
	11 :00	8,52	10,8	10	58,8	52,9	39
	12 :00	8,78	10,1	12	58,5	50	35
	13 :00	9,51	11,21	13,5	57,9	53	33
	14 :00	9,85	12	14	56,1	49	33
	15 :00	10,52	12,5	14	55,7	47,5	26
	16 :00	10,84	12,7	13,6	54,3	46	26
	17 :00	10,62	11,9	12	55,1	47	35
	18 :00	10,89	11	11	55,6	49,5	44
	19 :00	11,11	10,2	9,2	56,8	50	54
	20 :00	11,48	9,98	8	58,3	52,5	57
	21 :00	11,08	9,65	7	57,5	51,6	61
	22 :00	11,48	9,13	7	59,1	57,5	64
	23 :00	11,52	8,7	5	60	63	68
	24 :00	11,2	7,3	4	60	67,8	71
10/01/2017	01 :00	11	6,8	2,2	60	69,2	79
	02 :00	10,78	5	1	60,8	69,9	82
	03 :00	10,54	5,4	0	61,4	72,5	83
	04 :00	10,23	4,8	-0,5	62,5	73	86
	05 :00	9,32	4,5	-1	62,2	74,3	84
	06 :00	9,67	3,54	-1,5	62,4	74,9	86
	07 :00	9,71	3,87	-2	62,5	70	87
	08 :00	9,29	3,4	-2,3	63,5	72	87
	09 :00	9,08	3,6	-1	62,5	68,5	75
	10 :00	8,81	6,3	4,8	61,9	65	68

Tableau A.5 : Résultats de mesure de température radiante du séjour, en période hivernale.

Jour	Temps (h)	Température radiante (°C)					
		Nord	Sud	Est	Ouest	Plancher	Plafond
07/01/2017	11:00	8,75	9,21	10,7	10,73	8,68	10,47
	13:00	9,14	10,39	11,33	11,07	9,22	12,71
	15:00	9,84	12,59	11,58	11,67	9,43	13,03
	17:00	11,42	12,86	11,71	11,71	9,07	13,95
	19:00	12,32	13,42	11,69	11,89	10,82	14,41
	21:00	12,81	13,66	11,85	10,95	9,55	14,67
	23:00	11,76	11,02	10,67	10,76	9,32	13,63
08/01/2017	01:00	10,18	10,95	10,21	10,45	8,71	12,87
	03:00	9,93	10,61	9,97	10,01	8,13	12,53
	05:00	9,09	10,33	9,23	9,59	8,26	10,98
	07:00	8,72	9,87	9,23	9,01	7,94	10,03
	09:00	8,42	9,01	9,03	8,92	7,12	10,61
	11:00	9,09	9,85	9,25	9,58	7,98	11,01
	13:00	9,78	10,55	10,32	9,84	8,06	12,9
	15:00	10,98	11,23	10,92	10,13	8,88	13,42
	17:00	12,62	12,89	11,59	10,92	9,02	14,64
	19:00	13,02	13,52	11,83	11,28	10,35	14,89
	21:00	13,41	13,94	11,66	10,92	10,87	14,94
23:00	11,43	13,35	10,57	10,67	10,61	13,06	
09/01/2017	01:00	10,98	12,86	9,92	10,02	9,47	12,87
	03:00	9,22	11,32	9,57	9,77	9,08	12,09
	05:00	8,88	10,95	9,32	9,52	8,9	11,64
	07:00	8,56	10,08	9,28	9,47	8,62	10,31
	09:00	8,42	11,11	9,97	9,17	8,89	10,98
	11:00	9,57	12,42	10,35	9,98	8,67	12,32
	13:00	10,24	12,83	10,27	10,47	10,1	13,07
	15:00	11,5	13,6	10,54	10,72	10,51	13,46

ANNEXES

	17:00	12,58	13,78	10,61	10,87	11,01	14,31
	19:00	12,81	12,81	11,06	11,12	11,27	14,92
	21:00	13,31	12,93	11,47	11,49	9,96	13,14
	23:00	12,39	12,05	11,58	11,62	9,88	12,97
10/01/2017	01:00	11,32	11,91	10,76	11,11	9,24	12,31
	03:00	10,88	10,25	10,42	10,89	9,17	12,06
	05:00	9,75	9,93	10,19	10,58	8,62	11,82
	07:00	8,89	9,72	10,12	10,26	8,18	10,92
	09:00	8,48	9,29	9,83	9,89	8,03	10,18

Tableau A.6 : Résultats de mesure de température radiante de la cour, pendant la période hivernale.

