

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra  
Faculté des Sciences et de la technologie  
Département :.....  
Réf.....



جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
.....قسم:  
.....المرجع:

Mémoire présenté en vue de l'obtention  
Du diplôme de  
**Magister en : architecture**

**Option : ville et architecture au Sahara**

**L'amélioration du confort thermique de l'habitat traditionnel par l'adaptation d'un matériau de haute performance et le traitement de l'espace patio. Cas d'étude secteur sauvegardé de la ville de Laghouat.**

Présentée par :  
**Taleb Boulerbah**

*Devant le jury composé de :*

Dr BADA Yassine	Maitre de conférences (A)	Université de Biskra	Président
Dr BEN CHEIKH Hamida	Maitre de conférences (A)	Université de Laghouat	Rapporteur
Dr BOUZAHER Soumia	Maitre de conférences (A)	Université de Biskra	Examinatrice

Soutenu publiquement le : 07/07/2019

## Remerciements

*Le présent travail est réalisé au département d'architecture, université **Mohamed Khider-Biskra**, et plus précisément au sein de la Post-Graduation « **ville et architecture au Sahara** », une école doctorale née en 2014 grâce à toute l'équipe, que je tiens à remercier pour tous les efforts accomplis en première année théorique ainsi que pour leurs encouragements.*

*En premier lieu, je voudrais exprimer ma profonde reconnaissance et mes remerciements au directeur de mon mémoire, Monsieur **BENCHEIKH Hamida**, maitre de conférences -A- à l'université de Laghouat, d'avoir proposé et dirigé ce sujet ainsi que sa disponibilité durant la période de l'élaboration de ce mémoire.*

*Mes plus vifs remerciements s'adressent également à Monsieur **BADA Yassine**, Maitre de conférences classe -A- à l'université de Biskra, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à M<sup>me</sup> **BOUZAHER Soumia**, Maitres de conférences classe -A- à l'université de Biskra, d'avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Je tiens à remercier la chef de département de génie civil de l'université d'Amar Téliidji d'avoir accepté de nous ouvrir les portes de leur laboratoire pour effectuer la partie expérimentale.*

*Je désire remercier tous ceux qui n'ont pas été cités dans ces quelques lignes et qui ont contribué de près ou de loin par leur aide au bon déroulement de ce travail.*

*Enfin, je dédie ce travail aux membres de ma famille en les remerciant de leur confiance et soutien, spécialement à **ma mère** qui n'a cessé de m'encourager pour la rédaction de ce mémoire.*

## Résumé :

Le recours à l'architecture de terre en Algérie est une tradition très ancienne. Elle était employée non seulement dans les campagnes, mais également dans les villes et les Ksour. Actuellement, malgré la tendance à utiliser le béton de ciment, aujourd'hui des habitations du Sahara algérien habitent encore en « toub ». Dans le cadre de réhabilitation de l'habitat ancien du secteur sauvegardé, qui ce qu'on fait pour améliorer les performances énergétiques de l'adobe du point de vue de la performance thermique et résistance mécanique pour réduire l'épaisseur de mur ou arrivée à une épaisseur équivalents, les habitations traditionnelles à patio ouvert (houche) présentent quelques inconvénients (inconfort), comment en hiver, faire pour optimiser le confort thermique en hiver?

Ce travail vise à améliorer la résistance mécanique et thermique des briques en terre crue, ainsi que de prouver les bienfaits des matériaux en terre crue. Ainsi, dans un premier temps, il s'agit d'une caractérisation physique et géotechnique des trois échantillons de sols, extraits des trois maisons dans le secteur sauvegardé de Laghouat.

À la suite de cette caractérisation, on a commencé le travail par l'étude des performances thermiques de deux types de briques en terre crue (échantillon M1 et M2). Elles sont produites principalement d'une de trois matières premières précédemment caractérisées.

Nous avons étudié l'impact de l'incorporation des adjuvants sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques des briques. Quatre pourcentages ont été testés : 0 %, 1 %, 1,5 % et 2 %. Les résultats expérimentaux ont montré que les mélanges contenant 2 % de paille semblent être les plus efficaces, puisqu'ils permettent respectivement d'améliorer la conductivité thermique de 0,71 w.m/K à 0,51 w.m/K par rapport à l'état sans adjuvant paille. Ces proportions ont entraîné une augmentation de la résistance à la compression de 19 bars à 32 bars et qui est située dans la fourchette de littérature.

En effet, l'étude a montré qu'une épaisseur de 40 cm pour les briques M2 + P= 2 %, à une stabilité de températures intérieures, a été marquée après l'amélioration du matériau dans la période estivale dont la résistance thermique a été préservée, en fonction de l'épaisseur de mur et de la conductivité thermique (0,51 w.m/K).

Les résultats ont montré que l'amélioration faite a permis d'optimiser le confort thermique de l'habit ksourien pendant la période hivernale, et de préservé les mêmes performances pendant l'été. Or, ces résultats ont été hors la plage de confort, pour cela, une amélioration a été proposée afin d'améliorer le confort thermique hivernal. L'ajout d'une couverture en nylon au niveau du patio a permis d'augmenter la température intérieure dont une différence de 2 °C entre les deux améliorations a été marquée.

**Mots clés :** architecture de terre, confort thermique, ksar Laghouat, propriétés des briques en terre crue, Maison à patio.

## **Abstract**

The use of built with earth (Adobe) materials in Algeria is a very old tradition. They were used not only in the countryside, but also in cities and palaces. At the moment, despite the tendency to use cement concrete, houses in the Algerian Sahara the adobe are still used in some buildings. In the future rehabilitation of the ksar improved to reduce the energy conception and the wall thickness the traditional houses with (courtyard) presented incomfort during winter period which economic solution can be used to improve the winter comfort houses, for economic reasons, the adobe, energy performances and compressive strength must be

The purpose of this work was to improve the mechanical and thermal resistance of adobe bricks, as well as to demonstrate the advantages of the used of such material in building in the Sahara.

The First step three samples of clay material were chosen from three different houses in Zgag El Hadjaj ksar the physical and geotechnical proprieties of the three soil samples were tested in laboratory.

After this characterisation two type of clay bricks were made of this three samples, bricks (M1 and M2) was initiated. They are mainly made from one of the three previously characterized raw materials.

We studied the effect of the combination of mixtures on the physical, mechanical and thermal properties of adobe bricks. Four percentages were tested: 0% 0.1%.1.5% and 2%. Experimental results showed that mixture containing 2% of straw seem was the most effective, and improve the thermal conductivity from 0.71 w/m.k to 0.51 w/m.k compared to one without straw. These ratios of 2% of straw in the mixture increase the compressive strength from 19 bars to 32 bars, which is within the scope of the literature.

The study shows the clay brick made with M2, mixture and 2% of straw with thermal conductivity of (0.51 w/m.k). Can reduce the wall thickness to 40 cm and give the same inside air temperature in the space.

The results show the improved clay materials can produce the same thermal performances during summer time with less thickness from 60 cm to 40cm the winter thermal comfort was improved by 2°C by using a plastic cover on the top of the courtyard (patio) as the inhabitant use.

**Keywords:** earth architecture, thermal comfort, thermal inertia, ksar of Laghouat, clay material properties, courtyard houses.

## المخلص

إن استخدام العمارة الترابية في الجزائر ، هو تقليد قديم للغاية. كان يستخدم ليس فقط في الأرياف ، ولكن أيضا في المدن والقصور. حاليا ، على الرغم من الميل لاستخدام الخرسانة الاسمنتية ، اليوم المنازل في الصحراء الجزائرية لا تزال من " الطوب . " في سياق إعادة تأهيل السكنات القديمة للقطاع المحفوظ ، ما الذي يجب القيام به لتحسين أداء الطاقة في الطوب من جهة الأداء الحراري والمقاومة الميكانيكية لتقليل سماكة الجدار أو الوصول إلى سمك جدار مكافئ ، كما أن البيوت التقليدية ذات المخطط المفتوح (الحوش) لديها بعض العيوب (عدم الراحة) ، كيف يتم العمل في لتحسين الراحة الحرارية في الشتاء؟

كان الهدف من هذا العمل هو تحسين المقاومة الميكانيكية والحرارية للطوب ، وكذلك لإثبات فوائد المواد الطينية أولاً ، توصيف مادي وجيوتقني لعينات التربة الثلاث ، المستخرجة من المنازل الثلاثة في منطقة القطاع المحفوظ الأغواط .

ونتيجة لهذا التوصيف ، بدأ العمل بدراسة الأداء الحراري لنوعين من الطوب الطيني العينة M1 و M2. وهي مصنوعة أساسا من واحدة من المواد الخام الثلاثة المتميزة سابقا.

درسنا تأثير دمج مزيج من الخلطات على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية والحرارية للطوب. تم اختبار أربع نسب مئوية من التبن 0.1٪. 1.5٪ و 2٪. أظهرت النتائج التجريبية أن المخاليط التي تحتوي على 2٪ من التبن يبدو أنها الأكثر فعالية ، لأنها تسمح على التوالي لتحسين الموصلية الحرارية من 0.71 w/m.k إلى 0.51 w/m.k مقارنة بالعينة التي لا تحتوي على التبن. وقد أدت هذه النسب إلى زيادة في قوة الانضغاط من 19 بار إلى 32 بار والتي تقع ضمن نطاق الأبحاث.

في الواقع ، أظهرت الدراسة أن سمك 40 سم للطوب من عينة M2+2%P ، عند استقرار درجة الحرارة الداخلية كان ملحوظاً بعد تحسن المادة في فترة الصيف التي كانت مقاومتها الحرارية محافظ عليها ، اعتمادا على سمك الجدار والتوصيل الحراري 0.51 w/m.k

أظهرت النتائج أن التحسينات التي أدخلت سمحت بتحسين الراحة الحرارية لمنازل القصور خلال فترة الشتاء ، وللحفاظ على نفس الأداء خلال فصل الصيف. ومع ذلك ، فإن هذه النتائج كانت خارج نطاق معايير الراحة ، لذلك ، تم اقتراح حل لتحسين الراحة الحرارية في فصل الشتاء. أدت إضافة غطاء من النايلون على مستوى الفناء إلى زيادة درجة الحرارة الداخلية ، مع وجود اختلاف في درجة الحرارة بين درجتين مؤبنتين.

**الكلمات المفتاحية :** العمارة الترابية ، الراحة الحرارية ، قصر الأغواط ، خصائص الطوب الترابي، المنازل بفناء داخلي.

# SOMMAIRE

## SOMMAIRE

### Remerciements

### Résumé

### Abstract

### ملخص

### Sommaire

## CHAPITRE INTRODUCTIF

Liste des Figures :.....	I
Nomenclatures :.....	V
Introduction :.....	VII
Problématique :.....	IX
Objectifs :.....	X
Méthodologie de recherche.....	X
Structure du mémoire :.....	XI

## PREMIER CHAPITRE

I.1	Introduction :.....	2
I.2	Définition de la terre :.....	2
I.3	Modes d'utilisation de la terre :.....	2
I.4	Aperçu historique : .....	4
I.5	Situation de l'architecture en terre dans le monde :.....	7
I. 5.1.	Codes, normes, directives et orientations : .....	9
I.6	L'architecture de terre en Algérie : .....	11
I.6.1	Stratégie algérienne pour la réhabilitation de l'image des architectures de terre : .....	11
I.6.2	Les mesures de protection légale qui concernent les architectures de terre :.....	11
I.6.3	la réhabilitation de l'image des architectures de terre :.....	12
I.6.4	Actions du CAPTerre : .....	12
I.6.5	Actualité de l'architecture de terre en Algérie :.....	13
I.7	L'adobe une technique millénaire :.....	14
I.7.1	Définition de l'adobe :.....	14
I.7.2	Étymologie :.....	14
I.7.3	Typologie :.....	14
I.7.4	L'universalité des architectures de terre .....	14
I.7.5	Hassan Fathy: .....	15
I.7.6	Recherche de la bonne carrière :.....	15
I.7.7	Identification des terres : .....	16
I.7.8	Matières organiques et minérales : .....	17
I.7.9	les essais des identifications des terres : .....	18
I.7.10	Texture granulométrie après Tamisage : .....	21
I.7.11	Sédimentométrie:.....	21
I.7.12	Plasticité : .....	22
I.7.13	La stabilisation : .....	23
I.7.14	mise en forme des adobes : .....	25
I.7.15	arc, voute et coupole : .....	28
I.8	Les avantages et inconvénients de l'architecture en terre : .....	29
I.8.1	Les avantages du matériau terre : .....	29
I.8.2	Les inconvénients du matériau terre : .....	29
I.9	Quelques pathologies des constructions en terre : .....	30
I.9.1	Les principales causes de désordre :.....	30

I.9.2	Les pathologies humides : .....	31
I.9.3	Les pathologies structurelles : .....	31
I.10	Les principes de bonne conception d'une architecture de terre : .....	32
I.10.1	Protection des terrasses et toiture : .....	32
I.10.2	Protection des parois : .....	32
I.10.3	Protection des ouvertures : .....	32
I.10.4	Protection de la base du bâtiment : .....	32
I.11	Conclusion : .....	33

## **DEUXIEME CHAPITRE**

II.1	Introduction : .....	35
II.2	La notion de confort thermique : .....	35
II.3	Les paramètres affectant le confort thermique : .....	36
II.3.1	Paramètres environnementaux liés à l'ambiance extérieure : .....	36
II.3.1.1	La température des parois (Tp) : .....	36
II.3.1.2	La température de l'air ambiant (Ta) : .....	37
II.3.1.3	La vitesse de l'air : .....	38
II.3.1.4	L'humidité relative de l'air : .....	38
II.3.2	Paramètres personnels : .....	38
II.3.2.1	Métabolisme : .....	39
II.3.2.2	Résistance thermique du vêtement : .....	39
II.4	Transfert thermique dans le bâtiment : .....	40
II.5	Évaluation du confort thermique : .....	41
II.5.1	Les outils graphiques d'évaluation du confort thermique : .....	41
II.5.2	Diagramme de Givoni : .....	44
II.5.3	Indices pour l'évaluation du confort thermique : .....	46
II.5.4	La plage du confort thermique : .....	49
II.5.5	Zones climatiques en Algérie : .....	49
II.6	Vivre avec le climat : architecture vernaculaire : .....	50
II.7	La conception architecturale bioclimatique : .....	51
II.8	Rappels théoriques des principes de la construction bioclimatique Algérienne : .....	51
II.8.1	Caractériser les isolants : .....	51
II.8.2	Organisation de l'espace intérieur : .....	51
II.8.3	Aménagements extérieurs : .....	52
II.8.4	Conception des bâtiments : .....	52
II.8.5	L'implantation du bâtiment : .....	53
II.8.6	Orientation du bâti : .....	53
II.8.7	Forme, Volumétrie et couleur du bâtiment : .....	54
II.8.8	Intérêt des voûtes et coupoles : .....	54
II.8.9	Couleur des revêtements extérieurs : .....	54
II.8.10	Conception des ouvertures : .....	55
II.8.11	Conception de la ventilation naturelle : .....	55
II.8.12	Conception de mur de façade : .....	55
II.8.13	Matériaux de construction et leurs performances thermiques : .....	56
II.8.14	Caractéristiques des matériaux et leurs performances thermiques : .....	56
II.9	Les stratégies bioclimatiques pour améliorer le confort thermique : .....	60
II.9.1	Système de chauffage solaire passif (Confort d'hiver) : .....	61
II.9.2	Système de rafraîchissement passif (confort d'été) : .....	63
II.10	Conclusion : .....	65

## TROISIEM CHAPITRE

III.1	Introduction :	67
III.2	La société ksourienne de la région :	67
III.3	Les ksour, architectures et typologies :	68
III.3.1	les types des ksour selon A.G.P.Martin :	68
III.3.2	les types des ksour selon Colonel Quenard:	69
III.3.3	Les types de ksour selon Le Dr Abdul Rahman Ayoub:	70
III.3.4	les types des ksour selon « Ray Capot Rey »:	70
III.3.5	les types des ksour selon J. Bisson :	71
III.3.6	Les types des ksour selon J. Échallier:	71
III.4	Signification du ksar :	73
III.4.1	Morphologie du ksar :	73
III.4.2	L'habitat Ksourien :	75
III.5	Méthodologie de prise en charge des Ksour :	76
III.5.1	Réhabilitation des Ksour pour l'habitat :	76
III.6	classement de ksar comme secteur sauvegardé :	77
III.6.1	plan permanent du secteur sauvegardé du vieux ksar de Laghouat :	77
III.7	L'étude contextuelle :	77
III.7.1	Situation géographique et administrative :	77
III.7.2	Géographiquement :	78
III.7.3	Climatologie :	78
III.8	étude ksar de Laghouat :	79
III.8.1	L'histoire du vieux ksar :	79
III.8.2	L'évolution de ksar de Laghouat :	80
III.8.3	Les changements dans le tissu urbain :	82
III.8.4	Les limites et les caractéristiques de secteur sauvegarder :	83
III.8.5	Les Quartiers du ksar :	83
III.8.6	Les zones homogènes :	83
III.8.7	Typologie de l'habitat :	88
III.8.8	Décorations et éléments architecturaux:	90
III.9	Statistiques de Habitat et de la population :	91
III.9.1	Les matériaux de construction :	91
III.9.2	Avantages de l'utilisation des matériaux locaux :	92
III.9.3	Techniques de construction :	93
III.10	Conclusion :	94

## QUATRIEME CHAPITRE

IV.1	Introduction :	96
IV.2	Les caractéristiques des terres utilisées dans les techniques adobes paillés :	96
IV.2.1	Propriétés physiques des sols utilisés :	97
IV.2.2	La pallie :	98
IV.2.3	L'eau pour la mise en œuvre :	101
IV.2.4	Caractéristiques des briques d'adobe thermo-physique et mécanique :	102
IV.3	Essais au laboratoire : étude expérimentale :	107
IV.3.1	Les essais d'identification relatifs à la nature du matériau terre :	108
IV.3.2	Tests sur les briques anciennes :	108
IV.4	Caractéristiques géotechniques et physiques :	111
IV.4.1	Densités spécifiques :	111
IV.4.2	Granulométrie :	113
IV.4.3	les analyses granulométriques des échantillons :	113
IV.4.4	Les limites d'Atterberg :	118

IV.4.5	Les essais de l'écrasement (résistance à la compression) :	120
IV.4.6	Essai thermo-physique :	122
IV.5	Caractérisation des matériaux utilisés argile :	125
IV.5.1	Échantillonnage :	125
IV.5.2	Caractéristiques des matériaux :	125
IV.6	Amélioration par correction de granularité :	128
IV.6.1	Mélange de sols :	128
IV.6.2	Composition d'un mélange à granularité optimale :	129
IV.6.3	Correction granulométrique :	130
IV.7	Préparation de mélange :	131
IV.7.1	Mélange terre et paille :	131
IV.7.2	Préparation du mélange méthode rustique :	133
IV.7.3	La fabrication des briques :	134
IV.8	Conclusion :	136

## CINQUIEME CHAPITRE

V.1	Introduction :	138
V.2	Comportement mécanique thermique de l'adobe paillé :	138
V.2.1	Essai de compression :	139
V.2.2	Appareillage et manipulation :	139
V.3	Les principales méthodes de mesure des propriétés thermo-physiques :	143
V.3.1	les caractéristiques thermo-physique selon pourcentage de la paille M2 :	144
V.3.2	Les caractéristiques thermophysiques selon pourcentage de la paille M2 :	146
V.4	Présentation générales de la ville de Laghouat :	147
V.4.1	Analyse des éléments du climat :	147
V.4.2	Le diagramme bioclimatique de Givoni :	148
V.4.3	Présentation du cas d'étude maison ksourienne :	149
V.4.4	Le Quartier sélectionné dans le secteur sauvegardé : (Quartier Z'gag El Hedja) :	149
V.4.5	Techniques de construction :	150
V.4.6	Description de la maison (modèle) :	151
V.4.7	Amélioration et correction thermique [l'auteur] :	153
V.5	Choix de la composition optimale :	153
V.5.1	Méthode de mesure des propriétés thermo physiques ( $\lambda$ ) :	154
V.5.2	l'évaluation de l'épaisseur de mur optimale :	156
V.6	les propriétés thermo-physiques de la brique de terre M2:	157
V.6.1	Amplitude de la température harmonisée :	158
V.6.2	Temps de retard (déphasage) :	158
V.6.3	Facteur d'amortissement :	158
V.7	Présentation de logiciel de simulation :	158
V.7.1	Fichiers d'entrées d'Energyplus :	159
V.8	Raisons et choix des compositions idéales :	160
V.9	Description du système de mesure l'humidité relative :	160
V.9.1	Methodologie :	161
V.10	La température extérieure :	163
V.10.1	Avant l'amélioration, période hivernale :	163
V.10.2	Avant l'amélioration, période estivale :	164
V.10.3	l'effet de l'amélioration de la conductivité thermique de l'adobe :	165
V.10.4	La protection du patio par couverture plastique transparente (P.V.C) :	167
V.11	Conclusion :	168
	Conclusion générale :	169
	Références bibliographiques :	172

## Liste des Figures :

### PREMIER CHAPITRE

Figure : I. 1 présente les modes de construction en terre .....	4
Figure : I. 2 Salles d'entreposage, temple de Ramsès II .....	5
Figure : I. 3 Ville enrichie, vallée du Draa, .....	5
Figure : I. 4 Citadelle de bam, Iran, .....	5
Figure : I. 5 Bazar, Sirdjan, Iran .....	5
Figure : I. 6 la terre enfoncée maison, .....	5
Figure : I. 7 Finca enfoncé de la terre .....	6
Figure : I. 8 Mosquée chez Nando, .....	6
Figure : I. 9 grande mosquée, Djenné .....	6
Figure : I. 10 Mosquée, Kashan .....	6
Figure : I. 11 Maison de terre enfoncée, .....	7
Figure : I. 12 Maisons de terre enfoncée, .....	7
Figure: I. 13 différent forme de brique. ....	14
Figure : I. 14 Matières organiques : construire avec l'adobe. ....	16
Figure : I. 15 procédure d'essai toucher .....	18
Figure : I. 16 teste cigare. ....	19
Figure : I. 17 Test de la pastille. CRAterre .....	19
Figure: I. 18 méthode de tamisage, .....	20
Figure: I. 19 humidification de la terre. ....	21
Figure: I. 20 la paille sert de pansement entre les .....	23
Figure : I. 21 moyens de stabilisation des terres remaniées .....	24
Figure : I. 22 séchage d'adobe .....	27
Figure: I. 23 stockage de l'adobe, .....	28
Figure: I. 24 haut du mur .....	31
Figure: I. 25 bas du mur .....	31

### DEUXIÈME CHAPITRE :

Figure : II. 1 la température de confort dépend de la température de l'air .....	37
Figure : II. 2 les pertes thermiques du corps humain dépendant .....	39
Figure : II. 3 Relations entre les paramètres de confort et les modes d'échange de Chaleur .....	41
Figure: II. 4 Diagramme bioclimatique d'Olgay .....	42
Figure : II. 5 Diagramme bioclimatique .....	43
Figure : II. 6 Tableau psychrométrique adapté de Givoni .....	45
Figure : II. 7 Température opérative optimale en fonction de l'activité et de l'habillement .....	46
Figure : II. 8 Pourcentage prévisible d'insatisfait .....	47
Figure : II. 9 classification du climat en Algérie. ....	50
Figure : II. 10 technique de conception de bâtiment, .....	52
Figure : II. 11 Implantation du bâtiment .....	53
Figure : II. 12 Valeurs de la conductivité thermique pour quelques matériaux du bâtiment .....	57
Figure: II. 13 Temps de déphasage des différents matériaux de construction en fonction des épaisseurs .....	59
Figure : II. 14 période froide : les 4 stratégies de base .....	61
Figure: II. 15 trois murs, avec un matériau identique et de mêmes épaisseurs à l'intérieur .....	63

### TROISIÈME CHAPITRE :

Figure : III. 1 ville de Laghouat plan cadastral 1853.....	79
Figure : III. 2 La première phase de la première ère.....	80
Figure : III. 3 Deuxième phase de la première ère.....	80
Figure : III. 4 Troisième phase de la première ère.....	80
Figure : III. 5 Première phase des 2 ères de .....	81
Figure : III. 6 Deuxième phase de la deuxième ère .....	81
Figure : III. 7 développement de a ville de Laghouat de 1962 à 1990.....	82
Figure : III. 8 Changements deviennent-ils sur la structure de ksar de Laghouat. ....	83
Figure : III. 9 présent plan des zones homogènes de ksar de Laghouat. ....	84
Figure : III. 10 présente les axes structurants de ksar. ....	85
Figure : III. 11 Les axes structurant les quartiers du vieux ksar.....	85
Figure : III. 12 les axes structurant les quartiers du vieux ksar. ....	86
Figure : III. 13 Les formes des îlots des quartiers du vieux ksar.....	87
Figure : III. 14 Mode distribution de l'habitat ksourien .....	88
Figure : III. 15 habitat avec patio.....	88
Figure : III. 16 modes d'organisation de l'habitat ksourien. ....	89
Figure : III. 17 Des exemples sur les différents modes composition et organisation dans le style ksourien ....	89
Figure : III. 18 Mode de composition pour .....	89
Figure:III. 19 Mode de distribution pour .....	89
Figure : III. 20 Mixte entre ksourien.et de style colonial.....	90
Figure : III. 21 Exemples des formes des arcs.....	90
Figure : III. 22 Exemples des formes des arcs.....	90
Figure : III. 23 Des éléments décoratifs.....	90
Figure : III. 24 pourcentage des maisons habitées.....	91
Figure : III. 25 Pourcentage distribution.....	91
Figure : III. 26 Matériaux de construction actuelle de ksar de Laghouat.....	92
Figure : III. 27 Pourcentage des matériaux de construction des quartiers de ksar. ....	92

### QUATRIÈME CHAPITRE :

Figure:IV. 1 Fuseau limite des ADOBES.....	97
Figure:IV. 2 Fuseaux limites de pisé et briques compressées. ....	98
Figure:IV. 3 Fuseaux limites des terres stabilisées parla chaux et des terres stabilisées par le ciment. ....	98
Figure:IV. 4 l'eau pour la mise en œuvre,.....	101
Figure : IV. 5 la masse volumique sèche ( $\rho$ ) de la terre source .....	102
Figure : IV. 6 Propriété mécanique de la terre : la résistance à la compression. ....	103
Figure:IV. 7 la conductivité thermique ( $\lambda$ ) : de la terre crue. ....	104
Figure:IV. 8 la capacité thermique (C), .....	106
Figure:IV. 9 le coefficient de résistance à la vapeur d'eau (u).....	106
Figure:IV. 10 schéma de plan de travail partie expérimentale.....	106
Figure:IV. 11 la géométrie de briques et leur dimension.....	109
Figure:IV. 12 adobe utilisé .....	109
Figure:IV. 13 découpage de la brique pour les essais.....	109
Figure:IV. 14 la localisation des prélèvements des échantillons .....	111
Figure:IV. 15 Prélèvement de l'adobe « A ».....	111
Figure:IV. 16 Prélèvement de l'adobe « B » .....	111
Figure:IV. 17 Prélèvement de l'adobe « C » .....	111
Figure:IV. 18 Le Chatelier. ....	112
Figure:IV. 19 La courbe granulométrique de l'adobe « A ».....	115
Figure:IV. 20 La courbe granulométrique de l'adobe « B ».....	116

Figure:IV. 21 La courbe granulométrique de l'adobe « C ».....	117
Figure:IV. 22 les courbes granulométriques des trois adobes. A, B, C .....	117
Figure:IV. 23 le classement des sols selon les limites d'Atterberg. ....	120
Figure:IV. 24 Outil de la coupe de l'adobe.....	121
Figure:IV. 25 L'appareillage de la mesure la résistance à la compression .....	121
Figure : IV. 26 Dispositif expérimental de hot Disk.....	123
Figure : IV. 27 la conductivité thermique en fonction .....	124
Figure : IV. 28 la conductivité thermique en fonction .....	124
Figure : IV. 29 Localisation de la zone étudiée.....	125
Figure : IV. 30 Courbe granulométrique d'argile. ....	127
Figure:IV. 31 Classification des sols fins sur le diagramme de Casagrande.....	128
Figure : IV. 32 détermination de la courbe de mélange de deux sols. ....	129
Figure : IV. 33 courbes granulométriques des trois échantillons avant l'Amélioration .....	130
Figure : IV. 34 les courbes granulométriques après correction des trois échantillons .....	131
Figure : IV. 34 les courbes granulométriques après correction des trois échantillons .....	131
Figure : IV. 35 le stockage et la cure de brique .....	1315

## **CINQUIÈME CHAPITRE :**

Figure : V. 1 Résistance à la compression premier mélange M1 .....	141
Figure : V. 2 Résistance à la compression du deuxième mélange M2.....	142
Figure : V. 3 Résistance de l'adobe ancien et l'adobe confectionné. ....	143
Figure : V. 4 Conductivité thermique M1 en fonction pourcentage de la paille. ....	144
Figure : V. 5 propriété thermo-physique Cas l'amélioration de l'adobe :.....	145
Figure : V. 6 Conductivité thermique M1 et M2 en fonction.....	145
Figure : V. 7 Variation de résistance à la compression et conductivité thermique.....	146
Figure : V. 8 Le Quartier actuellement de Zgag El hadjedj, .....	147
Figure : V. 9 Situation de la ville de Laghouat par rapport aux zones climatiques .....	148
Figure : V. 10 Diagramme Givoni les zones de confort.....	149
Figure : V. 11 Coupe et vue sur le plancher. ....	151
Figure : V. 12 les plans de l'habitat simulé. ....	152
Figure : V. 13 la conductivité thermique en fonction pourcentage de la paille.....	155
Figure:V. 14 le schéma montre la structure globale d'EnergyPlus. ....	159
Figure : V. 15 Variation de l'humidité relative moyenne intérieure et extérieure .....	161
Figure : V. 16 les résultats de l'humidité de l'air .....	162
Figure : V. 17 Variation de température hivernale avant l'amélioration .....	163
Figure : V. 18 Variation de température avant l'amélioration, période estivale.....	164
Figure : V. 19 Variation de température après l'amélioration, période hivernale .....	165
Figure : V. 20 Variation de température après l'amélioration période estivale.....	166
Figure : V. 21. Variation de température après l'amélioration + nylon .....	167

## **Liste des Tableaux :**

### **PREMIER CHAPITRE :**

Tableau I. 1. Liste des documents examinés .....	10
Tableau I. 2. Les opérations de construction en terre en Algérie .....	13

### **DEUXIÈME CHAPITRE :**

Tableau II. 1 zone du confort intérieur du diagramme psychométrique .....	45
Tableau II. 2 Correspondances entre PMV et échelle des sensations thermiques.....	47
Tableau II. 3 Valeurs de $\alpha$ en fonction de la vitesse d'air .....	48
Tableau II. 4 Principe physique et stratégies de contrôle en architecture climatique .....	60

### **TROISIÈME CHAPITRE :**

Table III. 1. Pluviométrie de la ville de Laghouat .....	78
Table III. 2. Température annuelle Laghouat.....	79
Table III. 3. L'humidité moyenne annuelle — Laghouat .....	79
Table III. 4. présent plan des zones homogènes de ksar de Laghouat. ....	84

### **QUATRIÈME CHAPITRE :**

Tableau IV. 1. Caractéristiques des terres utilisées dans les techniques et adobe-paille .....	96
Tableau IV. 2. Propriétés physiques des sols utilisés .....	97
Tableau IV. 3. Propriétés physiques des matières végétales utilisées en matériaux de construction. ....	99
Tableau IV. 4. Pourcentage et longueur des brins de paille utilisée dans la terre .....	100
Tableau IV. 5. Pourcentage d'eau de gâchage pour l'adobe paillé.....	101
Tableau IV. 6 Données expérimentales sur des forces et des modules élastiques de l'adobe brique. ....	104
Tableau IV. 7 la conductivité thermique de l'adobe avec l'addition de la paille et du ciment .....	105
Tableau IV. 8 les conductivités thermiques outrent des matériaux avec d'autres stabilisateurs. ....	105
Tableau IV. 9 la conductivité thermique de l'adobe avec l'ajout fibre palmier dattier .....	105
Tableau IV. 10. Essai masse volumique apparente.....	113
Tableau IV. 11. Essai masse volumique absolue.....	113
Tableau IV. 12. Analyse granulométrique : éprouvette « A » .....	114
Tableau IV. 13. Analyse granulométrique : éprouvette « B » .....	115
Tableau IV. 14. Analyse granulométrique : éprouvette « C » .....	116
Tableau IV. 15 limite de plasticité — limite de liquidité.....	119

### **CINQUIÈME CHAPITRE :**

Tableau V. 1 Résistance à la compression première mélange M1 .....	140
Tableau V. 2. Résistance à la compression du deuxième mélange M2 .....	142
Tableau V. 3. propriété thermo-physique Cas l'amélioration de l'adobe .....	144
Tableau V. 4 propriété thermo-physique Cas l'amélioration de l'adobe M2 .....	144
Tableau V. 5 Paramètre des matériaux utilisés l'ancien adobe .....	153
Tableau V. 6 paramètres des matériaux utilisés.. .....	154
Tableau V. 7 la conductivité thermique en fonction pourcentage de la paille .....	154
Tableau V. 8 les instruments de mesure utilisés dans l'investigation.....	161

## Nomenclatures :

LI : limite de liquidité.....	%
Lp : limite de plasticité.....	%
Ip : l'indice de plasticité.....	%
T : la température de l'air.....	C°
R : l'humidité de l'air.....	%
V : la vitesse relative de l'air.....	m/s
M : métabolisme.....	/
Tp : température de parois.....	C°
Trs : température résultante sèche.....	C°
Ta : température ambiante.....	C°
Hr : humidité relative.....	%
Tn : température neutre.....	C°
T <sub>0</sub> : température extérieure moyenne.....	C°
PPD : pourcentage prévisible d'insatisfaits.....	/
PMV : Vote Moyen opératif.....	/
Top : température opérative.....	C°
Tmrt : température moyenne radiante.....	C°
α : coefficient en fonction de la vitesse d'air.....	/
R : Résistance thermique.....	M <sup>2</sup> .k/w
e : épaisseur de mur.....	m
λ : conductivité thermique du matériau.....	w/m.k ou w/m.C°
U : coefficient de transmission surfacique.....	/
Rse : résistance superficielle extérieure.....	M <sup>2</sup> .k/w
Rsi : résistance superficielle intérieure.....	M <sup>2</sup> .k/w
Φ : flux de chaleur.....	/
ρ : masse volumique apparente.....	(kg/m <sup>3</sup> )
c : chaleur massique du matériau.....	W/k.kg
E : effusivité thermique.....	J/m <sup>2</sup> S.C°
D : diffusivité thermique.....	m <sup>2</sup> /S
Ca : coefficient d'activité.....	/
R <sub>C</sub> : Résistance à la compression.....	(bars. MPa)
u : coefficient de résistance à la vapeur d'eau.....	/
M : Masse.....	(g) et (kg)
V : volume.....	cm <sup>3</sup>
γ <sub>s</sub> : masse volumique absolue.....	(kg/m <sup>3</sup> )
IR : indice de retrait.....	/
F : la force.....	KN ou NS :
surface.....	(mm <sup>2</sup> )
fc : facteur de correction.....	/
w : teneur en eau.....	%
f : facteur d'amortissement des ondes thermiques.....	(h)
Ø : temps de retard des ondes thermiques (déphasage).....	-
T <sub>ae (max)</sub> : température de l'air extérieur max.....	(°C)
T <sub>ae (min)</sub> : température de l'air extérieur min.....	(°C)
t : temps.....	s
ω : teneur volumique en eau.....	%

# **Introduction générale**

## **Introduction :**

En Algérie, il est constaté qu'il y a plusieurs styles de ce cadre bâti qui est diffusé au niveau de tout le territoire national. Dans le Nord, nous trouvons la Casbah et dans les zones de hauts plateaux et les zones désertiques, nous trouvons des Ksour. Préserver ce patrimoine sera sans doute de maintenir la diversité culturelle de la communauté, de sorte que l'État a alloué un programme intégré pour préserver cet héritage architectural. Parmi ces Ksour, nous trouvons les Ksour qui se trouvent dans la région de la vallée M'Zi, qui se caractérise par sa qualité architecturale unique. Cette étude a trait à la valeur architecturale et patrimoniale. Des mesures urgentes pour préserver et récupérer dans un programme complet de dimensions culturelles, historiques et économiques.

Il est instauré un plan permanent de sauvegarde et de mise en valeur des secteurs sauvegardés de Laghouat, que l'on considère comme plan spécial, pour des zones urbaines protégées par la vie privée, dont la spécificité, de ce ksar qu'il s'agit d'un site peuplé et la plupart des biens appartenant à des propriétés privées. Ce site exposé à maints dangers qui menacent la perte de sa valeur architecturale et culturelle unique, notamment avec l'avance des nouvelles constructions (bâtiments) que l'adoption privée de béton armé.

Les solutions préconisées doivent reposer sur des matériaux et des techniques de mise en œuvre qui respectent les caractéristiques du bâti ancien. Ceci n'exclut pas l'utilisation de matériaux ou de mises en œuvre modernes adaptées à ses spécificités.

La réhabilitation du patrimoine bâti ancestral les ksour (habitat vernaculaire), particulièrement dans le but d'améliorer ses performances énergétiques, doivent avant tout préserver sa valeur patrimoniale et tenir compte des caractéristiques techniques spécifiques des matériaux qui les composent et de leurs mises en œuvre.

L'évolution des techniques et le développement de nouveaux matériaux de construction contribuent à l'amélioration du confort thermique des usagers des habitats traditionnels. Certains matériaux naturels encore mal connus peuvent entraîner une diminution des dépenses énergétiques de l'habitat par une meilleure qualité d'isolation et participer ainsi à la protection de l'environnement.

Afin de profiter de cette étude dans le cadre des travaux de restauration des ksour de la région de Laghouat, spécialement le noyau central du vieux ksar, nous avons sollicité de caractériser les matériaux de construction en vue de leur utilisation dans la restauration. De ce fait, le but de cette étude est de réaliser un matériau de construction brique terre crue (adobe), dont il serait le principal constituant, et par conséquent d'un grand intérêt économique pour la région sud du pays. La méthode expérimentale de formulation de cette brique est basée principalement sur l'optimisation des proportions des différents constituants (fibre, sable) ; et ceci dans le but d'obtenir des matériaux de

construction à caractéristiques convenables (résistance, mécanique acceptable, bonne isolation thermique et autres...).

La sélection de ce secteur sauvegardé de la ville de Laghouat comme cas d'étude, est dictée par son importance historique, culturelle et économique, sa situation stratégique (porte de désert) et les mutations qu'elle est entrain, et continuera à subir dans le futur. Il est nécessaire de promouvoir un habitat avec des techniques passives adaptées aux régions du Sud à climat chaud et aride, afin de réduire la consommation énergétique dans les nouveaux projets, ce qui baisser l'utilisation abusive de la climatisation artificielle, source des gaz, qui augmente la pollution, et l'effet de serre qu'altère la qualité environnementale et climatique. Il est à noter qu'en Algérie les niveaux de consommation d'énergie ont enregistré une augmentation, dont la part la plus importante a été consignée dans le secteur résidentiel.

Notre contribution à ce thème de recherche vise à faire des interventions différentes selon plusieurs paramètres qui peuvent influencer sur les propriétés mécaniques et thermiques de la brique de terre crue (l'adobe) du vieux ksar, donc notre intervention est axée sur la possibilité d'améliorer ses différentes caractéristiques mécaniques et thermo-physiques de ce matériau et de le rendre durable, et découvrir leur effet sur l'épaisseur du mur.

L'affinement des pourcentages des divers constituants (fibre, et sable) est envisagé dans le but d'obtenir une brique à propriétés appropriées (résistance mécanique admissible, et bonnes propriétés thermo-physiques de ce matériau, et l'étude de l'effet de ces caractéristiques sur l'épaisseur du mur d'un habitat traditionnel dans le secteur sauvegardé de la ville de Laghouat et par conséquent d'un grand avantage économique pour la région sud du pays.

La démarche à suivre dans cette recherche est basée sur deux aspects : l'aspect théorique qui consiste à faire la recherche bibliographique en essayant de comprendre et d'approfondir notre sujet. Cette partie est constituée trois chapitres.

Au début nous avons commencé à collecter les données bibliographiques liées à notre thème de recherche comme les mémoires de magister, les thèses de doctorat, les articles et les rapports de recherche, les documents graphiques, etc.

Le volet pratique basé sur la méthode expérimentale s'appuie sur des essais pratiques réalisés au niveau de laboratoire de génie civil pour la formulation de cette brique et faire la simulation par un logiciel connaît au niveau mondial « Energyplus ». Cette partie quant à elle se compose de deux chapitres.

Nous avons entamé la démarche en faisant des essais préliminaires pour extraire les caractéristiques de ce matériau ancien en état réel originel tel qu'il existe dans le vieux ksar.

## **Problématique :**

Les matériaux anciens (locaux) sont abandonnés, cédant la place au béton, parpaing et acier. La justification de cet abandonnement s'appuie sur des raisons telles que : « la perte de technicité, du savoir-faire architectural des maçons experts jadis en l'art de bâtir en terre, est souvent évoquée par les habitants ».

Dans les régions arides ou semi-arides, il est nécessaire de réaliser des matériaux de forte inertie thermique ayant la capacité de stocker la chaleur le jour et la restituer la nuit. Pour réduire les fluctuations de la température qui sont à la base de la sensation d'inconfort et l'évolution des techniques et le développement de nouveaux matériaux de construction contribuent à l'amélioration du confort thermique, des usagers des bâtiments à partir de certains matériaux naturels encore mal connus ou bien mal exploités, peuvent entraîner une diminution des dépenses énergétiques et dépenses économiques (coût de réalisation) dans l'habitat traditionnel par une meilleure qualité d'isolation contribuer ainsi à la protection de l'environnement.

**a.** Dans le cadre de Rénovation de l'habitat ancien du secteur sauvegardé, quelles pistes pour améliorer les performances énergétiques des matériaux de construction locaux (adobe) de haute qualité du point de vue de la performance thermique et résistance mécanique (pour réduire l'épaisseur de mur ou arriver à une épaisseur équivalente au lieu d'utiliser des matériaux modernes comme le parpaing et le béton) ?

Tout le monde sait que les habitations traditionnelles à patio ouvert (houche) présentent quelques inconvénients (inconfort) à cause de la différence de température entre l'espace ouvert (houche) et les espaces intérieurs (chambres, cuisine...), ainsi le passage d'un espace à un autre par le patio crée une grande incommodité (inconfort) surtout pendant les périodes froides.

**b.** Donc comment en hiver, le patio permet-il d'emmagasiner les précieuses calories pour faire face aux jours et nuits froides ? Est-ce qu'il y a un traitement spécial dans ce cas-là ? Quelques revêtements présents dans le patio ou quel dispositif solaire pour optimiser le confort thermique en hiver ?

## **Hypothèses :**

Le confort thermique, pour l'habitat traditionnel, se résume à travers les techniques et propriétés des matériaux de construction, à savoir l'inertie thermique, la résistance thermique, la conductivité thermique, et à travers une typologie centrée autour du patio, jouant le rôle de puits d'air et de lumière, en une ventilation continue à travers les petites ouvertures assurant des températures douces et une bonne qualité de l'air.

## **OBJECTIFS :**

- Concilier réhabilitation de bâti ancien et amélioration de ses performances énergétiques par (confort thermique) dans les secteurs sauvegardés.
- L'un des buts principaux est de pousser les travaux de la restauration de l'habitat traditionnel pour mettre les occupants de ces habitats dans un milieu très confortable (chaud, froid) en créant un microclimat intérieur satisfaisant pour l'exercice de diverses activités.
- Le troisième-but s'intéresse à la technicité des matériaux locaux d'une typologie constructive à patio, en présentant leur mise en œuvre, leurs propriétés, leurs pathologies et les mesures à prendre pour les conserver et les restaurer.

Notre contribution à ce thème de recherche se soldera par des interventions différentes selon plusieurs paramètres qui peuvent influencer sur les propriétés mécaniques et thermiques des matériaux de construction, donc elle vise la possibilité d'améliorer ses différentes propriétés et par conséquent de le rendre durable.

### **Méthodologie de recherche**

Afin de réaliser notre objectif, il est sensé de suivre certaines phases, à savoir :

#### *1.1. La recherche bibliographique et l'analyse des données*

- Les références thématiques ainsi que des études spécifiques et les expériences dans le domaine du patrimoine d'habitation traditionnel et de la construction en terre ;
- Les références contextuelles présentant et décrivant la région ;
- Les références techniques sur la composition, le dosage et les techniques de fabrication des briques de terre crue et des possibilités d'amélioration de leurs performances.

#### *1.2. Travaux et documents graphiques*

- Des relevés métriques et d'architecture des espaces habités sont des instruments indispensables pour connaître l'habitat traditionnel ksourien, son origine, son évolution et ses transformations ;
- Les documents graphiques afin de faire une lecture des ksour et leurs évolutions ;
- Les relevés des détails techniques réservés au matériau, sa mise en œuvre et les types de dégradations se révèlent être des instruments indispensables pour définir les qualités et les insuffisances du matériau et de sa mise en œuvre ;
- Le relevé des détails architectoniques et des décors.

#### *1.3. L'étude au laboratoire du matériau utilisé « briques de terre crue séchées au soleil »*

- 🔧 Afin de calculer les performances thermo-physiques du matériau terre et d'apporter des solutions architecturales en vue d'un habitat durable, tout en sauvegardant le cachet typique de l'architecture Ksourienne.
- 🔧 La simulation numérique par logiciel EnergyPlus.

## **Structure du mémoire :**

Le mémoire est organisé en cinq chapitres :

**Le premier chapitre :** présente un état de l'art sur l'architecture de terre, il traite des procédés techniques de production de la construction en terre et des expériences menées à travers le monde pour sa revalorisation. Par ailleurs, il évalue la situation de l'architecture en terre en Algérie et dans le monde sur le plan réglementaire et les avantages et les inconvénients de l'architecture de terre et ces pathologies.

**Le deuxième chapitre :** concerne le confort thermique assuré par une conception architecturale bioclimatique de départ, les paramètres et l'évaluation de confort thermique ainsi les diagrammes bioclimatiques et les performances thermiques du matériau tel que l'inertie thermique et la conductivité thermique et la résistance thermique.

**Le troisième chapitre :** est consacré à l'étude de l'état des lieux du contexte de la région de Laghouat, les différents types de ksour selon la littérature et la description des auteurs ; ainsi l'étude du secteur sauvegardé et son évolution chronologique, et les quartiers principale plus la typologie de l'habitat qui existe dans le ksar.

**Le quatrième chapitre :** constitue une étude géotechnique et thermo-physique de l'adobe, pour connaître les propriétés du matériau, en fonction des normes et des recherches ainsi que l'analyse des caractéristiques de l'ancien matériau (adobe). Enfin, l'amélioration de ce matériau par le recyclage de l'ancien matériau, et la perfection d'un nouvel adobe (brique terre crue), afin de faire la comparaison entre l'ancien et l'adobe perfectionné du point de vue de la propriété mécanique et thermo-physique.

**Le cinquième chapitre :** Il s'agit d'une évaluation des propriétés thermiques par logiciel de simulation (d'Energy-plus). Il présente la synthèse des résultats et les interprétations par étude comparative entre l'adobe traditionnel (en état réel), et l'adobe amélioré et en fonction de l'épaisseur de mur et l'amélioration du confort d'hiver par traitement du patio. A l'issue des analyses et interprétations des résultats obtenus, le choix le plus adéquat a été fait sur les briques qui répondent aux exigences de bonne résistance à la compression, et une bonne propriété thermo-physique arrivée à l'épaisseur du mur propice, épaisseur réduite avec haute propriété thermique par rapport à l'ancien mur massique de large épaisseur.

Le mémoire s'achève par une conclusion et quelques recommandations dans le souci de mieux valoriser ce nouveau matériau de construction dans les régions sahariennes et spécialement dans les ksour.

## **I PREMIER CHAPITRE**

---

### **L'ARCHITECTURE EN TERRE**

### **I.1 Introduction :**

La construction de terre a été l'une des techniques utilisées en grande partie en domaine de construction dans différents âges historiques. L'homme a commencé à employer la construction de terre au moins il y a 6000 ans dans Mésopotamie, et a été en beaucoup plus employée par différentes civilisations tout autour du monde. De nos jours, on estime qu'entre 30% et 50% des vies de population du monde en structures de terre, où des techniques de terre de construction encore sont majoritairement employées pour de nouveaux logements, pour assurer principalement le confort aux occupants et la compatibilité architecturale avec les environnements établis historiques.

Un des éléments les plus intéressants de la construction de terre est l'utilisation des briques séchées au soleil de la terre faites en sol d'argile cru mélangé à la paille d'orge ou de blé (soi-disant, adobe comme matériel de maçonnerie). Les matières premières appliquées principales sont sable brut, terre argileuse et paille.

Ce chapitre met la lumière sur une chronologie historique de l'architecture de terre. Ainsi, nous décrivons les modes traditionnels et les procédés innovants apportés à l'élaboration de cette architecture. Nous évaluerons ensuite la situation de cette architecture dans le monde et en Algérie : quels sont les normes et les règlements courants de la construction en terre ? En effet, il sera toujours nécessaire de développer ensuite sur un mode constructif qui est connu par adobe, qui prouve la richesse de cette architecture de terre. Nous arrivons en dernier lieu aux pathologies qui correspondent à cette architecture afin de rétablir un diagnostic plus précisément et qui nous entraînent peut être plus tard à remédier ces pathologies.

### **I.2 Définition de la terre :**

Avant d'évoquer l'architecture de terre, il faut d'abord savoir ce que la terre, ce matériau qui considère comme un matériau naturel, auquel la moitié de monde construite par ce matériau est défini comme suit : « le sol est la fraction solide de la sphère terrestre, à la surface du sol. La terre est un matériau meuble d'épaisseur variable, qui supporte les êtres vivants et leurs ouvrages et, ou poussent les végétaux elle résulte de la transformation de la roche mère sous-jacente sous l'influence de divers processus physiques, chimiques et biologiques liés aux conditions bioclimatiques et la vie animale et végétale [01] ».

### **I.3 Modes d'utilisation de la terre :**

Construire en terre, c'est construire avec un matériau que l'on foule aux pieds tous les jours. Néanmoins, la terre ne peut être employée en construction que si elle offre une bonne cohésion propre. Principalement due à la présence d'argile qui joue le rôle de liant naturel. En maintes contrées dont les paysages familiers en sont très souvent richement marqués, l'architecture de terre

est véritablement un témoignage vivant de l'histoire et de la culture des peuples. Nous nous sommes basés essentiellement sur l'ouvrage de H. Houben et H. Guillaud, « *Traité de construction en terre* », édité en 1995 par les éditions Parenthèses de Marseille nous essayerons de présenter de très nombreux modes de construction avec une infinité de variantes qui traduisent l'identité des lieux et des cultures. On connaît principalement douze modes d'utilisation de la terre en construction. Parmi ceux-ci, sept sont très couramment employés et constituent les genres techniques majeurs. [Fig I.1]

### **I.3.1. Adobe :**

La brique séchée au soleil est plus communément connue sous le nom d'adobe. Les briques d'adobe sont moulées à partir d'une terre malléable souvent ajoutée de paille. À l'origine. Ces briques étaient formées à la main. Plus tard (et encore aujourd'hui), elles seront fabriquées manuellement à l'aide de moules à formes prismatiques variées en bois ou en métal. Actuellement, on emploie également des machines.

### **I.3.2. Pisé :**

La terre est comprimée en masse avec un pilon dans des hanches, couche par couche, et banchée par banchée. Traditionnellement, ces outils sont en bois.

### **I.3.3. Terre-paille :**

Pour cette technique, la terre utilisée doit avoir une bonne cohésion. Elle est dispersée dans de l'eau jusqu'à l'obtention d'une barbotine homogène, que l'on verse sur de la paille, jusqu'à enrober chaque brin. Au séchage, on obtient un matériau dont la texture est essentiellement celle de la paille.

### **I.3.4. Torchis :**

Une structure en colombages et claires de bois est hourdée avec une ou plusieurs couches de terre. Cette terre argileuse, amendée de paille ou d'autres fibres. Elle constitue les parois de la bâtisse.

### **I.3.5. Façonnage :**

Cette technique ancestrale est toujours fréquemment utilisée. La terre est façonnée de la même façon que pour la poterie, sans outils.

### **I.3.6. Blocs comprimés :**

Pendant longtemps, des blocs de terre ont été fabriqués à l'aide de moules dans lesquels on comprimait la terre à l'aide d'un petit pilon ou en rabattant avec force un couvercle très lourd. Ce procédé a été mécanisé et on utilise aujourd'hui des presses de toutes sortes. Les produits obtenus sont extrêmement variés.

### **I.3.7. Bauge :**

Ce procédé consiste à empiler des boules de terre les unes sur les autres et à les tasser légèrement à l'aide des mains ou des pieds jusqu'à confectionner des murs monolithiques.

Habituellement, la terre est amendée de fibres de natures diverses.

Aujourd'hui, ce sont les techniques de l'adobe, du pisé et du bloc comprimé qui sont les plus à l'honneur et même abordées à un très haut niveau de recherche scientifique et technologique. On peut regretter que ces trois genres techniques majeurs s'imposent au détriment des autres dont l'intérêt n'a pas été encore épuisé [01].