Jour	Temps (h)	Température radiante (°C)			
		Sud	Ouest	Nord	Plancher
07/01/2017	11:00	6,87	7,55	8,61	6,42
	13:00	9,41	12,6	13,62	11,51
	15:00	12,92	13,17	13,57	13,35
	17:00	11,49	12,05	12,83	11,45
	19:00	10,06	9,32	9,17	9,93
	21:00	7,26	4,64	4,32	5,44
	23:00	3,76	2,43	2,24	3,92
08/01/2017	01:00	3,09	1,78	1,57	1,89
	03:00	0,53	0,48	0,33	0,8
	05:00	-1,36	-1,34	-1,02	-1,78
	07:00	0,94	0,03	0,89	-1,18
	09:00	1,87	2,09	1,18	0,16
	11:00	5,9	6,82	7,26	5,28
	13:00	11,54	11,14	13,96	12,15
	15:00	13,03	14,89	16,4	14,98
	17:00	13,62	14,04	15,28	14,09
	19:00	11,14	9,93	10	10,39
	21:00	6,48	6,39	6	6,73
23:00	3,93	3,73	3,5	4,35	
09/01/2017	01:00	2,87	2,83	2,81	3,97
	03:00	1,72	1,51	1,31	0,82
	05:00	-2,05	-1,09	-1,84	-2,18
	07:00	-1,74	-1,61	-1,61	0,33
	09:00	7,52	6,14	5,19	6,84
	11:00	12,31	12,9	13,56	12,59
	13:00	13,65	13,83	15,71	14,33
	15:00	15,15	14,18	16,36	15,9
	17:00	13,41	13,34	14,33	13,06
	19:00	11,54	10,87	10,9	11,67
	21:00	9,88	7,91	9,3	9,14
23:00	6,72	7,07	7,65	6,98	
10/01/2017	01:00	4,56	3,44	4,05	4,57
	03:00	2,63	2,62	2,51	2,79
	05:00	1,24	1,36	0,06	2,95
	07:00	-1,02	-1,14	-0,89	-1,07
	09:00	2,07	1,72	0,94	1,84

ANNEXES

Tableau A.7 : Résultats de température moyenne radiante et opérative hivernale.

Jour	Temps (h)	Température moyenne radiante (°C)		Température opérative (°C)	
		Séjour	Cour	Séjour	Cour
07/01/2017	11:00	9,75	7,36	8,92	6,99
	13:00	10,64	11,79	10,26	9,99
	15:00	11,35	13,25	10,71	12,05
	17:00	11,78	11,96	10,66	10,98
	19:00	12,42	9,62	11,62	9,24
	21:00	12,24	5,42	11,88	6,8
	23:00	11,19	3,09	11,21	4,73
08/01/2017	01:00	10,56	2,08	10,59	3,38
	03:00	10,19	0,54	10	2,56
	05:00	9,58	-1,38	9,56	0,85
	07:00	9,13	0,17	9,08	1,6
	09:00	8,85	1,33	9,07	2,78
	11:00	9,46	6,32	9,46	5,42
	13:00	10,24	12,20	10,01	10,06
	15:00	10,92	14,83	10,61	13,33
	17:00	11,94	14,26	11,93	12,25
	19:00	12,48	10,37	11,76	10,07
	21:00	12,62	6,40	12,52	7,81
23:00	11,6	3,88	11,59	5,85	
09/01/2017	01:00	11,02	3,12	11,16	4,84
	03:00	10,175	1,34	10,44	2,93
	05:00	9,86	-1,79	10,09	0,65
	07:00	9,38	-1,16	9,28	0,94
	09:00	9,75	6,42	9,27	5,53
	11:00	10,55	12,84	9,53	11,53
	13:00	11,16	14,38	10,33	12,7
	15:00	11,72	15,40	11,12	13,8
	17:00	12,19	13,54	11,4	12,56
	19:00	12,33	11,25	11,72	10,51
	21:00	12,05	9,06	11,56	9,14
23:00	11,74	7,11	11,63	7,69	
10/01/2017	01:00	11,108	4,16	11,05	5,28
	03:00	10,611	2,64	10,56	3,85
	05:00	10,14	1,40	9,73	2,71
	07:00	9,68	-1,03	9,69	1,32
	09:00	9,28	1,64	9,18	2,35

Tableau A.8 : Résultats de mesure de température et d'humidité relative, en période estivale

Jour	Temps (h)	Température de l'air (°C)			Humidité relative de l'air (%)		
		Séjour	Cour	Extérieur	Séjour	Cour	Extérieur
	01 :00	27,7	32	30	44,5	42	23
	02 :00	27,8	30,6	28	44,65	43	26
	03 :00	27,9	29,8	27	44,8	43,2	28
	04 :00	28,1	28,4	26	44,6	44	32
	05 :00	27,9	28,1	26	44,8	44	32
	06 :00	27,8	27,4	25	45,1	44,1	39
	07 :00	27,5	27,7	26	45,3	42	34
	08 :00	27,6	29,1	29	44,9	40	27
	09 :00	27,8	29,4	31	44,2	39	22
	10 :00	27,9	29,7	31,7	43,9	39	20
	11 :00	28,2	31	34	42,7	38	19

ANNEXES

09/07/2017	12 :00	28,3	31,3	36	42,5	37	20
	13 :00	28,7	32,9	37	42,4	36	17
	14 :00	28,9	33,4	38	42,4	36	17
	15 :00	28,7	33,7	38	42,2	35,2	16
	16 :00	29,2	35,1	38,7	42,1	34	15
	17 :00	29,4	35,5	39	41,7	33	14
	18 :00	29,8	34,7	38	41,5	32,2	15
	19 :00	30,3	34,2	37,4	41,6	31,8	14
	20 :00	30,2	32	36	41,3	32,6	14
	21 :00	30,5	31,8	34	42,1	34,8	16
	22 :00	30,9	31,4	32,7	42,4	35	17,1
	23 :00	31,3	31	32	42,8	35,7	19
	24 :00	31,8	30,7	31,1	42,7	36	20,4
10/07/2017	01 :00	31,6	30,5	31	43,3	37	22,6
	02 :00	31,2	29,8	28	43,1	39,4	24,5
	03 :00	29,4	29,2	27,5	43,3	40,1	26,4
	04 :00	28,6	27,7	26,1	43,5	41,9	28,1
	05 :00	28,4	27,3	25	43,9	42	30,5
	06 :00	27,6	26,6	24	44,4	42,5	33,3
	07 :00	27	27	25,3	44,1	40,6	29
	08 :00	27,3	28,2	29	43,9	39	27
	09 :00	27,3	28,5	31	43,9	37,2	22
	10 :00	27,5	29,1	32,5	43,6	36	20
	11 :00	27,7	30,4	35	43,3	35,1	19
	12 :00	27,9	30,7	36	43	34	20
	13 :00	27,6	32,1	37,3	42,8	33	17
	14 :00	28,1	32,3	38	42,7	33	17
	15 :00	28,7	33,5	39	42,3	34	16
	16 :00	29	35	39	42,6	33,6	15
	17 :00	29,6	35,3	39	42,5	32,2	14
	18 :00	30,1	35,7	38	42,8	32	15
	19 :00	30,4	34,4	37,3	42,2	35,8	14
	20 :00	30,2	34,2	36	42,8	36	16,2
	21 :00	30,6	31,7	33	43	37	18
	22 :00	30,9	31,2	30,8	43,3	38,2	18,6
	23 :00	31,3	30,1	29	43,5	39,8	19,8
	24 :00	31,7	29,3	28	43,6	40,7	22
11/07/2017	01 :00	31,1	29	26,8	43,9	41	24,2
	02 :00	29,5	28,3	25	44,2	42	27
	03 :00	29,1	28	23	44	42,6	27
	04 :00	28,5	27,3	22,3	44,6	43	28,6
	05 :00	28,6	26,7	23	44,8	43,7	30,5
	06 :00	27,4	25,9	23	45,2	44	32,9
	07 :00	26,9	26	26,5	45,1	43	30
	08 :00	27,2	27,5	29	44,7	41,2	25
	09 :00	27,4	28,2	32	44,5	41	22
	10 :00	27,6	29	33,5	44,4	41	21
	11 :00	27,8	29,5	35	44,4	39,4	19
	12 :00	27,8	31,4	36	44,2	39	19
	13 :00	28,3	32,3	38	44	38	18
	14 :00	28,5	34,1	39	43,6	37,6	16
	15 :00	28,1	35,2	40	43,3	37	16
	16 :00	28,1	36,4	39,7	43,2	35	15
	17 :00	28,5	36,9	40	43,2	34	14
	18 :00	28,7	36,7	39	43,6	33	14
	19 :00	29,2	35,2	38,2	43,1	34	13
	20 :00	29,7	34,3	37	43,1	36,3	15
	21 :00	30,2	32,7	35	43,4	36,6	17,2