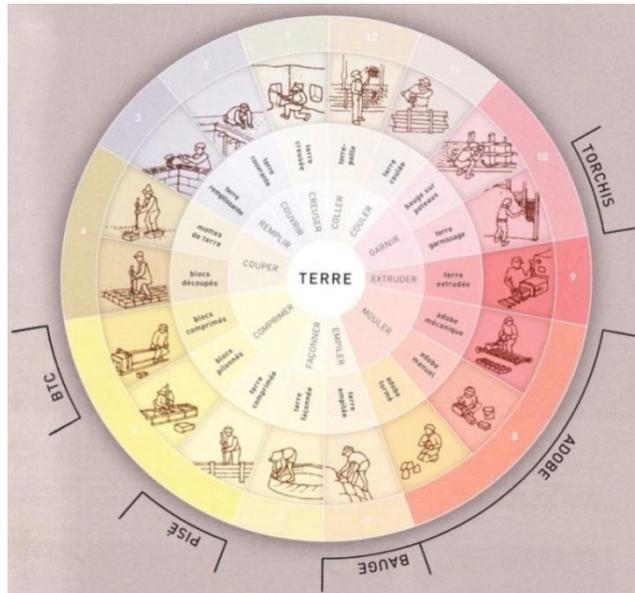


Figure : I. 1 Les modes de construction en terre [13]

La déficience de l'histoire a octroyé à cette architecture une date précise, étant donné que l'histoire de la construction en terre est méconnue pour ce matériau jugé antique et médiocre. En effet, sa prédominance dans son apparence peut dépasser les autres matériaux tels que la pierre ou le bois dits *matériaux nobles*. Quelques archéologues remontent sa date à l'âge néolithique, mais c'est clair pour nous que les techniques de construction de la terre ont été connues pendant plus de 9000 années. [02]

### I.4 Aperçu historique :

Des techniques de construction de la terre ont été connues pendant plus de 9000 années. La brique de terre (adobe) loge la datation de 8000 à 6000 avant Jésus-Christ et a été découverte en Turkestan russe (Pumpelly, 1908). Les bases enfoncées de la terre datant de 5000 avant Jésus-Christ ont été, quant à elles découvertes dans l'Assyrie. La terre a été aussi bien employée comme matériau de construction dans toutes les cultures antiques, non seulement pour des maisons, mais pour les bâtiments religieux. La figure I.2 montre des chambres fortes dans le temple de Ramsès II chez Gourn, Égypte, construites des briques de terre il y a 3200 ans. La figure I.4 montre la citadelle de Bam dans l'Iran, pièces datant de 2500 années ; la figure I.3 est une exposition une ville enrichie dans la vallée du Draa au Maroc, qui date d'environ 250 années [02].



Figure : I. 2 Salles d'entrepasage, temple de Ramsès II, Gurna, Égypte [02]



Figure : I. 3 Ville enrichie, vallée du Draa, Maroc [02]



Figure : I. 4 Citadelle de bam, Iran, avant tremblement de la terre du décembre 2003 [02]

La Grande Muraille de 4000 ans de la Chine a été à l'origine construite seulement de la terre enfouée. Seulement une bache postérieure des pierres et des briques a donné l'aspect d'un mur en pierre. Le noyau de la pyramide de Sun dans Teotihuacan, Mexique, construit entre 300 et 900 se compose approximativement 2 de millions de tonnes de la terre enfouée.



Figure: I. 5 Bazar, Sirdjan, Iran [02]



Figure : I. 6 la terre enfouée maison, Meldorf, Allemagne, 1795 [02]

Il y a beaucoup de siècles, dans des zones climatiques sèches où le bois est rare, on a développé des techniques de construction dans lesquelles des bâtiments ont été couverts de chambres fortes ou de dômes de brique de terre sans coffrage ou soutiennent pendant la construction. Figure I.5 montre le quart de bazar de Sirdjan en Perse, qui est couverte par de tels dômes et chambres fortes. En Chine, vingt millions de personnes vivent en maisons ou cavernes souterraines qui ont été creusées dans le sol vaseux.

Les découvertes d'âge du bronze ont établi cela en terre de l'Allemagne et qui ont été employées comme un remplissage dans les maisons timbre-ramée ou pour sceller des murs faits de troncs d'arbre. L'Acacia et le barbouillage ont été également employés, qui représentent l'exemple le plus classique de la brique de terre.

Les murs au Northern Europe, trouvé dans le fort de Heuneburg près du lac Constance, l'Allemagne (I.6) remontent au 6e siècle avant Jésus-Christ. D'après les textes antiques de Pline, il y avait les forts enfoncés de la terre en Espagne vers la fin de l'année 100 avant Jésus-Christ.

Au Mexique, l'Amérique Centrale et l'Amérique du Sud, bâtiments d'adobe sont connus dans presque toutes les cultures précolombiennes. La technique enfoncée de la terre a été également connue dans beaucoup de secteurs, alors que les conquérants espagnols l'apportaient à d'autres. Expositions de Figure I.7 un finca enfoncé de la terre dans l'état de São Paulo, Brésil, qui est 250 années. [02]

En Afrique, presque toutes les mosquées anciennes sont construites de la terre. Figure I.8 montre un du 12e siècle, montrent des exemples postérieurs dans au Mali et à l'Iran.



Figure : I. 7 Finca enfoncé de la terre, São Paulo, Brésil [02]



Figure : I. 8 Mosquée chez Nando, Mali 12e siècle [02]



Figure : I. 9 grande mosquée, Djenné, Mali, construit 1335 [02]



Figure : I. 10 Mosquée, Kashan, Iran [02]

Les Figures I.9 et I.10 montrent des exemples sur des mosquées au Mali et en Iran.

Dans la période médiévale (13e au XVIIe siècle), la terre a été employée dans l'ensemble de l'Europe centrale comme remplissage dans les bâtiments timbre-frame, aussi bien que pour couvrir des toits de paille pour les rendre résistantes au feu.

En France, la technique enfoncée de la terre, dites *le pisé de terre*, était répandue du 15<sup>e</sup> au 19<sup>e</sup>

siècle. Près de la ville de Lyon, il y a plusieurs bâtiments qui sont plus de 300 années et sont toujours habités. En 1790 et 1791, François Cointeraux a édité quatre livrets sur cette technique et qui ont été traduits en allemand deux ans après (Cointeraux, 1793). La technique a été introduite en Allemagne et aux pays voisins par Cointeraux, et David Gilly. Celui-ci a écrit la célèbre *Lehmbaukunst* (Gilly, 1787) de Handbuch, qui décrit la terre enfoncée.

En Allemagne, la plus ancienne maison habitée laquelle conçue avec la terre enfoncée mûre remonte à 1795 d'après son propriétaire, le directeur des corps de sapeurs-pompier, qui déclare que les maisons résistantes au feu ont été construites plus économiquement suivant cette technique, par opposition aux maisons d'armature habituelle de bois de construction avec le remplissage de la terre. [02].

La maison la plus grande avec les murs pleins de la terre en Europe est chez Weilburg en Allemagne. Réalisée en 1828, elle se tient toujours (I.11). Tous les plafonds et le repos entier de structure de toit sur les murs enfoncés pleins de la terre ayant 75 cm profondément au fond et 40 cm de profondeur au dernier étage (la force de compression au fond des murs atteint 7,5 kg/cm<sup>2</sup>).



Figure : I. 11 Maison de terre enfoncée, Weilburg, Germanie, 1828. [02]



Figure : I. 12 Maisons de terre enfoncée, Weilburg, Germanie, environ 1830. [02]

Figure I.12 montre aux façades d'autres maisons de terre enfoncées chez Weilburg, construites environ 1830. [02]

### **I.5 Situation de l'architecture en terre dans le monde :**

Sous ce rapport, on aborde la situation constitutive de l'architecture de terre. Nous allons tenter de démontrer les règlements et la formation autour du monde, et on verra les pays qui ont des règlements spécifiques et qui exposent d'une manière générale les codes, les normes et les directives liés à cette architecture.

D'après les statistiques de l'UNHCR (United Nation High Commission for Refugees). Près de 30 % de la population mondiale habitent actuellement dans des constructions en terre, c'est un matériau stable, écologique et bon marché. (Il a été ainsi constaté que 60 % des habitations du Pérou soient bâties en Adobe ou en pisé, à Kigali, 38 % des logements sont en terre et le

recensement de 1971 en Inde attestait que près de 72 % du parc immobilier est construit en terre.) Il est également important de remarquer que près de 17 % des bâtiments inscrits au patrimoine mondial de l'humanité sont en terre, ce qui reflète la longévité qu'offre ce matériau de construction [01].

✚ **21 % de la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO** est constitué de sites archéologiques et d'ensembles architecturaux en terre : soit, en 2014, 150 de biens culturels et mixtes, auxquels il faut ajouter 173 biens inscrits sur les listes indicatives en mesure de faire l'objet de demandes de classement.

✚ **15 % de la liste des monuments les plus en danger du World Monument Watch** sont construits en terre (sur 100 sites, liste révisée chaque année) : dernier site classé, le village de New Gourna de Hassan Fathy.

✚ **57 % de la liste du patrimoine culturel immobilier** en danger de l'UNESCO est construit en terre.

✚ **32 % des 242 villes inscrites** à ce jour sur la Liste de l'organisation des villes du patrimoine mondial, soit 78 villes sont construites en terre et témoignent d'un important tissu historique bâti avec ce matériau [10].

Plusieurs villes n'ont malheureusement pas été épargnées de tous ces plans d'action qui ont dégradé la situation du logement, et ont fait apparaître des ensembles d'habitations incohérents, hétérogènes aux tissus développés auparavant par la population, inadéquats au mode de vie de ces dernières qui se sont vus imposer une architecture étrangère [19].

De ce fait, la population a fini par s'imposer ce nouveau cadre bâti au nom du « Modernisme » au détriment d'une architecture appropriée à ses besoins et à ses moyens économiques et aux spécificités climatiques de la région.

Cette situation est le résultat de différents facteurs :

- Le manque de culture scientifique et sociale chez les décideurs et les différents acteurs de ce secteur ;
- Leur insensibilité à toute question liée au patrimoine et à l'environnement ;
- Leur insouciance à l'égard de la qualité architecturale et celle du cadre de vie du citoyen ;
- La volonté de répondre rapidement à la demande multipliée en logements.

Ces politiques n'ont fait qu'accentuer la destruction du patrimoine bâti remarquable que recèlent ces villes, puisque plusieurs constructions en terre ont été démolies pour être remplacées par des bâtiments dits « modernes » [20].

### **I. 5.1. Codes, normes, directives et orientations :**

La terre crue a été employée pour le bâtiment depuis les époques les plus anciennes, comme montrées par les milliers de bâtiments disséminés dans le monde entier. Avec l'arrivée des matériaux modernes industriels, elle a été abandonnée, particulièrement dans les pays développés. De nos jours, c'est l'objet d'un intérêt remplacé pour la partie due à être un matériel de l'énergie incorporée très basse, en particulier si non stabilisé. Dans les pays moins développés, l'utilisation n'a jamais arrêté bien que les gens préfèrent habituellement d'autres matériaux puisque la terre pour eux est liée à la représentation de la pauvreté. D'une part, la conservation des structures de terre est une principale préoccupation, comme montrée par l'intérêt des organismes internationaux pour la conservation, telle qu'ICOMOS (ce qui a des comités de la terre) et ICCROM (PROJET de TERRA). [16]

Selon [M. Carmen Jime, Ignacio Can˜as 2005], les auteurs avaient travaillé dans une perspective internationale pour obtenir une liste de documents normatifs reflétant la situation actuelle de l'étalonnage de la terre construisant dans le monde entier les références prises comme base pour l'étude présentée ici ont été choisies parmi les documents retenus pour cette fin.

[M. Carmen Jime, Ignacio Can˜as 2005] à collecter et classer les documents choisis dans trois catégories. Le groupe 1 est des normes des organismes et des règlements nationaux de normalisation seulement, puisqu'elles seront facilement reconnaissables. Tous autres normes et documents fournissant des règles, des guides ou des caractéristiques pour des activités ou leurs résultats » sont les documents normatifs, le groupe 2.

Pour le groupe 1, nous avons en 2003 les codes de terre de matériaux de construction du Mexique, États-Unis, par la Division d'industries du bâtiment du règlement et le département d'autorisation ; le prestandard pour CEB d'association française AFNOR [9] de normes ; des normes nouvelles Zélande ; règlement résistant d'adobe de tremblement de terre du Pérou, par le service national d'étalonnage, de formation et de recherche pour l'industrie du bâtiment (SENCICO). La terre comprimée bloque des normes de l'organisme de normalisation régional africain édité dans un document de CRATERRE, et le niveau enfoncé de la terre de l'association de normes du Zimbabwe.

Dans le groupe 2, il y a les documents de référence nationaux tels que le Lehmbau allemand Regeln ; Australien, SA et marcheur, bulletin 5 et EBAA ; MOPT espagnol et IETcc ; ou les recommandations pour préparer des normes de CYTED [16].

Le groupe 3 se compose de la bibliographie générale de la construction de la terre qui a été choisie parmi les références les plus citées en articles concernant le bâtiment de la terre en journaux des rapports de citation de journal d'ISIS, et des citations dans les normes également. Cela s'appelle les documents techniques. Il est constitué de deux publications de CRATERRE, d'un manuel complet

connu pour la construction de la terre, Houben et Guillaud et un manuel pour la production de BTC, Rigassi ; aux États-Unis nous trouvons un manuel pour l'usage de l'adobe et la terre enfoncée dans l'occidental du sud, McHenry, une étude au sujet de l'industrie d'adobe au Mexique, Smith et Austin, et un manuel conçu pour aider à satisfaire au besoin de maisons bon marché dans le monde, OIA. En conclusion, la terre comme matériau de construction pour les pays en voie de développement est considérée dans Spence et cook. [16]

**Tableau I. 1. Liste des documents examinés [16] :**

Group	Pays	Document	Techniques	Approches pour le choix de sol
1. Normes de NSBsb et règlements	LES États-Unis	NMAC 14.7.4 (2000)	A, BTC, TE	petites recommandations. Des unités de construction doivent être examinées.
	La France	XP P 13-901 (2001)	BTC	Abaques de granularité et de plasticité. Classification par la nature pour l'évaluation de sol
	La Nouvelle-Zélande	NZS 4297 (1998) 4298 NZD 1998) 4299 NZD 1998)	A, BTC, TE	Recommandations non quantitatives au sujet des sols qui ne doivent pas être employés. Mouiller/essai sec nécessaire. Système pour l'essai des unités
	Le Pérou	NTE E 080 (2000)	A	Les petites recommandations et ceux-ci sont pour la granularité
	L'Afrique régionale	ARSO (1996)	BTC	Abaques de granularité et de plasticité. Classification par la nature. Énumérer et classier les essais de sol, pas procédures expliquées.
	Le Zimbabwe	SAZS 724 (2001)	TE	Les recommandations pour la granularité, les sels, le contenu organique et le ruban examinant.
2. Normatifs Documents	L'Allemagne	Lehmbau Regeln (1999)	A, BTC, TE	Force de loi, plasticité et granularité d'essai essentiel. Énumérer et expliquer les essais en laboratoire simple et donnant des recommandations pour certaines d'entre eux.
	L'Australie	HB 195 (2002) Bulletin 51 992 EBAA (2001)	A, BTC, TE	*Énumération de champ et d'essai en laboratoire, avec des procédures données pour certaines. Recommandations de granularité pour chaque technique *Recommandations générale qualitative pour la granularité. Convenance par l'essai des unités. Observation de l'exécution de l'héritage existant *recommandations non quantitatives au sujet des sols pour ne pas employer
	L'Espagne	MOPT (1992) IETcc (1971)	À, BTC, TE	Convenance par l'essai sur le terrain avec un diagramme de décision. Essais en laboratoire recommandés, avec des recommandations pour la granularité
	CYTED international	CYTED (1995)	A, CEB, TE	quelques dispositions pour des états généraux de sol Pas une approche directe pour le choix de sol. Recommandations selon des essais de force sèche
3. Technique documents	Houben et Guillaud (1994)		À, BTC, TE	Propriétés essentielles : granularité, plasticité, Compactibilité et cohésion. Préliminaire et essai d'identification de laboratoire expliqué. Abaques pour la granularité, la plasticité et la compactibilité. Classification par la nature
	Rigassi V (1995)		BTC	Granularité, plasticité et compactibilité essentielles. Des essais de sol d'identification de champ et de laboratoire sont expliqués.
	Mc. Henry PG (1984)		À, TE	Offre les sols moyens qui ont montré la bonne exécution dans les bâtiments existants
	Smith et Austin (1996)		A, BTC, TE	L'identification et le choix des sols n'est pas donné beaucoup d'importance. Dispositions très petites. Les unités d'essai sont la meilleure manière.
	OIA (1970)		À, BTC, TE	Convenance par l'essai sur le terrain avec un diagramme de décision. Identification par des essais en laboratoire sans recommandations
	Spencer et cook (1983)		À, BTC, TE	Arrangement essentiel, les propriétés d'index : dimension particulière, limites d'Atterberg, tassement et classifications des sols bien que recommandations non données. L'essai des unités est essentiel.

A : adobe ; BTC : blocs comprimés de la terre ; TE : la terre enfoncée.

Dans le tableau [I.1], nous montrons les types de recommandations pour le choix des sols trouvés dans les documents examinés. Si les recommandations offrent pour l'adobe, CEB et terre enfoncée dans la même publication ils sont différents pour chaque technique, et ils sembleront décomposés.

### **I.6 L'architecture de terre en Algérie :**

L'architecture de terre aujourd'hui connaît une progression remarquable au niveau de monde et commence à retenir son image authentique. Par contre, la situation en Algérie il semble tombé dans un état déplorable et vit un retard et ça à cause de manque de la sensibilisation, qu'entraîne à un échec pour la revalorisation de l'architecture de terre. Par conséquent, il est établi une stratégie pour la réhabilitation de l'image de l'architecture de terre en Algérie, présentée sous forme d'un arsenal juridique et des mesures de protection. Dans ce paragraphe, nous allons exposer les lois juridiques et mesures manifestées par l'Etat et les effets de ces mesures. Enfin, nous montrons les actions majeures entreprises par le ministre de la Culture pour la réhabilitation de l'image de l'architecture de terre.

#### **I.6.1 Stratégie algérienne pour la réhabilitation de l'image des architectures de terre :**

Arsenal juridique : journal officiel de ministre de la Culture n° 44

1. Loi 98-04 des 20 Safar 1419 correspondants au 15 juin 1998 relatifs à la protection du patrimoine culturel.
2. Décret exécutif n° 03-324 du 9 Sha'ban 1424 correspondant au 5 octobre 2003 portant modalités d'établissement du plan permanent de sauvegarde et de mise en valeur des secteurs sauvegardés (PPSMVSS)
3. Décret exécutif n° 03-322 du 9 Sha'ban 1424 correspondant au 5 octobre 2003 portant maîtrise d'œuvre relative aux biens culturels immobiliers protégés.
4. Arrêté du 4 Rabie El Aouel 1426 correspondant au 13 avril 2005 fixant la composition et le fonctionnement du comité sectoriel de qualification de l'architecte spécialisé des monuments et des sites protégés
5. Arrêté du 4 Rabie El Aouel 1426 correspondant au 13 avril 2005 fixant les dispositions spécifiques à l'exécution de la maîtrise d'œuvre sur les biens culturels immobiliers protégés
6. Arrêté des 22 Rabie Ethani 1426 correspondant au 31 mai 2005 fixant les contenus des missions de la maîtrise d'œuvre portant sur la restauration des biens culturels immobiliers protégés[11].

#### **I.6.2 Les mesures de protection légale qui concernent les architectures de terre :**

- Mesure provisoire (10 ans) qui concerne tous les biens culturels : l'inscription sur la liste de l'inventaire supplémentaire
- Mesure définitive qui concerne les monuments historiques (édifices ou ensembles monumentaux) : le classement.

- Mesure définitive qui concerne les ensembles urbains ou ruraux : la création d'un secteur sauvegardé [11].

*Défaillance des mesures de protection légales : les raisons*

Les populations ont parfois de bonnes raisons de vouloir quitter les maisons situées dans les Ksour.

Parce que :

- Les habitations ne répondent pas aux normes modernes de confort et d'habitabilité
- Les infrastructures et services de base sont absents des abords des ksour (cas de Beni Abbas) :
  - Routes et transports
  - Services et équipements publics
  - Commerces.

Mais le plus souvent, ce sont de mauvaises raisons et des idées fausses induites par la dévalorisation de l'image des architectures de terre.

- Les maisons en terre fondent sous l'action de l'eau et de la pluie.
- On ne peut pas y introduire le confort moderne.
- On ne peut pas construire en étages avec de la terre.
- Ce sont des maisons qui nécessitent un entretien fréquent et coûteux.
- Ce sont des maisons qui ne sont pas durables.
- Ce sont des maisons de pauvres [11].

**I.6.3 la réhabilitation de l'image des architectures de terre :**

Actions majeures entreprises par le ministère de la Culture pour la réhabilitation de l'image des architectures de terre :

Création des nouveaux parcs culturels tels que le parc national de l'atlas saharien, parc de Tindouf, parc Adrar.

Exposition « De Terre et d'argile »

Institutionnalisation du festival archi'Terre.

Institutionnalisé par arrêté du 13 juillet 2011 de la ministre de la Culture.

Ateliers pratiques d'initiation aux techniques de construction en terre.

Création du CAPTERRE.

Centre algérien du Patrimoine culturel bâti en Terre (Établissement public à caractère administratif sous tutelle du ministère de la Culture) Décret n° 12-79 du 12 février 2012[11].

**I.6.4 Actions du CAPTerre :**

- Recherche appliquée pour réacquisition, développement et diffusion savoir-faire (manuels de construction, de réhabilitation et d'entretien) ;
- Assistance technique (projets publics ou privés de réhabilitation ou de construction) ;

- Organisation de cycles courts de formations qualifiantes (professionnels du bâtiment) ;
- Identification et inventaire du patrimoine culturel bâti en terre et des savoir-faire liés à sa production ;
- Organisation de manifestations culturelles et scientifiques promotion et valorisation.
- Réhabilitation d'une construction bâtie en terre
- Conception ou réalisation d'un édifice contemporain qui utilise le matériau terre
- formation dans le domaine des architectures de terre
- Création ou développement des activités d'une entreprise dans la filière terre
- Accomplissement des études ou recherches sur le patrimoine architectural bâti en terre ou sur la construction en terre
- Développement des projets ou activités dans le cadre de la conservation du patrimoine bâti en terre ou de la promotion des architectures de terre

#### **I.6.5 Actualité de l'architecture de terre en Algérie :**

Aujourd'hui, les attitudes ont changé, malgré l'échec de l'opération de Mustafa Ben Brahim. En effet, le BTS est un matériau reconnu officiellement et le Centre National d'étude et de recherche intégrée du Bâtiment (CNERIB) mène ses recherches sur ce sujet depuis plus de vingt ans. Plusieurs projets ont pu voir le jour tel que le montre le tableau qui suit [09] :

Intérêt de l'Algérie pour la construction en terre remonte au début des années 70

Tableau I. 2. Les opérations de construction en terre en Algérie [06]. [09]

<i>Date</i>	<i>Technique</i>	<i>Nombre</i>	<i>Lieu</i>
<i>1969-1970</i>	<i>Terre coulée</i>	<i>02</i>	<i>Zéralda</i>
<i>1971-1973</i>	<i>Terre remplissante</i>		<i>Abadla</i>
<i>1972</i>	<i>Pisé</i>	<i>136</i>	<i>Batna</i>
<i>1973-1975</i>	<i>Pisé (R+2)</i>	<i>30/300</i>	<i>Mustafa Ben brahim (Bel Abbès)</i>
<i>1976</i>	<i>Toub</i>	<i>100</i>	<i>Felliache (Biskra)</i>
<i>1980</i>	<i>Bloc de terre comprimée</i>	<i>120</i>	<i>Madher (Boussaâda)</i>
<i>1981</i>	<i>Bloc de terre comprimée</i>	<i>40</i>	<i>Chéraga,</i>
<i>1984</i>	<i>Bloc de terre comprimée</i>	<i>20</i>	<i>Tamanrasset</i>
<i>1984</i>	<i>Bloc de terre comprimée</i>	<i>02</i>	<i>Tamanrasset &amp; Soudania (Alger)</i>
<i>1986</i>	<i>Bloc de terre comprimée</i>	<i>10</i>	<i>Reggane (Adrar)</i>
<i>1993</i>	<i>Bloc de terre comprimée</i>	<i>68</i>	<i>Tamanrasset</i>
<i>1999</i>	<i>Pisé</i>	<i>01</i>	<i>Soudania (Alger)</i>
<i>2007</i>	<i>Bloc de terre comprimée</i>	<i>01</i>	<i>Soudania (Alger)</i>
	<i>Total</i>	<i>530</i>	

Sur le plan des pratiques traditionnelles, la construction en terre est pratiquée dans de nombreuses régions du pays. Selon le rapport du CNERIB, l'Algérie compte plusieurs techniques se distinguant par leurs procédés de production. Jusque-là, nous n'avons pas encore rencontré d'étude spécifique sur les techniques pratiquées en Algérie. L'ouvrage de P. Odul ne présente que

quelques exemples et ne s'étale pas sur l'ensemble des procédés traditionnels algériens [09].

## I.7 L'adobe une technique millénaire :

### I.7.1 Définition de l'adobe :

L'adobe est une technique de construction qui consiste à façonner à la main ou à produire à l'aide de moules des briques de terre, amendées de paille ou non, et à les laisser sécher au soleil avant de les utiliser pour appareiller des murs, arcs, voûtes ou coupoles, ou pour le remplissage de murs en pan de bois, en lieu et place du torchis.

Le mode de séchage de ces briques leur vaut, par opposition aux briques de terre cuite au four, le nom de briques de terre crue [07]. [21].

### I.7.2 Étymologie :

Le terme « adobe » serait originaire du vocable égyptien « thob » ou « thoub », devenu « al toub » en arabe. Assimilé sous la dénomination de « adobe » en Andalousie puis sur la péninsule ibérique, il persistera sous cette appellation en Amérique centrale et latine au-delà des périodes coloniales espagnoles et portugaises, de même qu'en Europe. En Afrique de l'Ouest, cette technique de construction est plutôt connue sous le terme de « banco » [21]. [07].

### I.7.3 Typologie :

La brique d'adobe est, à n'en pas douter, l'un des matériaux de construction les plus vieux au monde. Sa forme actuelle, c'est-à-dire le parallélépipède moulé, à plan rectangulaire ou carré, est le résultat d'un long processus d'évolution typologique qui a vu la brique de terre crue déclinée sous différentes formes façonnées à la main : boules ou pains de terre, coniques, piriformes, hémisphériques, dentiformes ou à plan convexe.

Les plus anciennes de ces briques, façonnées à la main sous forme de pains de terre striés sur leur face supérieure, ont été découvertes par les archéologues en Palestine, sur le site de Jéricho. Elles dateraient du VIII<sup>e</sup> millénaire av. J.-C. [07].

### I.7.4 L'universalité des architectures de terre

Quelques repères historiques, quelques personnalités :

#### François Cointereaux (France) – 1789

Diffusion d'écrits sur l'architecture traditionnelle rurale en terre (Europe – USA et Australie)

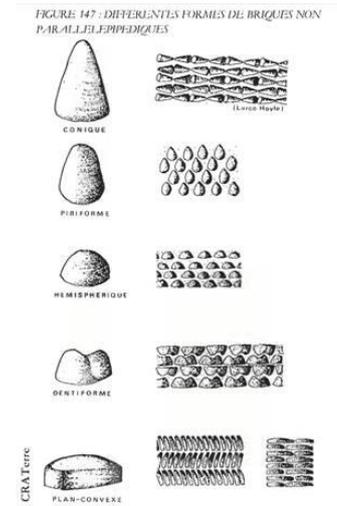
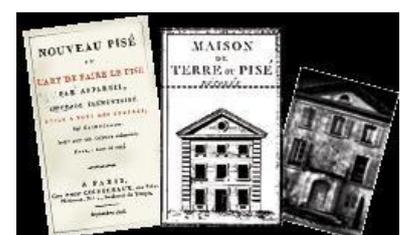


Figure: I. 13 différente forme de brique. CRA terre construire en terre



### Hassan Fathy (Égyptien) – 1900-1989

« Construire avec le peuple »- 1973 (Égypte – Iraq et Pakistan) Hassan Fathy cherche à s’ancrer dans les traditions autochtones pour mieux les dépasser.

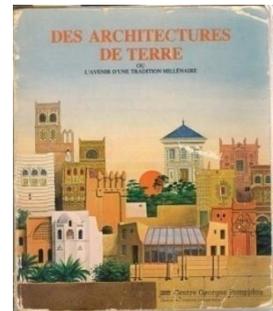
Première construction en terre en 1930

### Création de CRATerre (Grenoble) – 1979

Hubert Guillaud et Hugo Houben

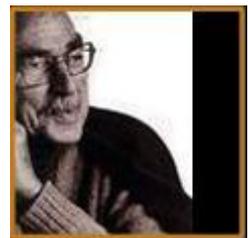
Publications - Recherches – formations – projets de préservation) Projets pilotes (Mayotte – Domaine de la Terre ...)

**Exposition « des Architectures de terre »**  
au Centre Georges Pompidou – 1982. [21]



#### I.7.5 Hassan Fathy:

On doit à l’architecte égyptien Hassan FATHY (1900-1989) la renaissance de la technique de construction en adobe - à travers la modernisation de son image – et ses développements récents à travers le monde, notamment aux États-Unis où il fût, en 1981, sollicité par la communauté musulmane pour réaliser un village en adobe à Abiquiu, au cœur du Nouveau-Mexique.



La renommée internationale de celui qui voulait « construire avec le peuple » et qui considérait qu’« il ne doit y avoir ni fausse tradition, ni modernisme factice, mais une architecture qui sera l’expression permanente et visible du caractère de la communauté » lui fut assurée par le projet, au succès pourtant mitigé, de la nouvelle ville de Gourna, en Haute-Égypte, réalisé entre 1945 et 1946.

Son œuvre lui valut le prix spécial d’architecture de la fondation Agha Khan en 1980 et la médaille d’or de l’Union Internationale des Architectes en 1985[21].

#### I.7.6 Recherche de la bonne carrière :

- **Origine de la terre :** la terre en tant que matériau, est issue de l’érosion mécanique et chimique de la roche mère. Cette roche se désagrège en particules minérales de dimensions variables, depuis les cailloux jusqu’aux poudres argileuses.
- **Convenance des terres :** Une terre pour l’adobe à chaque technique de construction en terre correspond une granulométrie préférentielle de la terre qui permet d’optimiser la qualité du produit.

Pour l’adobe, la terre ne doit pas contenir de gros cailloux soit une fraction granulaire en excès qui mettrait en péril la stabilité des briques ni un apport trop important d’argiles qui entraînerait des fissures lors du séchage. Elle doit également être totalement débarrassée des matières végétales,

comme les racines qui pourraient, en germant, provoquer la fissuration des briques.

- **L'extraction** : la terre appropriée à la fabrication de l'adobe peut être obtenue d'une ou plusieurs carrières. En premier lieu, il faut évaluer la capacité, la production, la profondeur et l'homogénéité de la carrière choisie (rapport investissement/rendement)[21]. [05]

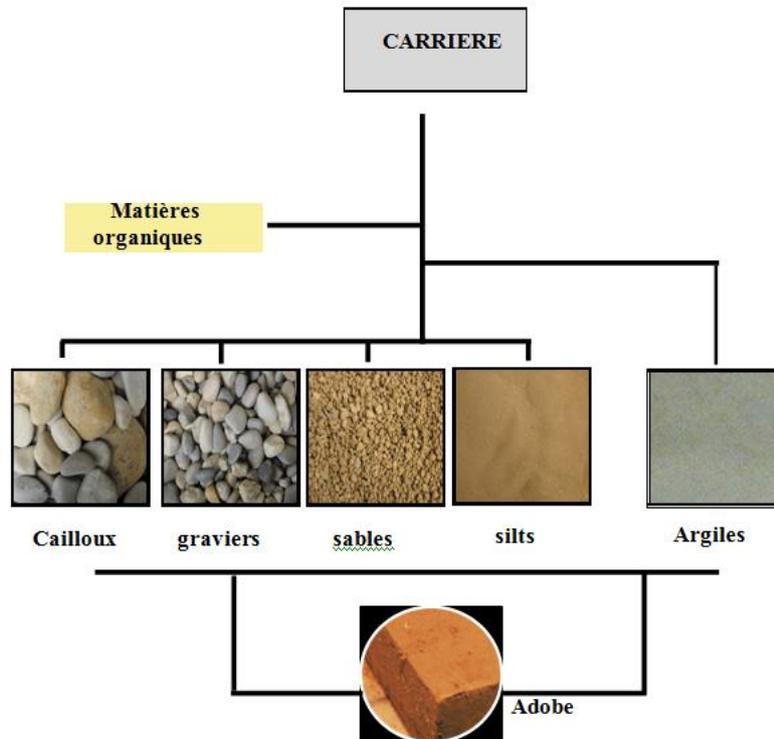


Figure : I. 14 Matières organiques : Younès BABANEDJAR, construire avec l'adobe

### I.7.7 Identification des terres :

Outre les essais de laboratoire, coûteux et longs à effectuer, un certain nombre d'essais de terrain permettent d'apprécier certaines caractéristiques de la terre et de confirmer ou d'infirmer sa convenance à la technique de construction envisagée.

Pour des ouvrages simples, un diagnostic d'identification basé sur ces essais peut suffire à condition que l'on s'assure de la concordance des signes du diagnostic. Si l'on constate des contradictions, il y aura lieu de pratiquer des tests de laboratoire.

Il s'agira de garder à l'esprit qu'une terre à adobe doit idéalement être constituée de sable, de limon et d'argile. (Sable (55%-75%), limon (10%-28%), argile (15%-18%))

la terre est formée à partir d'une roche mère par des processus très lents de dégradation et par des mécanismes très complexes de migration de particules. Il en résulte une infinité de sortes de terre avec une variation de caractéristiques illimitée.

La connaissance de ces propriétés est importante, mais surtout celle des quatre propriétés fondamentales : la granularité, la plasticité, la compressibilité et la cohésion.

Afin de rationaliser l'exploitation de la connaissance de ces propriétés, il est important de classer les terres. (fig : I.14) les classifications les plus adéquates pour la construction en terre sont la classification géotechnique et la classification pédologique [01]. [21]. [05].

### **I.7.8 Matières organiques et minérales :**

#### **I.7.8.1 Cailloux :**

Leur taille se situe entre 200 mm et 20 mm. Il s'agit d'un matériau grossier résultant de la désagrégation de la roche mère dont ils héritent des caractéristiques fondamentales. Ils peuvent être également issus d'un matériau d'apport les cailloux jeunes ont des formes angulaires. Les cailloux fortement désagrégés ont des formes arrondies ainsi que ceux qui ont été transportés par les cours d'eau ou les glaciers [01].

#### **I.7.8.2 Graviers :**

Leur taille se situe entre 20 mm et 2 mm. Ce sont des particules de matériau grossier. De petite taille, résultante de la désagrégation de la roche mère et des cailloux. Ils peuvent également avoir été apportés par les cours d'eau et présentent alors des formes rondes. Mais ils peuvent aussi être anguleux. Les graviers constituent le squelette de la terre et limitent sa capillarité et son retrait.

#### **I.7.8.3 Sables :**

Leur taille se situe entre 2mm et 0,06 mm, ils sont souvent composés de particules de silice ou de quartz. Certains sables de plage contiennent du carbonate de calcium (fragments de coquillages). La fraction sableuse d'un sol est caractérisée par sa grande friction interne. Les particules sableuses manquent de cohésion du fait de la faible influence des films d'eau au voisinage de leur surface dont l'absorption très réduite limite le gonflement et le retrait les sables sont caractérisés par leur structure ouverte et leur perméabilité.

#### **I.7.8.4 Silt :**

La taille des particules de silt se situe entre 0,06 mm et 0,002 mm. Du point de vue physique et chimique, la fraction silteuse est presque identique à la fraction sableuse avec pour seule différence l'écart de taille. La contribution du silt à la stabilité d'une terre est due à sa friction interne. Les films d'eau interparticules confèrent un certain degré de cohésion aux terres silteuses. Du fait de leur perméabilité élevée, les terres silteuses sont très sensibles au gel. Le gonflement et le retrait sont notoires à petite échelle.

#### **I.7.8.5 Argiles :**

La taille des particules d'argile est inférieure à 0,002 mm. Les particules d'argile diffèrent de celles des autres fractions de la terre par leur constitution chimique et leurs propriétés physiques. Chimiquement, ce sont des aluminosilicates hydratés formés au cours du processus de lessivage des particules grossières de minéraux rocheux primaires. Physiquement, les argiles sont très souvent de

forme plate et allongée, lamellaire. Leur surface spécifique est infiniment plus grande que celle des particules grossières de forme sphérique ou anguleuse. Les argiles sont notoirement sujettes au gonflement et au retrait [01].

### **I.7.9 les essais des identifications des terres :**

L'identification correcte est un pas essentiel dans le processus de décision concernant le choix d'une technologie de transformation de la terre en matériau de construction.

Il y a une grande variété d'essais qui peuvent être effectués sur la terre, mais en fait, il n'y a qu'un nombre assez restreint d'essais qui permettent une interprétation directe de l'adéquation de la terre à la construction et qui sont donc utiles.

On distingue des essais de terrain et des essais de laboratoire.

Tous les deux servent à fournir les informations nécessaires à la décision concernant l'utilisation de la terre, mais les essais de terrain peuvent également donner une indication quant à la nécessité de passer par les essais de laboratoire qui sont évidemment plus sophistiqués, plus longs à exécuter et surtout beaucoup plus coûteux [01]. [07]. [21].

#### **I.7.9.1 Essai de l'odeur :**

Cet essai consiste à sentir la terre fraîchement extraite. La terre est organique si elle dégage une odeur qui évoque le moisi et qui s'accroît à l'humidification.

#### **I.7.9.2 Essai du toucher :**

Cet essai consiste à triturer un échantillon de terre, débarrassée de ses plus grosses particules, à l'état sec, puis humide. La terre est sablonneuse si elle est rugueuse, qu'elle crisse désagréablement sous les doigts. (fig : I.15) la terre est limoneuse si elle est fine, agréable au toucher et collante. Il faut se méfier des terres limoneuses dans la mesure où une fois sèche, elles ne résistent pas à l'eau. La terre est argileuse si elle est difficile à rompre, lente à se dissoudre dans l'eau, très collante et fine.

##### **I.7.9.2.A Procédure de l'essai du toucher :**

Les visiteurs prennent un peu de terre dans leurs mains et la sentent. Ensuite ils font un petit tas au creux de la main et font couler un fil et d'eau au-dessus. Ils peuvent ainsi voir si la terre accroche ou pas à la peau.

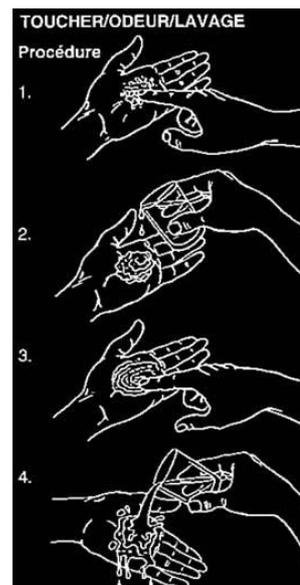


Figure : I. 15 procédure d'essai toucher [21]

### **I.7.9.3 Essai de cohésion ou « test du cigare » :**

- La terre ne doit pas salir les mains.
- Sur une planche, former un cigare de 3 cm de diamètre et de plus de 20 cm de long.
- Pousser lentement le cigare vers le vide.
- Mesurer la longueur du tronçon qui se détache
- Recommencer 3 fois et calculer la moyenne.

Préparer la terre à l'état plastique, et la laisser reposer une heure avant de fabriquer le cigare. Ainsi l'argile a le temps de réagir avec l'eau.

#### **I.7.9.3.A Procédure pour le test du cigare :**

Chaque participant forme un boudin avec la terre gros comme un pouce et d'une longueur de 20 cm. Ils poussent ensuite leur cigare dans le vide jusqu'à qu'il se casse. Ils peuvent ensuite comparer le bout cassé à la pige pour voir à quoi correspond leur terre. Figure : I.16



Figure : I. 16 teste cigare, CRATERre.

### **I.7.9.4 Essai de résistance à sec ou test de la pastille :**

Cet essai consiste à interpréter la nature de la terre en fonction de sa résistance à sec. Il s'agit de mouler deux pastilles de terre à l'état plastique à l'aide d'un moule circulaire. Après séchage :

- Observer les éventuels phénomènes de rétraction.
- Évaluer la résistance de la terre à la rupture et l'écrasement entre le pouce et l'index. Figure : I.17

La terre sera considérée convenable pour produire des briques d'adobe si son retrait est inférieur à 1 mm et qu'elle est difficile à réduire en poudre [07].

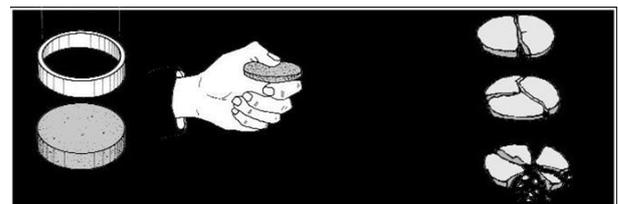


Figure : I. 17 Test de la pastille. CRATERre

### **I.7.9.5 la préparation de la terre :**

Il est parfois nécessaire d'effectuer un travail préparatoire sur la texture et la structure de la terre. Cette opération peut se faire manuellement ou avec des engins mécaniques.

#### **I.7.9.5.A le criblage :**

Cette opération permet d'éliminer les plus gros cailloux. C'est une étape est fastidieuse, c'est pourquoi il n'est pas rare d'employer des cribles mécaniques. Le criblage s'accompagne d'une désagrégation si la terre a tendance à former des mottes.

En général, cette étape se fait dans la zone même de l'extraction ce qui évite des remaniements de la terre supplémentaires.

### **I.7.9.5.B le tamisage :**

Il s'agit du même principe, à savoir, réduire le diamètre des grains. Pour cette étape on s'intéresse aux grains de diamètre d'environ 1,2 cm. En général, cette étape se fait dans la zone même de l'extraction ce qui évite des remaniements de la terre supplémentaires.

Le tamisage peut être manuel ou mécanisé. Sur un tamis manuel, on jette la terre au sommet du tamis, incliné à environ 50°. En jouant sur son inclinaison, il est possible d'augmenter ou de diminuer le refus. Le tamis peut se suspendre de façon à faciliter le travail. Enfin, dans la gamme du tamisage mécanisé, il existe différentes sortes de désagrégateur, plus ou moins mécanisé figure : I.18 Tamisage mécanisé Tamisage manuel, Expérimentation montrer aux gens l'importance d'un bon tamisage, montrer que la position du tamis peut faire varier la granulométrie [21].

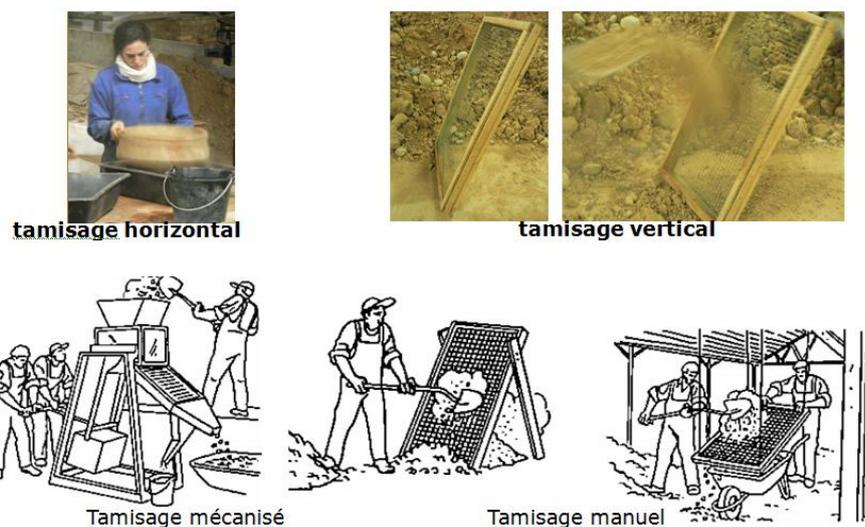


Figure:I. 18 méthode de tamisage,CRAterre, [21].

### **I.7.9.6 humidification de la terre :**

Il est souhaitable d'humidifier le tas de terre tamisée 12 à 24 heures avant son utilisation afin de saturer les argiles en eau et de détruire les petites mottes qui seraient passées à travers le tamis. La résistance des briques en sera meilleure de même que la maîtrise du retrait et donc des fissures.

Les argiles doivent commencer à enrober toute la matière.

### **I.7.9.6.A mélange à sec :**

Il est recommandé de bien mélanger la terre préparée afin de l'homogénéiser. Le mélange doit être effectué sur une surface plane, préalablement détrempée. Une fois que la terre est bien mélangée, on la dresse en un tas dans lequel on creuse un « cratère » qui accueillera l'eau.

### **I.7.9.6.B Mélange humide :**

Cette étape est primordiale et doit par conséquent être parfaitement maîtrisée, le moulage et la résistance des briques en dépendent. Il s'agit d'introduire l'élément cohésif de la terre, à savoir l'eau.

Les propriétés d'une terre dépendent énormément de sa teneur en eau et en air. Le « test de la colonne » met en évidence le passage de l'état sec à l'état liquide en passant par les états humide et plastique.

Pour la technique de l'adobe, la terre doit être plastique. Elle doit par conséquent contenir suffisamment d'eau, un tiers environ [21].

La quantité d'eau de gâchage étant importante, il est préférable d'installer la zone de production près d'un point d'eau. Figure : I.19



Figure:I. 19 humidification de la terre. CRAterre, Younès BABANEDJAR

#### **I.7.10 Texture granulométrie après Tamisage :**

Il consiste à filtrer la terre à travers une série de tamis normalisés superposés par ordre décroissant (le plus fin en dessous) et à déterminer les fractions de grains retenues par chaque tamis. L'analyse par tamisage s'effectue sur la fraction de grains de diamètre supérieur à 0,08 mm. La quantité de terre utile est d'environ 800 g, moins pour les terres fines (100 à 200 g) et plus pour les terres grenues (jusqu'à 2 à 3kg). Le matériel nécessaire rassemble une série de tamis (trous carrés) ou de passoirs (trous ronds) normalisés, 2 bacs contenant les tamis. L'échantillon tamisé est séché jusqu'à son poids constant ; ce poids sec est noté. Le tamisage s'effectue tamis par tamis, sous l'eau. Le rinçage permet de laver les éléments et de dissocier les fines des sables et graves. Les fines de rinçage sont chaque fois récupérées dans un bac et renversées dans un deuxième bac qui contient le tamis suivant et ainsi de suite jusqu'à épuisement des tamis. Chaque refus de tamisage est séché et pesé; le poids sec de chaque refus est noté. [01].

#### **I.7.11 Sédimentométrie:**

L'analyse granulométrique que l'on obtient par tamisage est incomplète. Si elle suffit pour la plupart des applications dans le domaine des travaux routiers, elle est insuffisante pour la construction en terre qui exige une analyse de la texture des fines avec un  $G < 0,08$  mm. Cette analyse se fait par la sédimentométrie qui utilise la différence de vitesse de chute des particules d'une terre en suspension dans l'eau. Les particules les plus grosses se déposent en premier et les plus fines en dernier. On mesure régulièrement, dans le temps et à une hauteur donnée (diminution de la densité

avec l'éclaircissement du liquide), la variation de la densité. La connaissance de la vitesse de chute des particules selon leur taille permet de calculer les proportions par les différentes grosseurs de grain [01].

### **I.7.12 Plasticité :**

Une terre peut avoir différents états de consistance. Elle peut être liquide, plastique ou solide. Le chercheur suédois Atterberg a défini ces différents états hydriques et les frontières qui les séparent par des limites et des indices exprimés en % pondéral de teneur en eau. On peut mesurer cinq limites :

- la limite de liquidité;
- la limite de plasticité;
- la limite de retrait;
- la limite d'absorption ;
- la limite d'adhérence.

Les deux premières limites sont les principales et les trois autres, quoiqu'intéressantes, sont peu utilisées. La détermination des limites d'Atterberg est pratiquée sur la fraction « mortier fin » de la terre qui passe à travers le tamis de 0,4 mm, car ce sont les seuls éléments sur lesquels l'eau agit en modifiant la consistance [01].

#### **I.7.12.1 Limite de liquidité (LI) :**

C'est le passage de l'état plastique à l'état liquide. LI se mesure avec un appareil de Casagrande. 50 à 70g de mortier fin apprêté à l'avance sont étalés dans la coupelle (épaisseur max » 1 cm) et divisés en 2 parties par une rainure axiale normalisée (longueur min » 4 cm). LI est la teneur en eau exprimée en % pondéral du poids du matériau sec étuvé à 105°C pour laquelle le sillon se referme sur 1 cm sous l'influence de 25 coups produits par la chute de la coupelle d'une hauteur de 1 cm sur une surface dure. L'essai est pratiqué pour différentes teneurs en eau et l'on trace la courbe d'évolution (une droite) du nombre de coups (entre 15 et 30) et des teneurs en eau.

#### **I.7.12.2 Limite de plasticité (Lp) :**

C'est le passage de l'état plastique à l'état solide avec retrait. Lp est la teneur en eau exprimée en % pondéral du poids du matériau sec étuvé à 105°C pour laquelle un petit rouleau de mortier fin se brise en tronçons de 1 à 2 cm de long lorsque le diamètre du rouleau atteint 3 mm. Le rouleau doit être long de 5 à 6 cm.

### **I.7.12.3 L'indice de plasticité (LP) :**

Il caractérise la plasticité de la terre.  $I_p = LI - L_p$ . Plus  $I_p$  est important, plus le gonflement par humidification de la terre et son retrait par dessiccation seront importants.  $I_p$  précise donc les risques de déformation du matériau.

### **I.7.13 La stabilisation :**

Stabiliser une terre consiste à l'amender d'un matériau qui améliore sa résistance mécanique, sa cohésion ou qui diminue son gonflement à l'humidification et par conséquent son retrait au séchage. Dans la construction en terre, on stabilise traditionnellement, en fonction des régions, par l'ajout de fibres végétales, animales ou de sable.

On utilise trop souvent aujourd'hui des stabilisants plus conventionnels tels que ciment, chaux, bitume. Dans tous les cas, il est important de procéder à un bon malaxage.

#### **I.7.13.1 Objectifs :**

On ne peut intervenir que sur deux caractéristiques de la terre elle-même : sa texture et sa structure. On dispose de trois possibilités d'intervention sur la texture et la structure :

—Améliorer les liens entre les particules : agir sur la résistance mécanique.

Les principaux objectifs poursuivis sont :

– Obtenir de meilleures caractéristiques mécaniques : augmenter la résistance à la compression sèche et humide, la résistance à la traction et au cisaillement

– Obtenir une meilleure cohésion. Fig : I.20

—Réduire la porosité et les variations de volume : gonflement-retrait à l'eau.

–Améliorer la résistance à l'érosion du vent et de la pluie, réduire l'abrasion de surface et imperméabiliser.

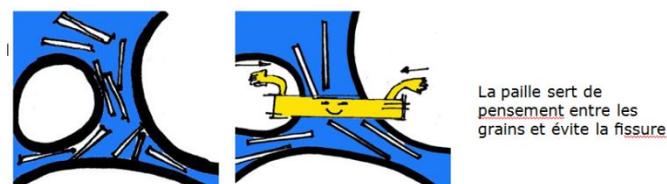


Figure:I. 20 La paille sert de pansement entre les grains et évite la fissure [21]

#### **I.7.13.2 Moyens de stabilisation de la terre :**

– Pour des terres non remaniées, la stabilisation s'opère généralement par injection ou par imprégnation. Mais cette technique est peu employée dans le domaine de la construction en terre, étant davantage appliquée aux travaux publics, aux ouvrages d'art, au traitement des fondations ou même dans le domaine de la préservation des monuments historiques.

–Pour des terres remaniées, les procédés de stabilisation sont très nombreux et la littérature a produit

divers systèmes de classification. Les stabilisants peuvent être classés selon leur nature : végétale ou animale, minérale ou synthétique, etc., ou bien selon leur forme : en-poudre, en fibres, en plaquettes, en pâte, liquide, etc.

On peut simplifier la classification en dénombrant six principaux modes de stabilisation :

- Densifier.
- Armer.
- Enchaîner.
- Liaisonner.
- imperméabiliser.
- Hydrofuger.

Chaque stabilisant n'agit pas obligatoirement selon un procédé exclusif, mais il peut aussi cumuler plusieurs procédés : physique et chimique [01] figure : I.21

MOYENS DE STABILISATION DES TERRES REMANIÉES						
STABILISANT	NATURE	PROCÉDÉ	MOYENS	PRINCIPE	SYMBOLE	
SANS APPORT DE STABILISANT		MÉCANIQUE	DENSIFIER	CRÉER UN MILIEU DENSE QUI BLOQUE LES PORES ET LES CANAUX CAPILLAIRES		
AVEC APPORT DE STABILISANT	STABILISANTS INERTES	MINÉRAUX	PHYSIQUE	ARMER	CRÉER UNE ARMATURE OMNI-DIRECTIONNELLE QUI RÉDUIT LE MOUVEMENT	
		FIBRES				
	STABILISANTS PHYSICO-CHIMIQUE	LIANTS	CHIMIQUE	ENCHAINER	CRÉER UN SQUELETTE INERTE QUI S'OPPOSE À TOUT MOUVEMENT	
				LIAISONNER	FORMER DES LIAISONS CHIMIQUES STABLES ENTRE LES CRISTAUX D'ARGILE	
		HYDROPHOBANTS		IMPERMÉABILISER	ENTOURER LES GRAINS DE TERRE D'UN FILM IMPERMÉABLE ET BOUCHER LES PORES ET CANAUX	
			HYDROFUGER	ÉLIMINER AU MAXIMUM L'ABSORPTION ET ADSORPTION D'EAU		

Figure : I. 21 moyens de stabilisation des terres remaniées [01]

### I.7.13.3 Les Fibres :

La stabilisation par armature à l'aide de fibres, dont très souvent la paille, est très employée de par le monde.