ANNEXES

	22 :00	30,5	32	32,7	43,1	37,2	18
	23 :00	30,7	31,3	30	43,9	38	19,6
	24 :00	31,9	30,4	29	44,2	39,4	22,3

Tableau A.9 : Résultats de mesure de température radiante du séjour, en période estivale.

Jour	Temps (h)	Température radiante (°C)					
		Nord	Sud	Est	Ouest	Plancher	Plafond
09/07/2017	02 :00	32,05	31,74	28,89	29,14	28,2	33,91
	04 :00	31,13	31,02	28,73	29,03	27,91	32,28
	06 :00	30,74	29,62	28,22	28,64	27,84	31,54
	08 :00	28,92	28,54	27,89	28,24	27,51	30,48
	10 :00	29,08	28,57	27,96	28,28	27,49	30,73
	12 :00	29,21	28,65	28	28,32	27,76	30,92
	14 :00	29,56	28,76	28,06	28,46	27,98	31,87
	16 :00	29,91	28,92	28,32	28,61	28,12	32,72
	18 :00	30,42	29,89	28,97	28,82	28,27	33,17
	20 :00	31,6	30,46	29,15	28,95	28,42	33,88
	22 :00	32,46	31,85	29,56	29	28,48	34,38
	24 :00	33,05	32,47	29,61	29,02	28,14	34,89
10/07/2017	02 :00	32,61	32,27	29,45	28,91	27,89	34,53
	04 :00	31,18	31,59	29,06	28,87	27,92	33,15
	06 :00	30,78	29,02	28,94	28,38	27,76	32,84
	08 :00	29,08	28,58	28,62	28,08	27,63	31,16
	10 :00	29,18	28,63	28,71	28,16	27,59	30,35
	12 :00	29,68	28,92	28,98	28,47	27,62	30,51
	14 :00	29,75	29,18	29,07	28,88	27,76	30,91
	16 :00	30,89	30,26	29,35	28,97	27,81	32,61
	18 :00	31,41	31,93	29,42	29,28	27,98	33,41
	20 :00	32,7	32,71	29,67	29,3	28,14	33,92
	22 :00	33,16	32,97	29,79	29,52	28,36	34,86
	24 :00	33,12	32,45	29,82	29,63	28,21	35,14
11/07/2017	02 :00	32	31,78	29,59	29,09	28,16	33,89
	04 :00	31,75	29,61	29,35	28,83	28,04	31,52
	06 :00	29,98	29,01	28,79	28,56	27,82	30,85
	08 :00	29,38	28,75	28,65	28,37	27,85	30,02
	10 :00	29,67	28,98	28,72	28,45	27,77	30,39
	12 :00	29,83	29,21	28,86	28,62	27,93	30,56
	14 :00	30,32	29,98	28,97	28,98	28,23	32,36
	16 :00	31,03	30,98	29,17	29,06	28,51	32,67
	18 :00	32,85	31,32	29,29	29,33	28,72	33,34
	20 :00	33,09	32,16	29,42	29,59	28,66	33,85
	22 :00	33,53	32,88	29,51	29,72	28,82	34,45
	24 :00	33,95	33,04	29,63	29,86	28,78	34,7

Tableau A.10 : Résultats de mesure de température radiante de la cour, en période estivale.

Jour	Temps (h)	Température radiante (°C)			
		Nord	Sud	Ouest	Plancher
09/07/2017	02 :00	31,06	31,12	29,04	31,44
	04 :00	29,62	29,92	28,54	30,06
	06 :00	27,1	27,44	26,06	27,75
	08 :00	32,35	28,89	33,64	27,94
	10 :00	38,54	30,25	38,53	38,3
	12 :00	43,76	37,59	45,36	45,38
	14 :00	49,09	45,66	41,77	50,52

ANNEXES

	16 :00	46,48	51,69	40,3	53,73
	18 :00	40,28	48,14	39,1	47,47
	20 :00	38,24	38,5	37,51	39
	22 :00	35,92	35,44	35,2	36,53
	24 :00	32,66	32,75	32,43	33,07
10/07/2017	02 :00	30,92	30,97	30,79	31,23
	04 :00	28,88	28,95	28,6	28,81
	06 :00	26,31	26,47	26,18	27,18
	08 :00	32,71	27,27	33,85	27,78
	10 :00	42,96	29,95	41,97	44,09
	12 :00	45,24	35,03	46,11	47,57
	14 :00	49,87	47,66	43,98	52,12
	16 :00	46,46	52,98	40,9	54,58
	18 :00	42,21	46,14	39,21	47,29
	20 :00	37,04	39,3	37,8	39,75
11/07/2017	02 :00	28,72	29,95	29,45	28,06
	04 :00	26,43	27,74	26,74	27,14
	06 :00	24,77	24,86	24,47	24,86
	08 :00	35,21	28,43	36,38	26,99
	10 :00	42,99	31,94	39,12	41,49
	12 :00	47,92	36,97	47,07	47,71
	14 :00	51,59	49,18	45,03	53,99
	16 :00	46,21	53,16	43,91	55,14
	18 :00	43,52	42,55	40,82	43,18
	20 :00	38,95	39,15	38,15	37,53
	22 :00	33,02	34,53	32,87	33,88
	24 :00	31,24	32,32	30,64	32,35

Tableau A.11 : Résultats de température moyenne radiante et opérative estivale.

Jour	Temps (h)	Température moyenne radiante (°C)		Température opérative (°C)	
		Séjour	Cour	Séjour	Cour
09/07/2017	02 :00	30,48	30,66	29,14	30,63
	04 :00	29,85	29,53	28,98	28,97
	06 :00	29,26	27,08	28,53	27,24
	08 :00	28,43	30,70	28,02	29,90
	10 :00	28,51	36,40	28,21	33,05
	12 :00	28,64	43,02	28,47	37,16
	14 :00	28,94	46,76	28,92	40,08
	16 :00	29,26	48,05	29,23	41,58
	18 :00	29,75	43,74	29,78	39,22
	20 :00	30,24	38,31	30,22	35,16
10/07/2017	02 :00	30,77	30,97	30,99	30,39
	04 :00	30,13	28,81	29,36	28,26
	06 :00	29,45	26,53	28,53	26,57
	08 :00	28,69	30,40	28,00	29,30
	10 :00	28,60	39,74	28,05	34,42
	12 :00	28,86	43,48	28,38	37,09
	14 :00	29,09	48,40	28,60	40,35
	16 :00	29,81	48,73	29,41	41,87
	18 :00	30,40	43,71	30,25	39,71
	20 :00	30,90	38,47	30,55	36,34

ANNEXES

	22 :00	31,27	33,04	31,09	32,12
	24 :00	31,22	30,88	31,46	30,09
11/07/2017	02 :00	30,58	29,05	30,04	28,67
	04 :00	29,68	27,01	29,09	27,16
	06 :00	29,00	24,74	28,20	25,32
	08 :00	28,67	31,75	27,94	29,63
	10 :00	28,83	38,88	28,22	33,94
	12 :00	29,00	44,91	28,40	38,16
	14 :00	29,64	49,94	29,07	42,02
	16 :00	30,07	49,60	29,09	43,00
	18 :00	30,64	42,51	29,67	39,61
	20 :00	30,96	38,44	30,33	36,37
	22 :00	31,31	33,57	30,91	32,79
	24 :00	31,49	31,63	31,50	30,82

ANNEXE V**Tableaux récapitulatifs de la simulation thermique dynamique****Tableau A.12 : Résultats de simulation de température de l'air, en période hivernale.**