La paille doit en fait être considérée comme un agent de renforcement de la structure, au même

titre que le gravier. Aujourd'hui, même dans les productions les plus modernes et industrielles, pour l'adobe aux U.S.A. par exemple, on incorpore encore très souvent de la paille, combinée avec le bitume. Cette méthode de stabilisation est intéressante, car elle est adaptable à différents modes de mise en œuvre de la terre, à l'état liquide ou plastique et même par compression. Les fibres sont principalement employées pour la confection de blocs moulés par pétrissage, avec des terres plutôt argileuses présentant souvent un important retrait les productions artisanales de briques d'adobe stabilisées à la paille sont très variées, mais on connaît aussi l'emploi de fibres pour construire en torchis, en terre paille, en bauge ainsi qu'en blocs comprimés et en pise [01].

### **I.7.13.4 Rôles des fibres :**

- Empêcher la fissuration au séchage en répartissant les tensions dues au retrait de l'argile dans toute la masse du matériau.
- Accélérer le séchage grâce à un drainage de l'humidité vers l'extérieur par les canaux des fibres. Inversement, la présence de fibres augmente l'absorption en présence d'eau.
- Alléger le matériau. Le volume de paille est souvent très important, allégeant la masse volumique du matériau et améliorant ses propriétés d'isolation.
- Augmenter la résistance à la traction ; sans doute le plus grand intérêt des fibres.

### **I.7.13.5 Mécanismes :**

Les matériaux de terre renforcés de fibres possèdent un degré élevé de résistance à la fissuration et à la propagation des fissures. En effet, au niveau d'un plan de clivage potentiel, les fibres s'opposent au clivage au fur et à mesure de l'augmentation de la contrainte. Le degré de résistance au cisaillement dépend pour beaucoup de la résistance à la traction des fibres. En outre, une bonne résistance à la compression peut être obtenue grâce une armature de fibres, qui dépend à la fois de la quantité de fibres employée et de la résistance à la compression initiale de la terre, de la résistance à la traction initiale des fibres et de la friction interne entre les fibres et la terre. Quelques recherches laissent supposer qu'un pourrissement préalable de la paille dans la terre, durant quelques semaines, produit de l'acide lactique qui agit secondairement sur l'efficacité de la stabilisation[01].

### **I.7.14 mise en forme des adobes :**

Les murs réalisés en brique de terre crue ou adobe appartiennent à la catégorie des murs en maçonnerie, c'est-à-dire qu'ils sont composés de plusieurs éléments unis par un liant les règles d'appareillage des adobes restent les mêmes que celles des briques cuites : ainsi, la dimension des adobes, et par conséquent celle des moules, est déterminée de manière à décaler les joints verticaux et à éviter les « coups de sabre » au moment de l'appareillage des différents éléments.

Dans le cas d'un mur en adobe, les joints de mortier peuvent aller jusqu'à mesurer 2 cm pour

compenser l'irrégularité des briques [21]. D'une manière générale, aucune dimension de bloc n'est fixée. Leur forme ainsi que leur taille varient en fonction des cultures. Les briques carrées sont également souvent utilisées dans la construction en adobe, notamment en Amérique latine ou en Asie Centrale.

### **I.7.14.1 Aire de fabrication des adobes**

Avant de fabriquer les adobes, il faut préparer la surface sur laquelle elles vont être produites. L'aire de production (puis de séchage) des adobes doit présenter une surface plane et uniforme afin d'assurer une épaisseur constante aux briques.

D'autre part, une fine couche de sable sec, de cendres, ou encore de sciure de bois peut venir aider à ce que la brique n'accroche pas au sol et permettre de faciliter son retournement. Sinon, il peut être difficile de la décoller, et il peut également arriver que la surface de l'adobe soit trop abîmée du fait qu'elle a fusionné avec le sol. Dans ce cas, au moment du retournement, soit il peut manquer une partie de l'adobe restée collée au sol [21], soit au contraire, une pellicule supplémentaire de terre, par exemple, peut venir s'ajouter à la brique d'adobe, qu'il faudra alors gratter et nettoyer pour qu'elle retrouve sa taille initialement prévue et sa planéité.

### **I.7.14.2 Les moules :**

Les moules utilisés pour la fabrication d'adobes sont généralement de forme rectangulaire ou carrée, réalisés en bois imputrescible. Ils peuvent parfois être en métal, ce qui présente l'avantage de les rendre plus facilement lavables et facilite par conséquent le démoulage des briques. Ils sont agrémentés de poignées qui permettent, en soulevant le moule, de faciliter le démoulage de la brique [07].

Afin d'accélérer la production, des moules multiples peuvent être utilisés : un même moule permet alors de former plusieurs adobes à la fois ; une plaque de contre-plaqué vient seulement diviser le cadre initial.

### **I.7.14.3 Production manuelle :**

Pour chaque adobe, le moule est préalablement trempé soit dans l'eau, soit dans l'huile, de manière à ce que sa surface n'accroche pas la terre et que le démoulage soit facilité.

On remplit le moule en tassant la terre avec les mains, afin de libérer l'air contenu dans le mélange et de densifier la brique. Il convient d'insister davantage sur les angles, partie la plus fragile de la brique. Une fois le moule rempli de terre, sa surface haute est nivelée en la raclant à l'aide d'une règle d'égalisation.

#### **I.7.14.4 Le démoulage**

A ce stade, le moule peut être retiré, mais le plus verticalement possible pour éviter toute déformation de la brique encore molle. Si, une fois démoulée, la brique commence à s'affaisser, c'est que le mélange de terre contient trop d'eau (la base de l'adobe ne doit pas augmenter de plus de 5 %). Expérience : façonnage d'une brique à différentes teneurs en eau.

#### **I.7.14.5 Autres modes de production :**

La production de briques d'adobe peut se faire à différentes échelles. Toujours manuellement, 8 000 à 10 000 adobes peuvent être produits chaque jour par des équipes de 5 à 6 ouvriers, s'ils choisissent d'utiliser des moules multiples de grande échelle ou bien de découper de petits adobes dans une « dalle d'adobe » de très grande taille.

Il existe aussi des modes de production d'adobes mécanisés, qui grâce à l'emploi de machines, augmentent considérablement les taux de production :

- Les pondeuses à moule
- Les pondeuses à disques

Dans ces cas, la terre est plus liquide que lorsqu'on moule un adobe à la main, puisque le moulage se fait par coulage [07].[21]

- Les extrudeuses

#### **I.7.14.6 Le séchage :**

La brique d'adobe tout juste démoulée doit sécher durant un minimum de 2 ou 3 jours avant de pouvoir être manipulée ; ce temps peut être allongé jusqu'à plusieurs semaines en hiver. Ensuite elle est retournée pour sécher sur l'autre face.

Pour savoir si une brique d'adobe est prête à être retournée, il faut s'assurer qu'elle ne s'écrase pas entre les doigts lorsqu'on essaie de la prendre et qu'elle ne s'affaisse pas lors du retournement, mais la couleur même de l'adobe peut déjà nous donner des indications sur sa teneur en eau.

Une fois que cette première face sèche, l'adobe est placé sur sa tranche (son « chant ») afin de sécher sur son autre face.

Le séchage d'une brique d'adobe dépend de la teneur en eau du mélange de terre et de l'épaisseur de la brique (plus la brique est petite ou fine, plus vite elle séchera et plus vite elle sera en état de fonctionner), mais il est avant tout conditionné par les paramètres climatiques locaux : à la fois l'humidité, la température et le vent [21].

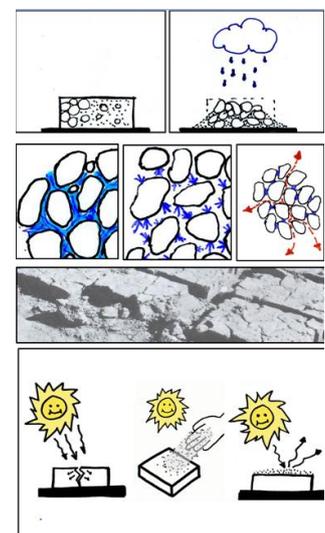


Figure : I. 22 séchage d'adobe[21].

### **I.7.14.7 Le stockage**

Pour un séchage complet des adobes avant utilisation, il faut prévoir trois semaines à un mois de cure. Le stockage des briques d'adobes, et donc leur empilement, doit être pensé de manière à ce que chaque brique puisse tout de même continuer à sécher. Ainsi, dans les régions sèches où lorsque le stockage se fait en intérieur, il suffit de les empiler en respectant des espacements suffisants entre les adobes. (fig : I.23) Sinon, elles sont organisées en forme de pyramide aérée, puis recouvertes (de feuilles, tôle ondulée ou plastique). Dans ce cas, les briques d'adobes sont disposées sur une couche de protection [21]

(tel un lit de sable) et un système de drainage est prévu tout autour (une rigole périphérique) pour éloigner l'eau de l'aire de stockage.



Figure:I. 23 stockage de l'adobe,  
Younès BABANEDJAR

### **I.7.14.8 Montage des murs et Préparation du mortier**

Le mortier qui sera utilisé pour les joints entre les briques (horizontaux et verticaux) est de la même composition ou légèrement plus résistant que les adobes, mais il ne comporte plus de gravier ni de paille. Il représente une grande proportion du volume du mur : de 1/4 à 1/7.

Si le mortier ne s'accroche pas bien aux briques d'adobes, il sera nécessaire d'humidifier les blocs ou d'ajouter un peu de stabilisant, en général pour les mortiers d'adobes, on a peu de problèmes.

Poser des portes avant de poser les briques d'adobes. Il faut d'abord bien repérer et marquer l'emplacement des portes sur le sommet du mur de fondation, et parfois en pose les huisseries des portes avant de monter le mur [21].

### **I.7.15 arc, voûte et coupole :**

La terre est un matériau qui travaille en compression, mais qui ne résiste pas à la traction. Ainsi, parmi les différentes techniques de construction en terre, du fait qu'il s'agit d'un système constructif en maçonnerie et donc en appareillage, seule la brique présente l'avantage d'offrir des solutions de franchissement entièrement en terre. Chaque élément associé aux autres permet alors de solliciter le matériau terre uniquement en compression. Ces franchissements peuvent être réalisés en arcs, voûtes ou coupoles : l'arc, sous diverses formes, est par exemple utilisé pour créer des ouvertures et franchir des vides aménagés dans les murs. Tandis que les différents types de voûtes et coupoles (mises en œuvre avec ou sans coffrage) permettent pour leur part de couvrir des espaces[21].

### **I.8 Les avantages et inconvénients de l'architecture en terre :**

La terre crue présente de gros avantages aussi bien sur le plan environnemental qu'économiques. On peut situer principalement les qualités de la terre crue avant et après la phase de construction :

- En amont, grâce à la diminution considérable des dégâts causés à la nature par la simple et pure action de séchage des briques de terre au soleil.
- En aval grâce au confort thermique que le matériau terre nous offre et aux économies d'énergie pour le chauffage et la climatisation générés par les propriétés thermiques de la terre [08].

#### **I.8.1 Les avantages du matériau terre :**

Le matériau terre, partout et largement disponible, présente beaucoup d'avantages parmi eux on peut citer :

- La terre est prélevée et exploitée sur site. Contrairement à d'autres matériaux, elle ne consomme aucune énergie non renouvelable et polluante.
- De grandes quantités de terre extraites au cours de grands travaux d'utilité publique, comme les routes, les travaux des fondations des constructions peuvent être recyclés et utilisés comme matériau de construction ;
- Le matériau terre n'utilise que très peu d'eau de gâchage, ressource essentielle pour la vie des populations ;
- Les coûts, des blocs comprimés en terre crue, en comparaison avec ceux de la maçonnerie en parpaing de ciment, de pierre ou même de brique de terre cuite, sont de 20 à 30 % inférieurs ;
- Pendant sa fabrication, ce matériau ne produit aucun rejet de déchets, son utilisation répond aussi de l'absence d'effets nocifs dans le cadre de la vie quotidienne, il a en plus l'avantage d'être presque entièrement recyclable après son utilisation initiale ;
- Le mode ainsi que les outils nécessaires à la production du matériau terre sont simples et accessibles à tous ;
- Il possède en outre des propriétés, telles qu'une grande capacité d'absorption d'eau, une masse volumique élevée, une bonne capacité à laisser transiter la vapeur, une bonne inertie thermique, des qualités phoniques et une longévité avérée [08]. [01]

#### **I.8.2 Les inconvénients du matériau terre :**

Malgré tous les avantages que peut présenter le matériau terre cependant, il présente aussi des inconvénients majeurs :

- Il s'érode facilement, ce qui rend son emploi délicat dans les régions à forte pluviométrie ;
- Utilisée en couverture elle peut prendre l'eau, s'alourdir et provoquer des affaissements ;

- n'adhérant pas au bois, cela fait apparaître des décollements autour des ouvertures ;
- Il ne résiste pas à la flexion et à la traction ;
- Les liaisons entre les particules du matériau terre sont d'ordre physique, en contact avec l'eau elles se fragilisent et même se neutralisent ce qui détériore le matériau et diminue sensiblement ces caractéristiques mécaniques et sa durabilité dans le temps.

Ces inconvénients sont principalement liés à la solubilité à l'eau de la terre crue, qui cause des désordres dans les constructions qu'on désigne par pathologies de vieillissement qui varient selon les climats et dont la maîtrise peut être assurée grâce à des mesures préventives [01]. [08].

### **I.9 Quelques pathologies des constructions en terre :**

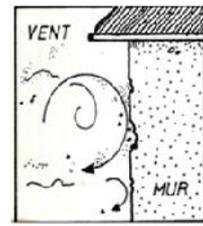
Il est nécessaire de se prémunir contre certaines pathologies. Les constructions en terre sont en effet très sensibles à l'eau. Ses dégradations peuvent être localisées :

- À la base du mur à cause des remontées capillaires ;
- Au haut du mur à cause du rejaillissement ou du ruissellement des eaux pluviales ;
- À des endroits précis tels que les ouvertures, acrotères de nature du terrain-terrasse saillie, gorge ou saignée, etc. [01].

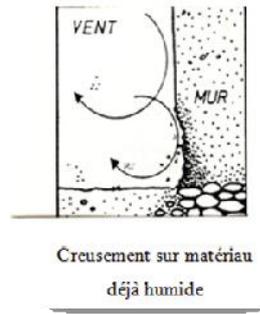
#### **I.9.1 Les principales causes de désordre :**

Les désordres sont principalement causés par la sollicitation du matériau ou du système à l'encontre des propriétés mécaniques. Le matériau terre ne doit pas être soumis aux efforts de traction ou de flexion, car il ne résiste qu'à la compression. Nous pouvons dénombrer plusieurs causes de désordre ;

- La forte pathologie humide
- Les mauvais terrains sur lesquels sont bâties les constructions : sol instable, de résistance trop faible, sol gonflant, etc.
- La mauvaise conception du bâtiment : des fondations sous-dimensionnées ou excentrées, mur non chaîné, trop élancé, trop percé d'ouvertures, des tableaux de baie trop lourds, des charges de toitures non reprises par le chaînage, etc.
- La mauvaise mise en œuvre : le choix d'une mauvaise terre, des systèmes constructifs mal exécutés (mauvais appareillage des blocs, mauvais ancrage des poutres de planchers, des évacuations des eaux pluviales mal soignées, etc.
- L'action du vent : Nous signalons que le vent altère aussi très fortement les constructions en terre. Il cause des dégradations au sommet et à la base du mur (Figure 24 et 25), plus ou aggravées par l'impact d'objets transportés, ainsi que par l'impact du sable (caractéristique du Sud algérien) [01]. [19].



Erosion accentuée par la présence d'une corniche saillante



Creusement sur matériau déjà humide

Figure:I. 24 haut du mur [01]

Figure:I. 25 bas du mur [01]

- Les autres causes annexes : les influences climatiques et actions des êtres vivants telles que les insectes et les rongeurs.

CRATerre a défini deux types de pathologies, les pathologies humides et structurelles.

### **I.9.2 Les pathologies humides :**

Les pathologies liées à l'eau sont relativement bien connues, elles sont dues à la :

- Présence de l'eau à la surface du bâtiment.
- Présence d'ouvertures dans cette surface (fenêtres ou fissures) qui permettraient à l'eau de s'infiltrer.
- Présence d'une force qui ferait pénétrer l'eau à l'intérieur (pression, gravité, capillarité).

On révèle les effets de ruissellement, rejaillissement, stagnation, absorption, impact et infiltration, qu'on désigne généralement par le système de la goutte d'eau ce sont les principales actions.

Les pathologies humides entraînent également des pathologies structurelles par l'effet des remontées capillaires et des rejaillissements de l'eau sur les murs, ce qui accentue le risque de creusement et affaiblit la structure porteuse [01]. [08].

### **I.9.3 Les pathologies structurelles :**

CRATerre identifie cinq types de pathologies. Elles sont typiquement identifiées par l'apparition de fissures ou de décomposition du matériau et peuvent aller à partir de l'apparition de simples fissurations.

Les fissures sont les manifestations principales des désordres causés par les contraintes localisées (poinçonnement, flambement, effondrement) ou encore la décomposition du matériau sous l'action de l'eau et de l'humidité.

- **Les fissures :** Elles sont souvent le résultat des erreurs constructives ou des modifications ultérieures. La forte compression, due aux surcharges propres ou à l'exploitation, peut mettre le matériau en situation de dépassement de contrainte mécanique. Cette forte sollicitation qui est soit localisée (ouvertures, planchers) ou exercée sur la masse (mauvaise fondation et tassement

différentiel) crée des fissures qui peuvent favoriser l'infiltration de l'eau voir déstabiliser le bâtiment.

- **Les fissures de retrait :** elles sont dues au mauvais contrôle de qualité de la terre employée et de la teneur en eau lors de la mise en œuvre.
- **Les flambements :** un mur élancé non chiné ou une charge importante peuvent induire des déformations structurelles, les flambements ou ventres extérieurs provoquent alors des fissurations.
- **Les effondrements :** ils peuvent être partiels ou totaux et sont induits par l'application de contraintes occasionnelles ou accidentelles ou bien le résultat d'une pathologie humide.
- **La décomposition du matériau :** la structure minéralogique et physico-chimique du matériau peut évoluer et se désagréger sous l'action de l'eau, du gel et dégel cycliques et de la forte chaleur. Cette pathologie est accélérée par la fixation des sels et des parasites organiques [01]. [08].

### **I.10 Les principes de bonne conception d'une architecture de terre :**

L'art de construire en terre obéit à des règles copieusement strictes qui sollicitent un savoir-faire propre. Mal conçues, les constructions peuvent être l'objet de graves désordres, les principes constructifs indiqués plus bas exploitent les performances et les caractéristiques du matériau terre pour réduire ou même éliminer les risques de pathologie, elles garantissent la durabilité des œuvres en terre [08].

#### **I.10.1 Protection des terrasses et toiture :**

- Toiture débordante
- Bande d'enduit haute, protection par le décor et la modénature
- Gargouille débordante, protection du mur à la sortie de la gargouille.

#### **I.10.2 Protection des parois :**

- Calepinage des banchées du pisé ou des blocs d'adobe ou blocs comprimés
- Angles chanfreinés.

#### **I.10.3 Protection des ouvertures :**

- Tableaux enduits
- Solin haut débordant avec goutte d'eau

#### **I.10.4 Protection de la base du bâtiment :**

- Soubassement enduit.
- Soubassement en pierres.
- Renfort des angles en leur base.
- Forme de pente, évacuation de l'eau loin du mur [01].

### **I.11 Conclusion :**

En raison de redécouvrir ces matériaux de construction traditionnels, les spécialistes en domaine de génie civil sont actuellement en grande partie intéressés à la construction de terre, dont beaucoup de disciples travaillent à cette matière. L'intérêt pour ce genre de structures est motivé non seulement par leur grande diffusion partout dans le monde, mais également par leurs propriétés mécaniques et thermo-physique.

Quoique beaucoup de travaux scientifiques sur différents types des matériaux et de structures de terre soient disponibles dans la littérature, les études détaillées sont nécessaires pour évaluer les propriétés matérielles et le comportement structural, puisque les structures de terre sont fortement emplacement du site-spécifique, selon les techniques utilisées pour la production de matériaux et la construction sur place du bâtiment

Par ailleurs, dans plusieurs pays, la conservation des structures historiques tel que les ksour en Algérie est une conscience de montée, où certaines de ces structures sont faites à partir de l'adobe.

Les raisons principales de la popularité de l'adobe peuvent être récapitulées comme suit [1] : (a) le matériel local est disponible partout ; (b) un à niveau élevé de la compétence et de la technologie n'est pas exigé pour la production des briques et des constructions d'adobe ; (c) la réparation et l'entretien des structures d'adobe n'exigent pas le travail spécialisé ; et (d) les propriétés inhérentes de la terre lui font une chaleur efficace et un matériel insonorisant. En dépit de ces nombreux mérites, les maisons d'adobe sont à dommages enclins sous des excitations séismiques et elles sont susceptibles de l'eau.

## **II DEUXIÈME CHAPITRE**

---

### **ARCHITECTURE ET CONFORT THERMIQUE**

### **II.1 Introduction :**

Le confort thermique est défini comme étant un état de satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique. Il est déterminé par l'équilibre dynamique établi par échange thermique entre le corps et son environnement, cela a poussé l'homme à se protéger des rigueurs du climat en créant à l'intérieur de son habitat les conditions d'un relatif confort [22].

Dans le deuxième chapitre de cette thèse, nous allons mettre en évidence d'une part, l'importance du confort thermique dans les milieux résidentiels et d'autre part, les méthodologies disponibles dans la littérature scientifique et la description des environnements thermiques.

Dans cette optique, nous allons de prime abord définir ce terme. Après nous, tenons à traiter les différents paramètres influant sur le confort thermique des habitants. En troisième lieu, nous verrons les différents aspects de ce type de confort thermique, ses paramètres et les outils de son évaluation. Par la suite, on parlera des facteurs pouvant améliorer ce dernier.

En premier lieu la démarche bioclimatique : ses principes, ses systèmes de conception et les stratégies bioclimatiques qui rentrent en jeu dans l'amélioration du confort.

### **II.2 La notion de confort thermique :**

Le confort thermique dans les environnements bâtis en général et plus précisément dans les environnements internes des logements est devenu une question quotidienne pour les architectes et les techniciens, ce qui a engendré de larges études dans la littérature scientifique [23]. Conformément aux normes internationales ASHRAE55 [24] ; ISO7730 [55], les chercheurs ont généralement défini ce concept comme la condition de l'esprit qui exprime la satisfaction de l'environnement thermique Fanger [32] ; Hensen [35] ; Castilla et al. [34].

Hensen [35] signale que le confort thermique est un état dans lequel il n'y a pas d'impulsions qui conduisent à corriger l'environnement de l'occupant par son comportement Hensen [35]. Fabbri, de son côté [31] trouve de son côté que le confort thermique peut être défini comme le résultat d'un processus dû à des échanges au niveau de la masse d'énergie entre l'occupant et son environnement Fabbri [31]. Il ajoute également que l'Organisation mondiale de la santé WHO/OMS [51] a relié la définition du confort avec le concept de la santé, cette dernière est définie comme un état global du bien-être physique, mental et social de l'occupant, et non seulement dans l'absence des maladies ou de l'infirmité WHO[51]. Dans le même ordre d'idées, Nematchoua et al.[46] affirme que le confort thermique est défini comme la situation dans laquelle une personne ne sent ni froid ni chaud, dans une atmosphère donnée Nematchoua et al. [46]. [23].

### **II.3 Les paramètres affectant le confort thermique :**

Depuis longtemps, Macpherson [43] et Tham [49] ont déclaré que le confort thermique d'une personne dans une certaine ambiance donnée dépend des six paramètres suivants :

- La température de l'air (T).
- L'humidité de l'air (R).
- La vitesse relative de l'air (v).
- La température radiante moyenne (la température moyenne des parois) (T).
- Le métabolisme (M).
- La résistance thermique des vêtements (I CL). (Macpherson [43] ; Tham [49])

À ce sujet, Jannot et Djiako [42] montrent que parmi ces paramètres qui sont des indicateurs d'évaluation de la qualité thermique d'une ambiance donnée, comme la température, l'humidité de l'air, la vitesse relative de l'air et la température radiante moyenne des parois, sont généralement utilisés afin de déterminer la sensation thermique d'une personne avec des caractéristiques de métabolisme données selon son activité physique et une certaine résistance thermique de ses vêtements Jannot et Djiako [42], Azizpour et al. [26], quant à eux, affirment qu'il existe des paramètres environnementaux et d'autres paramètres personnels influant sur le confort thermique Azizpour et al.[26], [23].

#### **II.3.1 Paramètres environnementaux liés à l'ambiance extérieure :**

La qualité de l'environnement interne comme le soutiennent Volkov et al. [50] a une forte relation avec les conditions thermiques de l'espace Volkov et al.[50]. Parmi ces conditions thermiques qui sont en relation à l'environnement thermique des logements, et qu'on peut décrire comme les paramètres environnementaux du confort thermique, car elles influent fortement sur l'équilibre thermique du corps de l'habitant. D'autre part, ces conceptions thermiques sont dues également à d'autres paramètres personnels. Néanmoins, la sensation thermique acceptable est fortement affectée par les facteurs environnementaux, comme soulignent Sadafi et al. [48], [23]

##### **II.3.1.1 La température des parois (Tp) :**

La température des parois  $T_p$  influence les échanges thermiques par rayonnement. La répartition des températures sur une paroi est un phénomène complexe, mais on admet que  $T_p$  est égale à la moyenne des températures des parois environnantes pondérées par leur surface.

De façon simplifiée, on définit une température de confort ressentie, dite encore température opérative ou température résultante sèche :  $T_{rs} = (T_a + T_p)/2$ .  $T_a$  représentant la température ambiante ou température sèche, mesurée par un thermomètre ordinaire.

## II Deuxième Chapitre

Pour une paroi non isolée, la température de surface est basse : 12 °C. Pour une température de l'air ambiant de 20 °C, la température résultante sera donc de 16 °C, soit une température inconfortable : c'est l'effet dit « de paroi froide ». Le corps perd de la chaleur en direction des sources froides. Figure : II.1

Pour une paroi isolée (paroi de droite), la température de surface est égale à 16 °C et la température résultante augmente jusqu'à 18 °C. La température des parois étant toujours inférieures à celle du corps, ce dernier continue à perdre de la chaleur, mais en moindre quantité, lui permettant d'atteindre un état de confort [23].

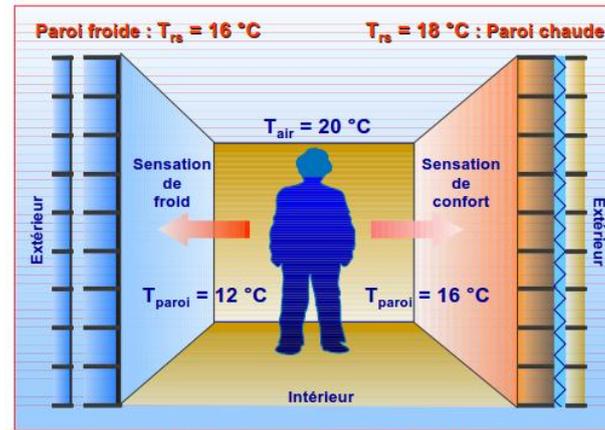


Figure : II. 1 la température de confort dépend de la température de l'air et de la température des parois. [22]

### II.3.1.2 La température de l'air ambiant (T<sub>a</sub>) :

La température ambiante de l'air est le paramètre le plus influant sur la sensation thermique de l'habitant bien qu'il existe pas mal de paramètres qui ont également des impacts considérables sur la sensation thermique. Néanmoins, ils sont restés toujours tournent autour de la température ambiante de l'air. À ce sujet, Gagge et al.[33], Hensen[34] soulignent que la température est le paramètre environnemental le plus important en ce qui concerne le confort thermique Gagge et al.[33] ; Hensen [34] ; Auliciems et Szokolay [25].

En effet, si le degré de la température ambiante de l'air dans le logement est plus élevé que le degré de la température de la peau de l'habitant, la température émise par le corps de celui-ci rencontre des difficultés dans sa transpiration vers l'extérieur. Cependant, dans le cas d'une décroissance remarquable de la température ambiante de l'air du logement en dessous des degrés agréables :  $22^{\circ}\text{C} \leq T_a \leq 28^{\circ}\text{C}$ , Capderou [29] ; Berghout et al.[27], ou  $30^{\circ}\text{C} < T_a < 18^{\circ}\text{C}$  Khoukhi et Fezzioui [46]. [23].

### **II.3.1.3 La vitesse de l'air :**

L'effet thermique de la vitesse de l'air est fortement lié à la température de l'air, comme le soutiennent Izard et Millet [41]. Il est à signaler aussi que l'effet thermique de la vitesse de l'air influe sur le confort de l'occupant, car il est considéré comme un indicateur important afin d'effectuer les échanges thermiques entre le corps de l'habitant et son environnement.

Dans le même ordre d'idée, il est à noter que le mouvement thermique de l'air et sa vitesse ont un impact sur le refroidissement du corps de l'occupant, où le corps perd de la chaleur par convection sous l'effet de l'air, sachant que le mouvement et la vitesse de l'air ne font pas diminuer la température, mais ils provoquent seulement un refroidissement du corps. En outre, Auliciens et Szokolay [25] signalent que le mouvement de l'air est mesuré par sa vitesse et affecte également l'évaporation de l'humidité de la peau par l'effet de refroidissement par évaporation. Auliciens et Szokolay [25].

Finalement, on peut dire que la vitesse de l'air est nécessaire dans les milieux d'habitation, sachant qu'elle ne doit pas dépasser le 0.2m/s, comme le certifient De Herde et Liébard[22]. De même, il faut noter qu'elle doit être inférieure à 0,15 m/s pendant la période hivernale Holm et Engelbrecht [37],[23].

### **II.3.1.4 L'humidité relative de l'air :**

L'humidité est une mesure de la quantité de la vapeur d'eau contenue dans l'air, comme le confirme McIntyre [45]. D'autre part, ce chercheur montre également que l'humidité relative de l'air est le rapport entre la pression de la masse de la vapeur d'eau contenue dans l'air d'une température donnée et la pression maximale de la vapeur d'eau (c'est-à-dire pour l'air saturé) pour la même température de l'air. Par ailleurs, l'humidité de l'air influe également sur la vitesse d'évaporation. Ce processus peut s'expliquer par l'humidité relative ( $H_r$  en %), humidité absolue, ou par la pression de la vapeur ( $p$ , en kPa), comme l'indiquent Auliciens et Szokolay [25].

Bien qu'il est difficile d'octroyer des limites ou des chiffres exacts au pourcentage optimal de l'humidité relative de l'air, car il varie selon la sensation d'une personne à l'autre. On peut assurer le confort thermique de l'occupant lorsque le pourcentage de l'humidité relative de l'air varie objectivement entre 35% et 65%, comme l'attestent McIntyre [45] et Holm et Engelbrecht[37].

### **II.3.2 Paramètres personnels :**

Parallèlement aux paramètres environnementaux, les caractéristiques personnelles de l'habitant telles que l'âge, le poids, la taille, le genre, l'activité et les vêtements sont également considérées comme déterminants pour le niveau du confort thermique de ces habitants. Par ailleurs, l'activité et l'habillement sont considérés comme les deux paramètres personnels les plus importants, comme argumentés par nombre d'auteurs Höppe , Havenith et al.[38].

### II.3.2.1 Métabolisme :

L'activité métabolique du corps humain dépend de l'état de la santé, de l'âge, du sexe et du type de diète (la quantité et la qualité de la nourriture). De son côté, Fabbri [31] a divisé le métabolisme en trois catégories qui sont :

- Métabolisme énergétique de base, où les besoins des calories nécessaires au maintien des fonctions vitales dans des conditions de repos ou de neutralité thermique (température 29-31 °C quand il est nu, 25-29 °C s'il est habillé).
- Métabolisme lié à la position du corps (couché, assis, debout).
- Métabolisme lié au type de travail / activités réalisées (repos, activité physique légère, moyenne, lourde, etc.). Fabbri [31]

En fait, la chaleur produite dans le corps par les processus métaboliques doit être dégagée à l'extérieur si l'équilibre thermique a été maintenu. Par ailleurs, le taux métabolique varie en fonction de l'activité exercée par l'habitant. De son côté, Butera [28] avance qu'il est souvent mesuré en met ( $1 \text{ met} = 50 \text{ kcal h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ). Butera [28].

### II.3.2.2 Résistance thermique du vêtement :

L'habillement est considéré comme l'un des facteurs dominants qui affectent la dissipation de la chaleur, comme souligné par Auliciems et Szokolay [25]. De même, le choix des vêtements par les habitants dans les situations chaudes est couramment limité aux vêtements légers qui ne dépassant pas une valeur d'isolation de 0,5 clo, figure II\_2. Dans la plupart des cas, le type de vêtement sélectionné par les occupants laisse généralement le mouvement de l'air qui tourne autour du corps Mallick [44], comme le cas de mettre les vêtements traditionnels de Biskra, le Qamis pour les hommes et la Djellaba et la Guandora (Robe) pour les femmes.

De ce fait, l'unité de mesure de la résistance thermique (clo) peut être définie comme une unité qui exprime les valeurs d'isolation thermique relatives à divers ensembles [23].

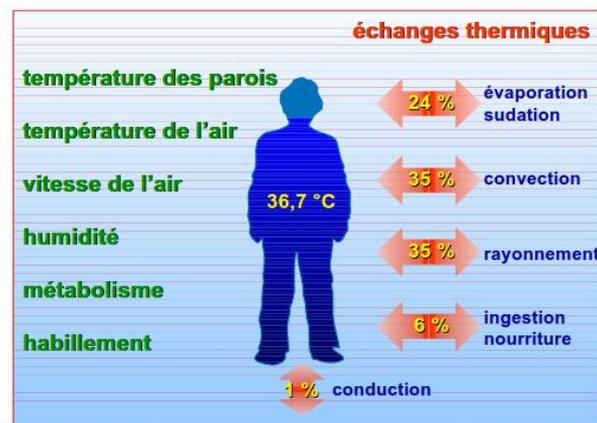


Figure : II. 2 les pertes thermiques du corps humain dépendant de 6 paramètres physiques. [22]

### II.4 Transfert thermique dans le bâtiment :

Un bâtiment échange perpétuellement des flux avec les ambiances intérieures, sachant qu'une paroi de bâtiment peut donner lieu à trois transferts thermiques différents : la conduction au sein de la paroi, la convection entre les faces de la paroi et l'air intérieur, et le transfert thermique par rayonnement avec les autres parois [58].

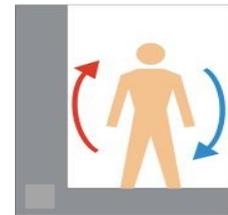
#### II.4.1 Les échanges de chaleur par conduction :

La conduction concerne l'échange de chaleur par contact direct entre certaines parties du corps et une surface de température différente (le sol, les parois ou le mobilier). Par exemple, un matériau effusif plus froid que la peau par contact « pompe » de la chaleur au corps humain en donnant une sensation de froid.



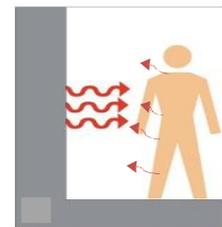
#### II.4.2 Les échanges de chaleur par convection :

La convection est le transfert de chaleur entre la peau et l'air qui l'entoure. Elle dépend de la différence entre la température de l'air et celle de la surface exposée, peau ou vêtement. Si la température de la peau est supérieure à la température de l'air, la peau va se refroidir. Dans le cas contraire, elle va se réchauffer.



#### II.4.3 Les échanges de chaleur par rayonnement :

L'échange par rayonnement est le mode d'échange de chaleur à distance entre deux corps par ondes électromagnétiques. Il s'agit principalement d'échanges, entre la surface du corps et les surfaces de la pièce ainsi, des inconforts froids peuvent être perçus par rayonnement à proximité des parois froides (exemple : mur mal isolé, fenêtre simple vitrage).

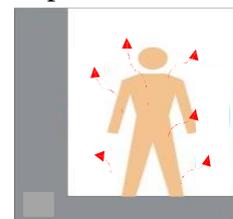


#### II.4.4 Les échanges de chaleur par évaporation

Nous distinguons deux types d'évaporation cutanée, à savoir perspiration et transpiration.

< La *perspiration* est un phénomène d'évaporation diffusive continue liée à la présence permanente d'eau sur la peau. La quantité d'eau évaporée par perspiration est fonction des conditions hygrométriques de l'air ambiant, mais avoisine 11 g/h par m<sup>2</sup> de peau

< La *transpiration* (sudation) est un processus de régulation qui se déclenche dès lors que le corps n'est plus en équilibre thermique.



La figure II.3 illustre la relation qu'il y a entre les paramètres de confort et les modes d'échange de chaleur [58].



Figure : II. 3 Relations entre les paramètres de confort et les modes d'échange de Chaleur [58]

## II.5 Évaluation du confort thermique :

L'évaluation du confort thermique dans les espaces est un paramètre capital dans toute conception architecturale. Les premières recherches se sont basées sur les enquêtes de terrain à l'aide des questionnaires en classifiant la sensation thermique (très chaud, neutre et très froid) ainsi que sur les essais de laboratoire sous des conditions climatiques artificielles. [56].

Cette évaluation a conduit plusieurs chercheurs à développer et à élaborer des indices de prédiction des niveaux de confort à l'intérieur des bâtiments.

En plus des indices thermiques, des tentatives ont été effectuées pour combiner les facteurs environnementaux sous forme d'outils graphiques qui permettent de prédire des zones de confort, connues sous le nom de diagrammes bioclimatiques, ils sont l'aboutissement direct de la connaissance du climat, ces outils sont également développés pour permettre d'obtenir des bâtiments confortables, adaptés aux variables climatiques [58].

### II.5.1 Les outils graphiques d'évaluation du confort thermique :

Diverses recherches ont été menées pour connaître les limites du confort thermique sous forme d'indices et diagrammes bioclimatiques. Débutant en 1923 par l'établissement de la température effective et index.

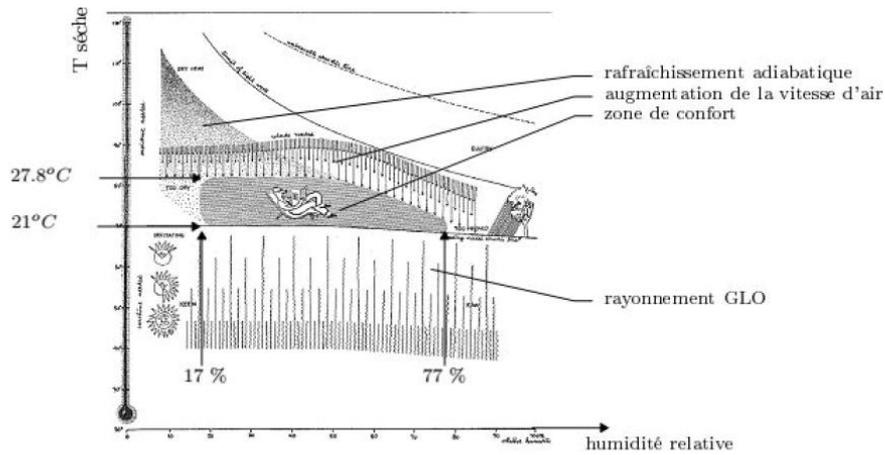


Figure:II. 4 Diagramme bioclimatique d'Olgay (source : Olgay, 1953)

Par F. Houghton et C. Yalu. Cet indice indique la sensation thermique après une exposition aux paramètres climatiques. En 1953, le premier « diagramme bioclimatique » a été proposé par V. Olgay, avec la vitesse de l'air nécessaire pour établir le confort en relation avec l'humidité et le refroidissement par évaporation figure II.4. Par la suite, ASHRAE a présenté une zone de confort d'été et d'hiver sous forme de température effective. L'outil est resté en application jusqu'à 1961 où d'autres recherches en 1970 ont abouti à la détermination de la température neutre par M. Humphrey, dont la formule est :

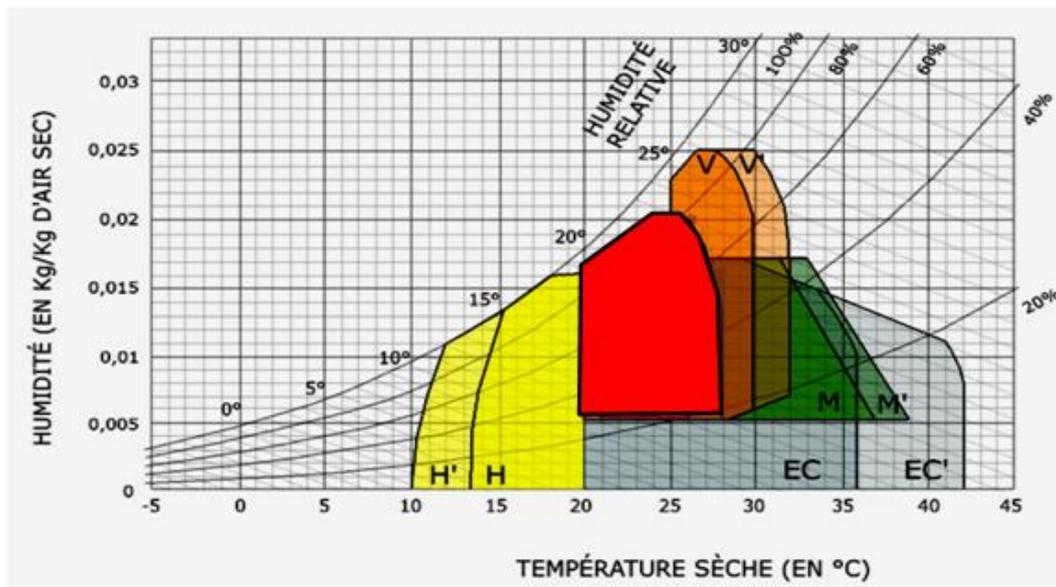
$$T_n = 11,9 + 0,534 T_0$$

$T_n$  : température neutre en °C et  $T_0$  : température extérieure moyenne du mois en question en °C.

À l'encontre de la méthode d'Olgay qui est plutôt préconisée pour assurer le confort extérieur en climat chaud et humide, B. Givoni a établi un diagramme psychrométrique où il exprime les techniques et les dispositifs architecturaux à utiliser pour établir le confort intérieur [65].

### II.5.1.1 Définition du diagramme bioclimatique :

Le diagramme bioclimatique est un outil d'aide à la décision globale du projet permettant d'établir le degré de nécessité de mise en œuvre de grandes options telles que l'inertie thermique, la ventilation généralisée, le refroidissement évaporatif, puis le chauffage ou la climatisation, il est construit sur un diagramme psychrométrique (appelé aussi diagramme de l'air humide figure II.5. [68]



-  -zone du confort thermique
-  - zone d'influence de la ventilation à 0,5m/s (VV')
-  -zone de l'inertie thermique (MM')
-  -zone d'influence du refroidissement évaporatif (EC et EC')
-  -zone de non-chauffage par la conception solaire passive (H et H')

Figure : II. 5 Diagramme bioclimatique [68]

Sur ce diagramme sont représentées :

- La zone de confort hygrothermique tracée pour une activité sédentaire, une vitesse d'air minimale (en général 0,1 m/s) et les tenues vestimentaires moyennes d'hiver et d'été ;

L'extension de la zone de confort hygrothermique due à la ventilation par augmentation de la vitesse d'air de 0,1 à 1,5m/s ;

- La zone des conditions hygrothermiques compensables par l'inertie thermique associée à la protection solaire ;
- La zone des conditions hygrothermiques compensables par l'utilisation de systèmes passifs de refroidissement par évaporation.
- La zone des conditions hygrothermiques qui nécessitent l'humidification de l'air
- La zone des conditions hygrothermiques compensables par une conception solaire passive du bâtiment.

Le diagramme bioclimatique trouve son utilité dès que les conditions climatiques s'écartent du polygone de confort, la distance qui sépare ces conditions des limites du polygone suggère dans le diagramme bioclimatique les solutions constructives et fonctionnelles qu'il faut adopter

pour concevoir un bâtiment adapté : ventilation, inertie thermique, protection solaire, utilisation des systèmes passifs.

Cette méthode graphique permet de bien se rendre compte de quelques techniques que l'on peut utiliser pour améliorer le confort dans le bâtiment. On peut voir par exemple que plus la vitesse de l'air est importante, plus la zone de confort est grande. Une ambiance peut donc être confortable avec une température de 30°C si la vitesse de l'air est de 0,5 m/s, de même, on se rend compte qu'à une température donnée, si l'on baisse l'humidité de l'air, on peut passer d'une zone d'inconfort à une zone de confort. C'est ce qui est utilisé dans les systèmes de climatisation, qui parallèlement apportent de la fraîcheur à un local, diminuent son taux d'humidité.

Le diagramme bioclimatique n'est pas un outil de dimensionnement précis du projet, mais il constitue bien un guide pour aider l'architecte à prendre les bonnes décisions en phase esquisse. [68].

### **II.5.2 Diagramme de Givoni :**

Se basant sur les études antérieures d'Olgay, Givoni a élaboré une méthode expérimentale où il représente les limites des ambiances confortables sur un diagramme psychométrique courant. Il présente une méthode plus performante que celle de V. Olgay, dans l'évaluation des exigences physiologiques du confort [52].

Givoni définit le confort en considérant la personne en état d'activité, par l'intermédiaire de son diagramme bioclimatique, il a prouvé qu'avec l'application des concepts de l'architecture, l'effet de variation climatique de l'environnement extérieur peut être réduit au minimum. Il a alors mis au point un outil synthétisant les zones thermo-hygrométriques et les moyens d'intervention par des dispositifs architecturaux ou techniques qui peuvent être utilisés pour remédier aux sollicitations du climat. Ceci est exprimé sur un diagramme psychométrique ou bioclimatique figure II.6, présenté dans son ouvrage « L'homme, l'architecture, le climat ».

La zone de confort est positionnée au centre, l'aire extérieure à cette zone est subdivisée en zones secondaires, où l'auteur propose de différentes procédures permettant de réintégrer les conditions de confort. Givoni a procédé dans l'élaboration de ses zones climatiques à des exigences de confort universelles. Sa zone de confort se situe entre les températures 20 et 27 C° ; c'est-à-dire qu'il considère que toutes les personnes, quelle que soit la latitude à laquelle ils se trouvent, réagissent de la même manière au confort [52].

Paramètre	Période estivale	Période hivernale
Température de l'air intérieur [°C]	23 - 26	20 - 24
Humidité relative [%]	40 - 60	40 - 60

Tableau II.1: Zones du confort intérieur du diagramme psychrométrique

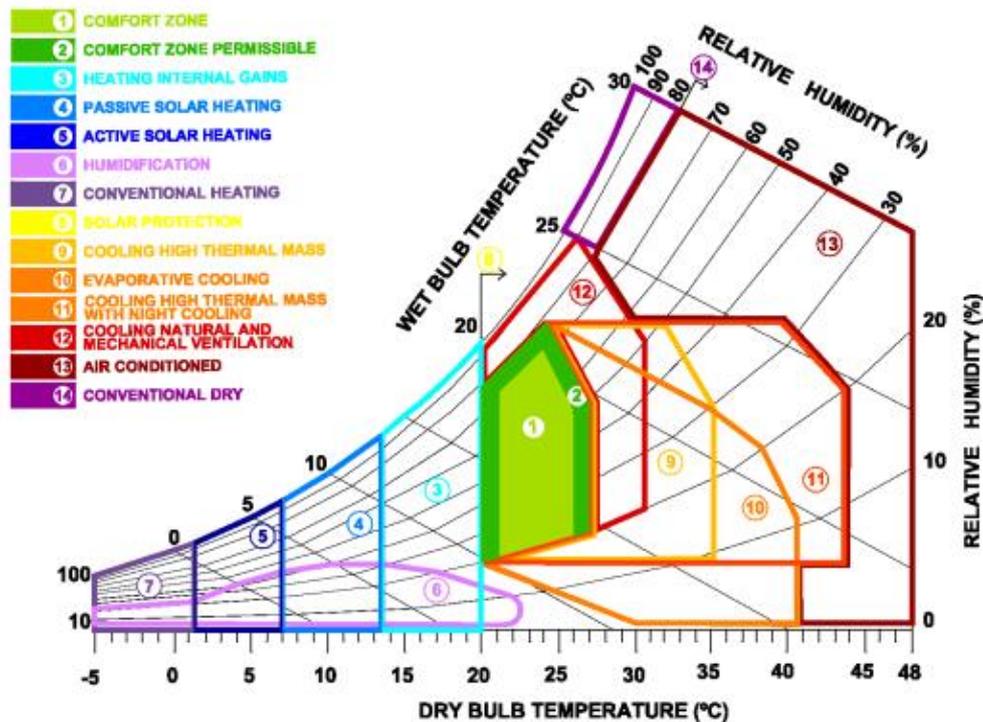


Figure : II. 6 Tableau psychrométrique adapté de Givoni  
(Givoni 1992 ; Manzano-Agugliaro et al.2015)

Or, les diagrammes et les outils proposés jusqu'ici ont été critiqués en 1980 par Evans et Szokolay, à cause du problème soulevé l'incohérence entre les résultats du confort thermique calculé et le confort réel perçut par les sujets.

En 1981, Auliciems est arrivé à déterminer une nouvelle formule de la température neutre, en révisant celle de M. Humphrey [65] dont la formule est :

$$T_n = 17,6 + 0,31 T_0$$

En 1983, Koenigsberger et al ont élaboré la méthode dite « Forward Analysis » ou analyse préalable. Basée sur les tables de Mahoney pour l'établissement des principes de conception avec une analyse climatique préalable.

En 1984, la norme internationale ISO 7730 a suggéré d'estimer les ambiances thermiques modérées utilisées en habitat et le travail dans les bâtiments à l'aide de deux indices.

Le premier, PPD fournit un avis statique moyen d'appréciation du confort de l'ambiance. Le second PMV indique le nombre de divergentes. [55]

L'indice PMV-PPD a été développé à partir du calcul d'un bilan thermique simplifié du corps humain dans un état proche du confort et de relations empiriques établies grâce à une grande base de données expérimentale de Fanger en [32]. La norme ISO 7730 [55] a déterminé ainsi la température opérative en fonction des conditions climatiques, l'habillement et l'activité du sujet figurent II.7. [61].

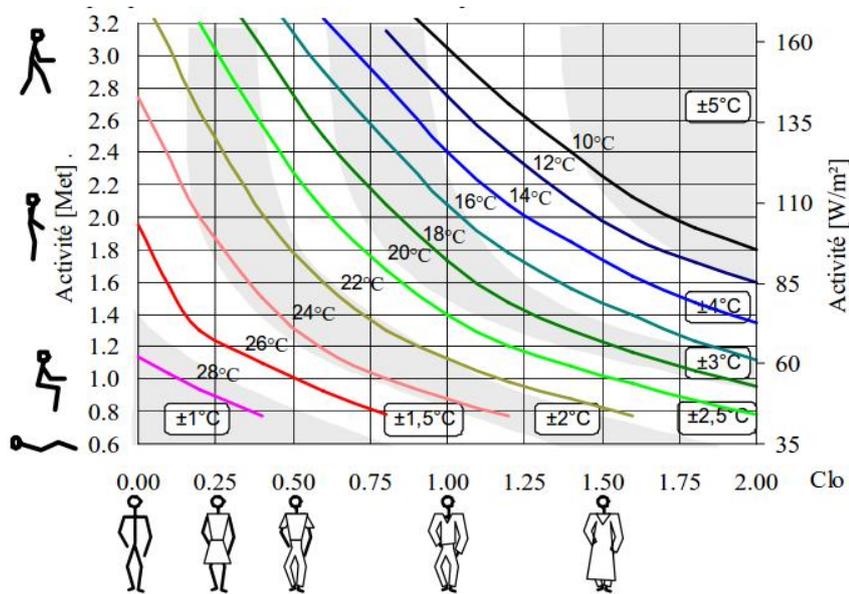


Figure : II. 7 Température opérative optimale en fonction de l'activité et de l'habillement (: Norme SN EN ISO 7730)[61]

### II.5.3 Indices pour l'évaluation du confort thermique :

De nombreux travaux de recherche réalisés à l'intérieur des bâtiments ou dans des conditions expérimentales parfaitement contrôlées en laboratoire, ont recensé les principales causes d'inconfort et ont permis d'établir un certain nombre d'indices, nommés « indices de confort thermique », qui sont généralement définis en fonction de la température et de la vitesse de l'air.

Nous ne citerons ici que les indices les plus couramment utilisés dans l'ensemble des normes de confort. [61]

#### II.5.3.1 Les indices PMV et PPD :

À partir d'études réalisées en laboratoire sous des conditions stables, c'est-à-dire sans que l'individu ne change ni de vêtements ni d'activité physique, Fanger a développé les indicateurs de confort thermique ; le PMV (*Vote Moyen Prévisible*) et le PPD (*Pourcentage Prévisible D'insatisfaits*). Le premier prédit, en effet, la sensation thermique moyenne d'un large groupe d'individus et le second, le pourcentage d'occupants insatisfaits de l'environnement thermique. Figure : II.8

**II.5.3.1.A Le PMV (Vote Moyen Prévisible) :**

Le PMV établi par Fanger permet de mesurer une sensation thermique globale du corps humain à partir du métabolisme et donne la moyenne des votes en référence à une échelle de sensation thermique. Les valeurs de l'indice PMV varient entre -3 et 3 comme l'indique le Tableau II.2.