Jour	Temps (h)	Température de l'air (°C)		
		Séjour	Cour	Extérieur
07/01/2017	10 :00	8,56223	3,78871	3,712
	11 :00	9,00967	6,14344	6,228
	12 :00	9,51961	8,53258	8,596
	13 :00	9,88237	10,25387	10,372
	14 :00	10,41608	11,40549	11,556
	15 :00	10,8438	11,84343	12
	16 :00	11,03716	10,08166	11,556
	17 :00	11,11967	9,6707	10,52
	18 :00	11,16521	9,30971	8,892
	19 :00	11,19052	9,183	6,968
	20 :00	11,10449	8,93977	5,044
	21 :00	10,99856	8,10606	3,416
	22 :00	10,85318	7,34024	1,936
	23 :00	10,69147	6,57759	0,752
24 :00	10,50474	6,01063	-0,136	
08/01/2017	01 :00	10,27511	5,45033	-1,269
	02 :00	10,03864	5,42129	-2,204
	03 :00	9,79202	5,39443	-2,952
	04 :00	9,53729	4,3697	-3,513
	05 :00	9,24031	3,34627	-3,7
	06 :00	9,06956	2,32428	-3,326
	07 :00	8,89472	3,30336	-2,391
	08 :00	8,74902	3,28361	-0,708
	09 :00	8,6153	4,26503	1,723
	10 :00	8,54603	4,65287	4,528
	11 :00	8,6902	7,56827	7,707
	12 :00	9,08121	10,59308	10,699
	13 :00	9,80223	12,74454	12,943
	14 :00	10,46354	14,18635	14,439
	15 :00	10,91213	14,73735	15
	16 :00	11,17752	12,01893	14,439
	17 :00	11,30784	11,37917	13,13
	18 :00	11,37779	10,84221	11,073
	19 :00	11,32777	10,69597	8,642
	20 :00	11,22464	10,0788	6,211
	21 :00	10,97653	9,30358	4,154
	22 :00	10,76138	8,52615	2,284
	23 :00	10,55539	7,59381	0,788
	24 :00	10,3256	6,50847	-0,334
09/01/2017	01 :00	10,07683	5,50566	-0,86
	02 :00	9,81683	5,4769	-1,76
	03 :00	9,61493	5,45046	-2,48
	04 :00	9,43446	4,42618	-3,02
	05 :00	9,22574	3,40314	-3,2
	06 :00	9,06734	2,38152	-2,84
	07 :00	8,91436	3,36097	-1,94
	08 :00	8,79627	3,34158	-0,32
	09 :00	8,69114	4,32335	2,02

ANNEXES

	10 :00	8,63213	4,7765	4,72
	11 :00	8,78128	7,71432	7,78
	12 :00	9,16152	10,61146	10,66
	13 :00	9,61172	12,72984	12,82
	14 :00	10,06699	14,14524	14,26
	15 :00	10,52214	14,68084	14,8
	16 :00	10,82013	12,03057	14,26
	17 :00	11,05316	11,34844	13
	18 :00	11,11797	10,8905	11,02
	19 :00	11,06799	10,72786	8,68
	20 :00	10,86127	9,77206	6,34
	21 :00	10,68665	8,8764	4,36
	22 :00	10,53109	8,10108	2,56
	23 :00	10,37432	7,33953	1,12
	24 :00	10,20038	6,50521	0,4
10/01/2017	01 :00	10,02224	5,63613	-0,277
	02 :00	9,83438	5,60889	-1,132
	03 :00	9,66022	5,58385	-1,816
	04 :00	9,45942	4,56085	-2,329
	05 :00	9,26889	3,53905	-2,5
	06 :00	9,14713	2,51858	-2,158
	07 :00	9,02993	3,49913	-1,303
	08 :00	8,92896	3,48078	0,236
	09 :00	8,85685	4,46354	2,459
	10 :00	8,79128	5,07142	5,024

Tableau A.13 : Résultats de simulation de température de l'air, en période estivale.

Jour	Temps (h)	Température de l'air (°C)		
		Séjour	Cour	Extérieur
09/07/2017	01 :00	28,55163	29,23141	26,82
	02 :00	28,27682	28,58612	26,12
	03 :00	28,04259	28,1013	25,56
	04 :00	27,85585	27,68463	25,14
	05 :00	27,71882	27,50057	25
	06 :00	27,53671	27,5086	25,28
	07 :00	27,49477	28,11157	25,98
	08 :00	27,54987	29,53003	27,24
	09 :00	27,7873	30,89139	29,06
	10 :00	27,95826	31,71845	31,16
	11 :00	28,34913	32,42702	33,54
	12 :00	28,95477	32,96972	35,78
	13 :00	29,19552	33,34087	37,46
	14 :00	29,36266	33,54325	38,58
	15 :00	29,44411	33,66876	39
	16 :00	29,49963	34,41925	38,58
	17 :00	29,68017	35,50583	37,6
	18 :00	29,8878	35,28239	36,06
	19 :00	30,08036	34,51817	34,24
	20 :00	30,54743	33,56696	32,42
	21 :00	31,54405	32,56217	30,88
	22 :00	31,60462	31,53057	29,48
	23 :00	30,97202	30,84847	28,36
	24 :00	30,38246	30,1959	27,52
	01 :00	29,71734	29,67043	25,689
	02 :00	29,2007	28,96368	24,924
	03 :00	28,85289	28,27794	24,312

ANNEXES

10/07/2017	04 :00	27,65499	27,45327	23,853	
	05 :00	27,34507	27,00285	23,7	
	06 :00	27,08089	26,79355	24,006	
	07 :00	26,87019	27,25274	24,771	
	08 :00	26,74999	28,92559	26,148	
	09 :00	26,79488	30,10024	28,137	
	10 :00	26,98953	31,23869	30,432	
	11 :00	27,4306	32,07114	33,033	
	12 :00	28,11358	32,75207	35,481	
	13 :00	28,45685	33,26058	37,317	
	14 :00	28,57276	33,62327	38,541	
	15 :00	28,71838	33,8114	39	
	16 :00	28,78142	34,01622	38,541	
	17 :00	28,89051	34,65755	37,47	
	18 :00	29,08384	35,30296	35,787	
	19 :00	29,8789	35,19968	33,798	
	20 :00	30,84596	34,28666	31,809	
	21 :00	31,17838	33,10795	30,126	
	22 :00	31,13103	31,84195	28,596	
	23 :00	30,37168	30,58291	27,372	
	24 :00	29,70505	29,26473	26,454	
	11/07/2017	01 :00	28,97041	28,41141	24,34
		02 :00	28,38797	27,54643	23,44
		03 :00	27,99068	26,85253	22,72
04 :00		27,42198	26,23315	22,18	
05 :00		27,06515	26,26303	22	
06 :00		26,7598	25,98066	22,36	
07 :00		26,52099	26,48678	23,26	
08 :00		26,38601	28,6286	24,88	
09 :00		26,44854	29,88466	27,22	
10 :00		26,68176	30,97304	29,92	
11 :00		27,4306	31,82086	32,98	
12 :00		28,11358	32,5191	35,86	
13 :00		28,45685	33,07135	38,02	
14 :00		28,57276	33,47367	39,46	
15 :00		28,71838	35,59541	40	
16 :00		28,78142	36,6173	39,46	
17 :00		28,87051	37,28305	38,2	
18 :00		28,91963	37,32513	36,22	
19 :00		29,04689	36,2644	33,88	
20 :00		29,54553	35,3637	31,54	
21 :00		30,43971	33,59793	29,56	
22 :00		31,43145	32,33402	27,76	
23 :00		31,35763	31,28947	26,32	
24 :00		30,69231	30,19744	25,24	

ANNEXE VI**Tableaux récapitulatifs des essais de caractérisation****Tableau A.14** : Résultats de caractérisation thermique.

Echantillon	% de PV	Λ (W/m.K)	α (mm ² /s)	C_p (Mj/m ³ .K)
AEK	0	0,895543366	0,907190689	0,987161109
AAPV	0	1,004431665	0,870073726	1,154421326
	5	0,935214203	0,873614677	1,070511093
	10	0,920985861	0,834162178	1,104084896
	15	0,845193182	0,901070569	0,937987779
	20	0,865246706	0,773661597	1,118378771
ABPV	0	0,946608504	0,874619110	1,082309422
	5	0,907133070	0,873134718	1,038938266
	10	0,823597043	0,969468831	0,849534319
	15	0,802769128	1,019851200	0,787143387
	20	0,860645021	0,937722656	0,917803377

Tableau A.15 : Résultat de caractérisation mécanique.

Echantillon	% de PV	Force (kN)	Force moy (kN)	Rc (MPa)	Déplacement (mm)
AEK	0	2.96	2.76	1.10	3.31
		2.63			3.96
		2.71			4.11
AAPV	0	5.24	5.27	2.10	7.82
		5.11			7.29
		5.48			6.87
	5%	7.27	7.22	2.88	9.18
		7.09			9.43
		7.32			9.27
	10%	7.01	6.96	2.78	6.15
		7.00			11.49
		6.88			10.03
	15%	6.74	6.84	2.73	7.60
		6.98			7.51
		6.82			7.76
	20 %	6.59	6.46	2.84	5.71
		6.70			8.35
		6.09			8.39
	0%	3.7	3.56	1.42	4.40
		3.19			5.77
		3.81			5.73
	5%	6.17	6.29	2.51	6.60
		6.06			7.13

ANNEXES

ABPV	10%	6.66	5.20	2.08	7.79
		5.29			5.08
		5.08			4.54
		5.25			5.70
	15%	4.27	4.48	1.79	6.93
		4.70			4.71
		4.47			6.12
	20%	4.69	4.60	1.84	6.35
		4.50			6.06
		4.62			6.77

Tableau A.16 : Résultats de caractérisation hydrique.