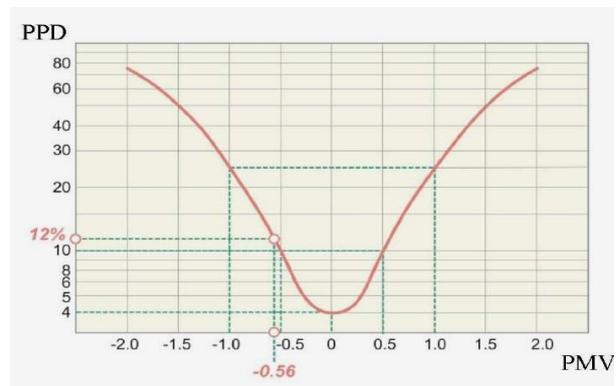
En constatant que les questionnaires utilisés pour évaluer le confort peuvent omettre certaines situations de confort, Fanger a avancé le postulat suivant : « Sont déclarées inconfortables toutes les personnes ayant des sensations supérieures à l'échelle 2 ou inférieures à l'échelle -2 ». Il a ensuite associé le PPD (Pourcentage Prévisible D'insatisfaits) qui exprime le pourcentage des sujets « insatisfaits » de manière générale [58].

**Tableau II. 1** Correspondances entre PMV et échelle des sensations thermiques[58]. [59].

Valeur de l'indice PMV	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3
SENSATION THERMIQUE	Chaud	Tiède	Légèrement tiède	Neutre	Légèrement frais	Frais	Froid

**II.5.3.1.B Le PPD (Pourcentage Prévisible D'insatisfaits) :**

À cause des différences physiologiques, il s'avère impossible de satisfaire tout le monde en réunissant des conditions « idéales », et Le PPD (pourcentage prévisible d'insatisfaits) exprime sous forme de pourcentage les sujets « insatisfaits » d'une ambiance thermique déterminée.



**Figure : II. 8** Pourcentage prévisible d'insatisfait [58]

Par contre, il est possible de créer un environnement dans lequel le pourcentage de personnes satisfaites est maximum, qui correspond aux conditions optimales de neutralité thermique du corps humain. Il reste néanmoins, en moyenne, 5 % d'insatisfaits lorsque le PMV est nul [58].

La norme ISO 7730 stipule que pour se situer dans la zone de confort thermique, il faut que :

$$-0,5 < PMV < 0,5 \text{ soit } PPD < 10 \%$$

### **II.5.3.2 La température de l'air ambiant ( $T_a$ ) :**

Elle représente l'indice le plus utilisé pour le contrôle des ambiances en intérieur du fait de la simplicité de sa mesure. Ce paramètre ne présente pas de grosses difficultés de mesure et d'évaluation, mais revêt un caractère toutefois limité pour la caractérisation complète du confort. Indice connu de tous, la température de l'air sera donc largement utilisée comme indice de confort dans le cas d'un contrôle peu strict du confort thermique. Il est utilisé pour définir les consignes de température références pour les installations de chauffage en période hivernale et climatisation en période estivale [58].

### **II.5.3.3 La température opérative ( $T_{op}$ ) :**

La température opérative,  $T_{op}$ , est un indice de confort thermique intégrant deux paramètres physiques, la température de l'air ambiant et la température moyenne radiante. Il s'agit donc d'un indice d'appréciation des effets convectifs et radiatifs sur le confort de l'individu. La norme ISO 7730 fournit le calcul simple de cet indice par la formulation :

$$T_{op} = \alpha T_a + (1 - \alpha) T_{mrt}$$

Avec :

- $T_{op}$  : La température opérative. [°C]
- $T_a$  : La température d'air. [°C]
- $T_{mrt}$  : La température moyenne radiante. [°C]
- $\alpha$  : Coefficient en fonction de la vitesse d'air.

Le tableau II.3 nous donne quelques valeurs de  $\alpha$  en fonction de la vitesse de l'air

Tableau II. 2 Valeurs de  $\alpha$  en fonction de la vitesse d'air

Vitesse (m/s)	0 - 0,2	0,2 - 0.6	0,6 – 0,7
$\alpha$ : coefficient	0,5	0,6	0,7

Avec des vitesses de l'air inférieures à 0,2 m/s, la température opérative est égale avec une bonne approximation, à la moyenne arithmétique des températures citées, et pouvant être écrite de la façon suivante.

$$T_{op} = (T_a + T_{mrt}) / 2$$

Pour des activités sédentaires ou légères exercées par des personnes portant une tenue vestimentaire estivale normale, la température opérative limite de confort est de 27°C pour un environnement avec 55% d'humidité relative, elle peut, par contre, être augmentée jusqu'à 29°C, si la vitesse de l'air est au-dessus de 0,2 m/s. [58]. [59].

### **II.5.4 La plage du confort thermique :**

Le confort thermique constitue une exigence essentielle à laquelle le chercheur doit apporter les réponses nécessaires. Le confort thermique est très complexe en raison de l'interaction de plusieurs variables environnementales telles que, la température résultante sèche, l'humidité intérieure, la température de surface du plancher réversible et la vitesse de l'air intérieur. [59]

#### **✓ Confort d'hiver :**

- 1) Température d'air entre 16-20 °C pour une humidité de 40 et 60 % (DTU 65.8).
- 2) La température superficielle maximale du plancher chauffant ne doit pas dépasser 28 °C en tout point du local pour une température intérieure de 19 °C (DTU 65.8).
- 3) La température d'entrée du plancher chauffant ne devra pas excéder les 50 °C selon la norme (DTU 65.8)[60].

#### **✓ Confort d'été :**

- 1) La température résultante sèche ne doit pas dépasser les 26 °C (ASHRAE).
- 2) La température de surface du plancher rafraichissant doit être comprise entre 19 et 27 °C (ASHRAE).

### **II.5.5 Zones climatiques en Algérie :**

L'Algérie est caractérisée par une diversité de zones climatiques qu'on peut classer en trois catégories :

1. Le Tell : climat tempéré humide de type méditerranéen.
2. Les hautes plaines : climat de type continental.
3. Le Sahara : climat aride et sec.

L'Algérie occupe une superficie de 2.381.741 Km<sup>2</sup> avec une large variété géographique et climatique allant du littoral au désert. Les principales zones climatiques sont (voir figure II.9) :

**Zone A :** le littoral marin dont le climat est particulièrement tempéré avec des hivers doux et pluvieux, et des étés chauds et humides.

**Zone B :** l'arrière littoral montagneux caractérisé par un climat froid en hiver, en revanche les étés sont chauds et moins humides.

**Zone C :** les hauts plateaux caractérisés par des hivers plutôt froids et longs avec la même altitude que la zone A et B et des étés chauds et secs.

**Zone D :** elle représente le climat saharien caractérisé par un gisement solaire important et une faible humidité, la période d'hiver est plus courte avec des jours modérés et des nuits très froides, l'été est très chaud avec des températures atteignent les 45 °C à l'ombre. Le comportement thermique d'un bâtiment dépend de sollicitations extérieures telles que la température de l'air extérieur, l'échange radiatif avec son environnement et le transfert de masse. [59].

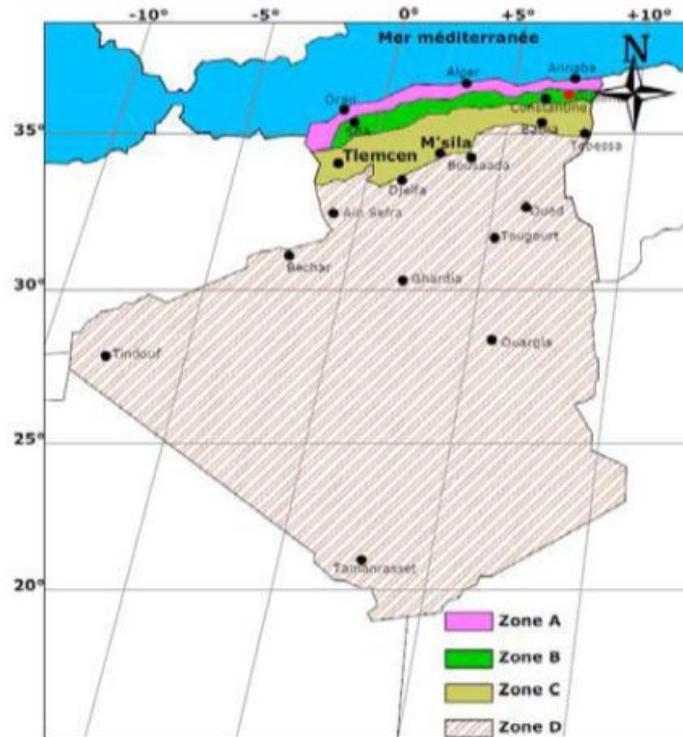


Figure : II. 9 classification du climat en Algérie, source [59].

### II.6 Vivre avec le climat : architecture vernaculaire :

L'étude de l'architecture vernaculaire montre que les concepteurs de ces bâtiments connaissaient le climat et les solutions pour s'en protéger. Ainsi dans les régions où les vents du Nord peuvent être violents et froids en hiver, les fenêtres des façades nord sont petites. Au contraire, au Sud, elles sont plutôt grandes pour capter les apports solaires gratuits. De même les murs ont des épaisseurs beaucoup plus importantes ce qui permet, grâce à l'inertie thermique, de maintenir la fraîcheur dans les habitats en été. De plus, les occupants avaient un comportement adapté : ils vivaient avec leur environnement et pratiquaient une migration saisonnière à l'intérieur de leurs logements afin de se protéger de la chaleur en été ou du froid en hiver. Ainsi en été ils préféraient une terrasse ombragée plutôt située au Nord alors qu'en hiver, ils utilisaient les espaces situés au Sud. L'occupant est « actif » au sein de son logement. Tout au long de la journée, en fonction des saisons et du climat, il agit sur ses protections solaires, ses fenêtres... L'occupant est acteur de son environnement thermique et vit avec son climat. C'est sur ces principes que s'est développée, dans les années 1970, l'architecture solaire ou bioclimatique. Loin d'avoir une attitude passiviste, les architectes de cette époque ont modernisé les techniques existantes, grâce aux progrès de l'industrie, pour proposer des architectures confortables avec de faibles consommations d'énergies[64].

### **II.7 La conception architecturale bioclimatique :**

En effet, les populations les plus pauvres doivent s'adapter au stress thermique et se contenter des équipements les moins performants. Les environnements intérieurs sont inconfortables et cela pèse sur la santé et la productivité. Du fait du contexte climatique africain, les occupants des bâtiments auront de plus en plus besoin de ressources énergétiques pour l'atteinte des consignes de confort thermique, source potentielle d'importante consommation d'énergie. Les bâtiments modernes dans ces pays, sont inadaptés à la chaleur, car en absence de réglementation sur le volet énergétique Janda and Busch, [54]; Iwaro and Mwasha,[53], la conception est basée sur des technologies et standards provenant d'autres contextes sociologiques et climatiques. Il est primordial de nos jours de chercher à adapter le secteur du bâtiment au contexte climatique dans les régions de l'Afrique subsaharienne notamment sur le volet énergie et bâtiment. Accroître l'efficacité de l'utilisation de l'énergie et promouvoir l'utilisation de solutions durables doit être une priorité dans les mesures prises pour protéger l'environnement [60].

### **II.8 Rappels théoriques des principes de la construction bioclimatique Algérienne :**

#### **II.8.1 Caractériser les isolants :**

Les isolants sont des matériaux généralement légers, vendus sous différentes formes (panneaux, rouleaux, vrac...). Ils sont caractérisés par : le coefficient de conductivité thermique noté  $\lambda$  et dont l'unité est le  $W/m^{\circ}C$ . Ce coefficient représente le flux de chaleur (en Watt) que traverse 1 mètre de matériau homogène, pour un écart de température de  $1^{\circ}C$  entre les deux côtés de la paroi. Plus  $\lambda$  est petit, plus le matériau est isolant.

L'isolation nous permet d'éviter des déperditions d'air chauffé à travers les parois. Les besoins en chauffage sont diminués et notre facture allégée. En été, l'isolation fait barrière à l'air chaud extérieur.  $1^{\circ}C$  de moins en température ambiante correspond à environ 7% de moins sur la facture. Aussi, une maison bien isolée vieillit mieux et nécessite moins des travaux d'entretien. En effet, l'isolation, avec une ventilation efficace, supprime les risques d'humidité souvent et cause de nombreux désordres (peinture, huisserie...). Les pertes de chaleur dans un bâtiment sont dues pour 30% aux murs, 25% à la toiture, 30% aux fenêtres et 15% au sol du rez-de-chaussée[62].

#### **II.8.2 Organisation de l'espace intérieur :**

La façade sud étant la plus agréable du point de vue thermique (chaude en hiver, frais en été) et la plus éclairée, il est préférable d'y placer les pièces à vivre, telles que le salon, les chambres principales afin de profiter au mieux de tous les avantages de cette orientation.

Les chambres principales peuvent également être orientées au Sud-est et à l'Est, afin de profiter du lever du soleil tout en restant fraîches en fin de journée. L'orientation de la cuisine dépend de notre mode de vie. Si elle est pour nous une pièce de séjour dans laquelle vous prenez la plupart de vos repas, une orientation sud est conseillée.

Une orientation sud-est nous permettra de prendre nos petits-déjeuners en profitant du soleil matinal. Les salles de bain sont des pièces ne nécessitant que peu, voire pas d'ouvertures, ni un ensoleillement important. Il est donc conseillé de les placer au Nord. Les pièces utilitaires, où il n'est pas nécessaire d'avoir une température confortable (entrée, garage, atelier, débarras...), seront de préférence disposées côté Nord. Ces espaces peu ou non chauffés, appelés espaces tampons [62].

### II.8.3 Aménagements extérieurs :

S'il n'est pas possible de modifier les données climatiques générales, les aménagements extérieurs (bâti, végétation) peuvent néanmoins modifier le microclimat d'un site par la création d'ombrages, le ralentissement des vents dominants, la modification du degré d'humidité, le stockage et la diffusion de chaleur. Durant l'été, même dans une rue étroite, à cause de la position très haute du soleil, l'ombre des bâtiments est réduite et aura donc peu d'impact sur le confort thermique. En revanche, des arbres plantés devant la maison auront un effet plus positif. Les végétaux à feuilles caduques sont particulièrement bien adaptés au climat de type tempéré, car ils offriront un ombrage apprécié l'été, tout en ne diminuant pas l'ensoleillement l'hiver, car durant cette saison ils perdent leurs feuilles. En hiver, ils protégeront également l'habitation des vents dominants. La présence de végétaux (arbres, buissons, gazon), absorbant le rayonnement solaire par photosynthèse, sera une des principales sources de réduction de la température de l'environnement. La présence d'eau sous forme de fontaine, de bassins, contribue aussi à réduire la température de l'air ambiant[62].

### II.8.4 Conception des bâtiments :

Cette partie a pour objectif de nous doter de connaissances essentielles quant à la conception d'un bâtiment. Généralement, c'est le spécialiste (architecte, thermicien), qui a les bons compromis entre un ensemble de critères et d'exigences différents, quelquefois en contradiction. Les informations exposées ci-dessous (Figure II.10) devraient nous permettre de comprendre l'ensemble des facteurs qui influent sur la qualité du confort thermique de notre logement et sur notre facture d'énergie. Les techniques de conception des bâtiments sont ici envisagées dans le cadre du milieu tempéré de l'Algérie; il faudra adapter les conseils donnés à la géographie du lieu d'implantation, à son microclimat le cas échéant, à sa topographie et à tous les paramètres physiques spécifiques d'un site donné. [62].



Figure : II. 10 technique de conception de bâtiment, source [62]

### II.8.5 L'implantation du bâtiment :

Le choix d'implantation doit être particulièrement bien pensé, car il influe directement sur le confort thermique du bâtiment, à cause de son incidence sur le rapport au soleil et aux vents dominants, ainsi que sur la forme globale du bâtiment. Bien que la marge de manœuvre pour implanter un bâtiment soit assez restreinte en ville, il est conseillé de garder toujours à l'esprit quelques principes fondamentaux gouvernant le choix d'implantation. Ils doivent reposer sur une connaissance, la plus fine possible, vents d'hiver, des caractéristiques topographiques et climatiques du site, telles que la hauteur du site, le pourcentage de pente, le niveau et les variations de température, les horaires d'ensoleillement, de brumes et de brouillard, les masques et les éléments proches (végétation, urbanisme) ou lointains (montagnes, mer) susceptibles de réduire l'insolation du bâtiment. (Figure II.11 implantation du bâtiment)[62].

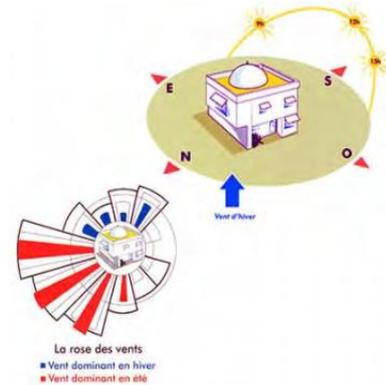


Figure : II. 11 Implantation du bâtiment, source [62]

### II.8.6 Orientation du bâti :

L'été, il s'agit de limiter les apports solaires et d'évacuer la chaleur, alors que l'hiver, il convient de profiter au maximum des apports solaires, et de se protéger des vents dominants. D'une manière générale, il est préférable d'avoir une exposition principale Sud à toute autre exposition, car c'est la seule à être à la fois avantageuse été comme hiver : en effet, une orientation sud apporte évidemment un éclairage satisfaisant, la maison étant éclairée naturellement aux heures les plus « intéressantes » de la journée, à midi et l'après-midi, ce qui garantit en plus des économies de chauffage une économie d'éclairage.

En dehors du Sud du pays, on n'a pas intérêt à choisir une exposition principale Nord, car nous priverions notre logement des apports solaires, à la fois agréables et utiles en saison froide. Les expositions principales Ouest et Est sont à éviter, car les rayons du soleil frappent de plein fouet (avec un angle d'incidence petit) les ouvertures, qui sont alors difficiles à protéger. Ceci est particulièrement dérangeant en été, surtout pour l'exposition Ouest, car les rayons solaires arrivent au moment le plus chaud de la journée. L'orientation du bâti doit également être pensée de manière à avoir des parois aussi étanches que possible à l'air, et qui minimisent l'effet des vents indésirables (vents froids d'hiver et vents chauds d'été) [62].

### **II.8.7 Forme, Volumétrie et couleur du bâtiment :**

Le coefficient de forme du bâtiment est le rapport de sa surface par son volume. Plus ce coefficient est petit, plus les déperditions énergétiques durant l'hiver sont faibles, plus la consommation de chauffage est réduite. En effet, pour une qualité d'isolation donnée ; la dépense de chauffage sera proportionnelle à la surface des parois en contact avec l'extérieur. Ainsi, de par les exigences de chauffage durant l'hiver, une maison à étage obtient de meilleurs résultats qu'une maison avec uniquement un rez-de-chaussée.

Pour accroître la compacité et réduire les pertes d'énergie l'hiver, on peut également prévoir des constructions qui profitent, dans la limite du possible, du jumelage avec les voisins. En revanche, la situation en saison chaude est différente. Durant les journées d'été, l'enveloppe du bâtiment tend à faire pénétrer de la chaleur à l'intérieur. Dans ce cas, un coefficient de forme faible est favorable comme pour l'hiver. Mais durant les nuits d'été, les parois permettent l'évacuation de la chaleur vers l'ambiance extérieure.

En plus de la convection par laquelle elles cèdent la chaleur à l'air extérieur. En effet, par les nuits claires d'été, dans un climat semi-aride, la température du ciel est très basse et le rayonnement nocturne des parois vers le ciel les refroidit très efficacement. Dans ce cas, un coefficient de forme élevé (grande surface d'enveloppe pour un volume donné) est très intéressant. C'est l'une des raisons pour lesquelles les maisons à patio sont fraîches l'été [62].

### **II.8.8 Intérêt des voûtes et coupoles :**

Ces toitures ont de très bonnes performances thermiques en saison chaude. En effet, en milieu de journée, quand le soleil est intense et haut à l'horizon, elles ne reçoivent guère plus d'irradiation solaire qu'une toiture-terrasse. En revanche, pendant la nuit, elles offrent une surface extérieure beaucoup plus importante, ce qui leur permet une meilleure évacuation de la chaleur par convection et surtout par rayonnement vers la voûte céleste [62].

### **II.8.9 Couleur des revêtements extérieurs :**

Un revêtement de couleur sombre favorise l'absorption du rayonnement solaire, une couleur claire réfléchira les rayons solaires les empêchant d'entrer dans le bâtiment. Des murs sombres peuvent sembler bénéfiques pour l'hiver, mais ils seront très pénalisants en saison chaude. Si l'on se rappelle le principe suivant lequel on doit pouvoir contrôler l'admission du rayonnement solaire dans le logement. Ici, nous déduisons que le bon choix est celui d'un revêtement extérieur blanc pour les murs. C'est d'ailleurs le choix de l'architecture traditionnelle dans tout le bassin méditerranéen [62].

### **II.8.10 Conception des ouvertures :**

Une bonne conception des ouvertures doit donc tenir compte de certains paramètres. La dimension des fenêtres doit être aussi réduite que possible à l'Est, à l'Ouest et au Nord, car ces ouvertures, particulièrement côté Nord, entraînent des entrées d'air froid en hiver et laissent peu ou mal pénétrer le rayonnement solaire. En contrepartie, il est préférable de placer de grandes fenêtres au Sud, car ces vitrages capteront plus d'énergie durant l'hiver qu'ils n'en feront perdre. Pour la même raison, on peut avoir également les baies vitrées à la façade sud. L'impact de l'agrandissement des fenêtres sur la charge de climatisation est négligeable. L'intérêt est de disposer des fenêtres à faible coefficient de déperdition thermique au Nord, à l'Est et à l'Ouest. Prévoir également des protections nocturnes (persiennes, stores.) Isolants placés à l'extérieur par rapport aux fenêtres. [62] Un facteur essentiel du confort d'été est d'avoir des ouvertures permettant de profiter de l'ombre.

### **II.8.11 Conception de la ventilation naturelle :**

La ventilation des locaux répond à plusieurs exigences principales : telles que satisfaire les besoins d'hygiène et de confort des occupants ; il faut leur apporter de l'oxygène, éliminer les odeurs, les fumées, le dioxyde et le monoxyde de carbone, ainsi que les produits dégagés par l'ameublement ou les structures du bâtiment. Améliorer le confort thermique en saison chaude et froide ; un courant d'air contribue à l'amélioration de la sensation de confort par élimination de la sueur. Réduire les besoins de climatisation ou améliorer la qualité de l'ambiance intérieure en saison chaude. L'été, la ventilation des locaux quand l'air extérieur devient moins chaud que l'air intérieur (en particulier la nuit), associé à une forte inertie thermique, permet d'évacuer la chaleur stockée dans la structure du bâti. La réduction de la ventilation à son minimum durant les heures chaudes permettra en revanche de conserver cette fraîcheur. [62].

### **II.8.12 Conception de mur de façade :**

Les murs de façade en simple cloison traditionnels se composent le plus souvent (de l'intérieur vers l'extérieur) ; (BLOCH J M [63]), d'un enduit mural à base de chaux et/ou de ciment de 1,5 à 2cm d'épaisseur ; d'une maçonnerie en briques 12 trous posés à plat. Pour des constructions plus anciennes, les briques peuvent être remplacées par des moellons de pierre naturelle ; dans ce cas, l'épaisseur des murs est fréquemment supérieure à celle des maçonneries de briques ; d'un revêtement extérieur éventuel constitué par un enduit à base de chaux ou de ciment (épaisseur =2 cm). Les murs de façade en doubles cloisons traditionnels se composent le plus souvent d'une paroi interne enduite (côté intérieur du logement). Cette partie de la façade joue le rôle de barrière à l'air et permet une mise en équilibre des pressions de part et d'autre de la paroi externe et d'une paroi externe enduite (côté extérieur du logement) ou parement : elle joue le rôle d'écran contre les pluies battantes, mais n'offre pas une étanchéité totale [62].

### II.8.13 Matériaux de construction et leurs performances thermiques :

Les matériaux reçoivent différemment le rayonnement selon leur degré de transparence ou d'opacité, leur couleur ou leur texture de surface. Mais ils ont aussi des caractéristiques thermiques particulières tenant à leur structure et à leur masse qui leur permettent de gérer différemment les apports caloriques. Ces caractéristiques thermiques seront prises en compte dans la conception des parois d'un bâtiment bioclimatique, qui auront pour mission première selon les cas de capter, de stocker, de transmettre et de conserver les calories. Ces caractéristiques thermiques des matériaux sont de deux ordres :

*Les caractéristiques statiques* : comment tel matériau se comporte-t-il en présence d'un flux thermique indépendamment du temps de réaction, ce sont la conductivité et la capacité thermique.

*Les caractéristiques dynamiques* : à quelle vitesse tel matériau gère-t-il le flux thermique ? Ce sont la diffusivité et l'effusivité. Dérivées des caractéristiques précédentes, elles font en plus intervenir le facteur temps [58].

### II.8.14 Caractéristiques des matériaux et leurs performances thermiques :

#### II.8.14.1 La résistance thermique :

Cette capacité isolante de la paroi est définie par un coefficient  $R$ , appelé résistance thermique et exprimée en  $\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$ . Un matériau à fort pouvoir isolant thermique a une résistance thermique élevée (et inversement). Les isolants thermiques peuvent être placés à différents endroits de l'enveloppe, sans incidence sur leurs propriétés. L'emplacement aura cependant une influence sur l'inertie de l'enveloppe et le risque de condensation.

$R$  est l'inverse de la quantité de chaleur passant à travers  $1 \text{ m}^2$  d'un système (ex. : paroi) pour une différence de température de  $1 \text{ K}$  entre les deux faces de ce système.

Pour une couche thermiquement homogène, c'est-à-dire composée de matériaux ayant à peu près les mêmes valeurs de conductivité thermique (à l'exception des lames d'air), avec un flux de chaleur perpendiculaire au système, on aura :  $R = e/\lambda$  avec  $e$  l'épaisseur de la couche (m) et  $\lambda$  la conductivité thermique ( $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ).

Pour une couche thermiquement hétérogène, c'est-à-dire composée de matériaux ayant des valeurs de conductivité thermique différentes, avec un flux de chaleur perpendiculaire au système, on aura :  $R = 1/U = R_{si} + R_{se}$  avec  $U$  coefficient de transmission surfacique de la couche,  $R_{si}$  la résistance superficielle vis-à-vis de l'intérieur, et  $R_{se}$  la résistance superficielle vis-à-vis de l'extérieur [22].

#### II.8.14.2 La conductivité thermique :

La conductivité thermique d'un matériau est égale à la quantité de chaleur qui traverse un mètre d'épaisseur de ce matériau par seconde et par mètre carré de surface, lorsque la différence de température entre les deux faces du matériau est de  $1 \text{ K}$ . Elle s'exprime en  $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$  et par

## II Deuxième Chapitre

degré Celsius ( $W/m \cdot ^\circ C$ ). C'est une donnée intrinsèque à chaque matériau qui caractérise donc uniquement ses performances isolantes. Le coefficient  $\lambda$  (lambda) d'un matériau caractérise sa capacité à transmettre la chaleur par conduction, plus  $\lambda$  est grand, plus le matériau est conducteur de chaleur. Plus  $\lambda$  est petit, plus le matériau est isolant thermiquement.

Les matériaux sont considérés comme isolants lorsque leur conductivité thermique est inférieure à  $0,065 W/m \cdot K$ . Figure. [II.12] montre la conductivité thermique de différents matériaux, les facteurs influençant la conductivité thermique d'un matériau sont :

- son poids volumique ;
- sa teneur en eau ;
- la taille de ses pores d'air ;
- la nature du solide les renfermant.

La présence d'eau à l'intérieur du matériau influence sa conductivité thermique. La porosité intrinsèque des matériaux, conjuguée à leur exposition à l'eau, peut faire varier sensiblement leur conductivité thermique, pour quelques matériaux du bâtiment, les valeurs  $\lambda$  en condition sèche et en condition humide. Celle des matériaux isolants n'est donnée qu'en condition sèche, car il est déconseillé de les utiliser là où ils pourraient s'humidifier (condensation, vapeur d'eau, etc. [22])

	sec	hum.		Conductivité thermique $\lambda$ des matériaux en $W/m \cdot K$
Matériaux isolants	0,028		polyuréthane	
	0,040		laine minérale, liège	
	0,058		vermiculite	
	0,065		perlite	
Bois et dérivés	0,17	0,19	feuillus durs	
	0,12	0,13	résineux	
Maçonneries	0,27	0,41	briques 700-1 000 $kg/m^3$	
	0,54	0,75	briques 1 000-1 600 $kg/m^3$	
	0,90	1,1	briques 1 600-2 100 $kg/m^3$	
Verre	1,0	1,0		
Béton armé	1,7	2,2		
Pierres naturelles	1,40	1,69	tuft, pierre tendre	
	2,91	3,49	granit, marbres	
Métaux		45	acier	
		203	aluminium	
		384	culvre	

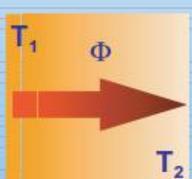


Figure : II. 12 Valeurs de la conductivité thermique pour quelques matériaux du bâtiment. [22]

### II.8.14.3 Capacité thermique :

La capacité thermique d'un matériau représente sa propension à emmagasiner de la chaleur en fonction de son volume. Elle est exprimée en  $kJ/m^3 \cdot ^\circ C$ . Plus la capacité thermique d'un matériau est grande, plus ce matériau sera capable d'emmagasiner et de restituer de la chaleur en hiver ou de la fraîcheur en été. Le principal bénéfice d'une forte capacité thermique est de lisser les variations de température d'un bâtiment [57].

En hiver, la pointe de température la plus froide se produit en fin de nuit. Pendant cette période la plus froide, une forte capacité thermique permet de diffuser dans le bâtiment les calories

emmagasinées la journée par l'apport solaire. Par ailleurs, cette diffusion de chaleur atténuant les effets des pics de froid pendant une période, elle permet d'éviter de nombreuses relances de chaudière, coûteuses en énergie. A l'inverse, en été, une forte capacité thermique permet d'emmagasiner le surplus de calories afin de les restituer pendant une période plus favorable à leur évacuation [57].

### **II.8.14.4 L'inertie thermique :**

L'inertie thermique est une notion qui recouvre à la fois l'accumulation de chaleur et sa restitution, avec un déphasage dépendant des caractéristiques physiques, dimensionnelle et d'environnement de la paroi de stockage. Une grande inertie thermique permet la récupération de la chaleur du jour afin de la restituer la nuit. Ceci est notamment intéressant dans les climats où la différence de température diurne et nocturne est importante.

La capacité d'accumulation d'un matériau dépend de sa chaleur spécifique, de sa conductivité thermique et de son poids volumique. Une paroi peut aussi s'échauffer en absorbant la chaleur rayonnée par d'autres parois ayant une température supérieure. De même, si l'air est plus chaud que la paroi, celle-ci peut gagner des calories par convection. [57] Ce type de stockage est alors indirect.

Lorsque les rayons du soleil frappent, une paroi opaque, une partie, de l'énergie rayonnée est absorbée, le reste est réfléchi. Un flux de chaleur s'établit alors entre la face externe et la face interne de la paroi. La chaleur, qui se transmet par onde de l'extérieur à l'intérieur, se propage avec un certain déphasage et subit un amortissement. Le maximum de température atteint sur la face extérieure n'est pas immédiatement senti sur la face intérieure de la paroi. Le temps de déphasage est en fonction de l'épaisseur ainsi que de la conductivité thermique des matériaux. Le déphasage et l'amortissement constituent l'inertie thermique.

Les caractéristiques de l'inertie thermique peuvent être regroupées pour chaque matériau en deux grandeurs intermédiaires : la diffusivité thermique et l'effusivité thermique.

La diffusivité thermique « a » correspondu à la vitesse d'avancement d'un front de chaleur à travers le matériau (unité : m<sup>2</sup>/h).

$\lambda$  : conductivité thermique du matériau (W/m.K)

$\rho$  : masse volumique du matériau (kg/m<sup>3</sup>)

c : chaleur massique du matériau (Wh/K.kg)

#### **II.8.14.4.A Effusivité:**

L'effusivité d'un matériau, appelé couramment chaleur subjective, est la vitesse à laquelle varie la température de surface d'un matériau. Ce paramètre a pour unité le J/m<sup>2</sup> S °C. Si l'effusivité n'est pas prise en compte dans un bilan thermique, elle reste cependant un paramètre

non négligeable du confort thermique

- Un matériau d'effusivité élevée absorbe rapidement une grande quantité d'énergie sans se réchauffer notablement;
- Si son effusivité est faible, le matériau se réchauffe en surface en peu de temps. C'est l'effusivité qui donne en hiver la sensation de mur froid, synonyme d'inconfort thermique. Si l'on pose la main contre une paroi en faïence (effusivité =  $1100 \text{ J/m}^2 \text{ S } ^\circ\text{C}$ ), elle semble froide, car ce matériau à forte effusivité absorbe rapidement la chaleur de la peau. Dans la conception d'une paroi, ce paramètre permet de choisir la qualité du revêtement en fonction du climat et de l'utilisation future de la pièce [57].

### II.8.14.4.B Diffusivité:

La diffusivité thermique d'un matériau caractérise la vitesse de diffusion de la chaleur en son cœur. Elle est exprimée en  $\text{m}^2/\text{s}$ . Plus la diffusivité est élevée, plus le matériau s'échauffe et se refroidit rapidement. La diffusivité est directement liée à la conductivité thermique, à la capacité thermique ainsi qu'à la masse volumique d'un matériau. Elle croît avec la conductivité thermique d'un matériau et décroît avec sa capacité thermique et sa masse volumique. Appliquée à un bâtiment, la diffusivité d'un matériau d'une paroi permet de gérer le temps de restitution de la chaleur. Par exemple, elle permet de dimensionner l'épaisseur d'un mûr accumulateur qui capte des calories la journée et les restitue quelques heures plus tard vers une pièce de vie nocturne.

Le déphasage ainsi créé est un paramètre essentiel dans l'optimisation du confort d'été d'une habitation. Un fort déphasage permet de décaler dans le temps un pic de température. Une forte chaleur d'une journée estivale atteint l'intérieur du bâtiment 12 heures après avoir impacté les faces extérieures. Il est donc possible d'évacuer ce surplus de calories en surveillant le bâtiment et ainsi de limiter l'inconfort thermique dans les pièces figure [II.13], [57].

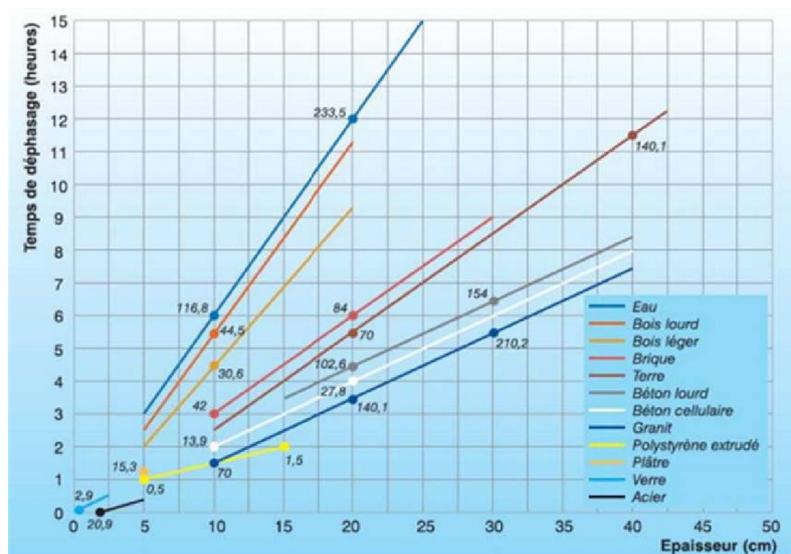


Figure: II. 13 Temps de déphasage des différents matériaux de construction en fonction des épaisseurs types (source [22]).

Une forte inertie est recommandée pour emmagasiner une partie des apports afin de les restituer au bâtiment lorsqu'il en a le plus besoin. D'autres traités d'architecture bioclimatique [22] dressent les mêmes constats : dans les climats tempérés, les solutions privilégiées pour l'hiver et l'été s'opposent, mis à part l'utilisation de l'inertie du bâtiment comme déphaseur.

### II.9 Les stratégies bioclimatiques pour améliorer le confort thermique :

En Algérie, les conditions climatiques ne correspondent pas souvent aux zones du confort. On utilise alors différents moyens afin que le climat intérieur se différencie du climat extérieur et assure le confort. Avant de recourir au chauffage ou à la climatisation, de nombreuses possibilités sont utilisables : utiliser les gains internes, favoriser les apports solaires passifs, augmenter la masse thermique du bâtiment, les principes d'utilisation de l'énergie solaire passive et de la prise en compte du climat dans la conception d'un bâtiment doit être intégrées dans un processus logique. L'analyse du site, du climat, du programme et de ses exigences doit aider le concepteur à choisir une stratégie [57].

Les stratégies de contrôle du climat font appel à des principes physiques simples qui sont énumérés dans le Tableau : II.4 les phénomènes d'échange thermique ont lieu sous forme de conduction, convection, rayonnement et évaporation. Selon la saison et le climat, on utilisera chacun de ces principes de base pour élaborer une stratégie de contrôle propre au projet architectural. [57]

**Tableau II. 3 Principe physique et stratégies de contrôle en architecture climatique [57]**

			<b>conduction</b>	<b>convection</b>	<b>rayonnement</b>	<b>évaporation</b>
<b>Stratégies de contrôle</b>	<b>hiver</b>	<b>Favoriser les gains résistés aux pertes</b>		Minimiser la vitesse d'air sur la peau externe	Favoriser les gains solaires	
			Minimiser les flux de chaleur par conduction	Minimiser les infiltrations d'air		
	<b>été</b>	<b>Résister aux gains (se protéger) favorisés les pertes (évacuer)</b>	Minimiser les flux de chaleur par conduction	Minimiser infiltration d'air	Minimiser les gains solaires	
			Favoriser les échanges avec le sol (terre)	Favoriser la ventilation	Favoriser le refroidissement par rayonnement	Favoriser le refroidissement par évaporation

L'aspect de dimensionnement de base (pré dimensionnement) est volontairement accentué dans la présentation de ces principes. Pour sélectionner les principes adéquats et les dimensionner, on peut distinguer deux périodes : l'hiver et l'été. En pratique, on ne pourra pas aussi facilement séparer ces principes : le choix d'un concept pour la période froide aura des conséquences directes sur le comportement du bâtiment en période chaude.

### II.9.1 Système de chauffage solaire passif (Confort d'hiver) :

#### II.9.1.1 Période froide ; confort d'hiver :

Au confort d'hiver répond la stratégie du chaud : capter la chaleur du rayonnement solaire, le stocker dans la masse, la conserver par l'isolation et la distribuer dans le bâtiment tout en la régulant.

L'énergie solaire peut être une contribution importante au chauffage d'un bâtiment. Pour atteindre ce but, il faut maîtriser les quatre principes de base :

- Capter le soleil:** le rayonnement solaire EST collecté et transformé en chaleur.
- Stocker la chaleur:** l'énergie captée est stockée pour une utilisation différée.
- Distribuer la chaleur:** la chaleur captée et stockée est distribuée aux parties du bâtiment qui requièrent du chauffage.
- Conserver la chaleur :** la chaleur distribuée est retenue dans le bâtiment.

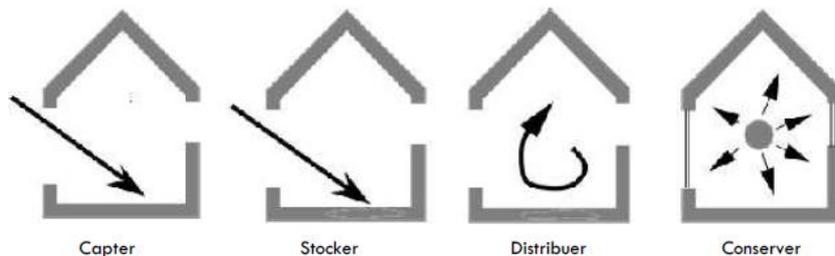


Figure : II. 14 période froide : les 4 stratégies de base. [57]

Une première distinction est établie : selon le mode de captage/stockage/distribution de la chaleur, on parle de systèmes solaires passifs à gain direct ou à gain indirect. Il n'est pas possible de compenser une faible conservation de l'énergie (enveloppes mal isolées) par un fort captage de l'énergie solaire. Ceci devient vrai aux latitudes plus basses, au niveau de la Méditerranée par exemple [57].

#### II.9.1.1.A *Capter le soleil* :

Capter la chaleur consiste à recueillir l'énergie solaire et à la transformer en chaleur. Le rayonnement solaire reçu par un bâtiment dépend du climat et de ses variations journalières et saisonnières, mais aussi de l'orientation du bâtiment, de la nature de ses surfaces et de ses matériaux, de la topographie du lieu, de l'ombrage, etc.

Le captage se fait principalement par des surfaces vitrées, qu'elles correspondent à des fenêtres, des murs-capteurs ou des collecteurs solaires. L'énergie solaire interceptée par une surface opaque isolée (murs, toit) ne pénètre pas vraiment dans le bâtiment, mais est en majorité rediffusée vers l'extérieur : cet apport peut être négligé en hiver. En tant qu'élément de captage

- pour permettre un captage optimal, le site devrait être dégagé (libre d'obstacles proches)
- , Le 75 % de cette surface devrait se trouver dans des orientations allant du sud-est au sud-ouest ( $\pm 30^\circ$  du Sud).

### **II.9.1.1.B Stocker la chaleur :**

Le principe du stockage thermique est d'accumuler les excédents de chaleur pour redistribuer celle-ci quand l'offre solaire vient à manquer.

Le rayonnement solaire produit souvent de la chaleur au moment où elle n'est pas nécessaire. Il est alors sensé de pouvoir stocker cette énergie jusqu'au moment où ce besoin se fait sentir. Ce stockage a lieu au sein de chaque matériau suivant sa capacité d'accumulation et permet ainsi d'absorber la chaleur et d'atténuer les fluctuations de température dans le bâtiment en tirant parti de son inertie. Le stockage de la chaleur peut être direct ou indirect.

#### **+ Stockage direct :**

Toute masse directement frappée par le rayonnement solaire ou après le passage au travers d'un élément vitré stocke quasi instantanément une partie de ce rayonnement. Ce phénomène permet d'étaler dans le temps les effets de captage du rayonnement solaire et d'éviter de rapides surchauffes. La quantité de chaleur stockée par un matériau dépend d'une part de sa capacité à transmettre une variation de température « diffusivité », qui est sensiblement du même ordre de grandeur pour tous les matériaux de construction (de 1 à 4), et, d'autre part, de sa capacité à absorber ou restituer une puissance thermique « effusivité ». L'effusivité dépend de la conductibilité thermique, de la masse volumique et de la chaleur spécifique. Du point de vue de leur effusivité, les matériaux de construction sont très différents (de 1 à 100). L'efficacité d'un stockage dépend donc de la quantité de chaleur emmagasinable par ces matériaux.

#### **+ Stockage indirect :**

Sous cette appellation, on retrouve deux types de stockage distincts.

✓ Le premier s'effectue naturellement par échange de chaleur par convection et par rayonnement. Cet échange de calories entre masses de températures différentes est spontané, car il obéit au second principe de la thermodynamique visant à l'équilibre thermique entre les masses. Ce phénomène permet une accumulation de chaleur supplémentaire à celle procurée par les mécanismes de stockage direct. Ce sont tous les deux des mécanismes solaires passifs qui offrent une réserve de chaleur d'un à deux jours.

✓ Le second stockage indirect est mis en place volontairement dans le cadre des systèmes solaires hybrides et actifs parce qu'il fait appel à une masse accumulatrice ainsi qu'à un mode de transport de la chaleur (ventilateur et gaines de pulsion s'il s'agit d'air).

Ce mode de stockage vise à équilibrer la disponibilité des calories. En effet, les variations d'ensoleillement sont liées aux rythmes journaliers et saisonniers. Elles déterminent donc des périodes durant lesquelles les apports peuvent être excessifs et d'autres où la demande n'est pas satisfaite.

### II.9.1.1.C Conserver la chaleur :

En climat froid ou frais, on s'efforcera de conserver toute chaleur, qu'elle découle de l'ensoleillement, d'apports internes ou du système de chauffage. C'est essentiellement la forme et l'étanchéité de l'enveloppe ainsi que les vertus isolantes de ses parois qui limiteront les déperditions thermiques du bâtiment. Cloisonner les espaces en différentes zones permettant de créer des ambiances thermiques différenciées (températures de consignes différentes ou zones tampons), orientées.

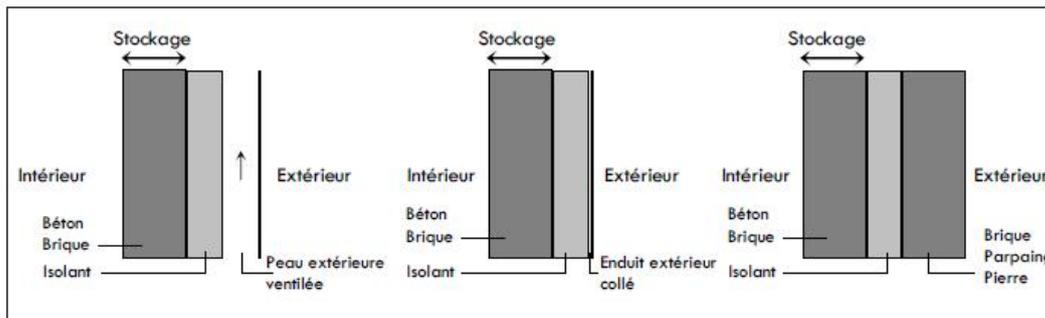


Figure:II. 15 ces trois murs, avec un matériau identique et de mêmes épaisseurs à l'intérieur  
De l'enveloppe isolée, offre un stockage équivalent. [57]

Plusieurs paramètres déterminent le dimensionnement d'un stockage : la surface de stockage rapportée à la surface de captage, l'épaisseur de la paroi, les caractéristiques thermiques du matériau.

Le stockage est habituellement limité à un déphasage jour-nuit, c'est-à-dire 12 heures de stockage et 12 heures de déstockage. Un des moyens de mieux utiliser la capacité de stockage d'un local est d'augmenter les amplitudes de température jour-nuit : réduction nocturne de la consigne de chauffage, acceptation de températures plus élevées la journée. Ces amplitudes plus marquées ne sont pas toujours compatibles avec tous les modes d'utilisation des espaces [57].

### II.9.1.1.D Distribuer la chaleur :

Distribuer la chaleur dans le bâtiment tout en la régulant consiste à la conduire dans les différents lieux de vie où elle est souhaitable. Cette distribution peut s'effectuer naturellement lorsque la chaleur accumulée dans un matériau durant la période d'ensoleillement est restituée à l'air ambiant par rayonnement et convection. Un autre mode de distribution de la chaleur est celui de la thermo circulation de l'air (migration naturelle des masses d'air chaud vers le haut). Enfin, cette distribution peut être assurée par un circuit de ventilation forcée. La chaleur doit également être régulée en fonction des différentes pièces de l'habitation et de leur utilisation.

## II.9.2 Système de rafraîchissement passif (confort d'été)

### II.9.2.1 Le confort d'été :

Au confort d'été répond la stratégie du froid : se protéger du rayonnement solaire et des apports de chaleur, minimiser les apports internes, dissiper la chaleur en excès et refroidir naturellement.

### **II.9.2.1.A Protéger :**

Protéger le bâtiment, et particulièrement ses ouvertures, de l'ensoleillement direct afin de limiter les gains directs revient à ériger des écrans, extérieurs si possible, qui le mettent à l'ombre. Ces écrans peuvent être permanents, amovibles ou saisonniers (végétation). De surcroît, afin d'éviter l'échauffement du bâtiment au droit des parois opaques, un niveau d'isolation suffisant doit empêcher la chaleur de s'accumuler dans la masse. En climat chaud, il faut particulièrement veiller à éviter les apports de chaleur provenant des parois et des toitures échauffées par le soleil.

### **II.9.2.1.B Minimiser les apports internes :**

Minimiser les apports internes vise à éviter une surchauffe des locaux due aux occupants et aux équipements : l'éclairage peut être facilement minimisé en favorisant, à titre d'exemple, l'éclairage naturel.

### **II.9.2.1.C Dissiper les surchauffes :**

La dissipation des surchauffes peut être réalisée grâce à la ventilation naturelle, en exploitant les gradients de température par le biais d'exutoires produisant un « effet de cheminée ». La pression du vent et la canalisation des flux d'air peuvent également être mises à profit pour évacuer l'air surchauffé du bâtiment

### **II.9.2.1.D Refroidir les locaux :**

Le refroidissement des locaux peut facilement être assuré par des moyens naturels. Une première solution consiste à favoriser la ventilation (surtout nocturne, afin de déstocker la chaleur emmagasinée la journée) ou à augmenter la vitesse de l'air (effet Venturi, tour à vent, etc.). Un autre moyen consiste à refroidir l'air par des dispositifs naturels tels que des plans d'eau, des fontaines, de la végétation, des conduites enterrées, etc.

Au confort d'été répond la stratégie du froid : se protéger du rayonnement solaire et des apports de chaleur, minimiser les apports internes, dissiper la chaleur en excès et refroidir naturellement [57].

### **II.10 Conclusion :**

Le confort thermique constitue une exigence identifiée et justifiée dans le bâtiment public du fait de son impact sur la qualité des ambiances thermiques intérieures ; il est donc considéré comme un élément marquant de la qualité globale d'usage de ce type de bâtiments. Ce confort ne peut être assuré que par l'optimisation de l'isolation thermique, du critère de l'inertie thermique et bien sur la prise en considération des paramètres de l'architecture bioclimatique lors de sa conception et dans l'architecture vernaculaire.

La maîtrise des éléments passifs, contribuant au confort thermique, tels que l'isolation thermique, l'orientation des façades, les ouvertures, la compacité de l'édifice et l'utilisation d'un matériau à hautes performances thermiques minimisera sans aucun doute les déperditions et gains thermiques dont souffrent les édifices à caractère public.

Le confort thermique ne peut être obtenu que si la conception architecturale bioclimatique est prise en charge dans les projets. A cela s'ajoute l'intégration des matériaux de construction de hautes performances thermiques capables de répondre aux critères de conductivité et d'inertie thermique.

**III TROISIÈME CHAPITRE**  
**LE CONTEXTE DE LAGHOUAT**

---

#### **III.1 Introduction :**

La région des montagnes (djebel) d'Amour, et plus précisément la ville de Laghouat et les ksour voisins, en se familiarisant avec certaines des structures urbaines est très importante en raison de sa valeur historique, archéologique et urbaine. Ces monuments riches en superficies sont situés dans ces ksour dispersés çà et là, à des distances variables du siège actuel de la wilaya (ville de Laghouat). Il varie entre 15 km à l'est et 150 km à l'ouest. La plupart de ces ksour sont situés sur le versant sud des montagnes Amour et allongés sur les deux côtés est et ouest de Laghouat. Certains de ces installations sont encore très à de grand hauteur visibles pour les citoyen, tels que Tajmout, Ain Mahdi et d'autres, racontant aux générations présentes et futures de leurs ancêtres, qui ont vécu dans la région pendant des périodes successives. [76] et qui ont rencontré leurs récifs et leurs sentiers malgré la cruauté de leur nature. Et ceux qui ont disparu et deviennent les ruines des personnes vulnérables aux conditions naturelles sont fabriqués à partir de ce que vous aimez.

Dans la première partie de ce chapitre, nous allons aborder la société ksourienne de la région. Puis nous étudierons la typologie des ksour. Nous essayerons de définir le ksar, sa morphologie suivie par une étude de l'habitat ksourien et les matériaux de construction du ksar. Dans la deuxième partie, consistera en une étude contextuelle du secteur sauvegardé du vieux ksar de Laghouat. Nous tenterons par la suite d'analyser les quartiers principaux du ksar et d'étudier la typologie de l'habitat qui existe encore. Enfin, nous évaluerons l'utilisation des matériaux de construction entre locaux de type moderne ou de type mixte.

#### **III.2 La société ksourienne de la région :**

Il est difficile d'identifier la majorité des tribus stationnées dans la région et de déterminer la période au cours de laquelle elles y sont apparues en raison du déplacement continu qui a eu lieu au fil des siècles. Cet accroissement s'est intensifié au cours des 11<sup>e</sup> et 13<sup>e</sup> siècles après l'arrivée des beni Hilals au Maroc et de l'arrivée de conflits politiques et religieux fugaces. Les tribus berbères ont émigré de leurs terres d'origine et se sont installées à cet endroit, suivies par les délégations de tribus barbares et Hilaliens, en particulier dans la tribu Amour. le site était également le site de nombreuses tribus bédouines en raison de sa nature pastorale. Cet afflux des vagues humaines a créé une société semblable à une mosaïque, l'une des principales raisons pour lesquelles les conflits et les clans ont connu une croissance remarquable au cours de l'histoire. Il convient de noter que ces tribus étaient composées de clans distincts, de portée limitée chacune et les plus célèbres à la fin de l'ère ottomane. [76].