Echantillon	% de PV	Surface (cm ²)	Temps (mn)	M1 (g)	M2 (g)	C _b (g/cm ² .mn)
AEK	0	50	10	294	308	8,86075949
AAPV	0	50	10	917	931	8,86075949
	5	50	10	938	950	7,59493671
	10	50	10	928	939	6,96202532
	15	50	10	960	971	6,96202532
	20	50	10	959	969	6,32911392
ABPV	0	50	10	983	998	9,49367089
	5	50	10	987	997	6,32911392
	10	50	10	919	928	5,69620253
	15	50	10	1000	1009	5,69620253
	20	50	10	915	923	5,06329114

ANNEXE VII**Tableaux récapitulatifs de l'analyse d'impact environnemental****Tableau A.17 : Résultats de la Méthode ReCipe 2016.**

Etude d'impact		Inventaire	Contribution des processus	Configurati	
Caractérisation	Normalisation				
Sauter catégories		Jamais			
					
					
Sé	Catégorie d'impact /	Unité	ABPV 5%	ABPV 20%	Clay brick (GLO) market
<input checked="" type="checkbox"/>	Global warming	kg CO2 eq	0,022	0,0906	0,318
<input checked="" type="checkbox"/>	Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	3,02E-8	1,24E-7	7,48E-8
<input checked="" type="checkbox"/>	Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	0,00129	0,00529	0,00717
<input checked="" type="checkbox"/>	Ozone formation, Human health	kg NOx eq	4,67E-5	0,000192	0,000877
<input checked="" type="checkbox"/>	Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	4,34E-5	0,000179	0,00032
<input checked="" type="checkbox"/>	Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq	4,82E-5	0,000198	0,000903
<input checked="" type="checkbox"/>	Terrestrial acidification	kg SO2 eq	7,27E-5	0,000299	0,000727
<input checked="" type="checkbox"/>	Freshwater eutrophication	kg P eq	5,43E-5	0,000223	4,05E-5
<input checked="" type="checkbox"/>	Marine eutrophication	kg N eq	9,99E-6	4,11E-5	3,28E-6
<input checked="" type="checkbox"/>	Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	0,226	0,928	1,32
<input checked="" type="checkbox"/>	Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	0,00162	0,00665	0,00931
<input checked="" type="checkbox"/>	Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	0,00212	0,0087	0,0126
<input checked="" type="checkbox"/>	Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	0,0029	0,0119	0,00954
<input checked="" type="checkbox"/>	Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	0,029	0,119	0,18
<input checked="" type="checkbox"/>	Land use	m2a crop eq	0,0517	0,212	0,0279
<input checked="" type="checkbox"/>	Mineral resource scarcity	kg Cu eq	0,000738	0,00304	0,0153
<input checked="" type="checkbox"/>	Fossil resource scarcity	kg oil eq	0,00357	0,0147	0,0749
<input checked="" type="checkbox"/>	Water consumption	m3	0,000891	0,0031	0,000686

Tableau A.18 : Résultats de la Méthode IMPACT 2002+.

Etude d'impact		Inventaire	Contribution des processus	Configurati	
Caractérisation	Étude d'impact	Normalisation	Pondération	Score unique	
Sauter catégories		Jamais			
					
					
Sé	Catégorie de dommages /	Unité	ABPV 5%	ABPV 20%	Clay brick (GLO) market
<input checked="" type="checkbox"/>	Human health	DALY	2,87E-8	1,18E-7	2,05E-7
<input checked="" type="checkbox"/>	Ecosystem quality	PDF*m2*yr	0,0671	0,276	0,0936
<input checked="" type="checkbox"/>	Climate change	kg CO2 eq	0,02	0,0822	0,309
<input checked="" type="checkbox"/>	Resources	MJ primary	0,195	0,803	3,55