#### **III.3 Les ksour, architectures et typologies :**

Dans cette section, nous allons étudier la typologie des ksour selon quelques chercheurs :

Ces ksour contiennent des collections d'éléments architecturaux et artistiques similaires à ceux que l'on trouve dans certains édifices islamiques du Maroc, qui appartiennent à l'ère d'une époque qui pourrait le précéder, ce qui est difficile pour la tâche du chercheur par rapport aux récits oraux sur son établissement.

En raison de l'absence de données suffisantes concernant ces ksour, ce qui pourrait mettre son calendrier unifié permettant de ramener chaque ksar à son époque, les chercheurs ont eu recours pour diviser en modèles spécifiques sans être en mesure de donner une date précise pour chacun d'eux. Ces modèles se sont multipliés en raison de perspectives divergentes entre l'apprenant. L'équipe de chercheurs ressentis de cette façon à l'extérieur de la clôture devrait déterminer le style.

Sur cette base, les ksour ont été divisés en certains types. Et une autre équipe basée sur la planification interne du ksar, c'est-à-dire comment diviser les ruelles et les routes à l'intérieur, et l'équipe a construit la division en fonction de la présence de la Casbah dans le ksar ou de la non-existence, tout en critiquant les divisions précédentes et en s'appuyant sur des textes historiques et la forme du ksar qui doit être renforcée par des preuves matérielles, puisque la plupart des données historiques exposées à certains de ces établissements sont venues plus tard et non de façon contemporaine. [54]. [76]. En ce qui concerne la première division, on peut inclure ce qui vient par l'historien

##### **III.3.1 les types des ksour selon A.G.P.Martin :**

Pour la première division, l'historien **A.G.P.Martin** peut être inclus dans son étude des zones désertiques de la région de Touat, Gourara et Tédédilet. Cette étude est la première tentative de classification des ksour. Mais ce qu'on pense au chercheur, c'est qu'il s'en remette principalement à la forme générale du ksar et aux textes historiques à sa disposition, tout en négligeant le côté technique de l'édifice et les preuves archéologiques [71], [74]. Ainsi Martin voit qu'ils sont divisés en trois types seulement :

###### **III.3.1.1 Premier type :**

Le premier style ce comprend un ensemble de bâtiments appartenant à l'époque (Gétules) et maintenant très éloignés de l'eau. La chronique de ce groupe par Martin de la période préhistorique à 100 ans après la naissance J.C. la caractéristique la plus importante de ce type de ksour, c'est qu'elles partagent un nom commun, Où le mot (Aurir pour mâle ou femelle est de Taourirt) elle a également participé à leur emplacement construit sur les hauts lieux, construit de pierres et de grosses pierres. Et d'après les observations du chercheur, ces installations semblent

délaissées il y a longtemps. Par exemple, nous trouvons le ksar Taourirt à Burgan et le ksar Al-Sharaf betmouktane.

#### ***III.3.1.2 Deuxième type :***

Le deuxième type comprend les communautés résidentielles, remontant à la période de présence juive dans la région. Il est daté par Martin entre 100 et 600 J.C. Les installations de ce type sont bien meilleures que leurs prédécesseurs et sont moins éloignées des centres d'eau que les collections du premier type. Ce type de ksar est entouré d'un mur semi-circulaire construit en pierres plates et disposé horizontalement, semblable à la technique romaine utilisée dans le pont de Biskra. Il abrite également une mosquée à deux étages. Alors que la balise est située au centre, elle sert également de tour de guet.

#### ***III.3.1.3 Troisième type :***

Le troisième type est attribué à la plupart des ksour construits après le début du 7<sup>e</sup> siècle. Pour son histoire, Martin s'appuie sur des textes historiques. Ce schéma est attribué aux ksour des tribus berbères Znatah et des ksour arabes, en particulier après l'entrée de Bani Hilal dans la région.

### **III.3.2 les types des ksour selon Colonel Quenard:**

Dans la même veine, le colonel « **Quenard** » a procédé à la classification des ksour en s'appuyant sur ce qu'il avait dit de son prédécesseur, en ajoutant des données techniques relatives à chacun des modèles proposés. Sur cette base, il estime que ces établissements sont divisés en trois sections est les suivantes :

#### ***III.3.2.1 première section :***

Le premier type est une forteresse construite au-dessus des sommets des montagnes et prend une dans sa totalité une forme rectangulaire. Entouré de tours de pierre. Et ce style de ksour retourne le ksar de Taourirt à Burgan et le ksar Charouin à Gouarara est les mêmes. **Quenard** se demande s'il s'agit de forteresses barbares ou construites par d'autres gens sont difficiles à définir.

#### ***III.3.2.2 Deuxième section :***

Le second modèle : est compatible avec Martin, Quenard sélectionnez ce style dans une datation présence juive dans la région. Ce type comprend un ensemble de bâtiments de forme ronde. Contenue à l'intérieur de la tour d'observation et entouré par une clôture haute et avancé par un fossé. Ou l'autre technique est utilisée dans une pierre placée de manière horizontale, séparée par une rangée de pierres d'inclinaison et de forme alternée, tout en forme de lettre latine V, qu'il donne à ces bâtiments un semble facile à connaître.

#### ***III.3.2.3 Troisième section :***

Le troisième style : est un ensemble de bâtiments construits en briques non cuites, contiennent des tombes avec dômes, de forme circulaire.

### **III.3.3 Les types de ksour selon Le Dr Abdul Rahman Ayoub:**

Le Dr Abdul Rahman Ayoub est d'accord avec les précédents chercheurs en matière de partitionnement, tandis que se distinguent en nommant les patrons parce qu'elle dépend de l'aspect extérieur des édifices et à leur histoire aussi. Ce dernier estime qu'il est divisé comme suit. :

#### **III.3.3.1 *La catégorie rectangulaire ou ce qu'on a appelé la catégorie berbère :***

Le rectangle ou l'espèce dite berbère est probablement la plus ancienne des variétés, malgré le manque de preuves, en raison de sa similitude avec la formation du rôle de la grotte Troglodytes, le ksar est constitué d'un ensemble de pièces de forme rectangulaire adjacentes les unes aux autres. Ces salles sont sculptées dans la pierre ou construites au-dessus de la surface de la Terre. Son utilisation est restée constante à des périodes ultérieures. Des exemples de ce type sont les ksour de Nalout en Libye, et El Hedada et Matmata et Gumrasen en Tunisie, Taourirt, et ksar Scharf et Aghil à Reguène.

#### **III.3.3.2 *la catégorie carrée ou la catégorie romaine :***

Le type carré ou le type romain Ce type est similaire à la présentation des forteresses byzantines et des premiers rubans islamiques de Ribat Souss et Ribat de Monastir. Cette catégorie est considérée comme la catégorie la plus basse du Maghreb islamique, que ce soit en raison de son extinction, de l'effacement de ses caractéristiques ou de sa non-utilisation sous la forme connue dans d'autres établissements. Des exemples de ce type incluent le ksar de Malouka dans l'Adrar, qui conserve encore son caractère d'origine, ainsi que le ksar de Hassi Fagagir de Gouarara, l'ancien ksar de Tunis et le ksar de Tefillet.

#### **III.3.3.3 *Catégorie circulaire ou la catégorie arabe :***

Le type à circulaire ou variété arabe : remonte au début du 11<sup>e</sup> siècle et 5<sup>e</sup> Hijiri de notre ère. Ce motif est représenté par Dr Ayub est une catégorie avancée pour les articles susmentionnés, en termes de surface de stockage et de distribution. Cela aide à mieux maintenir l'inventaire agricole et permet de développer une architecture à plusieurs étages. Cette catégorie appartient à la plupart des ksour du Sud algérien, tels que le ksar Bani yazguen à Ghardaïa, le ksar Ain Mahdi, l'ancien ksar de Wergla, le ksar de la vallée de Rigg, le ksar de Mtlili. Quant à la deuxième opinion,[76] qui dépend de la division de la distribution interne représentée par « Capot Rey » où il voit qu'il est divisé en deux types principaux est les suivants :

### **III.3.4 les types des ksour selon « Ray Capot Rey ».**

selon « Ray Capot Rey » les types des ksour sont classifiés en deux genres principaux, comme suit.:

#### **III.3.4.1 Premier genre :**

Type I : Ce genre comprend des ruelles étroites et tordues se terminant souvent par des chemins escarpés. Cette espèce est datée du 5e siècle Hijiri /11<sup>e</sup>, apr. J.-C. siècle le ksar de Sidi Khaled Biskra lui revient.

#### **III.3.4.2 Deuxième genre :**

Le deuxième style : représenté par les ksour aux rues larges et droites, qui se croisent avec chacun de configuré à angle droit. Ce type peut être daté du début du 10e siècle AH/16<sup>e</sup> siècle après J.C. Et de ce genre peuvent être mentionnés le ksar Dawson près de la ville d'Awlad djalal, qui remontent à l'année 1861.[76].

#### **III.3.5 les types des ksour selon J. Bisson :**

Il existe une opinion différente dans la division des vues ci-dessus représentée par le chercheur J. Bisson dans son étude sur la région de Gourara. Selon l'opinion de ce dernier, il est nécessaire de se fier à l'existence ou à l'absence de Casbah dans le ksar, sans présenter de délai chronologique pour chacun de ces types. C'est pour ça les ksour sa divisée selon son opinion en quatre types : [77].

#### **III.3.5.1 Premier modèle :**

Il comprend les ksour avec des Casbah, ce dernier doit être situé plus haut que le ksar où toutes ses parties doivent être surveillées.

#### **III.3.5.2 Deuxième modèle :**

Comprend les ksour qui ne contiennent pas de Casbah. Dans ce cas, les espaces de stockage sont adjacents aux maisons et le ksar se caractérise par sa taille réduite.

#### **III.3.5.3 Troisième modèle :**

Le troisième type est le ksar avec un ou plusieurs Casbah, contenant la mosquée et l'école coranique, tandis que le rond est réparti autour de lui dans les endroits bas.

#### **III.3.5.4 Quatrième modèle :**

Il est le ksar de nature religieuse. Il est avantageux de ne pas avoir besoin de moyens de défense tels que des clôtures, des tours ou d'autres, car depuis la protection du bon tuteur qu'est le gardien qui protège et paie les dommages. Ces divisions ont été critiquées par d'autres chercheurs, par exemple J. Échallier.

#### **III.3.6 Les types des ksour selon J. Échallier:**

D'autres chercheurs, dirigés par J. Echallier, ont critiqué ces divisions et les considèrent comme divisées en six modèles. Cette division ne découlait pas uniquement de documents historiques, mais était le fruit d'une étude de travail et sur le terrain de plus de trois cent trente-trois de ksar. Elle était également basée sur l'analyse d'images aériennes à différentes échelles (1/20 00 et 1/200 000), Ensuite, comparez-les à leurs sites, en plus de ce qui a été recueilli dans les

découvertes archéologiques, en particulier les pièces de poterie et des restes de végétarien. Ces types de motifs développés par le chercheur se composent de deux catégories et se divisent donc comme suit.

#### ***III.3.6.1 Premier type :***

Comprend ce type d'un ensemble de bâtiments, partagé en points entre eux, dont le mur extérieur est construit sur les bords du plateau rocheux non poli et est dans un état d'effondrement déplorable. Ce modèle est divisé en deux parties (A et B), qui diffèrent légèrement par la taille des bâtiments et la technologie utilisée.

##### ***III.3.6.1.A Premier type (a) :***

Le premier motif (a) consiste en un groupe de bâtiments monumentaux construits au-dessus d'une élévation naturelle, qui semble avoir été inchangée par l'homme. Il est entouré d'un mur de petites et de grosses pierres mélangées à de la boue et prend souvent une forme circulaire ou semi-circulaire et son épaisseur varie de 40 à 60 cm à certains endroits. Contient en son milieu un espace spacieux vide. Ce que l'on remarque sur ce type que la muraille touche les bords du rocher construisent au-dessus, et que ses structures internes, dispersées pour la plupart, indiquent l'ancienneté de l'édifice lui-même. Ce modèle est considéré comme un endroit pour stocker des produits agricoles et un refuge pour la population lorsque cela est nécessaire.

##### ***III.3.6.1.B Premier type (b) :***

Il est similaire au modèle ci-dessus en termes d'emplacement et de forme du mur d'enceinte, mais il est plus petit et meilleur technique que celui-ci. Souvent construits au pied de plateau ce type de ksar se trouvait des villages construits en petites pierres, accrochés à la boue et aux vestiges de jardins.

#### ***III.3.6.2 Deuxième type :***

Qui semble plus sophistiqué que le premier, notamment en termes de technique de construction et sa structure, est divisé à son tour en deux parties.

##### ***III.3.6.2.A Deuxième mode (a) :***

Inclus les ksour construits au-dessus de la hauteur naturelle après que l'être humain a fait les ajustements nécessaires en fonction de ses besoins. Il est entouré d'un mur d'enceinte épais bien construit qui contient rarement une tour de guet qui fait avancer l'entrée principale du ksar. La paroi est prend de forme semi-circulaire, avec des nervures incurvées et des têtes multiples.

##### ***III.3.6.2.B Deuxième mode (b) :***

Le deuxième modèle est similaire au précédent en ce qui concerne sa forme circulaire et ses bonnes fortifications : il occupe les sommets des montagnes ou les points hauts des lieux après sa configuration sont construits par de petits bâtiments, qui sont souvent les ruines. Les deux

catégories sont difficiles à distinguer, mais les différences entre elles semblent évidentes dans leur répartition interne.

#### **III.3.6.3 Troisième type :**

Malgré sa similitude avec les deux types mentionnés ci-dessus, notamment en ce qui concerne l'utilisation de pierres mélangées avec de l'argile et sa présence dans les hauteurs, est toutefois unique dans la planification globale. Il est rectangulaire ou carré et contient des bâtiments de pierre mélangés avec de la boue sur de hauts lieux naturels non préparés, comme on peut le voir dans le deuxième motif. Ce type de ksour est entouré d'un mur, souvent entouré d'un fossé et totalement dépourvu de tours à tour, à l'exception d'une tour ou de deux tours de guet. On accède au ksar par un pont reliant l'entrée au côté opposé. Ce style se caractérise par son architecture raffinée, avec ses angles et sa structure régulièrement construits.

#### **III.3.6.4 Quatrième type :**

Le quatrième type, est un bâtiment construit avec d'énormes pierres de sel mélangées à de la boue, ce qui est unique aux variétés précédentes. Quant à sa planification générale, elle semble quelque peu imprécise et complexe en raison de l'absence du mur d'enceinte [76].

#### **III.4 Signification du ksar :**

Le mot se prononce « *gsar* ». C'est une altération phonique de la racine arabe *qasr* qui désigne ce qui est court, limité. C'est-à-dire un espace limité, auquel n'a accès qu'une certaine catégorie de groupes sociaux. C'est un espace confiné et réservé, limité à l'usage de certains. Le *ksar* (pl. *ksour*) est un grenier, mieux encore un ensemble de greniers bien ajustés.

Les lectures de l'histoire ont résolu la question de l'apparition du *ksar* par l'invasion hilalienne qui aurait contraint les Berbères, après une longue résistance, à quitter la plaine et les oasis pour se replier dans la montagne et les emplacements fortifiés. Ibn Khaldoun (1332-1406) nous dit à ce propos : « *les premiers ksour datent probablement du 1<sup>er</sup> et des 2<sup>èmes</sup> siècles avant J.-C. Ils constituent sans doute l'extension progressive jusqu'à l'Atlas saharien du phénomène de sédentarisation des nomades berbères.* »[72]

#### **III.4.1 Morphologie du ksar :**

Généralement le ksar est constitué de trois entités distinctes : un espace habité (habitation d'ici-bas, un terroir et un espace de la mort ou habitation de l'au-delà). C'est une occupation agglomérée spécifique, caractérisée par une forme urbaine traditionnelle fortifiée.

Les constructions obéissent à la même architecture. Il s'agit d'un ensemble de maisons réparties sur un rez-de-chaussée ou rarement un étage autour d'une cour intérieure. Le *ksar* se présente ainsi : c'est une forme compacte, de couleur terre, horizontale, directement en relation avec un espace vert, la palmeraie, le terroir. La forme s'organise selon un principe où l'on distingue différentes échelles d'appropriation de l'environnement [72] :

***l'édifice*** : Habitation ou édifice public.

***L'unité urbaine*** : Association de plusieurs édifices organisés le long d'un axe (*zkak*) ou autour d'une place (*rahba*) définissant une unité autonome appropriative par le groupe.

***La cité (ksar)*** : L'ensemble des entités en articulations structurées, hiérarchisées, faisant émerger un centre qui identifie l'échelle habitée par la communauté.

***le territoire*** :

L'ensemble des *ksour* implantés généralement selon des principes morphologiques communs, partageant une succession d'événements significatifs (histoire), définissent, une fois une relation d'échange, un champ d'appropriation pour la population de la région.

La taille du *ksar* et l'importance de son espace bâti variant en fonction des capacités nourricières du terroir. Quand celui-ci en perd, le *ksar* est abandonné ; quand, par contre, le terroir est capable, de se développer pour recevoir la croissance démographique, le *ksar* se démultiplie. Un autre *agham* vient alors se juxtaposer au premier et ainsi de suite jusqu'à la limite des possibilités du terroir. À ce moment-là, une autre oasis se développe plus loin avec son propre *ksar* qui pourrait en appeler d'autres [72].

Le *ksar* se trouve toujours en aval sur le cheminement hydraulique. Pour des raisons évidentes « d'économie des eaux », la partie du *ksar* consacrée à habitat se situe toujours en amont du terroir, permettant ainsi à l'eau de servir d'abord aux besoins domestiques avant d'atteindre la zone de culture.

en générale, le *ksar* est entouré, d'un *mur* (rempart). Parmi les principales caractéristiques, des *ksour* on trouve les fortifications. Loin d'être un indice militaire, les murailles peuvent découler d'une mentalité collective où l'ordre est symbolisé par la limite matérialisée. Les enceintes des *ksour* peuvent constituer des frontières délimitant le monde organisé par rapport à celui qui est chaotique.

La porte dans le *ksar* est l'image emblématique de cette double fonction de communication et de protection assurée par l'enceinte. Elle est aussi un lieu de réunion ou de résidence, par la présence de salles souvent vastes aménagées de part et d'autre de l'accès. Cette exaltation de l'enceinte et des portes ne doit pas pour autant conduire à une vision rigide de l'espace urbain constituant une sorte de monde clos auréolé d'irénisme. Les portes sont au moins au nombre de deux, l'une *gabli* (ouverte au Sud), et l'autre *shargi* (ouverte à l'Est). Elles sont souvent « gardées » par des sépultures d'*awliya* (saints).

Une porte (souvent en chicane), percée dans les remparts, s'ouvre dans une rue centrale (*darb*) sur laquelle prennent des rues secondaires et enfin de petites venelles (*zqāq*) qui finissent en impasse menant aux différentes habitations.

#### III.4.2 L'habitat Ksourien :

- le *ksar* a une forme compacte, de couleur terre, horizontale, directement en relation avec un espace vert, la palmeraie. C'est l'horizontalité qui est la règle dans ce type d'établissement.
- L'architecture ksourienne est le produit d'une culture de masse nourrie de la quotidienneté, de l'environnement et du génie local et non pas une production d'élite. Cet habitat exprime des contraintes [72].
- Les maisons obéissent au même plan, à savoir l'existence d'une cour intérieure toujours carrée, accessible par une chicane à partir d'une ruelle. Cette cour est en plus très fonctionnelle. Elle peut, selon les circonstances, faire fonction d'étable pour les animaux ou de lieu de dépôt provisoire. Autour de la cour sont disposées les *byût* (les pièces). Ces pièces adjacentes étalées en rez-de-chaussée, rarement en étage, sont éclairées et aérées par l'intermédiaire de cette cour.
- La *bayt* (pluriel *byût*) est la cellule de base, généralement allongée de 4 mètres de profondeur et d'environ 2 mètres en hauteur et en largeur on constate la juxtaposition de ces *byût* et leur superposition
- l'extérieur, d'une muraille élevée, sans ouverture, compacte, analogue aux remparts d'un établissement fortifié. L'une de ces *byût* fait office de cuisine. Elle était généralement sans toit pour permettre l'évacuation des fumées résultant du feu de bois servant à la cuisson.
- L'espace intérieur de la maison est découpé selon une conception du sacré et non pas seulement en fonction de besoins concrets et objectivables : en général, deux chambres, une cour intérieure (*rahba*), un petit magasin à provisions (grenier) et un petit enclos pour les animaux (*taghemmin*). Ce petit enclos est d'une importance capitale, en tant que premier broyeur des déchets ménagers.
- Un autre élément très important et même structurant de la maison ksourienne est les patios ou *wast dār*. C'est autour de cet élément que s'organise la maison. Chaque face s'ouvre sur un espace appelé *bayt*. Quand des contraintes techniques empêchent une de ces ouvertures, sur un côté mitoyen à une autre maison où donnant sur l'extérieur, l'ouverture est simulée. Une porte aveugle est dessinée à même le mur, bien marqué par un arc et ses décors.
- Les portes, seuils et ouvertures marquent la transition entre deux sortes d'espace. Leur franchissement peut indiquer le passage d'une personne d'un état à l'autre. Portes et fenêtres, ouvertures indispensables sont aussi les parties les plus vulnérables d'un édifice. La porte invite à l'entrée et en permet le contrôle. Les portes sont.
- l'arc le plus usité au Maghreb est l'arc plein cintre outrepassé ou en fer à cheval, qui symbolise la défense et la protection magiques. Il est censé éloigner le mauvais œil, la malédiction et les mauvais augures.
- la porte est souvent prolongée d'une *sqîfa*, sorte de vestibule où parfois est confectionnée

une banquette maçonnée (*dukkâna*) permettant au seuil d'être marqué dans sa fonction de filtre. Contrairement à ce que l'on a pu penser ou écrire, cette *sqîfa* n'est pas un espace où le propriétaire recevait ses clients. Elle révèle plutôt la structuration polynucléaire de la famille[72].

#### **III.5 Méthodologie de prise en charge des Ksour :**

La stratégie de prise en charge de l'habitat ksourien doit être définie en fonction de son état de dégradation, des possibilités de réhabilitation et des possibilités de changement d'usage des ksour de l'habitat vers le commerce ou le tourisme, par exemple. C'est ainsi qu'on peut envisager les scénarios suivants :

- Réhabilitation des ksour avec introduction des différentes viabilités pour un usage résidentiel ;
- Réhabilitation des ksour avec introduction de certaines viabilités pour un usage commercial et touristique ;
- Remplacement progressif du bâti ancien en tenant compte des spécificités locales à travers la construction de nouveaux programmes adaptés [73].

##### **III.5.1 Réhabilitation des Ksour pour l'habitat :**

L'originalité des Ksour s'exprime dans l'utilisation des matériaux, les formes et l'agencement des espaces, mais aussi à travers l'utilité et le rôle de chaque espace bâti. Cependant, la connaissance des matériaux utilisés, les techniques de mise en œuvre et le fonctionnement de la vie dans les Ksour sont nécessaires pour mener à bien le projet de leur réhabilitation.

Par réhabilitation, on entend la valorisation et la sauvegarde, qui situent les Ksour dans leur réalité socio-économique, historique et culturelle, pour prévoir leur mise à niveau et la relance de leur dynamisme. Pour réintégrer ces constructions dans la vie courante, la méthodologie doit être axée sur les étapes suivantes :

- Inventaire détaillé sur l'état de dégradation des ksour.
- Confortement de l'assise des murs d'enceinte.
- Le renforcement des bases des murs par la maçonnerie de pierres.
- La reprise et la consolidation des points névralgiques et des effondrements de la maçonnerie en élévation.
  - La mise en place des revêtements du sol et des revêtements des ruelles par le matériau adéquat.
- Travaux permanents d'entretien et de maintenance.
- Amélioration des caractéristiques mécaniques du matériau terre (par les procédés de stabilisation) et utilisation des enduits compatibles aux constructions en terre [73].

#### **III.6 classement de ksar comme secteur sauvegardé :**

La loi n° 98-04 du 15 juin 1998 relative à la protection du patrimoine culturel, notamment les articles 2, 8, 16, 41,42 et 43 classe les ksour dans la catégorie des secteurs sauvegardés

art 41 : sont érigés en secteur sauvegardé, les ensembles immobiliers urbains ou ruraux tels que les casbahs, médinas, ksour, villages et agglomérations traditionnels caractérisés par leur prédominance de zone d'habitat et qui, par leur homogénéité et leur unité architecturale et esthétique, présentent un intérêt historique, architectural, artistique ou traditionnel de nature à en justifier la protection, la restauration, la réhabilitation et la mise en valeur

Art. 43 : les secteurs sauvegardés sont dotés d'un plan de sauvegarde et de mise en valeur tenant lieu de plan d'occupation des sols [69].

#### **III.6.1 plan permanent de sauvegarde et de mise en valeur du secteur sauvegardé du vieux ksar de Laghouat :**

Pour ce qui concerne l'ancien ksar de Laghouat, le plan permanent de sauvegarde et de mise en valeur de l'ancien ksar de Laghouat, conformément à ce règlement, est appliqué à une partie de la région de la municipalité de Laghouat située au centre-ville. Quartier Garbiat et safah, quartier ben Badisse et tapis vert en ajoute rocher Fromentin qui considérer comme patrimoine national.

Ce secteur a été classé par la loi n ° 89-04 du 11 juin 1889 sur la protection du patrimoine culturel, en particulier son article 41, et par le décret exécutif n ° 03-324 du 10 octobre 2003, qui définit les modalités de préparation du plan permanent de sauvegarde et de valorisation des secteurs préservés. Décret exécutif n° 1-141 du 29 mars 2011, qui prévoit la création du domaine réservé de l'ancien ksar de Laghouat et la délimitation de ses limites.

#### **III.7 L'étude contextuelle :**

##### **III.7.1 Situation géographique et administrative :**

Le terme de Laghouat vient selon certains de Ghout pluriel Aghouat signifiant maisons avec jardins, selon d'autres, c'est un terme berbère qui désigne : « montagnes en dents de scie »[85].

Selon Ibn-Khaldoun, les Béni-Aghouat sont le nom d'une tribu berbère qui habitait la région et cette dernière serait liée à la confédération des Maghraoua.

Laghouat, porte d'accès aux espaces sahariens, situés au pied du contrefort de djebel Amour, à 432 km au sud d'Alger sur l'axe de la RN n° 1 reliant la capitale au sud du pays, à 751 m d'altitude à une latitude de 33°41' Nord et à une Longitude de 2° 53' est.

Elle est bâtie sur 3 hauteurs rocheuses :

- La première domine l'oued M'Zi et porte le marabout de Sidi Abdelkader.
- La deuxième, au centre, porte l'hôpital militaire datant de la prise de Laghouat (le 4 décembre 1852. Fort Bouscarène).
- La troisième, à l'Ouest, porte la mosquée de Sidi El Hadj Aissa.

### **III - Troisième Chapitre**

Au Nord, en bordure de Laghouat, une chaîne de montagnes comportant en particulier le « Ras Aioune » et qui domine la prise d'eau \_ le Milok \_ le Djebel Lazrègue. Au sud, la région des Dayas (dépression). Plus à l'Ouest se trouve le « Rocher des Chiens » séparé des trois premières par une dépression [69]. Division administrative et de la population :

La wilaya de Laghouat est divisée en 24 communes. L'état d'une superficie de 25 052 km<sup>2</sup>.

**III.7.2 Géographiquement :** est à environ 400 km de la capitale d'Alger et la route nationale numéro 01 passe à travers. La Wilaya de Laghouat est limitée.

- Du nord, wilaya de Tiaret à 270 kilomètres.
- De l'est, wilaya de Djelfa avec une distance de 103 km.
- Du sud, wilaya de Ghardaïa avec une distance de 189 km.
- à l'ouest de wilaya de Bayadh à 230 kilomètres.

#### **III.7.3 Climatologie :**

L'altitude dans les montagnes de Djebel Amour donne à la région un climat contrasté, et se caractérise notamment par :

- des précipitations qui varient selon la région entre 300 et 400 mm par an.
- des températures élevées en périodes estivales (jusqu'à 40 c°), et froides en hivers, avec des chutes de neige et des gelées blanches.
- la faible humidité relative de l'air variant entre 50-60 % en été à 70-80 % en hiver.
- L'évaporation de l'ordre de 1000 mm par an, variant de 0,5 mm/jour en hiver à près de 5 mm/jour en été.

Dans la zone sud, le climat est de type saharien et la pluviométrie y varie de 50 à 100 mm par an avec :

- des températures élevées en périodes estivales (jusqu'à 45 c°), et relativement froides en hiver.
- Une faible humidité relative de l'air variant entre 40-50 % en été à 70-75 % en hiver.
- Une forte évaporation de l'ordre de 1700 mm par an allant de 1,7 mm/jour en hiver à près de 8,1 mm/jour en été.

Voici par ailleurs, les moyennes annuelles des principaux indicateurs relatifs aux données climatiques pour la région de Laghouat (Station météorologique de l'aérodrome de Laghouat)[75].

#### **III.7.3.1.A Pluviométrie :**

Table III. 1. Pluviométrie de la ville de Laghouat [PATW Laghouat -Décembre 2013]

Mois	Sept	Oct.	Nov	Déc.	Jan	Févr.	MAR	Avr.	Mai	Jun	Jui	Aou	Moy. Annuelle
Précipitations (mm)	18,6	15,9	10,1	0,4	6,3	0,4	50,6	42,5	22,9	29,6	8,1	6,6	212

### III - Troisième Chapitre

La moyenne des précipitations sur les dix dernières années est de 212 mm/an ; le mois le plus arrosé est le mois de mars avec 50,6 mm alors que décembre et février sont paradoxalement les mois les plus secs.

#### III.7.3.1.B Températures :

Table III. 2.Température annuelle Laghouat [PATW Laghouat –Décembre 2013]

Mois	SEPT.	OCT.	NOV.	DÉC.	JAN	FÉVR.	MAR	AVR.	MAI	JUN	JUI	AOU	Moy. annuelle
Températures (°C)	24,9	18,7	13,2	10,2	8,7	9,1	12,1	19,0	21,6	25,9	31,6	31,3	18,8

Le mois le plus frais est, avec une moyenne de 8,7 °C, le mois de janvier alors que le mois d'août reste le mois le plus chaud de l'année.

#### III.7.3.1.C Humidité :

Table III. 3.L'humidité moyenne annuelle — Laghouat [PATW Laghouat –Décembre 2013]

SEPT.	OCT.	NOV.	DÉC.	JAN	FÉVR.	MAR	AVR.	MAI	JUN	JUI	AOU	Moy. annuelle
45	49	57	49	59	52	55	46	43	43	28	29	46

Janvier est le mois de l'année le plus humide (59 %) et juin, le mois le plus sec avec 28 %.

### III.8 étude ksar de Laghouat :

#### III.8.1 L'histoire du vieux ksar :

Retour aux anciennes origines de Laghouat comme en témoignent certaines Pierres dessinées datant de la période néolithique de 09 à 06 mille av. J.-C. et sont répartis entre les municipalités. Sidi makhlouf, Hassbiya, Mellak, Rukoussa, Hweita, El Gheishah Laghouat est dérivé du mot Goutte pluriel Aghouat, ce qui signifie les maisons entourées d'arbres, mais Ibn Khaldoun le voit comme une tribu berbère dans les faubourgs du désert entre Zab et Djebel Rashid. La fondation du Laghouat a été établie jusqu'aux premières années de l'arrivée de Bani Hilal en 1045 dans la région.

Nous pouvons conclure de ce groupe de vues que la ville de Laghouat pourrait être la première en tant que petite communauté réunie par mghraouahet le moment où l'arrivée de Bani Hilal à la région a élargi son architecture et lui a donné un caractère arabe et est devenue une ville combinant civilisation et style bédouins de différents villages situés au plateau et déserts d'Algérie. Et le monde arabe en général depuis les temps anciens [69].

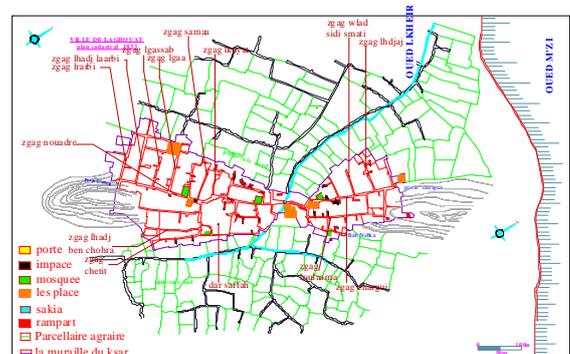


Figure : III. 1 ville de Laghouat plan cadastral 1853 [PPSMVSS de ksar Laghouat]

### III - Troisième Chapitre

Ksar de Laghouat a été érigée à l'ouest de la vallée de M'zi sur le versant nord du Mont Tizgrarine entouré d'oasis des vergers de fruits de palmier où il y avait du Nord et du Sud OASIS, divise le ksar d'oued El kheir (ramification de vallée M'zi) le ksar à deux Quartiers, le quartier EST était habité par la tribu des «ehlaf» et. Le quartier occidental était habité par la tribu des« Sargaine ».

Comme pour les autres ksour saharien, le ksar de Laghouat se caractérise par sa structure urbaine, qui comprend des ruelles étroites menant aux places et aux installations publiques de la mosquée, le marché et le cimetière qui existait à l'entrée du ksar, ainsi qu'une série de clôtures, portes et tours. Qui a dit « Ayachi» A été effectuée dans la région en 1663. L'importance de l'emplacement stratégique de Laghouat sur la route du convoi et son exposition fréquente à l'invasion a conduit à accorder plus d'attention à la fortification de la ville, ce qui a conduit à la construction de tours, murs et portes [69].

#### III.8.2 L'évolution de ksar de Laghouat :

On peut diviser le développement de la ville de Laghouat en trois périodes de temps, la première a été de la période précoloniale, la deuxième est la période coloniale et la troisième est la période postcoloniale.

##### III.8.2.1 Première ère :

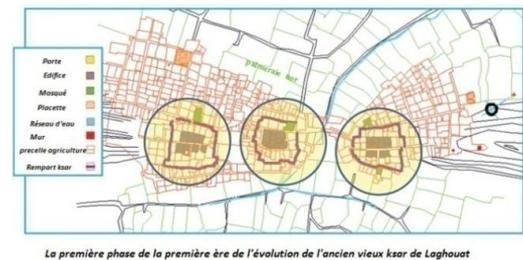
La première période a été caractérisée par plusieurs étapes :

##### III.8.2.1.A Une première phase :

Le ksar a été divisé en trois petites communautés dispersées le long du versant nord du mont Tizgrarine, chaque assemblée étant indépendante et entourée d'un petit mur. Chaque assemblée comprend une mosquée, une cour et un cimetière.

##### III.8.2.1.B Une deuxième phase :

À ce stade, les communautés résidentielles ont commencé à s'étendre en dehors de leurs murs. Une route principale reliant ces communautés a ensuite été construite, axe est-ouest viable sur le plan commercial.



La première phase de la première ère de l'évolution de l'ancien vieux ksar de Laghouat

Figure : III. 2 La première phase de la première ère de l'évolution de l'ancien vieux ksar de Laghouat [PPSMVSS de ksar Laghouat]



deuxième phase de la première ère de l'évolution de la vieux ksar de Laghouat

Figure : III. 3 Deuxième phase de la première ère de l'évolution du vieux ksar de Laghouat [PPSMVSS de ksar Laghouat]



troisième phase de la première ère de l'évolution de l'ancien vieux ksar

Figure : III. 4 Troisième phase de la première ère de l'évolution de l'ancien vieux ksar. [PPSMVSS de ksar Laghouat]

#### III.8.2.1. Une troisième phase :

La troisième phase a été intégrée aux communautés résidentielles en deux parties, à l'est, habitées par la tribu des Ahlaf et à l'ouest, par la tribu des ouled Sargaine, encerclant les murs du ksar, construisant d'énormes briques jusqu'à 4 mètres, soutenus par quatre tours, traversant la clôture. Entre les deux tribus, le tissu urbain du ksar se caractérisait par sa densité, le chevauchement des maisons, le tortillage des routes et des impasses, caractérisées par leur importance du public au privé.[69].

#### III.8.2.2 La deuxième ère :

Deuxième période après l'occupation française de Laghouat en 1852, l'administration française décida de faire de Laghouat une ville militaire conformément au décret du 28 mars 1871, qui divisait l'Algérie en deux régions (Cité militaire du Nord et du Sud). Ainsi pris Laghouat comme une base militaire à occuper le sud de l'Algérie et c'est ce qui rend Laghouat ville militaire par excellence.

Le projet de faire de Laghouat une base militaire, le général « Du Barail », a été codifié par le maréchal « Rondon », qui était alors gouverneur de l'Algérie occupée.



Figure : III. 5 Première phase des 2 ères de l'évolution de l'ancien ksar de Laghouat. [PPSMVSS de ksar Laghouat]



Figure : III. 6 Deuxième phase de la deuxième ère de l'évolution du vieux ksar de Laghouat. [PPSMVSS de ksar Laghouat]

La plupart des points le plus remarquables de ce projet sont les suivants :

-L'enlèvement et le remplacement des ruines des tours effondrées avec la construction de deux grandes fortifications, fort Bouscarène (1857) et fort Morand (1856).Retrait d'anciennes clôtures et des murs nouvelles érections plus spacieux.

-La mise en place d'une caserne militaire à la périphérie de la ville.

-Développez les rues jusqu'à cinq mètres.

La rue Cassaigne était ouverte le long des oasis du nord.

La construction du noyau européen qui était caractérisé par les nouveaux tissus urbains et de voiries plus larges et perpendiculaires et contiennent des placettes en mention, le plus connu la place « Du Barail et la place « Randon » et la place d'étoile [69].

### III.8.2.3 La troisième ère :

La troisième ère après l'indépendance a vu une expansion remarquable surtout Laghouat en raison de l'oasis où certains sièges administratifs étaient stationnés le long de la rue, qui était une ville principale plaque tournante élargit structurée avant de

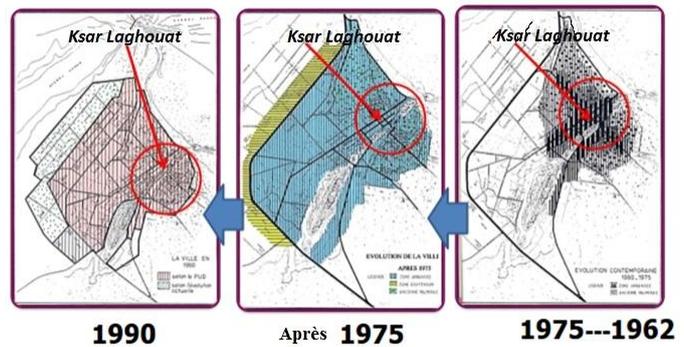


Figure : III. 7 développement de la ville de Laghouat de 1962 à 1990. [PPSMVSS de ksar Laghouat]

vous remplacez la route nationale 10 et il est à noter que la ville s'élargissait vers un À l'Ouest et du Nord-Ouest d'obstacles naturels comme vallée M'zi plus et visage du mont Moukrane qui visaient l'agrandissement du côté ouest, ont également été l'introduction d'un nouveau type de logement ou du « ZHUN ». La carte présente les trois étapes de développement.

### III.8.2.4 Le temps ou l'état actuel :

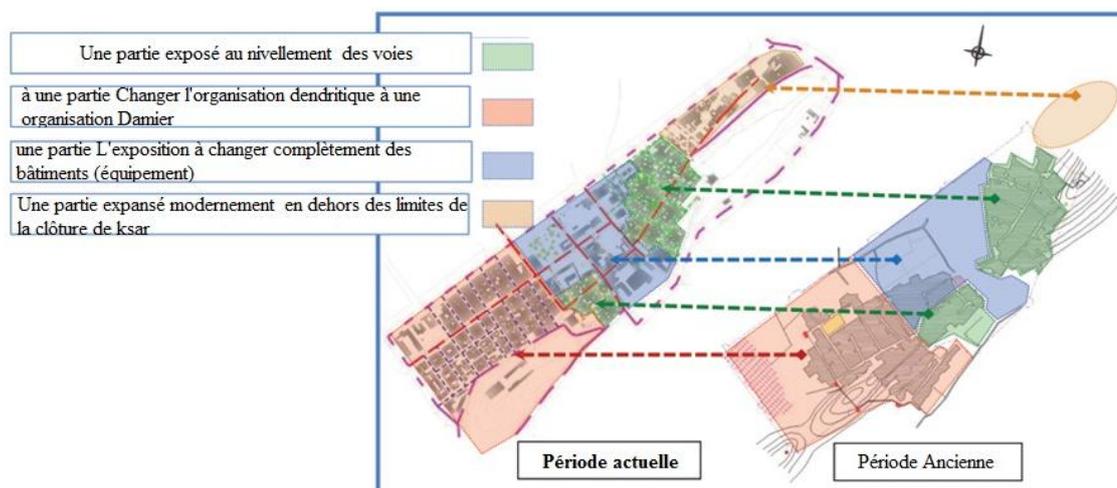
Pendant la période de l'indépendance, nous pouvons résumer les changements qui ont eu le lieu au niveau du secteur sauvegardé de ksar de Laghouat dans les points suivants :

1. Édifier la zone de Zarbia vert (Zarbia el Khadra)
2. Le ksar est devenu à la frontière sud-est de la ville de Laghouat
3. Le renouvellement et le changement la fonction de la plupart des équipements (la prison devenue musée, par exemple)
4. La rénovation de nombreux bâtiments résidentiels
5. La prolifération des activités commerciales et services largement notamment dans le quartier Al Garbiat. [69].

### III.8.3 Les changements dans le tissu urbain :

Comme le montre la figure III.8, nous intégrons les parties en tissu urbain n'a pas été exposés aux mêmes changements. Nous pouvons citer à titre indicatif :

- Au niveau de Zegag el Hedjaj et de la partie supérieure de Quartier Safah ont été réglées et la continuation des ruelles et des rues situées au niveau du Quartier Garbiat de l'Ouest a été à l'intersection de nombreux nouveaux axes et a modifié l'organisation de dendritiques au jeu d'échecs comme changer la forme de fragmentation.
- Au niveau de la partie inférieure des quartiers de Zegag el Hidjaj et le quartier Safah ont été complètement remodelés et la nature du textile est devenue principalement des équipements publics à service public.
- Au niveau du tapis vert, ce tissu a été créé deux blocs et est situé à l'extérieur de la clôture.



Au niveau de Quartier Garbya ouvrir de multiple axes et changement de l'ancien organisation traditionnel

changement devient-il sur la structure urbaine de ksar de Laghouat

Figure : III. 8 Changements deviennent-ils sur la structure de ksar de Laghouat. [PPSMVSS de ksar Laghouat]

#### III.8.4 Les limites et les caractéristiques de secteur sauvegarder :

La zone concernée comprend le ksar de Laghouat, situé au centre de la ville, qui constitue le premier noyau de la ville de Laghouat, comme en témoigne le développement historique de la ville, et comprend les quartiers suivants, Al-Gharbia, quartier Safah, Quartier Zegag el Hedjaj, Quartier Tapis vert, avec une superficie estimée de cet espace 30 hectares et le nombre de ses maisons autour de 1500 habitats.

La région du vieux ksar de la ville de Laghouat et qui fait l'objet du plan de protection PPSMVSS délimitée par :

- du Nord-Ouest la rue d'Indépendance et l'Oasis Nord
- du nord-est la vallée de M'Zi (oued M'Zi)
- du côté sud-est oasis sud et le mont Tizigrarine
- et au sud-ouest la caserne militaire DCA

#### III.8.5 Les Quartiers du ksar

Le plan comprend le plan de chacun des quartiers suivants :

1. Quartier « Gharbia »
2. Quartier E'safah
3. Quartier Zgag el hadjedj
4. Quartier Zarbia vert
5. en plus Rochis Fromentin qui est considéré comme un patrimoine naturel et national classé.

#### III.8.6 Les zones homogènes : les quartiers de ksar

Selon l'analyse de l'historique et typologique du ksar de Laghouat, nous trouvons qu'il existe quatre régions homogènes sont les suivants :



Plan des zones homogènes

Figure : III. 9 présent plan des zones homogènes de ksar de Laghouat. [PPSMVSS de ksar Laghouat]

Table III4 . présent plan des zones homogènes de ksar de Laghouat[69].

<b>zone 1</b>	La plupart d'entre eux ont été construits avant la période coloniale	Tout le quartier Zgag el hadjedj sauf les arcades qui dominant sur la place d'étoile et tous les équipements publics (Musée moudjahid et l'école primaire Mehboubi El Hadj. – la partie supérieure de quartier E'safah à proximité de la mosquée E'safah (grande Mosquée), à l'exception de ce dernier – la partie nord-est du quartier Gharbia et comprends l'ancienne mosquée	Et il comprend l'ensemble, et la plupart des habitats anciens et la typologie caractère ksourien logement (contenant de la cour) * En pente au sol * Peu de magasins de commerce ou de la rareté
<b>Zone 2</b>	Il a été reconstruit pendant la période coloniale	Une grande partie du quartier Gharbia adjacent à la route double ou une rue commerciale privée * Certaines parties des quartiers E'safah avec son caractère commercial. * Une partie de la ruelle et du quartier des pèlerins (Zgag el hadjedj) qui est dépendant à la place d'étoile.	Des habitats qui ne contiennent pas des cours Dominé par l'utilisation d'arcades dans les couloirs Nature commerciale et des services, où la majorité des magasins et des emplois libres dans la région. La plupart des habitats à de deux étages
<b>Zone 3</b>	Construit pendant la période coloniale	Il comprend tous les services publics, à l'exception des mosquées (dont seulement) mosquée E'safah	Les équipements publics et les centres administratifs et de sécurité Il est considéré comme zone de tissu architectural coloniale avec quelques rénovations mineures
<b>Zone 4</b>	Tous ont été construit après l'indépendance	Et il comprend le quartier Zarbia vert ou tapi vert.	Tissu architectural et l'émergence de nouvelles de style

## Étude du tissu urbain du ksar de Laghouat

**Composant du ksar :** le ksar se compose de trois éléments :

**l'espace non bâti :** et comprends des espaces libres les placettes et les jardins

**l'espace bâti :** et il comprend aussi des habitats et des magazines de commerces et des monuments historiques

**Les routes et les différents réseaux :** et comprends des routes goudronnées et ruelles en plus des réseaux d'eau, d'électricité et de gaz. etc. [69].

### III.8.6.1 Structuration du tissu urbain et les axes structurants

Le tissu est structuré avec l'axe principal reliant la porte orientale/ Bab El-Wad/ Bab El-Dahrawy / Porte Ouest et tous les axes et les rues. Forme sinueuse (irrégulier) et L'axe structuré a conservé sa trajectoire, mais a pris une forme droite qui a affecté la forme des îlots/cadre bâtis et il en a été de même pour les autres axes. La position de l'axe structurel après la connexion des deux entrées a été définie par le colon français pour la relier entre les pôles des religieux/église/armée/caserne/garder son cours, mais prendre une forme droite qui affectait la forme des îles/bâti/et identique pour les autres axes. L'émergence d'un autre axe perpendiculaire au premier, faisant que le cadre bâti se développe en dehors des limites du mur du ksar. Actuellement, le tissu a conservé les axes précédents et l'axe parallèle du premier axe séparant le ksar de l'autre tissu est devenu un centre commercial.



Figure : III. 10 présente les axes structurants de ksar. [PPSMVSS de ksar Laghouat]

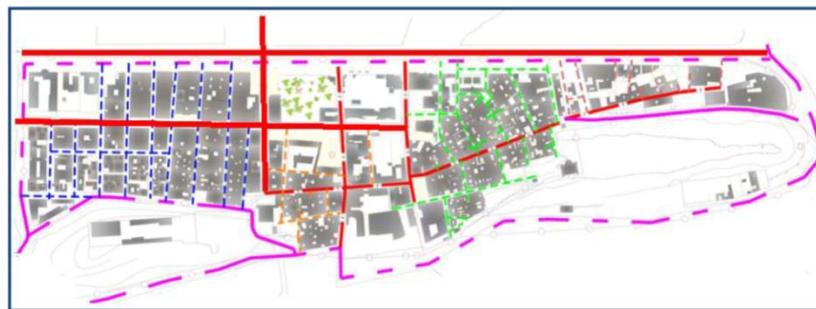


Figure : III. 11 Les axes structurant les quartiers du vieux ksar. [PPSMVSS de ksar Laghouat]

### III.8.6.2 Étudier la restructuration actuelle du tissu urbain du ksar

Nous trouvons que tout le ksar est structuré avec des axes principaux continus et perpendiculaires et qui ne sont que les mêmes éléments que le développement historique du tissu, et que tous les axes structurels principaux relient les placettes.

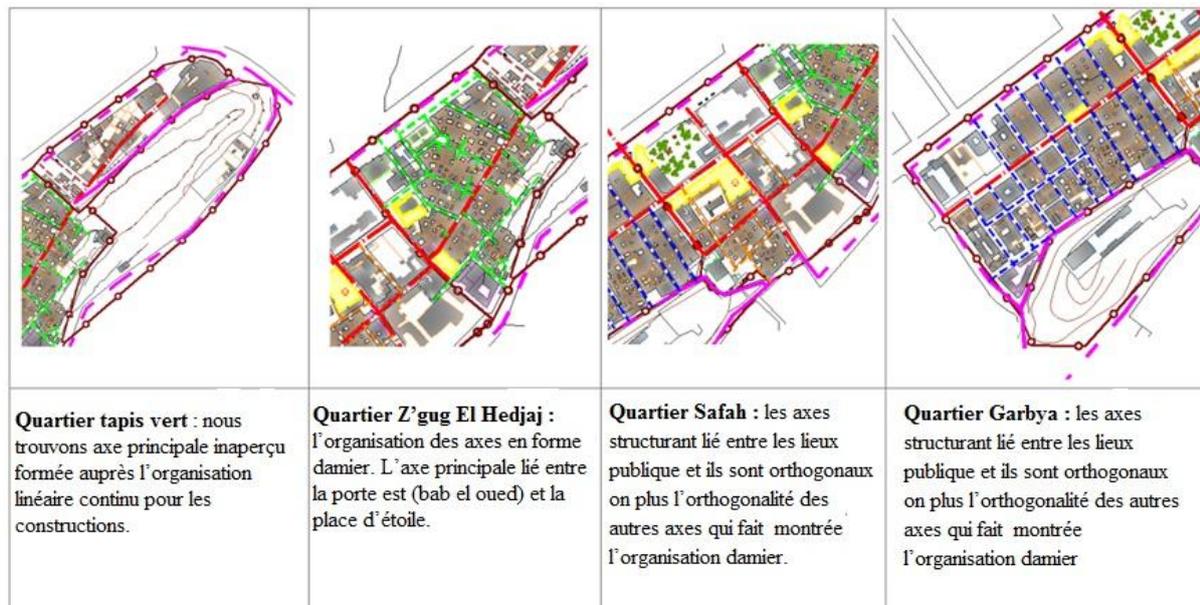


Figure : III. 12 les axes structurant les quartiers du vieux ksar.  
[PPSMVSS de ksar Laghouat]

**Quartier Gharbia :** Le quartier Al Gharbia la plupart des rues ont un caractère commercial, en particulier la partie inférieure adjacente aux axes principaux, qui sont caractérisés par des arches le long des rues principales, tandis que les rues secondaires sont dépourvues d'arches. La partie supérieure à côté de la montagne est purement résidentielle.

**Quartier safah :** les Safah les rues adjacentes à l'axe principal sont commerciales et ont des arches, tandis que le reste sont des rues étroites.

**Quartier Zgag el hadjedj :** se caractérise par ses rues étroites et graduelles allant de rue en rue étroite jusqu'à l'impasse. Les rues sont rares dans les magasins, même si historiquement elles étaient commerciales, et les magasins situés au niveau de la frontière avec les axes sont structurés. Les parenthèses sont limitées au carré (place d'étoile).

**Quartier Tapis vert :** Le voisinage du tapis vert se caractérise par le manque de rues et l'absence d'arcs complètement, [69]. Alors que les magasins se limitent à la façade donnant sur la double route.

### III.8.6.3 Formes des d'îlots :

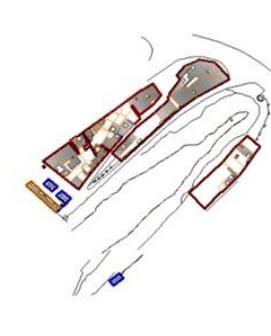
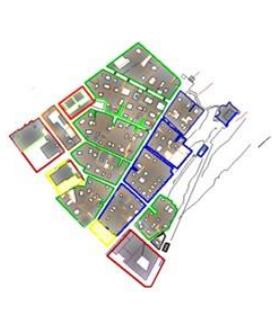
			
<p><b>Quartier Tapis vert :</b></p> <p>Des îlots en forme des masses de bâtisse continu semblant au style ksourien locaux malgré la nouveauté tu tissu.</p>	<p><b>Quartier Z'gug el Hadjaj :</b></p> <p>Il ce caractérise ces forme dendritique émerge pour nous des îlots pentagonale et carré irrégulier.</p>	<p><b>Quartier Safah :</b></p> <p>Plusieurs formes des îlots : pour soi grand surface et présente l'équipement publics. Rectangulaire et prolongé. (Étendu)</p>	<p><b>Quartier Garbya :</b></p> <p>L'organisation damier émerge pour nous plusieurs formes d'îlots prolongé pour-soi des grands surface et autres carrée cette différence parce qu'il n y a pas de continuité pour quelque axes</p>

Figure : III. 13 Les formes des îlots des quartiers du vieux ksar [PPSMVSS de ksar Laghouat]

### III.8.6.4 Cadre bâti :

Le cadre bâti il se diviser en quatre sections :

- Services publics.
- Locaux commerciaux et les fonctions libres
  - les bâtiments résidentiels
  - monument historique
  - nous constatons que le quartier Gharbia : se caractérise par son caractère commercial, la grande majorité des commerces et services étant concentrés dans toute la région, en particulier dans la zone adjacente à l'axe principal et à la double route.
  - En ce qui concerne le quartier el safah, les magasins sont concentrés au niveau de place l'oliveraie et toute la partie de la double route est constituée d'installations publiques.
  - En ce qui concerne le quartier d'El-Hadjaj et quartier Tapis vert, l'activité commerciale est très limitée et la plupart des bâtiments sont uniquement des unités résidentielles. Les installations sont situées à la frontière du quartier d'El-Hadjaj.

### III.8.6.5 Le Gabarit des bâtiments :

La plupart des bâtiments conservent leur ancienne hauteur (gabarit) et atteignent deux niveaux : rez-de-chaussée, premier étage ou terrasse. Il existe également de nombreux bâtiments à trois niveaux, de style étranger, qui déforment le caractère général du ksar.

#### la nature propriété foncière :

La nature de l'immobilier la plupart des propriétés appartiennent à des maisons privées, des commerces et des services, qui constituent la majeure partie du tissu urbain. Ces propriétés sont soit exploitées par le propriétaire, soit louées. De nombreuses maisons appartiennent aux héritiers, tandis que les installations publiques redeviennent propriété publique ainsi que les

monuments historiques, et les installations religieuses sont considérées comme un arrêt.

**III.8.6.6 Les habitats :**

Le nombre de logements dans la zone d'étude est de 0 à 11, et un grand nombre de logements ne sont pas habités pour plusieurs raisons dans les quartiers Zgag El-Hadjaj et El-Safah (la partie supérieure) et devenir en ruine et détériorer leur état technique. Cependant, ce pourcentage varie d'un quartier à l'autre, avec une population d'environ 5 199 personnes, c'est-à-dire que le taux d'occupation d'une maison TOL est d'environ 4 personnes.

**III.8.7 Typologie de l'habitat :**

Style de logement au niveau de l'habitat, il existe trois types principaux, le style ksourien avec patio, et le style de l'époque coloniale, avec un style mixte, colonial et un style moderne.

**III.8.7.1 Le style ksourien avec patio :**

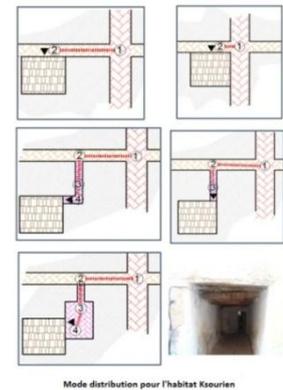
Modèle ksourien avec patio c'est le type le plus ancien du tissu urbain du ksar de Laghouat et il est particulièrement situé au niveau du quartier Zegag el-Hadjaj et la partie supérieure du quartier Safah et le quartier tapis verts.

**Mode de composition:**

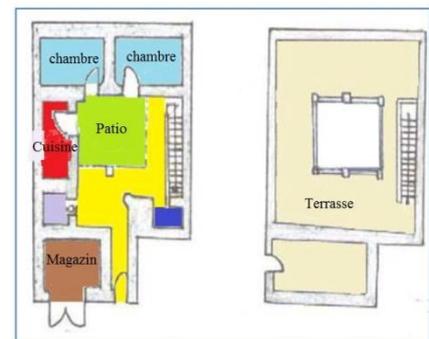
Ce type est caractérisé par la compacité et la haute densité de l'habitat comme indiqué dans la figure suivante.:

Se caractérise par le passage progressif dans les rues pour se rendre à la maison et a une dimension sociale et culturelle et se caractérise par trois schémas (mansarde/ruelle/l'impasse) pour passer du public au privé).

- Ce modèle dispose un patio au niveau domestique élément structuré est d'organiser des espaces et prend plusieurs endroits) au milieu, à l'arrière. (Et surtout ce modèle dans la zone homogène 1.



**Figure : III. 14 Mode distribution pour l'habitat ksourien. [PPSMVSS de ksar Laghouat]**



Exemple d'un habitat avec patio style ksourien)

**Figure : III. 15 habitat avec patio style ksourien. [PPSMVSS de ksar Laghouat]**

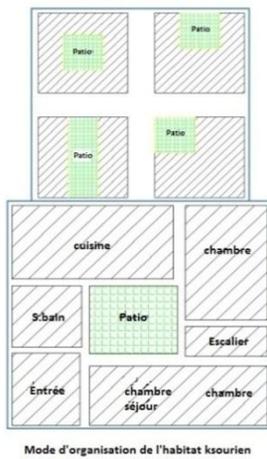


Figure : III. 16 mode d'organisation de l'habitat ksourien. [PPSMVSS de ksar Laghouat]



Figure : III. 17 Des exemples sur les différents modes composition et organisation dans le style ksourien [PPSMVSS de ksar Laghouat]

Mode distributif : Des exemples sur les différents modes (composition et distribution et l'organisation) dans le style ksourien. Exemple d'un habitat avec patio style ksourien). Les Façades fermées avec des ouvertures étroites et peu on nombre, et la plupart des espaces ouverts autour de la cour (patio).

### III.8.7.2 Le deuxième style de la période coloniale :

Le deuxième modèle est achevé à l'époque coloniale et se caractérise par l'absence de cour intérieure dans la plupart des maisons et de grandes ouvertures à l'extérieur et par l'exploitation de la façade principale comme cas commercial. Ce modèle se trouve dans la zone homogène 2 et les maisons avec la cour appartiennent à la zone homogène 1.

Style de composition : tissu ordinaire tissu sous forme d'échecs linéaires et de circulation permet de relier directement les logements depuis les rues principales ou secondaires.

Style de distribution, le passage est gradué de l'espace extérieur aux espaces intérieurs, soit directs.

Style d'organisation : Les espaces de la maison sont de deux types similaires au modèle court avec de grandes ouvertures (ouverture vers l'extérieur) et type dominant dispos de galerie ou hall d'accueil est réparti différemment.

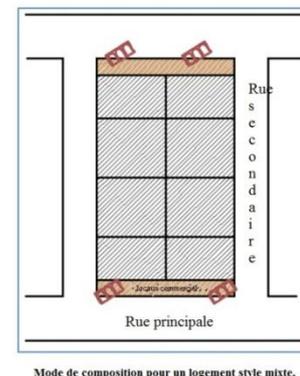


Figure : III. 18 Modes de composition pour un logement style mixte. [PPSMVSS de ksar Laghouat]

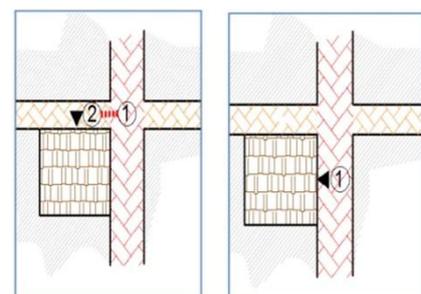


Figure:III. 19 Modes de distribution pour un logement style mixte. [PPSMVSS de ksar Laghouat]

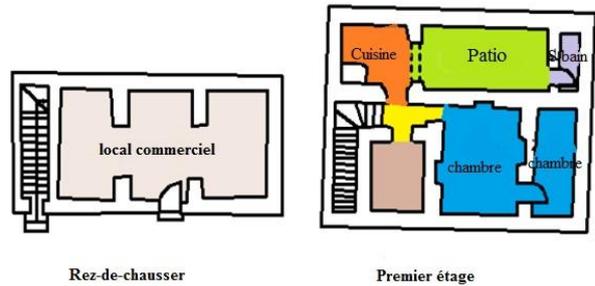
**III.8.7.3 Type I : type mélangé entre style colonial et ksourien.**

Exemple de logement style mixte

**Style moderne :**

Le style moderne se caractérise par sa variété de styles, ses magasins et l'utilisation de béton armé dans la construction. Surtout dans la zone homogène 4 et au niveau de certaines parties reconstruites d'autres régions.

Mode de composition est dépend de la propriété héritée des modèles précédents, car il a remplacé le bâtiment qui occupait le même champ. C'est semblable au modèle précédent.



Exemple de logement style

Figure : III. 20 Mixte entre ksourien. et de style colonial. [PPSMVSS de ksar Laghouat]

**III.8.8 Décorations et éléments architecturaux:**

**III.8.8.1 Arches :**

les arches sont situées au niveau des passages extérieurs et des cours intérieures et ont plusieurs types:

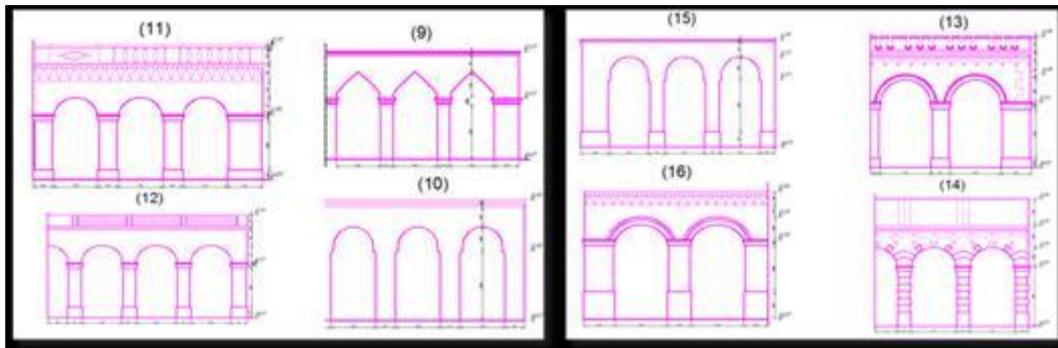


Figure : III. 21 Exemples des formes des arcs. [PPSMVSS de ksar Laghouat]

Quelques exemples des arcs et des éléments décoratifs :

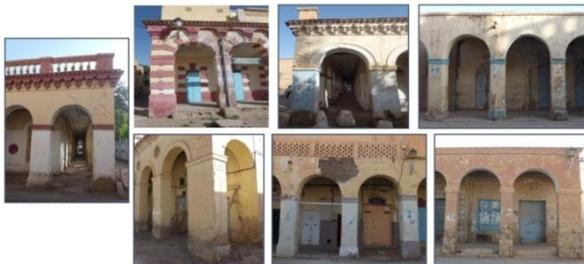


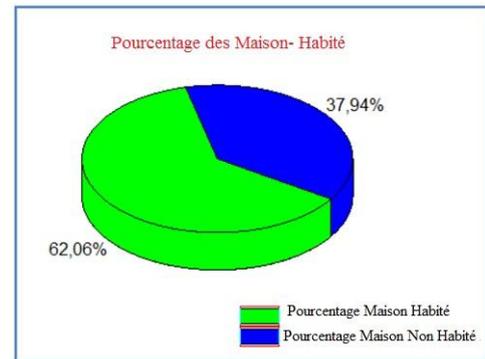
Figure : III. 22 Exemples des formes des arcs.



Figure : III. 23 Des éléments décoratifs.

### III.9 Statistiques de Habitat et de la population :

Nous constatons que le nombre de logements dans la zone d'étude est égal à 110 et grand nombre de maisons inhabitées pour plusieurs raisons, dans un quartier ben Badisse (Zegag el Hedjaj)et quartier Safah (la partie supérieure) (pour leur transformation en ruines et détérioration technique et quartier Garbiat , qui convertit en commerces, et la proportion de maisons habitées 62 %, mais ce pourcentage varie d'un quartier à l'autre et le nombre de résidents dans les maisons recensées est de 5199 personnes, c'est-à-dire que le taux d'occupation de la maison TOL est d'environ 4 et 0 au niveau de quartier Ben Badisse (Zegag el hedjaj).

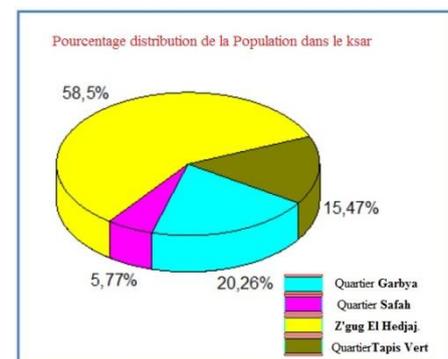


Pourcentage des Maisons Habitées au Niveau

Figure : III. 24 pourcentages des maisons habitées et non habitées [PPSMVSS de ksar Laghouat]

#### Pourcentage de la maison habitée au niveau du vieux Ksar.

Nous notons que la majeure partie de la population a plus de 55 ans, c'est-à-dire au-delà de l'âge de la scolarisation et de la majeure partie de cette catégorie, mais les familles ont peu d'enfants ou de personnes âgées et leurs membres restés ont changé de résidence. Ceci est directement lié aux conditions de vie au niveau des anciens bâtiments. Soit au niveau de la rue principale, doit être utilisé comme zones commerciales. Quant à la proportion d'hommes et de femmes dans tous les districts, elle est considérée comme très proche [69].



Distribution de la Population selon les Quartiers

Figure : III. 25 Pourcentages distribution de la population dans le ksar [PPSMVSS de ksar Laghouat]

#### III.9.1 Les matériaux de construction :

De tels matériaux adaptés aux aléas des conditions météorologiques, car ils varient selon la région, par exemple, la majeure partie des matériaux utilisés dans la construction de maisons traditionnelles sont des matériaux locaux, le produit de certains simples processus de cuire et séchage et la discipline pour devenir de bons matériaux pour la construction. Les matériaux traditionnels peuvent être divisés en deux parties, matériaux solides et des matériaux en bois :

- pour les matériaux de construction, le ksourien a fait appel à son milieu. L'utilisation des matériaux dits « hors-normes », extrêmement limités dans des sociétés de pénurie, est exclusivement réservée aux édifices hors-normes. L'extraordinaire le non-utilitaire sont réservé

aux édifices culturels. Les plus anciennes constructions ont été édifiées en pierres. L'argile comme matériau de construction n'intervient que par la suite. On peut évidemment penser à une raréfaction du matériau qui va pousser à l'utilisation d'un matériau moins solide.

– De manière générale, l'habitation est en *tûb* avec une structure en murs porteurs, assez épais. La poutraison est faite de troncs de palmiers (*khashba*) et les plafonds sont constitués par un clayonnage de palmes (*jrîd*). La terrasse est faite d'un mortier de terre où se mêlent argile et feuilles de palmiers. Les troncs d'arbre constituent les poutres, ce qui explique la largeur à peu près commune à toutes les pièces (2 mètres 50 environ). La différence réside dans la longueur qui elle dépend d'aspects sociaux [72].

– la décoration s'inscrit dans une ornementation géométrique. C'est un art que les Berbères ont de tout temps pratiqué. Des compositions cruciformes des carrés, des losanges et des polygones étoilés ont été réutilisées dans les décors architecturaux du *ksar*. Ces symboles ont été si fortement réappropriés par le génie de l'art musulman qu'ils finissent par changer de sens aux yeux mêmes de ceux dont les ancêtres eux furent les promoteurs.

– Les décorations se font au niveau du matériau lui-même. Les toitures sont faites à partir d'un clayonnage des branches de palmiers (*jrîd*). Elles sont d'une composition géométrique. La disposition des pierres est en arête de poisson, de corniches saillantes [69].

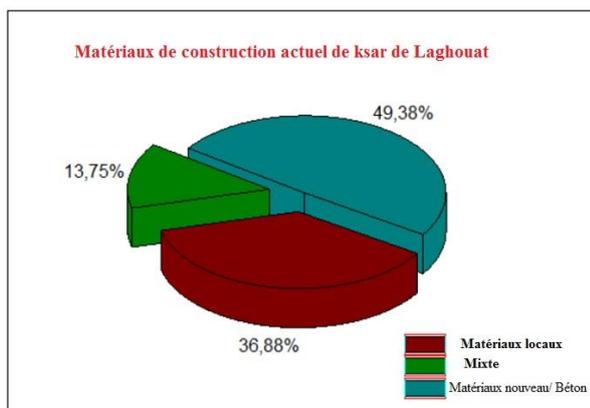
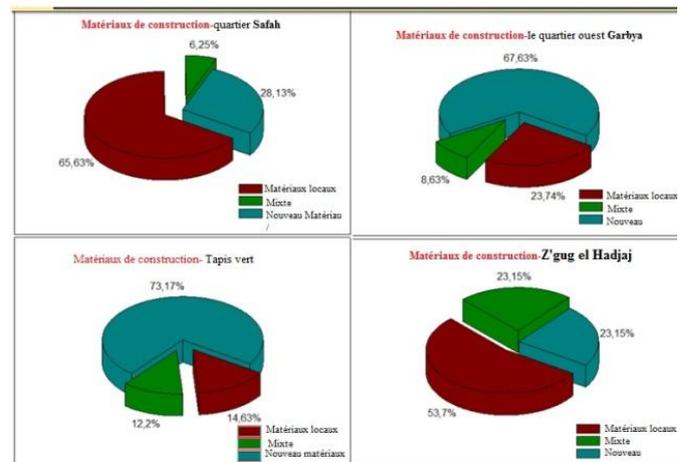


Figure : III. 26 Matériaux de construction actuels de ksar de Laghouat. [PPSMVSS de ksar Laghouat]



Pourcentage de la Nature du Matériaux de Construction de tout le Ksar et selon les Quartier

Figure : III. 27 Pourcentage des matériaux de construction des quartiers de ksar. [PPSMVSS de ksar Laghouat]

### III.9.2 Avantages de l'utilisation des matériaux locaux :

Outre l'aspect économique avantageux de ces matériaux, d'autres points clefs plaident en faveur de leur intégration dans la construction et qui est :

- La non-consommation d'énergie pour la production des matériaux et faible consommation d'énergie pour le chauffage et la climatisation des logements.
- Leur facilité d'adaptation aux conditions locales et leur disponibilité en abondance contrairement aux autres matériaux (gravier, sable, brique, parpaing, brique de terre cuite...).
- Création d'emplois et disponibilité de main-d'œuvre locale.

- Maintien des populations dans leur environnement à travers une architecture adaptée.
- Coût énergétique de production réduit : il n'est pas nécessaire de disposer d'installation industrielle complexe.
- Décentralisation et utilisation des ressources humaines locales, l'utilisation des moyens de production humains et matériels localement disponibles assure l'autonomie et l'autosuffisance locales.
- Minimisation du réseau de transport, les matériaux vont directement du producteur au consommateur sans les frais de transport.
- Consommation minimale en eau.
- Moindre dépendance d'importation en matières premières notamment du ciment et l'acier [73].

#### **III.9.3 Techniques de construction**

**Colonnes :** Il y a quatre façons

- a. Les colonnes sont constituées d'une base de pierres et le corps de la colonne est construit sur elle à partir des formes de boue.
- b. Ou base de brique et il construit en suite, le corps de la colonne est construit à partir de moules en argile (adobe).
- c. Demandez que chaque colonne doive être de la brique
- d. Ou bien chaque colonne doit être de la pierre.

**Murs :** Les murs doivent être constitués de moules en argile (adobe) reposants sur une large base de pierres, dont la hauteur varie en fonction de la nature du sol et de l'emplacement de l'édifice.

**Toiture :** Les toitures sont constituées d'une couche de roseaux recouverts d'un mélange d'argile et de chaux reposant sur les poutres de troncs de palmiers ou d'autres arbres, ces derniers étant placés contre le mur. Et le toiture qui a été construite à l'époque coloniale et utilisait des poutres métalliques au-dessus nouer par brique.

**Les escaliers :**

Pour éviter toute rupture par rapport aux matériaux de construction actuels, l'escalier exécute verticalement en générale .La moitié de la structure est construite avec des matériaux modernes, avec une variation de ce rapport entre les quartiers, 80 % à Al Gharbia et dans le quartier de Tapis vert 80 % et tombe de 10 % à 15 % au niveau de quartier Zegag El Hedjaj et Quartier Safah. [69].

**III.10 Conclusion :**

Le vieux ksar de Laghouat est considéré parmi les Ksour le plus notables dans la région de l'atlas saharien. Il reflète l'aspect antique du patrimoine architectural qui s'étend à travers toutes les époques historiques. À partir d'une étude précédente, en particulier l'étude morpho-typologique, nous avons pu identifier l'importance de ce patrimoine architectural. Or les défis pour le sauvegarder s'accroissent en raison de l'extension continue du centre urbain.

Afin de le préserver, il serait judicieux de développer certaines règles spécifiques, qui pourraient garantir la préservation et l'encadrement de toute intervention future ou actuelle.

**IV -QUATRIÈME CHAPITRE**

---

**PERFORMANCES MÉCANIQUE ET THERMIQUE DES  
BRIQUES DE TERRE**

**IV.1 Introduction :**

Avant d’entamer notre protocole expérimental, nous allons définir notre composite tout en présentant le maximum d’informations assemblées sur sa nature, sa composition et sur son comportement selon les littératures. Puis nous déterminons la localisation des prélèvements des échantillons et les caractéristiques physiques et mécaniques et thermiques de la brique « l’adobe » dans le secteur sauvegarde de la ville de Laghouat : quartier Zgag el hadjedj.

Tout en essayant d’approfondir notre connaissance de la qualité de la terre utilisée, nous présentons certaines caractéristiques comme : le pourcentage de l’argile, la densité spécifique la limite de la liquidité, la plasticité ou l’index de la plasticité ont défini par quelques propriétés de l’adobe ancien tel que la résistance mécanique et les propriétés thermo-physiques et sa méthode de mesure. Nous expliquerons ensuite l’amélioration de l’ancien adobe par le recyclage de l’ancien matériau et l’amélioration par la correction de la granularité de ce matériau, l’ajout des fibres de paille. Enfin, nous procéderons à l’explication du processus de fabrication de brique terre crue l’adobe perfectionné au niveau de laboratoire.

Pour approfondir notre étude, notre programme de recherche on a sélectionné quelques articles scientifique qui discuter sur les propriétés de terre convenable pour ce mode de construction de terre adobe paille afin de le comparer.

**IV.2 Les caractéristiques des terres utilisées dans les techniques adobes paillés :**

Tableau IV. 1. Caractéristiques des terres utilisées dans les techniques et adobe-paille [l’auteur]

pays	technique	caractéristique en pourcentage %					Réf.
		Densité ps	Argile %	Limon %	Sable fin %	Gros sable %	
Algérie	Adobe paillé	A = 2,7 B= 2,68 C= 2,72 D= 2,67	A= 40 B= 28 C= 21 D= 26	A= 45 B= 29 C= 39 D= 42	A= 8 B= 23 C= 5 D= 4	A= 7 B= 20 C= 35 D= 27	[97]
Allemagne	Adobe paille	2.67÷2.69 g/cm3	15	25	60	/	[99]
La Turquie	Adobe paille	1.278	32,04	24,52	43,44	/	[100]
L’Italie(1)	Adobe paille	2,68 g/cm3	26,9 %		70,1 %	3	[102]
Italie (2)	Adobe paille	/	25.6÷9,6	43.6÷16,3	11.4÷40,3	9.3÷25,5	[103]
Roumanie	Adobe paille		7,34	18,26	16,72	37,53 ÷20,15	[ ]
Italie	Adobe paille	/	22,4	49,9	24,5	3,2	[14]
Italie	Adobe paille	2.68/cm3	12 ÷18	10 ÷35	55 ÷75		[102]

IV.2.1 Propriétés physiques des sols utilisés :

Tableau IV. 2. Propriétés physiques des sols utilisés [l'auteur] :

Pays	Technique	WL %	WP %	IP	Ca	Réf.
Algérie	Adobe paillé	A= 56,76 B= 32,72 C= 31,63 D= 39,67	A= 23,43 B= 14,94 C= 17,82 D= 21,85	A= 33 B= 18 C= 14 D= 18	A= 0,92 B= 0,61 C= 0,66 D= 0,66	[97]
France	Adobe	38	20	18	10	[98]
Chypre	Adobe paille	A= 42÷46 B= 35÷37	A= 25÷28 B= 24÷26	A= 14÷21 B= 9÷13	/	[101]
Bangladesh	Adobe+chaux+Sable	32	20	12	/	[105]
Rochechinard	adobe	38	20	18	10	[108]
Turquie	Adobe paille	47,1	16,3	30,8	/	[113]
Italie	Adobe paille	26,4	18,4	8,0	/	[109]
Espagne	Adobe paille	31,5	17,1	14,4	/	[110]
Italie	Adobe paille	38,7	21,0	17,7		[112]

Comme référence aux résultats trouvés dans notre étude expérimentale, nous allons prendre les fourchettes de limites d'Atterberg obtenues à partir de la littérature et qui caractérisent les terres aptes à des constructions en adobes [H. Houben et H. Guillaut] savoir :

WL: Varie de 30 à 50 %.

IP :varie de 15 à 30 %.

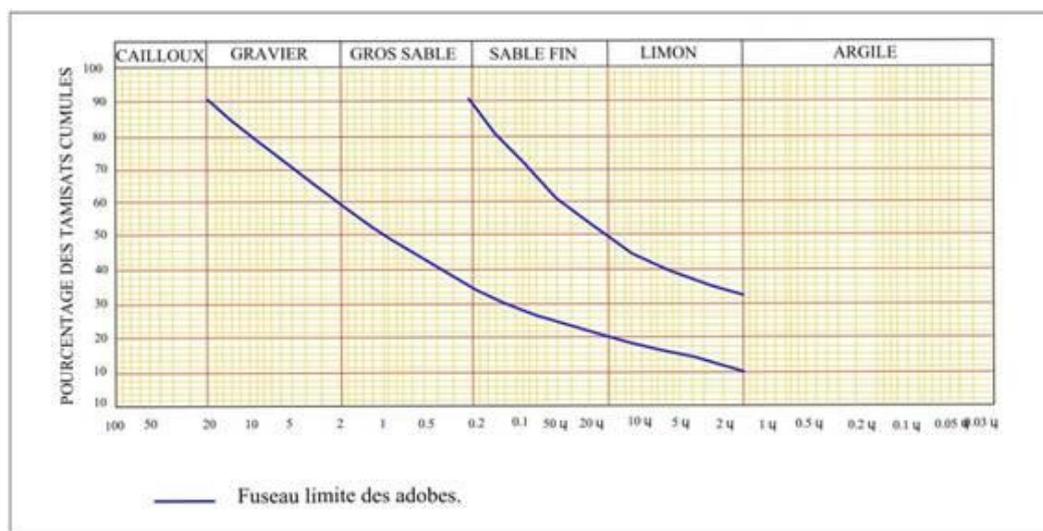


Figure:IV. 1 Fuseau limite des ADOBES.

Fuseau limite des adobes. Et Fuseau limite de Pise' \_ [H. Houben et H. Guillaut]



**IV.2.2.1 Principales fibres végétales :**

Le tableau [IV.3] présente certaines caractéristiques physiques, morphologiques, mécaniques. Etc., d'une partie des fibres citées dans le tableau [114]

**Tableau IV. 3. Propriétés physiques des matières végétales utilisées en matériaux de construction de la terre [A. Laborel-Préneron, ~ de J.E. Aubert, C. Magniont].**

Dactylographier à de fibre suivant l'utilisation	Nom de la fibre	Longueur (cm)	Diamètre (millimètre)	Apprend Densité (kg.m3)	Absolu Densité (kg.m3)	Absorption (%)	Thermique Conductivité mWm-1k-1	Réf.
Paille de céréale	Paille de blé	1.5-2.5	0,5					[114]
		5		103,6			41.4-48.6	
		5	3					
		0-3		33	868	280-350		
	Paille d'orge	5						
		1-6						
		0.5-2						
	Paille d'avoine paille	1-2						
			2-5					
		20-30						
5		3						
Agréats en bois	Bois (rasage ou fibres)	2						
		2		111,4			35.3-53.9	
		0.3-0.8						
				50	440	240		
		0.025-0.05						
Fibres de filasse	Fibre de chanvre	0.85-1.7						
			0,035			1500	80-105	
	Chanvre-hurds	0.5-3.5	1-8				280	
		2	2-5					
	Fibre de lin textile	7-8.5		0,013				
	Fibre de jute	2-4	1		1700			
					1460			
	Fibre de kana	3	0,133		1040	307		
Fibre de Diss	2							
Fibres de palmier	Fibre de coco		2,38				78	
		3.5-5	0,35					
		5	0,27			100		
					1177	145		
	Fibre de palmier à huile	1						
	Fibre de palmier dattier	2-3.5	0.1-0.8	512-1089	1300-1350	97-203		
Perte et résidus	Peau de Cassa	5	5					
	Résidu de millet				1164			
	Résidu de coton	0,01			500			
	Résidu de thé							
	Résidu de tabac		0.025-0.05					
	Herbe		0.025-0.05					
Fibres de feuille	Fibre de sisal	5	0,15			230		
		4-5						
		4	0,15					
		7,2	0,3		1370			
		45-160	0.004-0.012		1370	110		
	Fibre de banane	0.85-1.7						
	Fibre d'ananas	1						
Plante aquatique	phragmite	2	2					
	typha	2	2					
	Fibre d'algue	1						
laines	Laines de mouton	1.2.3	0,035					

#### IV – Quatrième Chapitre

Dans notre étude, nous allons utiliser comme fibre végétale la paille qui peut provenir soit de blé, orge ou siège. L'intérêt de l'addition d'un pourcentage de paille à la terre, découle des facteurs suivants :

- La réduction des fissures provoquées par le retrait après séchage de la pâte de terre ; suite au rôle de renforcement que joue la paille.
- Sa présence dans la matrice accélère le séchage des blocs, grâce aux canaux intérieurs de la fibre.
- Améliore la résistance des blocs à la traction et au cisaillement et rend la terre plus ou moins ductile
- Améliore pour certaines terres la résistance à la compression [114].
- Améliore l'isolation thermique, à titre comparatif, on note que la capacité thermique de l'adobe qui se situe autour de (360 Wh/m<sup>2</sup>) est faible à celles du pisé (70 Wh/m<sup>2</sup>) et du béton (590 Wh/m<sup>2</sup>).

Le pourcentage de la paille ainsi que les longueurs des brins recommandés dans la littérature sont regroupés (suivant les pays) dans le tableau suivant :

**Tableau IV. 4. Pourcentage et longueur des brins de paille utilisée dans la terre [l'auteur] :**

Pays	Technique	Pourcentage %	Dimension	Réf.
Algérie	Adobe paillé	0÷3,5	1÷20 cm	[97]
Allemagne	Adobe paille	0.72÷3,84	5 cm	[30]
Chypre	Adobe paille	A= 20÷40 B =15÷28	A= 3÷25 millimètres B= 2÷65mm	[101]
L'Italie (1)	Adobe paille	0,5 et 3	70 mm	[102]
Italie (2)	Adobe paille	0÷0,9	0.02 et 0,08 m	[117]
Roumanie	Adobe paille	10%, de 20 , de 30 , de 40, de 50 ou de 60		[106]
Burkina Faso	Adobe paille	1 -3	/	[107]
Italie	Adobe paille		0.02÷0,08 m	[109]
Espagne	Adobe paille	25 ÷33	Entre 5 et 10 cm	[110]
Italie	Adobe paille	0,64	3÷70÷ 100 mm	[102]

Tableau [l'auteur] : Pourcentage et longueur des brins de paille utilisée dans la technique adobe paille. Toutefois, il faut signaler que les valeurs présentées dans ce tableau s'entachent d'une forte imprécision, car il s'agit des fibres naturelles et non pas synthétiques, elles doivent être donc employées avec prudence.

### IV.2.3 L'eau pour la mise en œuvre :

L'eau permet d'ajuster la consistance de la terre. Au fur et à mesure qu'on lui ajoute de l'eau, elle passe par différents états de consistance. Sèche, la terre foisonnée n'a aucune cohésion. À l'état humide, elle forme des mottes qui peuvent s'agglomérer si on les comprime. Puis si l'on ajoute de l'eau, elle devient d'un seul coup difficile à travailler : la limite plastique (PL) est atteinte. Avec encore plus d'eau, elle devient visqueuse et oppose moins de résistance. Au-delà de la limite liquide (LL), elle s'écoule et ne se laisse plus mettre en forme.

Les limites de plasticité (PL) et liquidité (LL) varient d'une terre à l'autre. Plus elles sont éloignées, plus l'indice de plasticité de la terre considérée ( $PI = LL - PL$ ) est élevé [13]. [80].

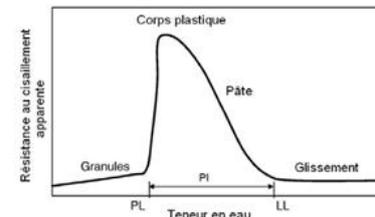
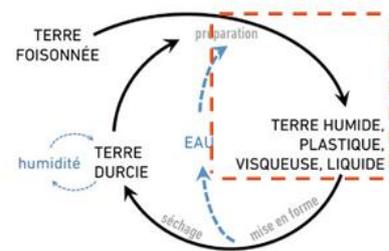


Figure:IV. 4 l'eau pour la mise en œuvre, source : Serge Bossini.

### ÉTAT HYDRIQUE DU MATÉRIAU TERRE

**Terre sèche** (teneur en eau : 0 – 5 %)

**Terre humide** (teneur en eau : 5 – 20 %)

**Terre plastique** (teneur en eau : 15 – 30 %)

**Terre visqueuse** (teneur en eau : 15 – 35 %)

**Terre liquide**

#### IV.2.3.1 L'eau de gâchage :

La quantité d'eau nécessaire pour fabriquer le mélange terre et paille (eau de gâchage) dépend essentiellement de la nature de terre ainsi que l'usage antérieur de produit fini.

Tableau IV. 5. Pourcentage d'eau de gâchage pour l'adobe paillé [l'auteur].

Pays	Technique	Pourcentage d'eau %	Réf.
Algérie	Adobe paillé	17÷30	[97]
France	Adobe	24 En fonction, de la teneur en eau de fabrication ( $W_m$ ) en deux voies : la voie sèche ( $8\% < W_m < 15\%$ ) et la voie humide ( $16\% < W_m < 35\%$ ). La voie sèche est celle du BTC tandis que la voie humide comprend les adobes.	[98]
Allemagne	Adobe paille	19.25÷57,00	[99]
Espagne	Adobe paille	20	[104]
Italie (2)	Adobe paille	7.6÷10,4	[103]

Mélange terre et paille 2 selon les littératures

La réalisation du mélange peut être obtenue en utilisant : l'une des méthodes suivantes :

#### IV.2.3.1.A Voie sèche :

Dans cette méthode en mélange d'abord la terre et la fibre à l'intérieur du malaxeur, l'eau n'est ajoutée qu'après la vidange de la terre et fibre du malaxeur.

#### **IV.2.3.1.B Voie demi-sèche :**

Dans cette méthode, l'eau est ajoutée à la terre sèche et fibre à l'intérieur du malaxeur.

#### **IV.2.3.1.C Voie humide :**

De manière générale, la terre une fois broyée, tamisée ou laissée dans l'état cru (obtenu de carrière) ; est gâchée avec la quantité d'eau désirée. Au mélange obtenu (terre et eau), on ajoute la fibre de paille. Ensuite, tout le produit sera soit pétrissé aux pieds, à l'aide d'une fourche (ancienne technique), à l'aide d'un malaxeur (nouvelle technique) ou manuellement (méthode rustique) jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène et selon son état de consistance la production peut être :

- Manuelle : Dans le cas où la pâte serait mi-molle, elle est introduite dans des moules préalablement mouillés. Par contre, si elle est mi-ferme, elle sera tassée aux poings et le surplus sera arasé à l'aide d'une règle.
- Mécanisée : En utilisant des pondeuses à moule ou pondeuses à disque [01]. [21]. [79].

#### **IV.2.4 Caractéristiques des briques d'adobe thermo-physique et mécanique :**

##### **IV.2.4.1 La masse volumique sèche ( $\rho$ ) :**

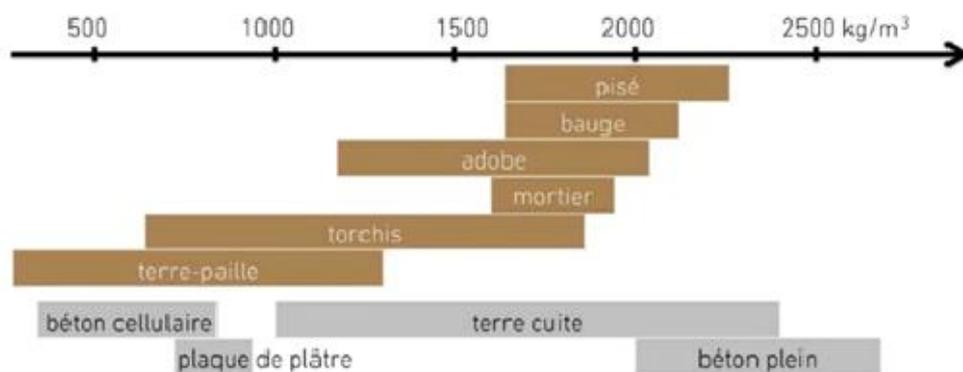


Figure : IV. 5 la masse volumique sèche ( $\rho$ ) de la terre source : [80]

La masse volumique ou densité sèche ( $\rho$ ) d'une terre est le rapport entre son masse et son volume mesurés à l'état sec après passage en étuve à 105 °C. Cette propriété dépend de plusieurs paramètres dont les principaux sont la distribution granulométrique, la proportion et la nature de la phase liante, la teneur en eau à la mise en œuvre, et l'énergie de mise en œuvre compaction, vibration, etc.[80].

#### IV.2.4.2 Propriété mécanique de l'adobe : la résistance à la compression :

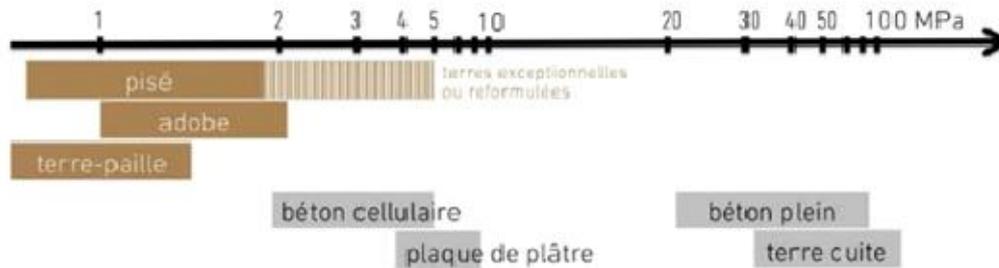


Figure : IV. 6 Propriété mécanique de la terre : la résistance à la compression. [80]

Les paramètres qui contribuent à une forte résistance à la compression d'une terre sont :

- une masse volumique élevée.
- une faible teneur en eau.
- une forte teneur en argiles et silts.
- la présence d'argiles gonflantes.
- une bonne homogénéité.
- des grains de petite taille.

Dans l'état actuel des connaissances, il n'est pas possible de prédire la résistance à la compression d'une terre sans la mesurer expérimentalement. Connaître la densité, la teneur en eau ou en argiles ne suffit pas. Beaucoup d'autres paramètres entrent en jeu dans les mécanismes de cohésion de la terre qui déterminent sa résistance. Le lien entre la microstructure de la terre et ses propriétés mécaniques macroscopiques est extrêmement complexe.

Les normes imposent souvent des protocoles d'essai qui ne permettent pas de mesurer la résistance intrinsèque au matériau : la mesure peut être influencée par le dispositif d'essai. Cela est dû en partie à la transposition d'essais utilisés pour les bétons de ciment à des normes concernant la terre crue, alors que les propriétés mécaniques de ces deux matériaux sont complètement différentes.

Les valeurs de la résistance à la compression de l'adobe paille trouvée dans la littérature sont présentées dans le tableau IV-6 (les dimensions des éprouvettes dans la plupart des cas ne sont pas mentionnées)[80]

**Tableau IV. 6** Données expérimentales sur des forces et des modules élastiques de l’adobe brique. [102]

Source	Endroit	Fibres (%)	fc (MPa)	pi (MPa)	L’EC (MPa)	Et (MPa)
[102]	L’Algérie	0	4.1-5.1	1.1-2.5		
		1,0	3.6-5.4			
		1,5	3.2-5.6	1.2-2.6		
		2,0	3.0-4.1			
		2,5	2.4-3.7	1.6-2.7		
		3,0	2.3-3.0			
		3,5	2.3-2.7	1.8-2.9		
	La Turquie	Na	2.0 (vieux)			
			2.4-5.1 (nouveau)			
	L’Italie	0	0.2-0.78 (vieux)		15-87	
			0.72-2.44 (nouveau)		90-287	
	Le Portugal	0	0.66-2.15	0.13 - 0.19c	51-448	100-340
	L’Italie	10	2.5			
	Turkmenistan	0	0.94	0.29	193	
				0.20c		
	Le Maroc	0	2.83 d	0.18-0.35		
	Le Portugal	0	0.46	0.15		
	L’Écosse	0	2.23-3.77	1.06-1.12		
		0,25	3.05-4.44	1.1 0-1. 45		
		0,5	4.37	1.05		
	Le Mexique	0	1,18	0,27		
	L’Italie	0,5	1.57-1.70	0,75	130-148	
	L’Italie	0	0.29-1.56	0.17-0.40		
	Le Mexique	0	0.51-1.57	0.20-0.43		
	La Colombie	0	3,04	0,41		
	Le Portugal	0	0.28-1.21	0.20-1.03	7609-25.000	
				0.03 - 0.28c		
	La Chine	0,5	1.39-1.70		24.04-41.70	
L’Allemagne	0	2.10-3.75	0.38 - 0.75 f			
	0,6		0.15 - 0.27 f			
		0.7-3.8	0.55-1.75			
Cette étude	L’Italie	0,6	1,08	0,56	145	58

#### IV.2.4.3 La conductivité thermique ( $\lambda$ ) : Matériau terre

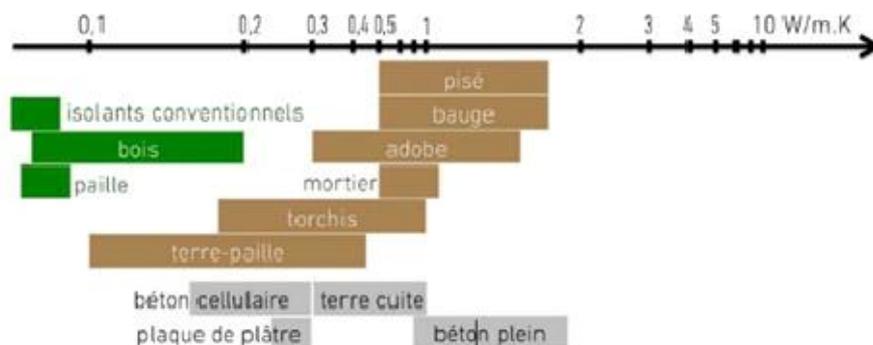


Figure:IV. 7 la conductivité thermique ( $\lambda$ ) : de la terre crue. [80]

La conductivité d’une terre dépend principalement de sa densité et porosité. Elle est de l’ordre de 1,3 w/m.k pour les raisons très denses et peut descendre à 0,10 w/m.K pour des mélanges de terre-paille de 500 kilogrammes/m3.

Augmentation de conductivité avec la teneur en eau. Pour une boue de 1800 kg/m3, elle peut aller de 0,8 à 1,0 w/m.K si la teneur en eau va de 0 à 2 %. Pour la même différence dans la teneur en eau, la variation de la conductivité plus ou moins est marquée selon chaque terre : elles n’ont pas la même sensibilité thermique à arroser.

## IV – Quatrième Chapitre

Seule, la terre n'est pas un bon isolateur. Mais mélangée aux fibres végétales et de l'épaisseur suffisante, elle peut être employée pour l'isolation d'un bâtiment.

Les conductivités thermiques des matériaux avec d'autres stabilisateurs.

La conductivité thermique de l'adobe avec l'addition de la paille et du ciment [80]

**Tableau IV. 7 la conductivité thermique de l'adobe avec l'addition de la paille et du ciment [107]**

pays	Matériaux	Conductivité thermique ( $\lambda$ ) en ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )	Erreur de mesure	Résistance à la compression (MPa)	Réf.
Burkina Faso	TS/Adobe	1.452	0,014 95	0,517	[107]
	TP1/adobe+1%paille	1.303	0,015 0	0,554	
	TP2/adobe+2%paille	1.118	0,013 2	0,630	
	TP3/adobe+3%paille	0,805	0,045 0	0,740	
	TC/adobe+4%ciment	1.874	0,013 1	1.126	
	TCP1/adobe+4%ciment+1%paille	1.725	0,006	1.066	
	TCP2/adobe + 4%-ciment + 2 % paille	1.622	0,009 45	1.002	
	TCP3/adobe+4%ciment+3%paille	1.568	0,007 4	0,974	

**Tableau IV. 8 les conductivités thermiques des matériaux avec d'autres stabilisateurs [116].**

L'échantillon de la brique de boue	Conductivités thermiques (W/m.k)			Réf.
	5 %	10 %	15 %	
Avec la bouse de vache	0,900 6	0,932 7	0,940 5	[116]
Avec du savon	0,914 9	1,060	1,217	
Avec de l'huile de palmier	0,997 2	1,127	1,330	
Avec la cendre	0,867 7	0,835 9	0,690 6	
Sans additifs	0,846 9			

**Tableau IV. 9 La conductivité thermique de l'adobe avec l'ajout fibre palmier dattier**

la conductivité thermique de l'adobe avec l'ajout fibre	C1	C2	C3	C4
La masse M (kilogramme)	1,45	1,43	1,38	1,15
La densité apparente (kg/m3)	1803,5	1740	1697,3	1491,2
Conductivité thermique ( $W/m^\circ C$ )	0,64	0,63	0,57	0,46
Th de la résistance thermique R ( $m^2 \cdot ^\circ C/W$ )	0,070	0,07 1	0,075	0,093
La chaleur spécifique CP ( $KJ/m3\hat{A}^\circ C$ )	7620,8	7402	7175	6400,4
Morceau d'essai (brique)	C5	C6	C7	C8
La masse M (kilogramme)	1,38	1,36	1,10	1,05
La densité apparente (kg/m3)	1945	1779,6	1437,4	1392
$\lambda$ de conductivité thermique ( $W/m^\circ C$ )	0,71	0,66	0,58	0,48
Th de la résistance thermique R ( $m^2 \cdot ^\circ C/W$ )	0,060	0,066	0,072	0,087
La chaleur spécifique CP ( $KJ/m3\hat{A}^\circ C$ )	7833	7652	7196,8	7064,1

IV.2.4.4 La capacité thermique (c) :

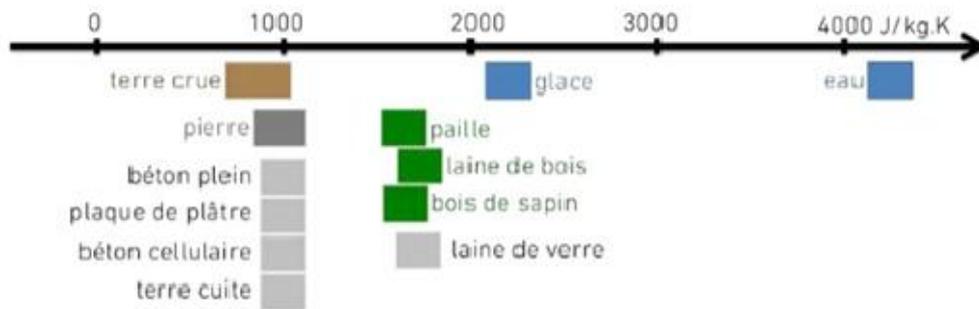


Figure:IV. 8 la capacité thermique (C) source : [80].

La capacité thermique massique (c) indique la quantité de chaleur à fournir à 1 kg ou matériau pour élever sa température de 1 K. Cette propriété multipliée par la masse volumique détermine la capacité thermique volumique du matériau. En  $J/m^3.K$ , qui est responsable de l'inertie thermique apportée par le matériau à une structure.

La capacité thermique peut se mesurer par Calorimétrie : cela consiste à imposer une variation d'énergie à un échantillon et à mesurer sa température, ou l'inverse : imposer à l'échantillon une augmentation de température et mesurer la variation d'énergie.

La capacité thermique peut s'exprimer en fonction des capacités thermiques des constituants du milieu étudié selon une simple loi des mélanges :  $c = \sum U_i c_i$

où  $U_i$  est la proportion massique ou constituante  $i$  et  $C_i$  sa capacité thermique massique [80].

IV.2.4.5 Le coefficient de résistance à la vapeur d'eau (u) :

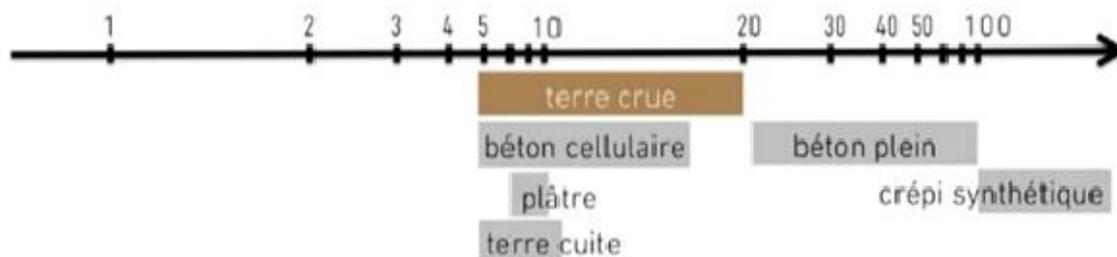


Figure:IV. 9 le coefficient de résistance à la vapeur d'eau (u) : source [80]

La capacité d'un matériau à résister à la diffusion de la vapeur d'eau est représentée par le facteur  $p$  qui est le rapport entre la perméabilité de l'air à la vapeur d'eau et celle du matériau considéré, Plus ce coefficient est faible, plus le matériau est perméable à la vapeur.

La terre crue à une perméabilité à la vapeur d'eau équivalente au béton cellulaire, au béton de granulats légers, au plâtre et à la terre cuite.

Pour les matériaux hygroscopiques comme la terre, qui peuvent fixer une certaine quantité d'humidité contenue dans l'air, la perméabilité augmente avec l'humidité relative ambiante.

Donc, le facteur de résistance à la vapeur d'eau  $\mu$  diminue lorsque l'humidité relative augmente.

En théorie, une seule mesure de perméabilité ne suffit donc pas à caractériser complètement le comportement hygrométrique de la terre [80].

### IV.3 Essais au laboratoire : étude expérimentale

Les caractéristiques physiques et mécaniques et thermiques de la brique « l'adobe » dans le secteur sauvegardé de la ville de Laghouat (quartier Zgag el hadjed) schéma de plan de travail :

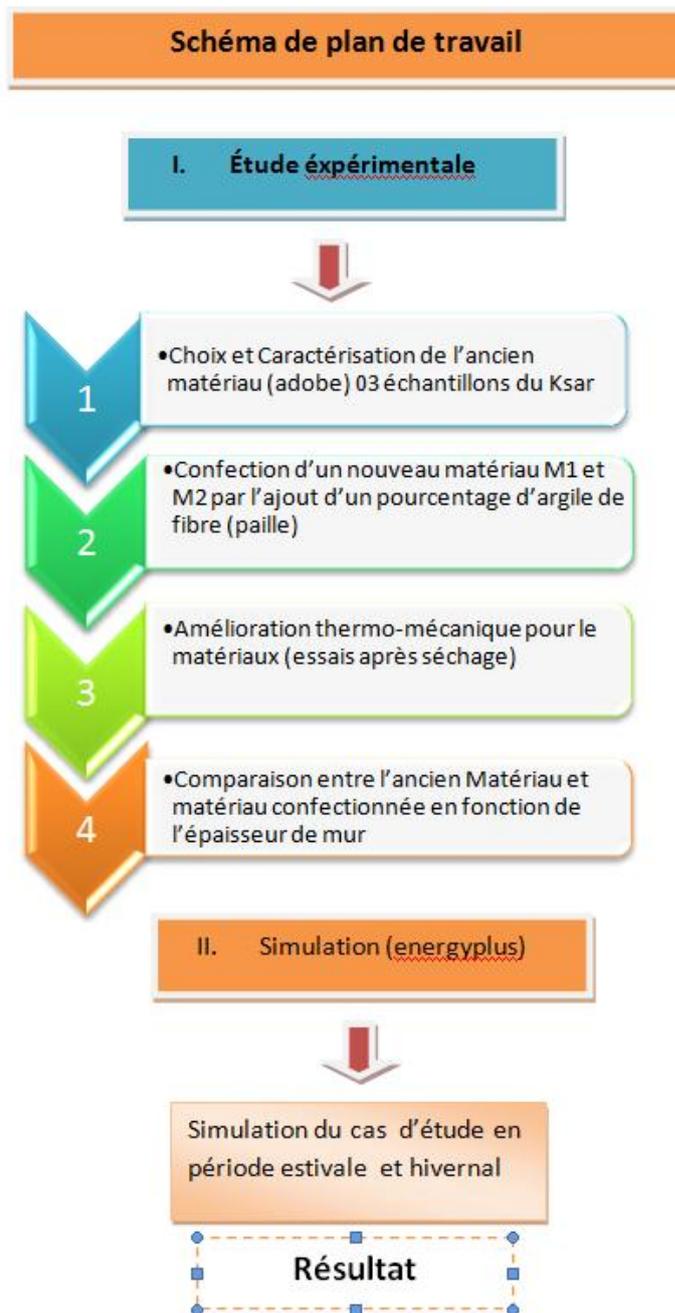


Figure IV. 10 schéma de plan de travail partie expérimentale

#### **IV.3.1 Les essais d'identification relatifs à la nature du matériau terre :**

Dans le souci de maîtriser la composition de la brique de terre crue et de trouver la composition optimale donnant les plus grandes performances de résistances et comportements physiques et thermiques ce à partir seulement du sol du site ou s'étale le Ksar, nous avons procédé à une étude expérimentale au niveau du laboratoire des matériaux de construction (L. R. G. C.) université de Amar Telidji-Laghouat - contenant les essais préliminaires d'identification.

##### **-Les essais physiques :**

La masse volumique (apparente et absolue)

Analyse granulométrique

Analyse par sédimentométrie

Limites d'Atterberg

##### **-les essais mécaniques :**

Résistance à la compression

##### **-l'essai thermo-physique :**

La conductivité thermique ( $\lambda$ )

La capacité thermique (c)

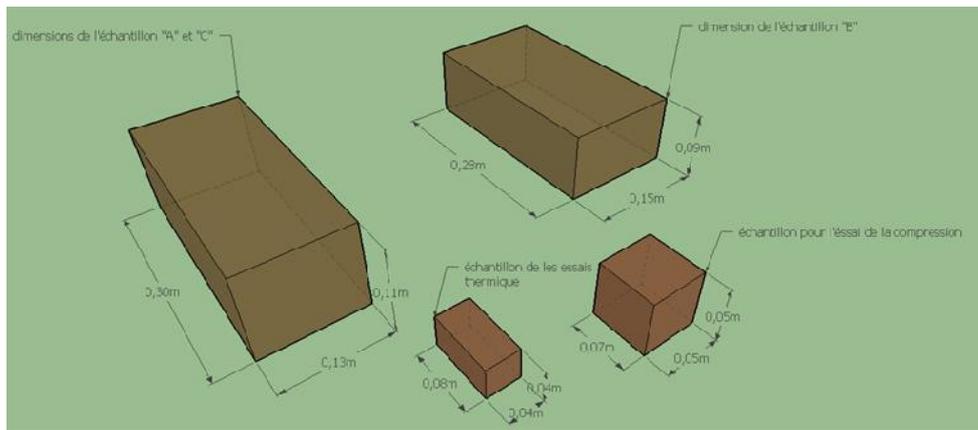
La résistance thermique

L'étude d'identification de la terre avec laquelle nos ancêtres ont construit le Ksar a été effectuée sur trois points différents du site afin de choisir la terre servant après pour la fabrication de la brique améliorée par recyclage de l'ancien matériau.

#### **IV.3.2 Tests sur les briques anciennes :**

Ces tests sont réalisés afin de connaître les caractéristiques physiques et mécaniques et notamment les caractéristiques thermo physiques de la brique de terre ancienne prélevée directement du site (les maisons du ksar de Laghouat Quartier Zgag el hadjedj).

Comme premier constat la géométrie de ces briques est en moyenne de : (30x13x11cm) et (25x15x9cm)



**Figure:IV. 11 la géométrie de briques et leur dimension[l'auteur]**

Il faudrait signaler que ces dimensions sont à peu près, les premières dimensions avec lesquelles les briques anciennes ont été confectionnées, la différence existe dans le moule utilisé. Il suffit de prendre en considération la métamorphose de la brique elle-même à travers le temps, malgré sa soumission à des alias du climat, le phénomène de vieillissement de certaines composantes de la brique, les creusements causés par l'eau de la pluie telle quelle présente dans l'image.



**Figure:IV. 12 adobes utilisés : [l'auteur]**

À cet effet, la préparation de l'essai est engagée par un découpage de la brique pour avoir des dimensions précises et permettant d'effectuer les différents essais surtout l'essai thermique et l'essai d'écrasement pour mesurer la résistance à la compression de l'ancien adobe.

Ainsi la brique a pris la forme suivante : rectangulaire et carré



**Figure:IV. 13 découpages de la brique pour les essais[l'auteur]**

**IV.3.2.1 Les matériaux :**

Afin d'élargir le champ d'investigation de notre étude, nous avons jugé utile d'opter pour trois types de terre et un seul type de paille d'orge. Une étude comparative sera effectuée sur ces trois terres. Pour compléter l'étude. Un lien sera établi entre les caractéristiques déterminées dans le présent chapitre et le comportement final de notre composite. Enfin, nous essayerons d'en déduire qu'elles seront les principales caractéristiques requises pour une terre destinée à l'adobe paille perfectionnée ?

**IV.3.2.2 Les terres :**

L'emploi judicieux de la terre dans la construction, nécessite la connaissance de quelques critères importants tels le gisement, la granulométrie, les limites d'Atterberg et certaines autres caractéristiques fondées sur la géotechnique telle que la densité absolue et apparente.

**IV.3.2.3 Le gisement :**

Le lien entre la géologie d'un lieu et son architecture est universel. Depuis que l'homme s'abrite, il exploite les matériaux disponibles localement pour construire son habitat. La terre est souvent le matériau le plus présent, mais de sa composition dépend la technique de mise en œuvre. Ainsi on peut observer le développement de familles de techniques de construction qui, selon la granularité du matériau disponible, feront évoluer l'état hydrique du mélange.

Dans la ville de Laghouat, la terre exploitée est extraite des oasis et des jardins qui étaient proches du vieux ksar (oasis Nord et Oasis sud). En plus, il existe un certain nombre de gisements de terre exploitable autour de Laghouat comme Mrigha, Khenegue...etc., qui contiennent à présent des carrières de briques rouges.

**IV.3.2.4 Prélèvement des échantillons :**

Le prélèvement est effectué sur trois points du site (figure IV.17). La représentativité de ce prélèvement est assurée par un choix judicieux qui tient en compte l'encadrement du ksar la partie haute et la partie basse la partie haute plus ancienne que la partie basse donc normalement elle n'est pas de la même qualité et tout simplement elle n'était pas du même âge.

Si on considère que le noyau ancien du ksar commence donc de haut vers le bas (voir le plan) et par la suite les points mentionnés dans le plan demeurent parmi les plus anciennes constructions du ksar. Carte qui présente l'état des maisons du Ksar de Laghouat ;



Figure:IV. 14 la localisation des prélèvements des échantillons[l'auteur]

### La localisation des prélèvements des échantillons

● La zone de prélèvement.

### Les murs d'où on a extrait la brique



Figure: IV. 15 Prélèvement d' Adobe « A »[auteur]



Figure: IV. 16 Prélèvement d' Adobe « B »[auteur]



Figure: IV. 17 Prélèvement d' Adobe « C »[l'auteur]

## IV.4 Caractéristiques géotechniques et physiques

### IV.4.1 Densités spécifiques

Comme caractéristiques physiques, la densité spécifique des trois terres sera déterminée suivant les normes ASTM — 854-58. [79]

**IV.4.1.1 La masse volumique (apparente et absolue) : Densité spécifique, ASTM.854.**

Méthode du volumétre « Le Chatelier » :

C'est un récipient de 250 cm<sup>3</sup> en principe comportant un col étroit muni d'un renflement de 20 cm<sup>3</sup> environ.

Sous le renflement se trouve la graduation zéro.

Au-dessus du renflement, d'autres graduations donnent le volume en 1/10 de cm<sup>3</sup> à partir du zéro.

# mettre l'eau jusqu'à une graduation voisine de zéro. Noter V1,

# peser le tout : M1,

# introduire le corps étudié jusqu'à ce que le niveau du liquide soit dans la partie utile de la graduation.

# bien chasser les bulles d'air. Noter V2

# peser : M2,

# la masse volumique absolue ou réelle est :

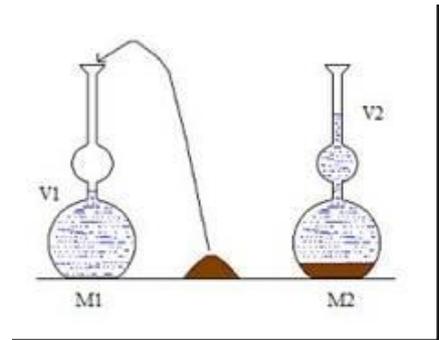


Figure:IV. 18 Le Chatelier. []

**IV.4.1.1.A Masse volumique absolue :**

Dans cette opération, j'ai calculé la masse volumique par la méthode de (Le Chatelier). On a utilisé Alcool éthanol au lieu d'utiliser le mazout et pour éviter le risque de ce dernier premièrement j'ai tamisé une quantité de sols de 60 g sur le tamis 125µ.

V1 = 23,2

V0 = 0

V = V1-V0

$\rho = M/V$                        $\rho = 60/23,2 = 2 586 = 2,59 \text{ g/cm}^3$

<b>M2 - M1</b>
<b>MVR = -----</b>
<b>V2 - V1</b>

**IV.4.1.1.B La masse volumique apparente :**

Tout d'abord, on prendre les mesures de l'adobe, le poids et le volume de son état réel après le séchage à l'étuve pour peser à l'état sec et prendre leur dimension réelle pour l'adobe A et c (30x13x11cm) et pour B (28x15x9 cm)

Pour cette opération, j'ai taillé l'adobe pour donner une dimension définie 4x4x16cm. J'ai ensuite taillé trois éprouvettes de mêmes dimensions, mais avec une masse différente.

Éprouvette A : M01 = 509,8 g / 256 = 1,99 g/cm<sup>3</sup>

Éprouvette B : M02 = 538,2 g / 256 = 2,10 g/cm<sup>3</sup>

Éprouvette C : M03= 540 g / 256 = 2,109 g/cm<sup>3</sup>

➤ **Masse volumique :**

Les résultats des masses volumiques représentent la masse volumique apparente et masse volumique absolue des deux essais.

- **Masse volumique apparente :**

Les résultats des essais sont présentés dans le tableau III.1

**Tableau IV. 10. Essai masse volumique apparente. [l'auteur]**

	Essai « A »	Essai « B »	Essai « C »
M réelle (g)	6966	6516	7454,2
V réelle (cm <sup>3</sup> )	4290	3780	4290
Y <sub>app</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	1,62	1,72	1,73
M <sub>0</sub> (g)	509,8	538,2	540
V <sub>1</sub> (cm <sup>3</sup> )	256	256	256
Y <sub>app</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	1,99	2,10	2,11

- **Masse volumique absolue :**

Les résultats des essais sont présentés dans le tableau III.2

**Tableau IV. 11. Essai masse volumique absolue. [l'auteur]**

	Essai « A »	Essai « B »	Essai « C »
M <sub>1</sub> (g)	60	60	60
V <sub>1</sub> (cm <sup>3</sup> )	23,4	23,2	23,2
V <sub>0</sub> (cm <sup>3</sup> )	0	0	0
Y <sub>ab</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	2,56	2,58	2,58
Y <sub>ab</sub> moyenne (kg/m <sup>3</sup> )	2564	2586	2586

#### **IV.4.2 Granulométrie :**

L'essai a pour but de déterminer en poids, la distribution des particules des sols suivant leurs dimensions.

L'analyse granulométrique s'obtient par deux opérations successives et complémentaires :

- Le tamisage sous l'eau (par voie humide) pour les particules de dimensions  $\geq 80 \mu\text{m}$  (0,08 mm), l'essai est effectué selon la norme NF P94-056 [82].
- La sédimentométrie pour les particules de dimensions  $< 80 \mu\text{m}$  qui complète la première, elle est effectuée selon la norme NF P94-056 [82]. Le principe de cet essai est fondé sur la loi de Stokes ou la vitesse de sédimentation des particules en suspension dans un milieu dépend de leurs diamètres.

La distribution des particules des trois sols est traduite par des courbes appelées « courbes granulométriques », figure [IV.18.19.20]

#### **IV.4.3 les analyses granulométriques des échantillons :**

Il est en effet difficile de donner beaucoup de détails, vu la variété des terres utilisées dans la construction et les techniques de mise en œuvre. Pour classer une terre donnée, le mieux est de référer sa courbe granulométrique aux fuseaux limites types des différentes techniques de construction.

Analyse granulométrique : éprouvette « A »

**Tableau IV. 12. Analyse granulométrique : éprouvette « A »[l'auteur]**

Tamis	Refus partiel	Refus cumulé	% refus Rn 100/M	Passant 100- Rn.100/Ms
31,5	0	0	0,00 %	100,00 %
25	53,4	53,4	0,78 %	99,22 %
20	11,09	64,49	0,94 %	99,06 %
16	30,2	94,69	1,38 %	98,62 %
14	57,3	151,99	2,21 %	97,79 %
12,5	6,5	158,49	2,30 %	97,70 %
10	32,4	190,89	2,77 %	97,23 %
8	42,3	233,19	3,39 %	96,61 %
6,3	34,9	268,09	3,89 %	96,11 %
4	60	328,09	4,76 %	95,24 %
3,15	33,8	361,89	5,26 %	94,74 %
2	48,9	410,79	5,97 %	94,03 %
1,25	62,4	473,19	6,87 %	93,13 %
1	35,3	508,49	7,38 %	92,62 %
0,4	2185,9	2694,39	39,13 %	60,87 %
0,315	83,2	2777,59	40,34 %	59,66 %
0,25	176,1	2953,69	42,89 %	57,11 %
0,125	921,7	3875,39	56,28 %	43,72 %
0,08	15,8	3891,19	56,51 %	43,49 %
0,062 5				40,71 %
0,046 8				34,62 %
0,034 0				31,14 %
0,022 0				28,53 %
0,015 8				26,79 %
0,011 3				25,05 %
0,008 1				23,31 %
0,005 8				22,44 %
0,003 4				18,09 %
0,001 4				16,00 %

% Argile	16 %
Limon	12 %
sable fin	25 %
<i>gros sable</i>	41 %
<i>cailloux</i>	6 %

À partir de cette analyse de l'échantillon « A », on constate que le pourcentage de sable est plus élevé donc type de terre est sableuse avec 16% d'argile.

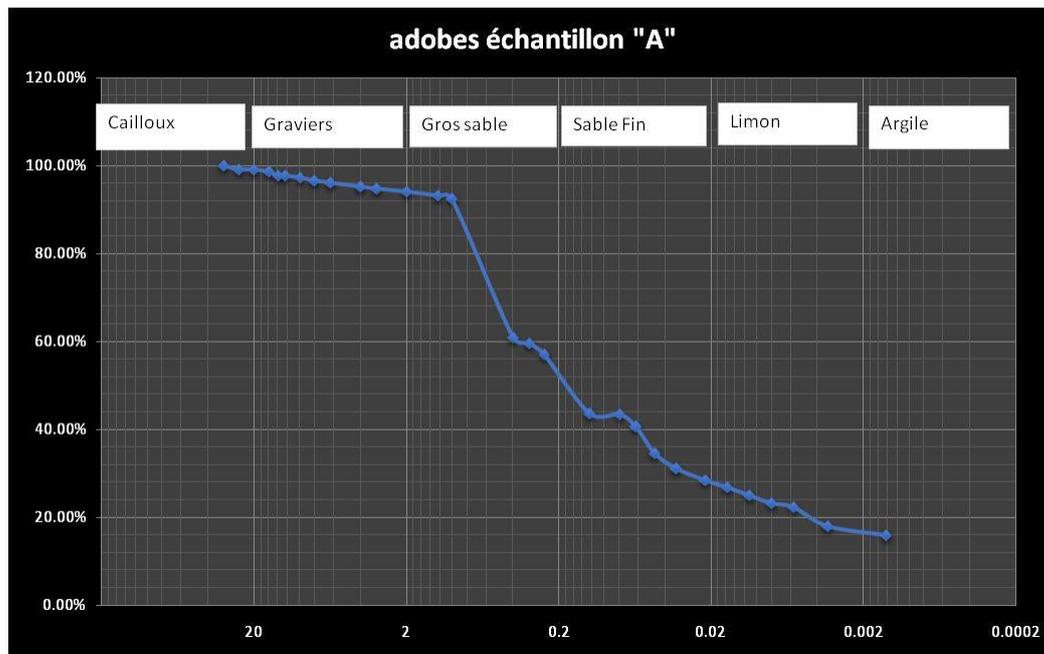


Figure:IV. 19 La courbe granulométrique de l'adobe « A »[l'auteur]

2. Analyse granulométrique : éprouvette « B »

Tableau IV. 13. Analyse granulométrique : éprouvette « B »[l'auteur]

Tamis	Refus partiel	Refus cumulé	% refus Rn 100/M	Passant 100- Rn.100/Ms
31,5	0	0	0,00 %	100,00 %
25	23,8	23,8	0,35 %	99,65 %
20	0	23,8	0,35 %	99,65 %
16	0	23,8	0,35 %	99,65 %
14	11,7	35,5	0,52 %	99,48 %
12,5	1,3	36,8	0,53 %	99,47 %
10	10,4	47,2	0,69 %	99,31 %
8	12,5	59,7	0,87 %	99,13 %
6,3	12,8	72,5	1,05 %	98,95 %
4	34,5	107	1,55 %	98,45 %
3,15	22,7	129,7	1,88 %	98,12 %
2	29,4	159,1	2,31 %	97,69 %
1,25	40,3	199,4	2,90 %	97,10 %
1	15,3	214,7	3,12 %	96,88 %
0,4	1089,3	1304	18,94 %	81,06 %
0,315	346,3	1650,3	23,97 %	76,03 %
0,25	450,5	2100,8	30,51 %	69,49 %
0,125	735,7	2836,5	41,19 %	58,81 %
0,08	134	2970,5	43,14 %	56,86 %
0,063 9				43,78 %
0,045 9				41,51 %
0,032 7				40,37 %
0,020 8				39,23 %
0,014 8				38,10 %
0,010 5				36,96 %
0,007 6				33,55 %
0,005 4				31,27 %
0,003 2				25,59 %
0,001 4				18,99 %
fond	34,3			
total	3004,8			

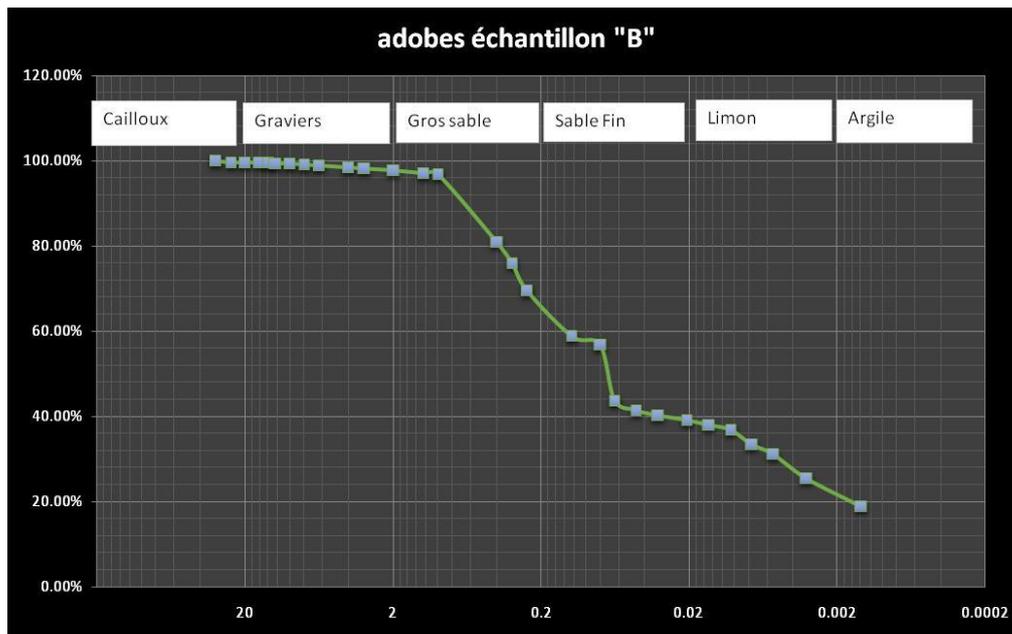


Figure:IV. 20 La courbe granulométrique de l'adobe « B »[l'auteur]

Analyse granulométrique : éprouvette « C ».

Tableau IV. 14. Analyse granulométrique : éprouvette « C »[l'auteur]

Tamis	Refus partiel	Refus cumulé	% refus Rn 100/M	Passant 100- Rn.100/Ms
31,5	355,1	355,1	5,16 %	94,84 %
25	25,5	380,6	5,53 %	94,47 %
20	45,5	426,1	6,19 %	93,81 %
16	60,9	487	7,07 %	92,93 %
14	29,8	516,8	7,50 %	92,50 %
12,5	20,8	537,6	7,81 %	92,19 %
10	59,3	596,9	8,67 %	91,33 %
8	41	637,9	9,26 %	90,74 %
6,3	35,8	673,7	9,78 %	90,22 %
4	58,2	731,9	10,63 %	89,37 %
3,15	28,4	760,3	11,04 %	88,96 %
2	43,6	803,9	11,67 %	88,33 %
1,25	53,3	857,2	12,45 %	87,55 %
1	23,4	880,6	12,79 %	87,21 %
0,4	1053,4	1934	28,09 %	71,91 %
0,315	241	2175	31,58 %	68,42 %
0,25	325,4	2500,4	36,31 %	63,69 %
0,125	616	3116,4	45,26 %	54,74 %
0,08	76,6	3193	46,37 %	53,63 %
0,065 1				40,44 %
0,047 0				37,22 %
0,033 5				36,15 %
0,021 5				34,00 %
0,015 4				31,86 %
0,011 0				29,71 %
0,007 9				27,57 %
0,005 6				25,42 %
0,003 3				21,99 %
0,001 4				15,77 %
<b>fond</b>	20,5			
<b>total</b>	3213,5			

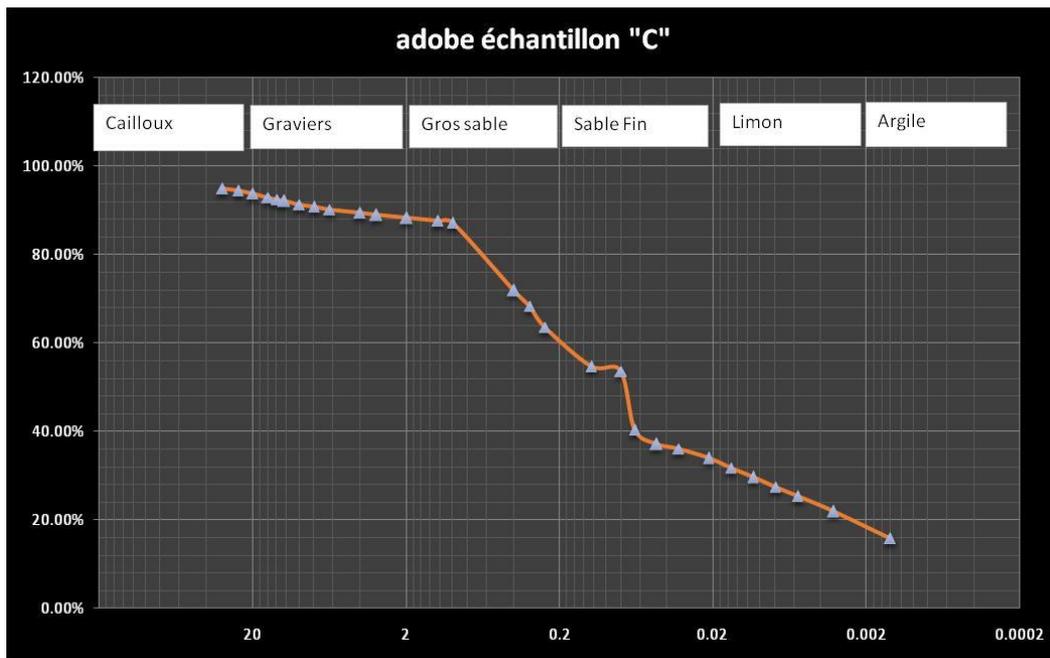


Figure:IV. 21 La courbe granulométrique de l'adobe « C ». [l'auteur]

Dans la partie suivante, nous allons illustré les résultats de l'analyse granulométrique au tableau ci-dessous ils sont reportés sur un graphe recommandé par : les normes françaises ; NF P 94 — 072 ; 1992 AFNOR [82].

La gamme de résultats des analyses révèle l'insertion de toutes les courbes obtenues dans le faisceau voir le graphe : notre choix a été porté sur la courbe représentant la plus parfaite continuité pour un étalage de dimensions de grains quasiment uniformes.

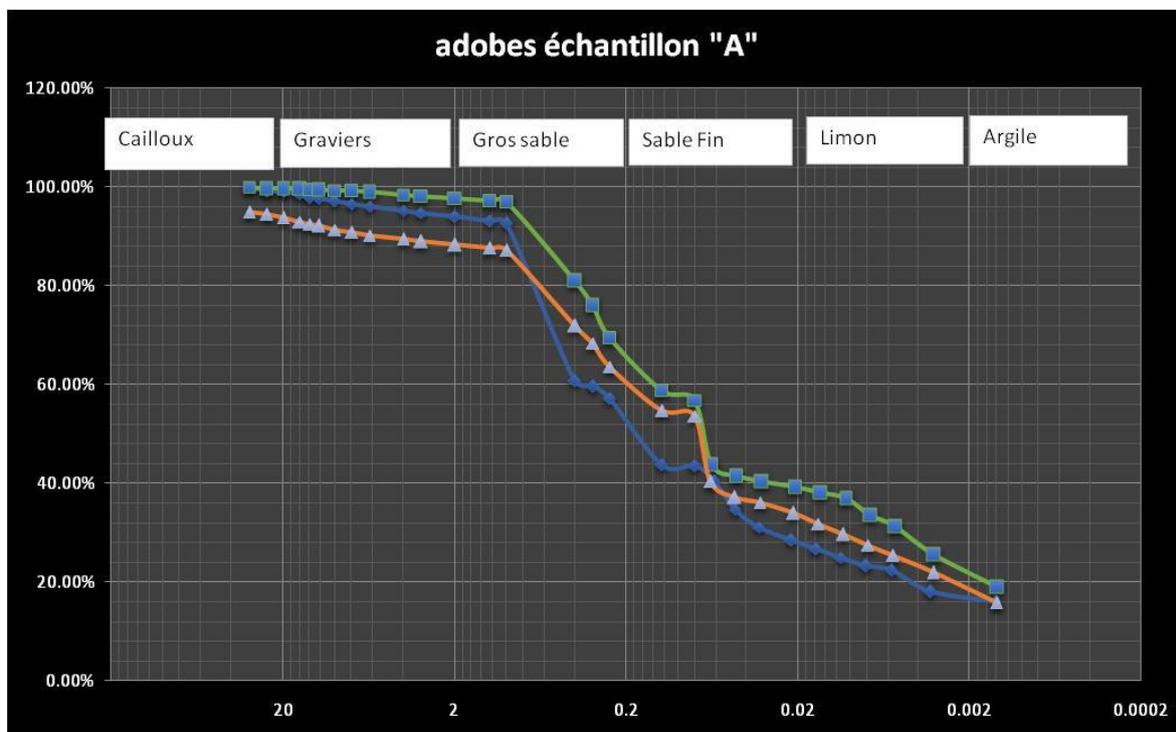


Figure:IV. 22 les courbes granulométriques des trois adobes. A, B, C [l'auteur]

Bleu : échantillon A, Vert : échantillon B, Orange : échantillon C

#### **IV.4.4 Les limites d'Atterberg :**

Une classification de terre ne pourra être obtenue, en connaissant uniquement les pourcentages de ces différents constituants, mais elle sera toujours complétée par les limites d'Atterberg (obtenues selon le procédé normalisé ASTM-D-423).

Ces limites, une fois déterminées feront l'objet d'une comparaison avec les fourchettes des adobes

La capacité de gonflement de la terre pourra aussi être estimée à partir de ces limites.

- Gonflement IP
- Faible <0 + 15 %
- Moyen 10 + 25
- Élevé 25 + 55
- Très élevé >55

Par définition, les limites d'Atterberg sont des teneurs en eaux pondérales caractéristiques du sol, elles correspondent à des comportements particuliers [79].

Ces limites déterminées sur la fraction du sol passant à travers des tamis de 400 µm.

Les limites utilisées sont :

- Limite de liquidité notée WL (norme NF P 94-050) [82] : teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état liquide (le sol est humide et déformable) et un état plastique.
- Limite de plasticité notée WP (NF P 94-054) [82] : teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état plastique et un état solide.
- Limite de retrait notée WR (XP P 94-060-1) [82] : teneur en eau à partir de laquelle le volume de l'échantillon cesse de diminuer quand sa teneur en eau décroît ou commence à augmenter quand sa teneur en eau croît.

À partir de ces trois essais, et par définition, on peut déterminer d'autres paramètres qu'ils sont :

- Indice de plasticité noté : IP.  $IP = WL - WP$
- Indice de retrait noté : IR  $IR = WL - WR$

Les résultants sur les limites de consistances des trois sols sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV. 15 LIMITE DE PLASTICITÉ — LIMITE DE LIQUIDITÉ [l’auteur]

<b>« LIMITE D’ATTERBERG » LIMITE DE PLASTICITÉ — LIMITE DE LIQUIDITÉ</b>	
<p>– À noter que le prélèvement est effectué à partir des briques d’adobe traditionnellement sélectionnées. après le tamisage 4mm, les échantillons sont mise à l’étuve pour séchage</p>	
<p>Le malaxage de l’échantillon avec l’eau distillée</p>	
<p>Répéter l’essai 4 fois avec un pourcentage d’eau différent W%, la protection de l’échantillon contre l’évaporation ; « le paraffinage »</p>	
<p>Les outils pour procéder à l’expérience de la limite la liquidité « L’APPAREIL DE CASAGRANDE »</p>	
<p>Pour les limites de plasticité on fait des rouleaux de 3mm d’épaisseur, ces rouleaux pour mesurer la limite d’élasticité de chaque échantillon</p>	

Tableau IV. 16. les limites d’Atterberg des trois échantillons « A. B.C « .[l’auteur]

Échantillon	WL%	LP%	IP%
<b>ADOBE A</b>	18,46	8,71	9,75
<b>ADOBE B</b>	19,22	14,69	4,53
<b>ADOBE C</b>	42,09	33,37	8,72

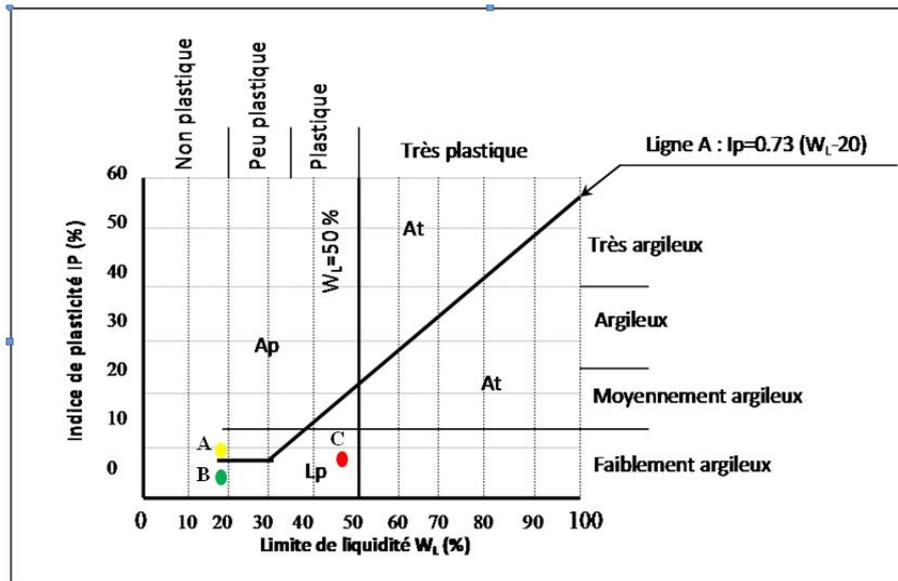


Figure:IV. 23 le classement des sols selon les limites d'Atterberg. [82]. [81]. [84].

D'après les données de ce tableau de casagrande, on peut classer le type de chaque sol si notre sol sableux ou argileux ou limoneux pour l'adobe A et B, il s'agit de sol faible argile et non plastique et par rapport au sol C, il s'agit d'un sol faible argile plastique.

#### IV.4.5 Les essais de l'écrasement (résistance à la compression) :

La résistance à la pression est souvent considérée comme caractéristique mécanique la plus importante des matériaux de construction, mais sa mesure a toujours été un sujet de polémique. ces 20 dernières années, la terre, qui est certainement l'un des matériaux de construction les plus anciens, est venue pour être reconsidérée comme matériel convenable pour la construction dans des économies avancées. Il y a plusieurs raisons de cette nouvelle attraction, mais les plus importantes sont le bas impact de ce matériel sur l'environnement et son règlement des conditions hydrothermiques du climat d'intérieur. Avec le grand intérêt récent pour le développement durable, les constructions de terre sont devenues très attrayantes. La conséquence de ceci a été l'aspect des études scientifiques sur les matériaux de construction de terre et particulièrement sur leurs propriétés mécaniques.

##### IV.4.5.1 Norme Résistance à la compression :

L'essai préconisé pour la mesure de la résistance à la pression des briques de la terre est cela utilisé pour des unités de maçonnerie, présentées en EN 772-1 (norme européenne 2000). [89]. Dans cette norme, on utilise des facteurs de correction d'allongement, ces facteurs de correction dépendent de l'allongement, mais varient selon la largeur de la brique. Une brique avec une plus petite largeur a comme conséquence un facteur de correction réduit pour le même allongement la sélection de cette norme afin de nous permettre de faire la comparaison entre l'adobe ancien ramené directement du vieux ksar et l'adobe perfectionné qu'on va préparer par la suite.

#### IV.4.5.2 préparation de Matériaux :

Les essais ont été effectués sur trois types de briques de la terre ramenée auprès du vieux ksar A B.C. Ces briques ont été fabriquées par l'extrusion en trois blocs d'adobe, on a fait couper la pour les plus petits spécimens (le 5x5x5 cm<sup>3</sup>). Les essais de compressibilité ont été effectués un type de presse hydraulique selon la taille des spécimens : une presse d'une capacité Fmax=100 kN.

L'essai d'écrasement est entamé sur les éprouvettes préparées (5x5x5 cm) pour établir la résistance à la compression.



Figure:IV. 24 Outil de la coupure de l'adobe

Couper la brique en forme cube de dimension (5X5X5) pour mesurer la résistance réelle de la brique



Figure:IV. 25 L'appareillage de la mesure la résistance à la compression

pour l'échantillon « A », « B » et « C », on a fait l'essai sur trois éprouvettes et on pris le moyen.

#### IV.4.5.3 Observation et interprétation : L'Adobe Ancien

Pour les briques d'adobe (non fibrées), la rupture se fait de manière brutale suite à l'apparition soudaine des fissures entraînant ainsi le découpage de la brique.

Tableau IV. 17. Résistance à la compression en fonction de pourcentage de paille pour toutes les terres [l'auteur] :

échantillon	F/kN	F en N.	S (mm <sup>2</sup> )	$\sigma = F/S.$	$\bar{\sigma} = F/S$ Moy	en (bars)	fc	Rési réel
« A »	6,24	6240	2500	2,50	2,03	20,32	0,85	17,27
	4,23	4230	2500	1,69				
	4,77	4770	2500	1,91				
« B »	5,47	5470	2500	2,19	2,25	22,48	0,85	19,11
	5,41	5410	2500	2,16				
	5,98	5980	2500	2,39				
« C »	4,63	4630	2500	1,85	2,46	24,60	0,85	20,91
	8,44	8440	2500	3,38				
	5,38	5380	2500	2,15				

Nous constatons que l'adobe de point « C » donne une résistance à la compression plus élevée par rapport aux autres briques d'adobe « A » et « B »

Ces résultats restent très faibles dans la mesure où il faudrait améliorer la capacité portante des murs porteurs (ceci est le cas des constructions en R+2 et trouver des remèdes à la fragilité du matériau)

#### **IV.4.5.3.A Observation :**

La mesure de la résistance à la compression sur petit sec de spécimens scié des briques n'est pas une solution facile pour au moins deux raisons. Premièrement, l'exécution pratique de ces essais est plutôt difficile : elle pose les problèmes de santé (la poussière) et de sûreté ou l'équipement spécifique lourd des besoins (scie équipée d'un système puissant de vide pour évacuer la poussière). Deuxièmement, il a semblé que les vibrations produites par la coupe sèche ont quelques fois endommagé les spécimens.

#### **IV.4.6 Essai thermo-physique :**

##### **IV.4.6.1 Méthode de mesure des propriétés thermo-physiques ( $\lambda$ ) :**

L'essai est effectué au laboratoire de recherche de génie civil (les caractéristiques thermiques dans les matériaux de construction) de l'université Amar Telidji de Laghouat. Et ceci par l'appareil et la méthode de hot disk

##### **IV.4.6.2 Méthode, du hot disk :**

La mise en œuvre de la méthode du Hot Disk qui s'intéresse à la mesure des propriétés thermo physiques des matériaux est simple. Une sonde, qui sert de source de chaleur et de capteur de mesure dynamique en enregistrant l'augmentation de la résistance de la sonde (qui correspond à l'augmentation de la température) est constituée d'un double spiral de Nickel de 10  $\mu\text{m}$  d'épaisseur prises en sandwich entre deux feuilles d'isolant Kapton ou Mica suivant la température d'utilisation (figure IV.26). Cette méthode (Hot Disk) consiste à imposer un flux de chaleur uniforme dans un plan séparant deux échantillons symétriques d'extension infinie[83].

En plus de sa mise en œuvre qui est simple, la méthode du hot Disk peut mesurer simultanément la conductivité thermique et la diffusivité thermique et donne par déduction la capacité thermique des matériaux. La difficulté qui apparaît lors de l'utilisation de cette méthode est d'avoir d'avance une idée sur les caractéristiques thermo-physiques du milieu. En effet, la connaissance grossière du matériau étudié (géométrie, conductivité thermique) permet de prédire la profondeur de pénétration et ainsi de choisir le type de sonde et la puissance de chauffe.

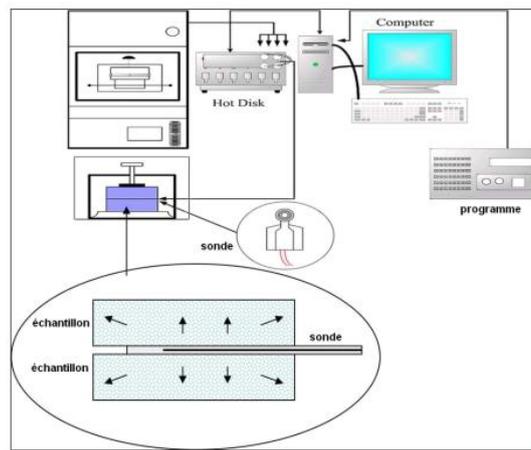


Figure : IV. 26 Dispositif expérimental de la méthode du Hot Disk[83]

#### IV.4.6.3 La préparation de l'échantillon :

On a fait couper l'adobe pour la façonner en forme parallélépipède rectangle de dimension 4×4×8 cm, les résultats de ces analyses sont présentés dans le tableau ci-dessous, par rapport à l'échantillon « A », « B » et « C ».

##### IV.4.6.3.A Les grandeurs thermo-physiques :

- les caractéristiques thermo-physiques de l'ancien adobe : Cas Zgag el hadjedj secteur sauvegardé à Laghouat :

Tableau IV. 18 propriétés thermo-physiques de l'ancien adobe [l'auteur]

Échantillon	A	B	C
Dimensions L × l × h (mm)	300×130×110	280×150×90	300×130×110
Densité (kg/m <sup>3</sup> )	2564	2586	2586
Conductivité thermique (W/m.K)	0,71	0,83	0,86
Capacité de chaleur spécifique (J/kg.K)	1.168	1.169	1.212
Diffusivité thermique (10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> /s)	0,611	0,715	0,710
Effusivité thermique (J.K-1.m-2.s-1/2)	8 572	9 267	6 745

#### IV.4.6.4 Résultats d'essai et discussion :

Les résultats prouvent que la densité des briques (B) et (C) est plus haute que celle (A), bien que la masse volumique des grains pleins des divers échantillons soit sensiblement identique, d'environ 2,65 g/cm<sup>3</sup>. La différence de densité est provoquée par la méthode de fabrication des briques, spécifiquement les conditions d'extrusion.

La conductivité thermique de trois briques est environ A= 0,71 B=0.83 C=0.86 (W/m.K). Ce matériau de construction n'ont pas été prévus pour l'isolation thermique. D'une part, nous notons que les valeurs obtenues de conductivité et capacité de chaleur entrent dans l'intervalle des valeurs de référence trouvées dans la littérature.

**IV.4.6.4.A Remarque :**

Il s'agit du résultat lié à la propriété thermo-physique de l'adobe ancien à l'état sec c'est-à-dire après le séchage de l'échantillon dans l'étuve, pour avoir une idée sur la conductivité de l'adobe en été. on a refait le même essai sur le même échantillon, mais par rapport à la teneur en eau échantillon contient un pourcentage d'eau pour voir la conductivité à l'état humide (en hiver) la dimension de l'échantillon nous a empêché à arriver à 100 % de la teneur puisqu'elle va se déformer totalement et l'essai est fait par un faible pourcentage.

**Tableau IV. 19 la conductivité thermique en fonction pourcentage de l'eau. [l'auteur]**

Essai N°	Masse d'échantillons	W %	conductivité thermique W/m <sup>2</sup> . s
1	546,2	4 257	0,892 2
2	541,5	3 359	0,888 3
3	537,0	2 500	0,880 9
4	532,7	1.680	0,876 1
5	528,4	0,859	0,873 3
6	523,9	0,000	0,861 4

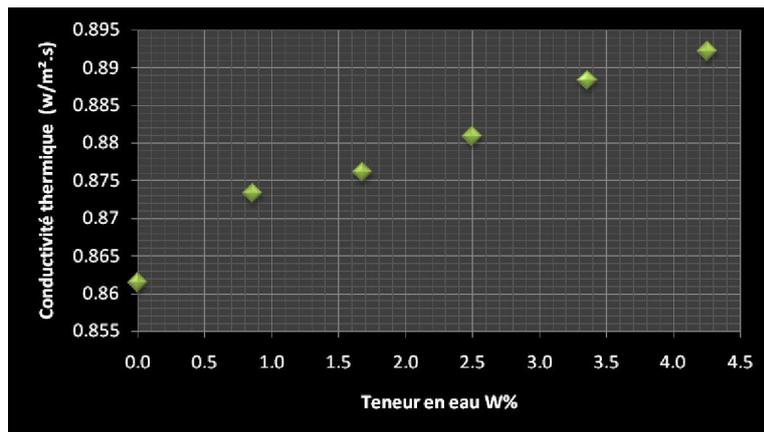


Figure : IV. 27 la conductivité thermique en fonction pourcentage de l'eau. [l'auteur]

Les valeurs de la teneur en eau W % est trop faible (inférieur à 5 %) pour justifier ces résultats.

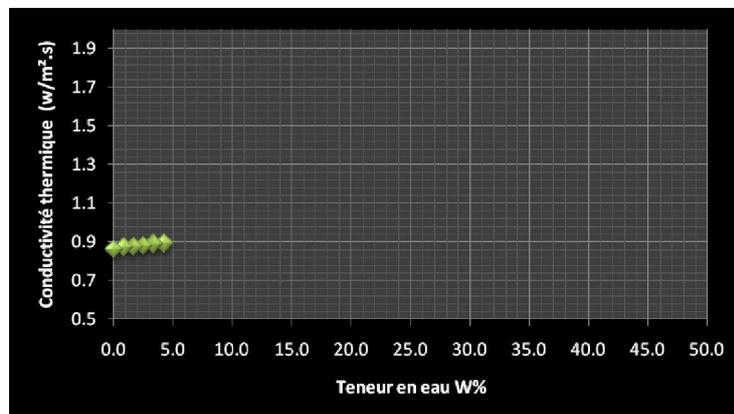


Figure : IV. 28 la conductivité thermique en fonction pourcentage de l'eau.[l'auteur]

Dans le souci d'améliorer les performances des constructions en matériau-terre, l'attention est focalisée vers la stabilisation de la brique de terre crue. Le choix du stabilisant est porté sur la correction granulométrique (lever le pourcentage d'argile de l'adobe et les fibres végétales telles que la paille ; matériau pouvant être fabriqué traditionnellement, au niveau du site (Ksar de Laghouat). C'est un savoir-faire ancien qui a prouvé ses qualités dans différents domaines d'utilisation, à l'écart du ciment qui nécessite tout un processus de fabrication et une main-d'œuvre spécialisée.

### IV.5 Caractérisation des matériaux utilisés argile :

La construction en blocs de terre crue est une technologie dont le but est l'utilisation des matériaux locaux, c'est-à-dire disponibles dans les alentours immédiats du site de construction. Le contexte même de l'évolution rapide de la qualité de la terre crue demande donc un spectre de terre à utiliser le plus large possible. Ainsi, les exigences résident uniquement au niveau des caractéristiques physiques, et mécaniques qui peuvent prédire la qualité des blocs en fonction de leur destination (brique, pisé, terre de paille... etc). En ce qui suit, on présente les résultats des essais d'identification un matériau radicalement différent (Argile) utilisé pour confectionner les blocs en terre crue. [81].

Dans cette section, nous n'avons pas mentionné les caractéristiques de l'argile au niveau de laboratoire, mais nous avons fait appel au mémoire de Nouiwa Taher (81) et nous avons repris les valeurs de quelques essais qui ont été précédemment faits.

#### IV.5.1 . Échantillonnage :

##### Argile :

Cette argile provient de la région de Mraigha (prélevée de la carrière de Sofabril, une briqueterie de la région) distante de 6 km au nord de la ville de Laghouat. Elle se présente sous forme d'un sol de couleur marron figure [IV.29].

#### IV.5.2 Caractéristiques des matériaux :

Le programme expérimental consiste à effectuer une série d'essais pour déterminer un bon nombre de paramètres et d'indices permettant l'identification du matériau.



Figure : IV. 29 Localisation de la zone étudiée [Nouiwa]

Concernant l'identification de l'argile, l'étude expérimentale comprend les analyses et les essais suivants :

- Masse volumique
- Analyses granulométriques par sédimentation.
- Les limites d'Atterberg : Classification des argiles.

#### **IV.5.2.1 Masse volumique :**

Les résultats des masses volumiques représentées la moyenne de deux essais.

- **Masse volumique apparente :**

Les résultats des essais sont présentés dans le tableau III.1

**Tableau IV. 20 Masse volumique apparente de l'argile. Nouioua Tahar[81]**

	Essai 1	Essai 2
$M_0$ (g)	264	264
$M_1$ (g)	1674	1682
$V_1$ (cm <sup>3</sup> )	1000	1000
$\gamma_{app}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,41	1,42
$\gamma_{app}$ moyenne (g/cm <sup>3</sup> )	1.415	
$\gamma_{app}$ moyenne (kg/m <sup>3</sup> )	1415	

#### **Masse volumique absolue :**

Les résultats des essais sont présentés dans le tableau III.2

**Tableau IV. 21 masse volumique absolue de l'argile. Nouioua Tahar[81]**

	Essai 1	Essai 2
$M_1$ (g)	200	200
$V_1$ (cm <sup>3</sup> )	300	400
$V_2$ (cm <sup>3</sup> )	406	502
$\gamma_{ab}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,89	1,96
$\gamma_{ab}$ moyenne (g/cm <sup>3</sup> )	1,93	
$\gamma_{ab}$ moyenne (kg/m <sup>3</sup> )	1930	

#### **IV.5.2.2 Analyse granulométrique :**

L'essai normalisé (NF P 18-560) par voie sèche, nous permet de déterminer la répartition des grains de sable suivant leurs grosseurs, cette répartition est traduite par la courbe granulométrique de la figure IV.30.

IV.5.2.3 Analyses granulométriques par sédimentation :

Tableau IV. 22. présente les résultats d'analyse granulométrique d'argile. Nouioa Tahar [81]

Diamètre de tamis Ø	Refus partiel (GR)	Cumulé des Refus (GR)	Cumulé %	Tamisât %
3,15	2,5	2,5	0,13 %	99,88 %
2,5	0,1	2,6	0,13 %	99,87 %
2	0,3	2,9	0,15 %	99,86 %
1,6	0,2	3,1	0,16 %	99,85 %
1,25	0,2	3,3	0,17 %	99,84 %
1	0,1	3,4	0,17 %	99,83 %
0,8	0,1	3,5	0,18 %	99,83 %
0,63	0,3	3,8	0,19 %	99,81 %
0,5	0,2	4	0,20 %	99,80 %
0,315	0,8	4,8	0,24 %	99,76 %
0,16	5,5	10,3	0,52 %	99,49 %
<b>0,08</b>	<b>12,6</b>	<b>22,9</b>	<b>1,15 %</b>	<b>98,86 %</b>
0,066 376 43				97,99 %
0,047 204 5				96,01 %
0,033 567 95				94,03 %
0,021 467 72				90,08 %
0,015 346 06				86,12 %
0,010 967 49				82,17 %
0,007 836 48				78,21 %
0,005 569 75				76,24 %
0,003 341 48				62,02 %
<b>0,001 413 37</b>				<b>49,74 %</b>
0,001 042 07				45,47 %

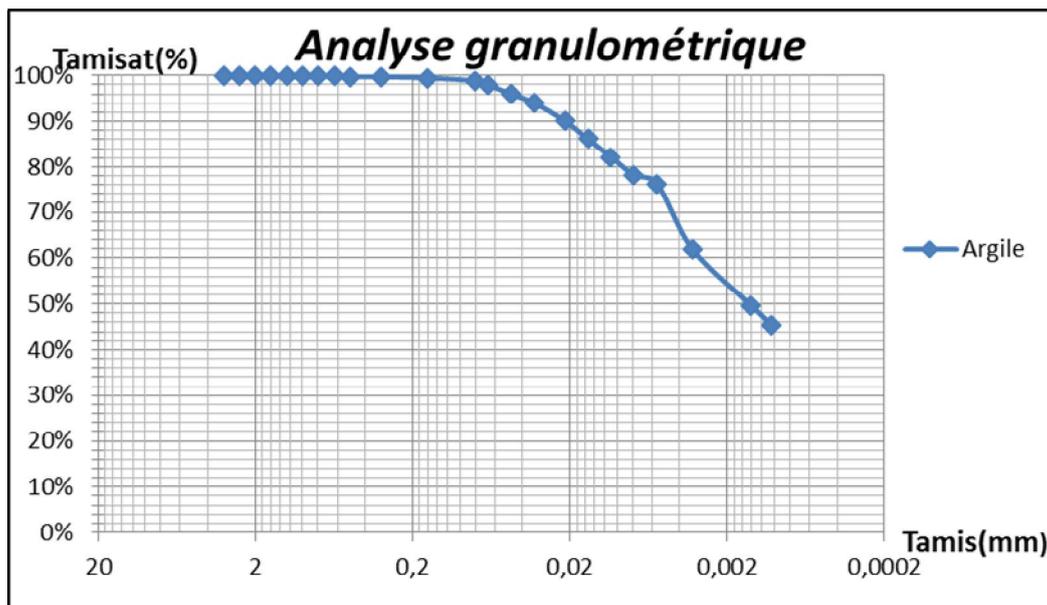


Figure : IV. 30 Courbe granulométrique d'argile. [81]

D'après le tableau IV.22, plus que 98 % du passant est inférieurs à 0,08 ø (80 µm) et 50 % du passant est inférieur à 0,001 042 07ø

**IV.5.2.4 Les limites d’Atterberg : Classification des argiles :**

Les résultats des limites d’argiles sont présentés dans le tableau III.5

**Tableau IV. 23 Les limites d’Atterberg d’argile. Nouioa Tahar[81].**

	W <sub>L</sub> (%)	W <sub>P</sub> (%)	I <sub>P</sub> (%)
Argile	53	31	22

Pour déterminer l’état d’argile utilisée, portant les résultats obtenus sur le diagramme de Casagrande. (Voir figure IV.31).

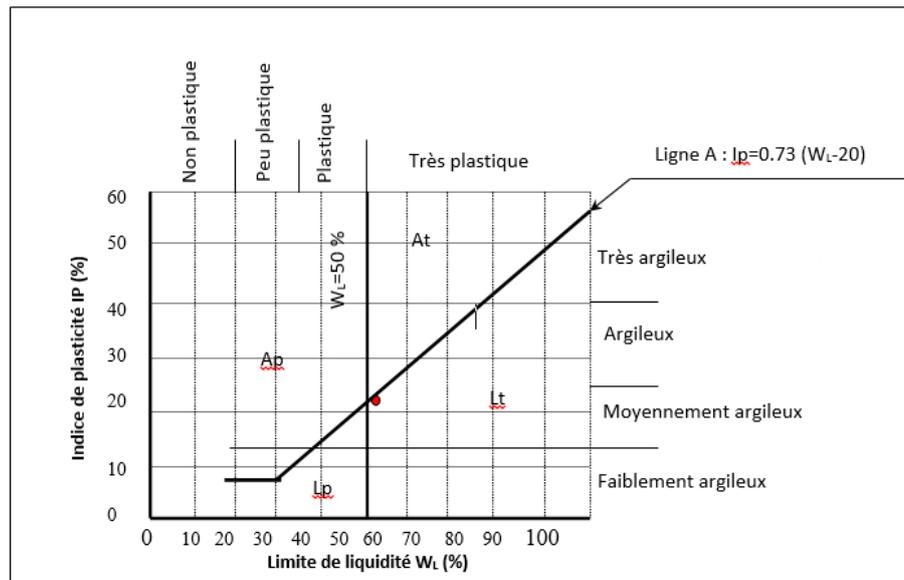


Figure:IV. 31 Classification des sols fins sur le diagramme de Casagrande (Philipponnat et Hubert. 1997)

**Nous pouvons conclure que l’argile utilisée de Mraigha est une argile plastique à très plastique moyennement argileuse et qui a tendance d’être une Illite.**

**IV.6 Amélioration par correction de granularité :**

Les sols disponibles peuvent parfois présenter des caractéristiques susceptibles d’amélioration au moyen d’apports ou de coupures granulaires ; c’est ainsi que l’on peut corriger une teneur trop forte ou trop faible en fines ou en gravillons. Un sol trop plastique pourra ainsi être amélioré par un apport de sable, cependant qu’un sol trop peu plastique le sera par rapport de fines.

Voir les variations de plasticité (limites d’Atterberg) d’un mélange sable argile pour différentes proportions de sable et d’argile [07].

**IV.6.1 Mélange de sols :**

Si l’on dispose de deux sols (1) et (2) de granularité  $d_1/D_1$  et  $d_g/D_g$  avec  $D_1$  supérieur à  $D_g$  et  $d$  supérieur à  $d_g$  les mélanges de ces deux sols auront une granularité  $d_2/D_1$ , et leurs courbes granulométriques seront comprises entre les courbes (1) et (2).

La courbe d’un mélange composé de  $m$  % de (1) et de  $n$  % de (2) sera telle que :

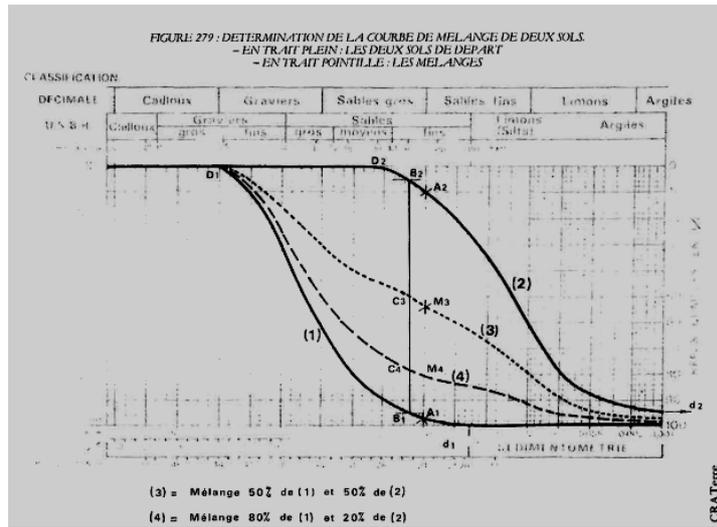


Figure : IV. 32 déterminations de la courbe de mélange de deux sols. [07]

$$\frac{MA_2}{MA_1} = \frac{m}{n}$$

Pour une grosseur de grains donnée, M est situé sur la courbe de mélange, A2 sur la courbe (2) et A1 sur la courbe (1). Les valeurs de MA2 et MA1 sont lues en pourcentage sur l'échelle des ordonnées.

Par exemple, pour 0,2 mm et la courbe de mélange (4) on lit sur 1er graphique :

$$\frac{M_4 A_2}{M_4 A_1} = \frac{70,4}{17,6} = \frac{m}{n} = \frac{80}{20}$$

Il en est ainsi pour toutes les grosseurs de grains compris entre D1 et d2. Un mélange (4) composé de 80 % de sol (1), et de 20 % de sol (2) contient bien 19,6 % d'éléments inférieurs à 0,2 mm. En effet, 100 kg de ce mélange contiennent 80 kg de sol (1) soit  $0,02 \times 80 = 1,6$  kg d'éléments inférieurs à 0,2 mm et 20 kg de sol (2) soit  $0,9 \times 20 = 18$  kg d'éléments inférieurs à 0,2 mm.

#### IV.6.2 Composition d'un mélange à granularité optimale :

Pour un usage spécifique, les courbes granulaires des sols ayant la granularité optimale sont situées à l'intérieur d'un fuseau granularité. Lorsque la courbe d'un sol n'est pas, en totalité ou en partie, située dans le fuseau, il est possible, par mélange avec un autre sol riche des éléments manquants au premier, d'obtenir un produit satisfaisant. La figure [IV.33] montre quelques exemples de ce procédé. [07].

IV.6.3 Correction granulométrique :

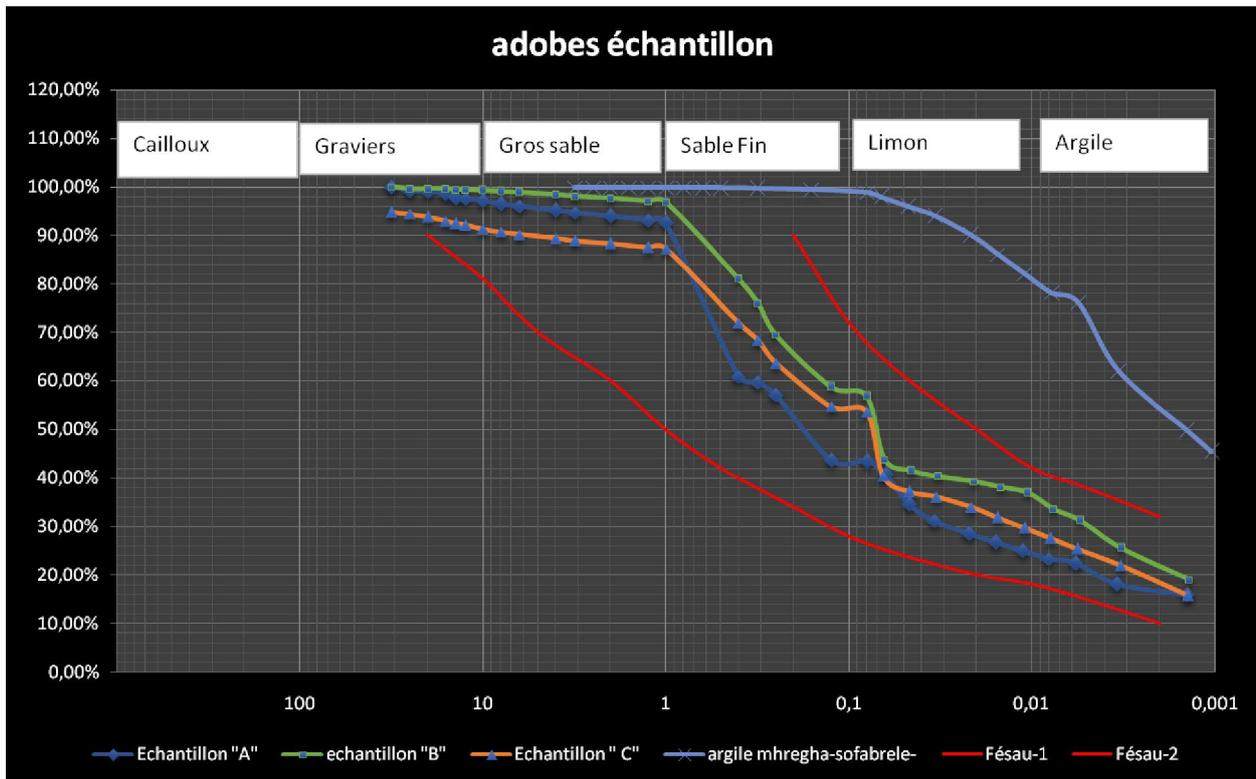


Figure : IV. 33 courbes granulométriques des trois échantillons avant l'Amélioration [l'auteur]

Tableau IV. 24. granulométrique des sols et de l'argile. [l'auteur]

argile mhregha-sofabrele-		sol-A-												80%A+20%sof		mélange 70%A+30%sof	
Diamètre de tamis	Tamisé t %	Tamis	Passant	Diamètre	Sol "A"		Sol "B"		Sol "C"		Argil Sofibril		f				
3,15	99,88%			100	20	39	33,00%	39	33,00%	34	34,00%	100	100,00%	39,20%	39,30%		
2,5	99,87%	31,5	#####	100	16	38	36,00%	100	100,00%	32,5	32,50%	100	100,00%	36,40%	36,60%		
2	99,86%	25	99,22%	100	12	37	37,00%	39	39,00%	32	32,00%	100	100,00%	37,60%	37,90%		
1,6	99,85%	20	99,06%	100	8	36	36,00%	38,5	38,50%	30	30,00%	100	100,00%	36,80%	37,20%		
1,25	99,84%	16	98,62%	100	4	34,5	34,50%	38	38,00%	28,5	28,50%	100	100,00%	35,60%	36,15%		
1	99,83%	14	97,79%	100	1,8	33,8	33,80%	37,5	37,50%	28	28,00%	100	100,00%	35,04%	35,66%		
0,8	99,83%	12,5	97,70%	100	1,4	33,2	33,20%	37	37,00%	27,8	27,80%	100	100,00%	34,56%	35,24%		
0,63	99,81%	10	97,23%	100	1	32	32,00%	36,4	36,40%	27	27,00%	100	100,00%	33,60%	34,40%		
0,5	99,80%	8	96,61%	100	0,6	74,4	74,40%	28,2	28,20%	26,4	26,40%	100	100,00%	73,52%	82,08%		
0,315	99,76%	6,3	96,11%	100	0,2	52,2	52,20%	66	66,00%	60	60,00%	39	39,00%	61,56%	66,24%		
0,16	99,49%	4	95,24%	100	0,16	48	48,00%	62	62,00%	58	58,00%	38,8	38,80%	58,16%	63,24%		
0,08	98,86%	3,15	94,74%	100	0,12	42,6	42,60%	58	58,00%	54,2	54,20%	38,5	38,50%	53,78%	59,37%		
0,06637643	97,99%	2	94,03%	100	0,08	42,8	42,80%	56,6	56,60%	54	54,00%	38,2	38,20%	53,88%	59,42%		
0,0472045	96,01%	1,25	93,13%	100	0,04	32,4	32,40%	41,4	41,40%	36,4	36,40%	35	35,00%	44,32%	51,18%		
0,03356795	94,03%	1	92,62%	100	0,018	27	27,00%	38,4	38,40%	32,4	32,40%	35	35,00%	39,20%	45,30%		
0,02146772	90,08%	0,4	60,87%	100	0,014	26	26,00%	38	38,00%	31,2	31,20%	35,2	35,20%	37,84%	43,76%		
0,01534606	86,12%	0,315	59,66%	100	0,01	24	24,00%	36,2	36,20%	29	29,00%	35,1	35,10%	35,22%	40,83%		
0,01096749	82,17%	0,25	57,11%	100	0,006	22,2	22,20%	32	32,00%	26	26,00%	35	35,00%	33,16%	38,64%		
0,00783648	78,21%	0,125	43,72%	100	0,002	16,2	16,20%	22	22,00%	18	18,00%	35	35,00%	23,76%	27,54%		
0,00556975	76,24%	0,08	43,49%	100	0,0016	16	16,00%	20	20,00%	16,3	16,30%	35	35,00%	23,04%	26,56%		
0,00334148	62,02%	0,0625	40,71%	100	0,0012							46,3	46,30%	9,26%	13,89%		
0,001413	49,74%	0,0468	34,62%														
0,00104207	45,47%	0,0340	31,14%														
		0,0220	28,53%														
		0,0158	26,79%														
		0,0113	25,05%														
		0,0081	23,31%														
		0,0058	22,44%														
		0,0034	18,09%														
		0,0014	16,00%														

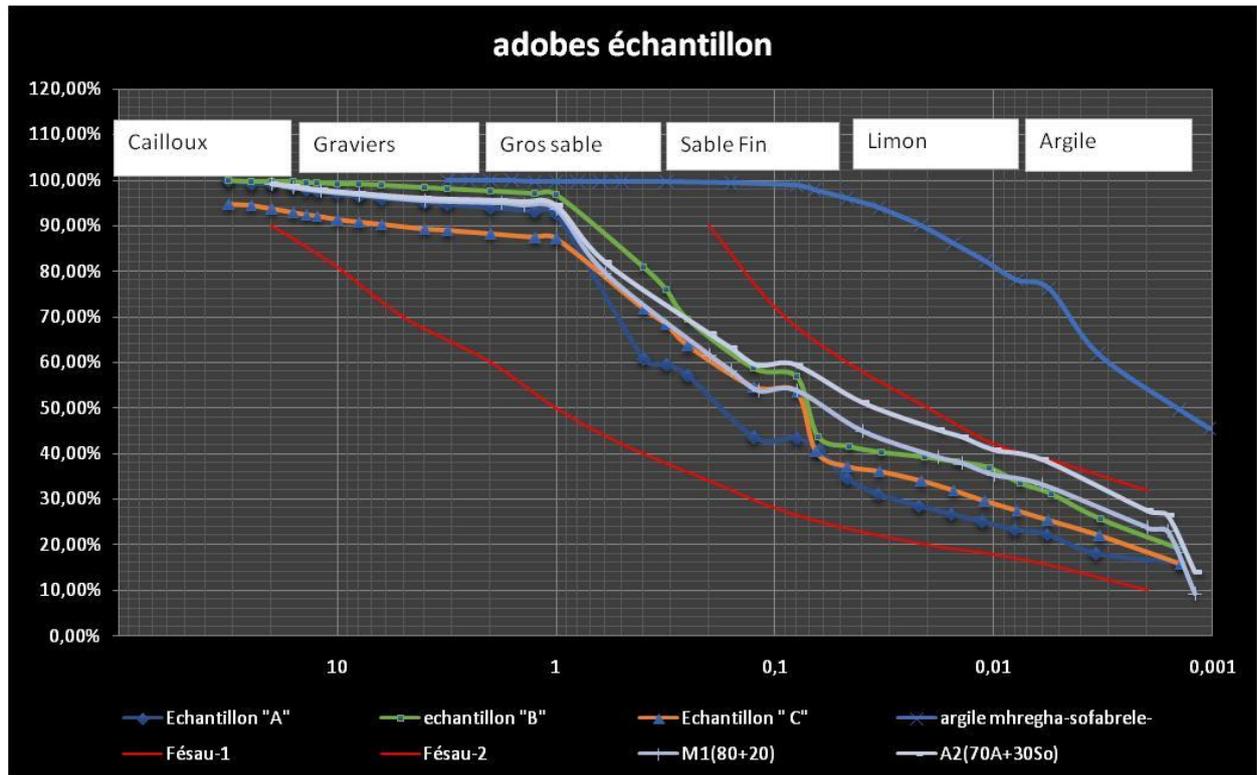


Figure : IV. 34 les courbes granulométriques après correction des trois échantillons [l'auteur]

#### IV.7 Préparation de mélange :

Après avoir identifié les caractéristiques physiques, mécaniques et thermo-physiques de l'ancien adobe de ksar de Laghouat, on a essayé d'améliorer les propriétés de cette brique venir notamment en ce qui concerne les caractéristiques mécaniques et thermo-physiques de cette brique et cela de la manière suivante :

1. Augmentation du niveau d'argile dans l'échantillon sélectionné pour augmenter son adhérence par l'amélioration granulométrique des sols en briques sélectionnés « A » ainsi que pour améliorer ses propriétés mécaniques.
2. Utilisation de la paille pour améliorer les propriétés du sol mécaniquement et thermiquement et cela est dû aux caractéristiques réelles de cette matière et ainsi fourni similaire à d'autres matériaux sur les marchés et le prix bas et le matériel sont disponibles dans tous les domaines.

##### IV.7.1 Mélange terre et paille :

Après la sélection du sol propice « A », la reconnaissance des propriétés de l'ancien adobe et des composites de chaque sol, il s'agit maintenant de présenter les étapes suivies par la confection des briques de terre crue d'un côté et étudier leur caractéristique mécanique et thermo physique d'un autre côté afin de comparer entre les deux.

##### IV.7.1.1 préparation de l'échantillon :

Identifier une terre convenable. Les briques récupérées de murs en ruine peuvent être recyclées si la terre de brique est propice à ce sujet.

Suite à l'identification des caractéristiques des sols de chaque adobe on a récupéré des briques d'adobe de site « A » de l'ancien mur en ruiné puisqu'il contient une quantité suffisante et pas encore débarrassée dans l'oued, où habituellements les citoyens jettent cette matière à ces endroits.

On a commencé à recyclée, suivant les processus ci-dessous :

- 1 - on ramener une quantité d'adobe telle qu'il est dans son état naturel des murs anciens ruiné au laboratoire et stocké dans un endroit sa température ambiante stable et protégée contre la chute des pluies et toutes autres intempéries.
- 2 – l'adobe ensuite broyée, cette opération s'effectue manuellement par un marteau et gamète pour la broyer doucement dedans afin de ne pas changer la granulométrie de la terre.
- 3 – nettoyer et débarrasser de tous les ajouts qui se trouvent dans l'adobe et qui va plus tard menacer et influent sur le bloc plus tard comme les noix, les grosses pierres, cendre les détritux, etc.

La dernière opération consiste à tamiser la terre au tamis de 5 mm. Ce diamètre a été choisi afin d'avoir une terre permettant un malaxage facile en présence d'eau (éviter la présence des mottes gênant ce processus prend beaucoup de temps pour leur dissolution).

Les terres ainsi obtenues seront stockées dans des sacs en attente de leur utilisation

#### **IV.7.1.2 Correction granulométrique :**

Après avoir apporté une quantité importante d'argile de la carrière Mraigha, et la placée près du laboratoire de génie civil à l'université Amar Telidji de Laghouat. L'argile a été préparée à travers les étapes suivantes afin de mélanger avec des sols préparés à l'avance.

1 - Prendre assez d'argile et purifier de pierres et d'impuretés suspendues à la carrière.

1. Broyez une quantité d'argile par un broyeur mécanique pour écraser la boue et nous permettrons de la mélanger facilement avec les sols moulus

3 - Après séchage, l'argile a été placée dans des sacs pour être stockée en attendant les étapes suivantes :

Suite à la correction granulométrique, que nous avons faite avant dans le tableau : IV.24 les le graphique de la courbe granulométrique, nous avons constaté qu'on doit mélanger 80 % du sol plus 20 % d'argile pour 10 kg mélange 8 kg de sol plus 2 kg d'argile ce par rapport au premier mélange M1, mais pour le second échantillon de 70 % du sol, plus 30 % d'argile dans le sens de 10 kg, on mélange 7 kg de terre plus 3 kg d'argile broyée pour M2

le malaxage de ces mélanges au lieu d'être effectuée manuellement, le malaxeur mécanique joue son travail pour nous aider dans ce processus et pour bien obtenir un mélange homogène biens malaxé de ces sols et en fin nous avons deux échantillons du sol M1 qui est constitué de 80 % de Sol + 20 % d'argile et échantillon M2 contenant 70 % du sol + 30 % d'argile à la fin, les échantillons de sol M1 et M2 ont été stockés dans les sacs de chaque échantillon,

#### **IV.7.1.3 Préparation de la paille :**

Les différentes étapes suivies pour la préparation des fibres de paille se résument aux points suivants :

Se débarrasser de toute fibre d'autre nature.

Étant donné la non-flexibilité de la fibre de paille, le mélange intime de terre et paille pose de sérieux problèmes particulièrement si des brins longs sont utilisés. Après des essais de tâtonnement, on s'est aperçu qu'on pourrait contourner ce problème si on se limite à des fibres de longueur inférieure ou égale à 5 cm.

Vu que les dimensions des fibres ne pouvant être obtenues qu'à l'aide des ciseaux, opération manuelle difficile face à la quantité importante de la paille, on a limité les longueurs avec lesquelles on va travailler à cinq cm :

- une longueur utilisée dans les briques faisant objet de l'étude de la résistance à la compression et les propriétés thermo-physiques à savoir :
- Une longueur qui varie de 2 à 5 Cm utilisée dans les briques faisant objet de l'étude de résistance à la compression.
- Une fois les fibres découpées aux longueurs désirées, elles sont stockées dans des sacs en attendant leur utilisation.

#### **IV.7.2 Préparation du mélange méthode rustique :**

Le malaxage de terre plus les fibres, se fait par voie humide ou l'ajout de l'eau se trouve antérieur à celui des fibres. On malaxe donc les fibres avec la terre humide.

Cette méthode qui permet de s'affranchir de toute machine est purement manuelle. Elle a été choisie à plus d'une raison. Bien que l'utilisation du malaxeur ait ses avantages, il n'en manque pas d'inconvénients dont on cite :

- À des teneurs en eau relativement faible, beaucoup de mélange se colle aux plancher, si notre terre est d'un certain pourcentage en argile. Et il n'est guère pensable des grattes après chaque malaxage.
- L'utilisation de la fibre de paille dans une pâte de terre épaisse ne peut être homogénéisée avec les simples rotations effectuées par la pelle.

Il est donc nécessaire, si l'on voulait avoir un mélange terre et paille homogène, de procéder soigneusement à sa réalisation en choisissant la méthode de malaxage convenable par pieds.

#### **IV.7.2.1 Le processus :**

Les étapes suivies sont :

- La terre prête à l'emploi sera divisée en plusieurs quantités dont chacune aura un poids déterminé, permettant de réaliser un nombre défini de briques.
  - Sur une plateforme, plate et rigide couverte d'un grand film plastique, chaque quantité de terre sera mise sous forme d'un tas au milieu duquel la quantité d'eau nécessaire pour le malaxage soit versée 19% de la quantité de sol : Valeur reprise depuis le mémoire (Aouissi Fatima)[79]
  - 4 » la terre est couverte par un film plastique et laissée s'imbiber d'eau.
  - Une fois, la terre est imbibée qu'il s'agit de la mélanger avec une pelle et à pied jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène.
  - Le mélange obtenu sera partagé en petites parties, égales au nombre de briques voulu (chaque partie permet la confection d'une brique).
  - A chaque partie, on ajoute la quantité de paille désirée, et ceci suivant deux modes :  
Pour les éprouvettes destinées aux, essais de résistance à la compression, il s'agit d'aplatir notre mélange en couche mince sur lesquelles on fait tomber les fibres de paille sous forme de pluie afin d'assurer une bonne distribution. Par la suite, on continue à mélanger jusqu'à l'homogénéisation du composite.
  - La dernière étape consiste à remplir immédiatement les moules pour confectionner les éprouvettes désirées. De 280×120×80 mm [suivant la norme C.N.E.R.B Biskra]. [78]
- Enfin il est à constater que : cette méthode de mise en œuvre présente un avantage important, du fait qu'elle ne nécessite pas un matériel spécial, ce qui permet de généraliser son utilisation.

#### **IV.7.3 La fabrication des briques :**

Deux types d'éprouvettes ont été utilisés dans le programme expérimental :

La partie préliminaire de ce programme a été effectuée sur des briques pilotes de 28.12.8 Cm de dimension. [78]. Ce choix est motivé par les raisons suivantes :

Économie dans le matériau, l'obtention des briques de forme plus régulière et facile à démouler, car on peut utiliser pour ces dimensions une presse manuelle, pour les essais de thermique (chap. IV), les dimensions des éprouvettes étaient 4. 4.16 cm.

#### **IV.7.3.1 Le processus de Moulage et stockage :**

Les éprouvettes de la partie préliminaire sont obtenues grâce à un moule triple traditionnel en bois démontable. Les éprouvettes ont été obtenues en utilisant des moules standard.

Les différentes étapes suivies dans la confection des éprouvettes se résument comme suit :

– Le mélange prêt à l'emploi sera façonné préalablement à la main sous forme de brique de même dimension que celle du moule.

Les briques seront marquées et identifiées à l'aide d'un bout de papier et une épingle-feutre, avant de les stocker sur de plates formes du laboratoire (couverte d'un film plastique).

Il faut remarquer que la quantité d'eau utilisée conduit à des mélanges pratiquement mi-fermes, demandant un grand effort de malaxage pour avoir une homogénéité convenable.

Ce problème de malaxage s'accroît avec l'augmentation du pourcentage de paille et d'argile, vu que la quantité d'eau utilisée a été maintenue constante.

#### **IV.7.3.2 Condition de cure :**

Le stockage et la cure de nos briques ont été effectués au laboratoire (sous des conditions non contrôlées), dû à la difficulté de transporter quotidiennement les briques à l'extérieur du laboratoire, vu leur quantité importante. Et éviter d'être exposées directement au soleil qui va peut être faite des fissures influé plus tard sur la résistance des blocs, la température ambiante dans le laboratoire lors de la période de cure était la suivante : entre 29 et 32 °c

#### **IV.7.3.3 Les teneurs utilisées à la paille et l'eau de gâchage :**

Dans la partie préliminaire quatre teneurs en fibre ont été utilisées, réparties sur les deux types de terre M1 et M2 à savoir : 0 %, 1 %, 1,5 % et 2 % les longueurs des brins des pailles varient entre 2 et 5 cm. Le but de cette phase d'initiation à la réalisation de nos expériences est d'avoir une idée sur l'ordre de grandeur de différents paramètres pouvant influencer le comportement de l'adobe.

Afin de conserver un programme expérimental raisonnable, une seule teneur en eau ont été utilisées 19%. Sachant qu'elle est de grande importance dans le produit final (densité, résistance) elle sera déterminée à partir des littératures quand on a vu déjà dans le mémoire de A.Fatima[79].



Figure IV 35 Le stockage et la cure des briques  
source : (auteur)

#### **IV.8 Conclusion :**

L'étude des propriétés de l'adobe existe au niveau de l'ancien ksar de Laghouat qui est considéré comme secteur sauvegardé aujourd'hui, est un besoin très indispensable, dans notre programme de recherche, d'autant plus qu'elle nous permet tout d'abord de comparer ces caractéristiques physiques, mécaniques et thermo-physiques. Par ce qu'il en existe au niveau de la recherche et des études scientifiques liées à ce matériau principal dans la production de ce produit brique de la terre crue (adobe).

Cela nous permet également d'identifier les faiblesses de ce matériau, car il s'agit d'un matériau primordial dans la construction des murs intérieurs et extérieurs des logements traditionnels et, par conséquent, de la fragilité de l'habitat en général.

En vue de traiter les propriétés des vieilles briques et d'améliorer leurs performances mécaniques et thermiques, j'ai préparé les nouvelles briques afin de les comparer. Et dans le but de développer et d'améliorer les propriétés de cette brique en corrigeant et en essayant de modifier la qualité de sol en ajoutant et en augmentant le pourcentage de l'argile, on utilise l'argile qui est destinée pour la fabrication de la brique creuse brique rouge dans le mélange et qui se trouve dans la carrière Mrigha et l'ajout d'un pourcentage de paille. Pour obtenir de bonnes briques, avoir de bonnes propriétés mécaniques, permettre de supporter la charge de murs et des propriétés thermiques comparables à des murs épais. Comme nous savons que plus l'épaisseur des murs du bâtiment traditionnel est grande, plus elle est isolée de l'environnement extérieur du bâtiment, que ce soit en saison chaude ou froide, et ce que nous allons le voir dans le chapitre suivant.

**V CINQUIÈME CHAPITRE**

Application théorique par simulation les propriétés

Mécaniques et Thermo-physiques

### V.1 Introduction :

La connaissance de la résistance de la compression a une grande importance dans notre programme expérimental, vu qu'elle nous permet de connaître l'aptitude de la brique d'adobe à travailler dans les conditions de charges normales (en service), comme élément rentrant dans la construction des murs porteurs. Dans cette optique, nous essayerons d'établir « l'influence de pourcentage et dimensions de la paille, et l'éclatement de l'éprouvette sur la résistance de la brique.

Ce chapitre présente les résultats d'une étude expérimentale réalisée sur les matériaux de la terre crue avec une teneur en poids de 0 à 2 % de paille d'orge. La paille est une perte agricole locale qui peut éclairer le matériel et améliorer certaines de ses caractéristiques. Des propriétés mécaniques et thermiques ont été ainsi mesurées pour enrichir les bases de données des matériaux de construction biomasse de la terre.

Dans ce chapitre, il s'agit de faire une comparaison entre l'ancien matériau (adobe), et le matériau amélioré afin d'évaluer l'efficacité thermique des deux matériaux. Nous essayons de déterminer l'épaisseur optimale de mur qu'on peut l'atteindre avec le nouveau brique, et cela en fonction de la résistance thermique du matériau (R) et traité l'efficacité de ce nouveau matériau sur l'espace patio qui considère le centre de l'habitat et un espace de transition. À l'aide d'un logiciel de simulation, EnergyPlus qui va nous permettre d'évaluer l'effet de matériau sur le confort thermique. Ainsi il s'agit de définir quelques notions importantes telles que la conductivité thermique de ce matériau, l'effusivité thermique a savoir les amplitudes de la température le temps de retard (déphasage), et le facteur d'amortissement.

Ainsi, nous allons aborder la définition de logiciel de simulation et savoir leur propriété et ses avantages, ensuite faire une comparaison pour évaluer le confort thermique d'un type d'habitat (sélectionné) par l'ancien (adobe) et l'épaisseur réelle du mur de 60 cm et une conductivité de 7,1 w/m.k, quelquefois dépasse et avec le nouveau matériau (adobe amélioré) d'une épaisseur de mur réduit qui atteindrait 40 cm et une conductivité de 5,1 w/m.k.

Enfin nous essayons de traité l'espace patio d'habitat sélectionné on suppose qu'on va utiliser (l'adobe amélioré) et une couverture démontable en nylon plastique pour le patio dans la période d'hiver. Et cela pour estimer l'effet de nylon sur le patio pendant cette période hivernale.

### V.2 Comportement mécanique thermique de l'adobe paillé :

La littérature à montre, seulement environ vingt études ont traité des briques de la terre où des agrégats d'usine sont incorporés à la matrice de la terre. Fulvio [102]. Et peu d'études se concentrent sur la paille incorporée en terre crue. Parmi les références disponibles, certains ont prouvé que la stabilisation de rétrécissement se produit plutôt avec l'utilisation de la paille d'orge parce que la structure creuse des tiges permet l'évaporation accélérée Bouhicha [97].

L'addition de la paille modifie également des forces mécaniques. À titre illustratif, la résistance à la compression a été améliorée par 10 à 20 % en additionnant 1,5 % de la paille d'orge, mais seulement pour la terre la plus argileuse (entre 28 % et 40 % d'argile) Bouhicha [97]. Au contraire, d'autres études ont prouvé qu'une augmentation de la proportion de paille a mené à une diminution de la résistance à la compression, qui a été expliquée par une plus faible densité. Pour ce qui concerne la conductivité thermique, tous les résultats montrent la même tendance : une augmentation du contenu de fibre mène à une diminution de la conductivité thermique. À titre indicatif, la conductivité thermique d'un plâtre de terre contenant environ 16 % du poids de la paille d'orge a été réduit d'environ 56 % en comparaison d'un spécimen fait seulement de terre (0,154 et 0,350 W/m/K respectivement) Fulvio [102]. Il y a très peu de références à la paille incluse en matériau de la terre, particulièrement avec plus de 3 % en poids, Bouhicha [97].

### **V.2.1 Essai de compression :**

La résistance à la compression des briques destinées à l'édification des ouvrages d'un à deux niveaux doit être située entre [79] : 20 à 25 bars pour des conditions de fabrication normales et 10 à 15 bars pour des conditions de fabrication bien contrôlées. Ces valeurs sont le minimum absolu pour assurer un bon comportement mécanique, comme le mentionne Aouissi Fatima dans son mémoire [79]. Les essais rapportent ici, ont été effectués sur les éprouvettes suivantes

### **V.2.2 Appareillage et manipulation :**

#### **V.2.2.1 Description de l'équipement :**

L'appareil utilisé est une machine hydraulique de conception classique munie de :

- Deux manomètres, dont les capacités, sont respectivement  $F_{max} = 100$  KN
- Deux vannes destinées respectivement aux réglages de la vitesse de chargement et de déchargement

#### **V.2.2.2 Valeur de paramètres expérimentaux :**

Suivant la norme qu'on a prendre en filature **BS EN 772-1 : Norme européenne 2000**

Dans notre cas, nous avons travaillé avec une force de plateaux constante et égale à 12,5 kg/s, car pour les matériaux à base de terre, une faible vitesse de chargement est recommandée.

La force de rupture enregistrée par la presse a été divisée par la surface de la brique chargée pour obtenir la résistance à la compression [89].

#### **V.2.2.3 Manipulation :**

La brique une fois prête à l'écrasement est placée entre les deux plateaux de la machine de compression, de telle manière que le parement non coffré soit la surface chargée de la brique. Ce mode d'emplacement de la brique est identique à ce qu'on utilise dans la construction des murs. Une plaque métallique de dimension 5×5 cm et de 4 mm d'épaisseur et une autre ont été insérées entre les plateaux de la machine et les surfaces de la brique afin de répartir aussi que possible la

charge sur la brique et réduire les efforts de frottement qui se développent à l'interface plateaux brique, la force de compression appliquée par la presse.

#### V.2.2.4 Paramètre mesuré, essais pilotes :

La brique de dimension (28x12x8cm) découpée par appareil de cisaillement afin de prélever les éprouvettes de (5.5.5 cm) qui va soumise vers l'écrasement. Ces essais sont réalisés sur les briques pilotes de terre M1 et M2 âgées de 28 jours et stabilisés aux teneurs de fibres suivantes : 0 %, 1 %, 1,5 % et 2 % paille.

Ces essais ont été réalisés sur des briques de dimensions 5. 5. 5 cm en utilisant les deux mélanges de terres avec :

- Quatre taux de fibres : 0 %, 1 %, 1,5 %, 2 %, pour la terre M1
- quatre taux de fibres : 0 %, 1 %, 1,5 %, 2 % pour la terre M2

Les dimensions des fibres varient entre 2 et 5 cm.

La teneur en eau utilisée dans le mélange est 19 %. En plus de la teneur en fibre, le jour de l'écrasement a été pris en considération. Pour les terres M1, la résistance à la compression a été déterminée après 30 jours, même pour les terres M2. Ceci pour permettre d'établir, influence de l'âge sur la résistance à la compression, la période de cure nécessaire pour la brique afin d'acquérir une résistance suffisante et l'influence de la teneur en fibre sur cette période

#### Observation et interprétation : Mélange M1.

Pour les briques non fibrées (contenant un pourcentage 0% de fibre), la rupture devient de plus en plus évidente avec l'augmentation de pourcentage de paille en se manifestant, par la multiplicité des fissures.

Tableau : Résistance à la compression en fonction de pourcentage de paille pour toutes les terres  
P (%) : Pourcentage de paille

Les résistances enregistrées sur toutes les briques 28 jours sont résumées dans les tableaux [V.1]

**Tableau V. 1 Résistance à la compression première mélange M1 : [l'auteur]**

échantillon	F/kN	F en N.	S (mm <sup>2</sup> )	$\sigma = F/S$	$\bar{\sigma} = F/S$ Moy	en (bars)	fc	Rési réel
M1+P=0%	4,74	4740	2500	1,90	2,07	20,65	0,85	17,56
	5,17	5170	2500	2,07				
	5,58	5580	2500	2,23				
M1+P=1%	3,79	3790	2500	1,52	2,00	20,03	0,85	17,02
	5,7	5700	2500	2,28				
	5,53	5530	2500	2,21				
M1+P=1,5 %	4,52	4520	2500	1,81	1,75	17,52	0,85	14,89
	4,68	4680	2500	1,87				
	3,94	3940	2500	1,58				
M1+P=2%	7,69	7690	2500	3,08	3,36	33,64	0,85	28,59
	8,12	8120	2500	3,25				
	9,42	9420	2500	3,77				

% de paille	M1+P=0%	M1+P=1%	M1+P=1,50 %	M1+P=2%
En (bars)	20,65	20,03	17,52	33,64
fC	0,85	0,85	0,85	0,85
Rési réel	17,56	17,02	14,89	28,59

À la suite aux résultats obtenus, nous avons tracé une courbe récapitulant l'ensemble des résultats de compression en fonction des pourcentages de paille (de 0 à 2 %) de la terre utilisée pour la fabrication de la brique

La résistance à la compression des briques diminue. Pour la terre M1, on a constaté que le pourcentage de 1,5 % des fibres réduit la résistance à la compression au-dessous. La résistance à la compression de l'ancien adobe sans fibre (A. B.C) jusqu'à 14,90 bars par contre pour le pourcentage de 2 % de paille la résistance augmente jusqu'à 28,60 bars.

Tableau [V.1] : Variations enregistrées dans la résistance à la compression à la suite de l'ajout de fibre.

Ce tableau montre que l'effet de l'ajout de fibres aux terres sur la résistance à la compression diffère d'une terre à une autre. A, B, C. M1 part la terre M1, on constate dès le début, une diminution de la résistance à la compression, pour les autres mélanges, l'augmentation enregistrée de la résistance est plus importante pour la terre M1+P=2%.

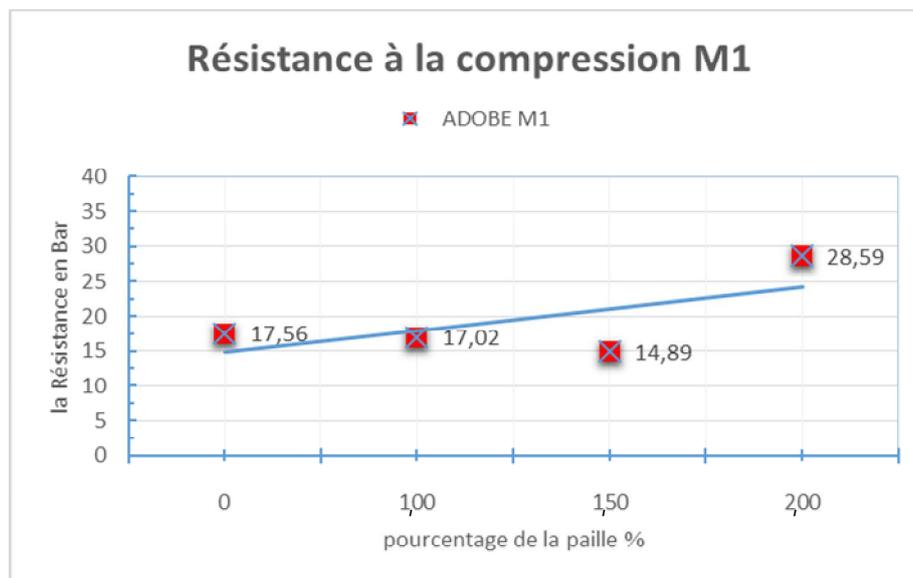


Figure : V. 1 Résistance à la compression premier mélange M1 en fonction pourcentage de paille[l'auteur]

### V.2.2.5 Observations et résultats : pour mélange M2

La durée de cette phase varie avec la nature de la terre d'un côté et le pourcentage de paille d'un autre côté ; cette durée augmente pour les terres les plus sableuses et pour les terres les plus fibrées (c.-à-d. augmente avec le pourcentage d'argile et avec le pourcentage de paille).

Résistance à la compression du deuxième mélange M2

P (%) : Pourcentage de paille

Les résultats enregistrés pour la résistance à la compression sur les briques âgées de 28 jours sont résumés dans les tableaux suivants :

Tableau V. 2. Résistance à la compression du deuxième mélange M2 [l'auteur]

échantillon	F/kN	F en N.	S (mm <sup>2</sup> )	σ= F/S	σ= F/S Moy	en (bars)	fc	Rési réel
M2+P=0%	9,46	9460	2500	3,78	3,67	36,69	0,85	31,19
	10,72	10 720	2500	4,29				
	7,34	7340	2500	2,94				
M2+P=1%	6,78	6780	2500	2,71	2,86	28,57	0,85	24,29
	7,94	7940	2500	3,18				
	6,71	6710	2500	2,68				
M2+P=1,5 %	8,69	8690	2500	3,48	3,30	33,00	0,85	28,05
	8,11	8110	2500	3,24				
	7,95	7950	2500	3,18				
M2+P=2%	9,99	9990	2500	4,00	3,83	38,27	0,85	32,53
	9,06	9060	2500	3,62				
	9,65	9650	2500	3,86				

% de paille	M1+P=0%	M1+P=1%	M1+P=1,5 %	M1+P=2%
En (bars)	36,69	28,57	33,00	38,27
fC	0,85	0,85	0,85	0,85
Rési réel	31,19	24,29	28,05	32,53

Pour faire suite aux résultats obtenus, nous avons tracé une courbe récapitulant l'ensemble des résultats de compression en fonction des pourcentages de paille (de 0 à 2 %) de la terre utilisée pour la fabrication de la brique.

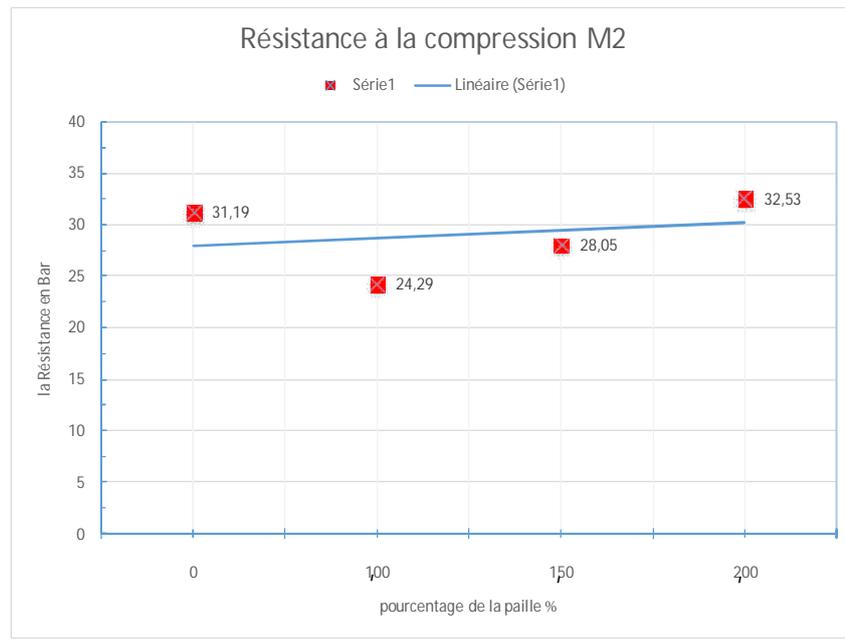


Figure : V. 2 Résistance à la compression du deuxième mélange M2 En fonction pourcentage de paille [l'auteur]

Concernant le mélange M2 nous constatons que la résistance à la compression atteindra 24,30 bars pour un pourcentage de paille 1 %, ensuite augmente jusqu'à 32,50 bars pour pourcentage de paille 2 % nous remarquons que malgré la différence il est léger pour pourcentage de paille, mais il est clair et grand son influence par rapport aux résistances à la compression. Pour les autres briques (briques fibreuses), la variation de la résistance à la compression en

fonction du pourcentage de paille est montrée pour la brique terre crue dans les figures V.2 pour M2. On remarque que malgré la nature du matériau utilisé (terre) et la distribution aléatoire des fibres, le coefficient de corrélation des droites obtenues dans l'interpolation des points expérimentaux est acceptable ( $R = 0,85$ ), et les courbes données dans la figure pour les autres terres montrent qu'il existe un pourcentage optimal de fibre correspondant aux résistances maximales à la compression des briques. Lorsque ses teneurs optimales de fibres sont égales, 2 % pour la terre M1 et 2 % pour la terre M2.

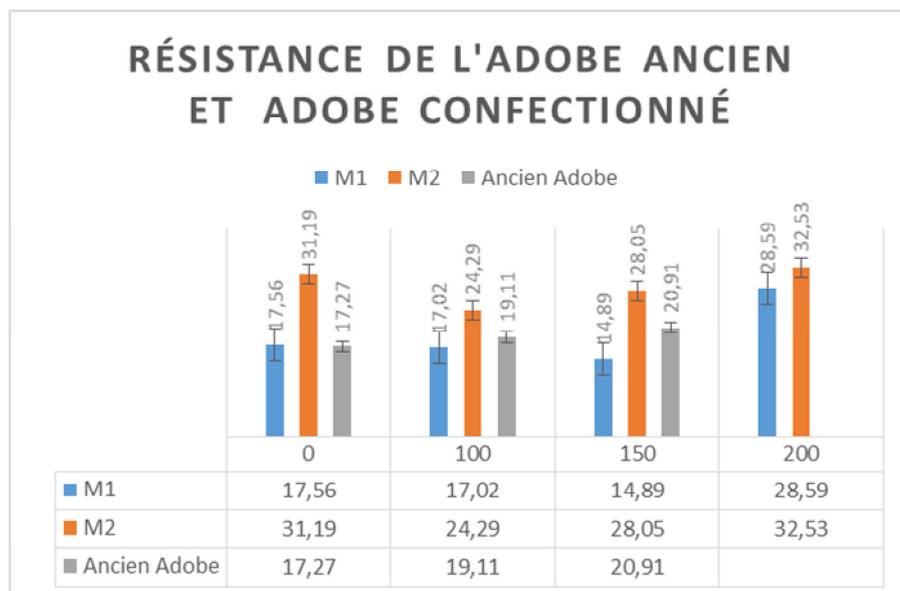


Figure : V. 3 Résistance de l'adobe ancien et l'adobe confectionné. [l'auteur]

Le graphe représente toutes les données obtenues, une moyenne de courbes a été introduite dans le but d'illustrer la croissance de la courbe et vérifier la validité des résultats pour chaque pourcentage de paille ; ci-dessus la Fig : V.3 représentant les différentes moyennes de résistances en compression et les pourcentages de dosage en paille utilisé dans le mélange M1 et M2 et l'adobe ancien.

Pour les briques contenant un pourcentage nul de fibre (non fibrées), nous constatons que la résistance de la terre M2 est légèrement supérieure à celle de la terre M1 et A, B et C qui sont très voisins. Ceci semble être lié au pourcentage de fines contenues dans les terres. Plus la terre ne contient de grosses particules (moins de fines) plus sa résistance à la compression augmente.

Type de mélange optimal : La résistance à la compression varie d'une terre à une autre où elle se trouve plus remarquable pour la terre M2 (terre contenant plus d'argile et pourcentage de paille élevé).

### V.3 Les principales méthodes de mesure des propriétés thermo-physiques :

Les deux types de briques de la terre M1 et M2 ont été caractérisés à l'échelle de laboratoire. Leurs caractéristiques thermo-physiques étaient déterminées et présentées dans les tableaux [V.3]. L'amélioration de l'adobe ; la confection de nouvel adobe M1 :

M1 : 80 % sol + 20 % argile sofabril +pourcentage de paille :

Tableau : V. 3. Propriété thermo-physique le cas de l'amélioration de l'adobe : la confection de nouvel adobe M1 [l'auteur]

Échantillon	M1+P=0	M1+P=1%	M1+P=1,5 %	M1+P=2%
Dimensions L × l × h (mm)	280 ×120×80	280×120×80	280×120×80	280×120×80
Densité (kg/m3)	1488	1482	1413	1394
Conductivité thermique (W/m.K)	1,01	0,88	0,84	0,54
Capacité de chaleur spécifique (J/kg.K)	1,00	1,34	0,94	1,02
Diffusivité thermique (10 <sup>-7</sup> m2/s)	0,88	0,75	0,58	0,82
Effusivité thermique (J.K-1.m-2.s-1/2)	5,93	6,72	5,89	7,02

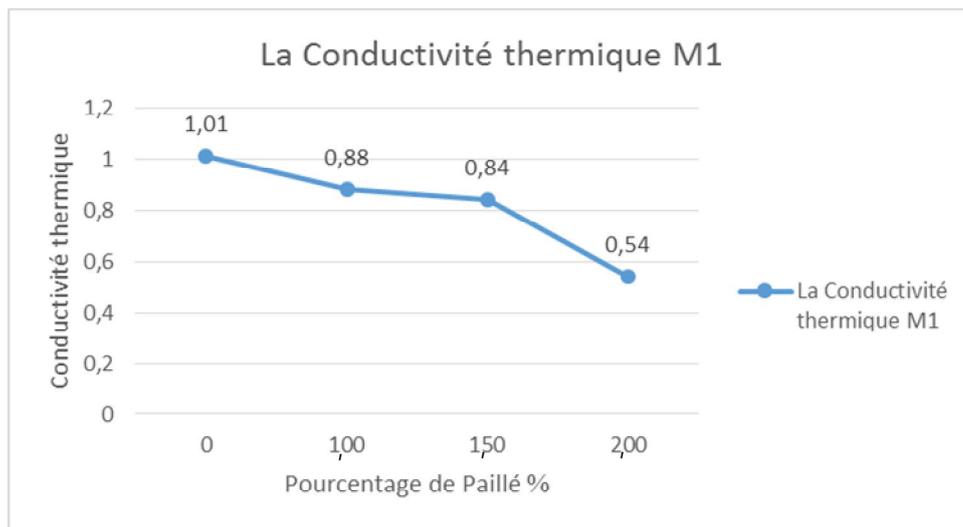


Figure : V. 4 Conductivité thermique M1 en fonction pourcentage de la paille. [l'auteur]

Les caractéristiques thermo-physiques, selon aussi le pourcentage de la paille M1 :

Il est constaté, que la conductivité thermique elle n'influe pas par le pourcentage d'argile par contre elle influe par le pourcentage de la paille plus la teneur augmente plus que la conductivité de ce matériau varie et diminue de 1 (W/m.k) jusqu'à 0,54 (W/m.k).

### V.3.1 les caractéristiques thermo-physique selon pourcentage de la paille M2 :

Cas l'amélioration de l'adobe : la confection de nouvel adobe M2 :

M2 : 70 % sol +30 % argile sofabril+ pourcentage de paille.

Tableau V. 4 propriétés thermophysiques, cas l'amélioration de l'adobe : la confection de nouvel adobe M2 [l'auteur]

Échantillon	M2+P=0%	M2+P=1%	M2+P=1,5 %	M2+P=2%
Dimensions L × l × h (mm)	280×120×80	280×120×80	280×120×80	280×120×80
Densité (kg/m3)	1499	1507	1433	1393
Conductivité thermique (W/m.K)	1,04	0,82	0,77	0,51
Capacité de chaleur spécifique (J/kg.K)	1,58	1,53	1,78	0,85
Diffusivité thermique (10 <sup>-7</sup> m2/s)	0,66	0,50	0,46	0,60
Effusivité thermique (J.K-1.m-2.s-1/2)	6,28	6,35	6,06	5,99

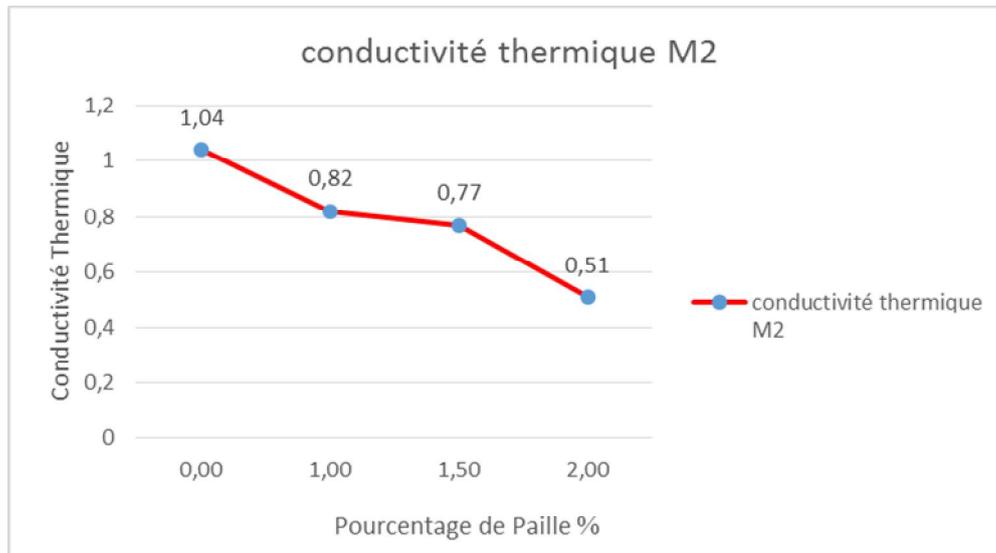


Figure : V. 5 propriétés thermophysiques Cas l'amélioration de l'adobe : la confection de nouvel adobe M2[l'auteur]

Les caractéristiques thermo physique selon aussi pourcentage de la paille M2 :

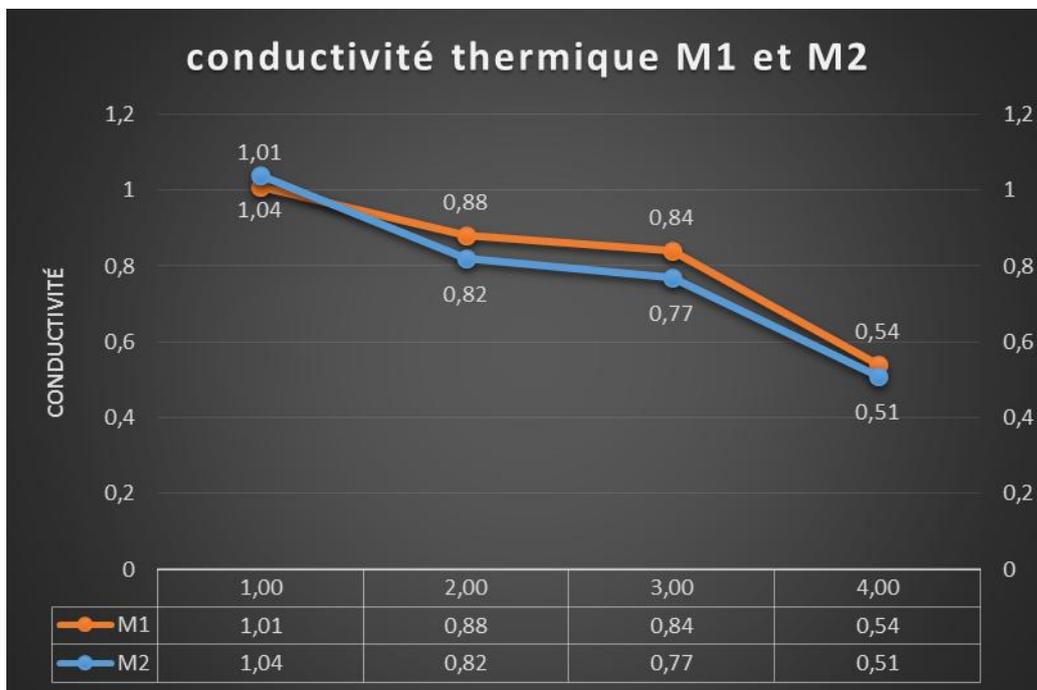
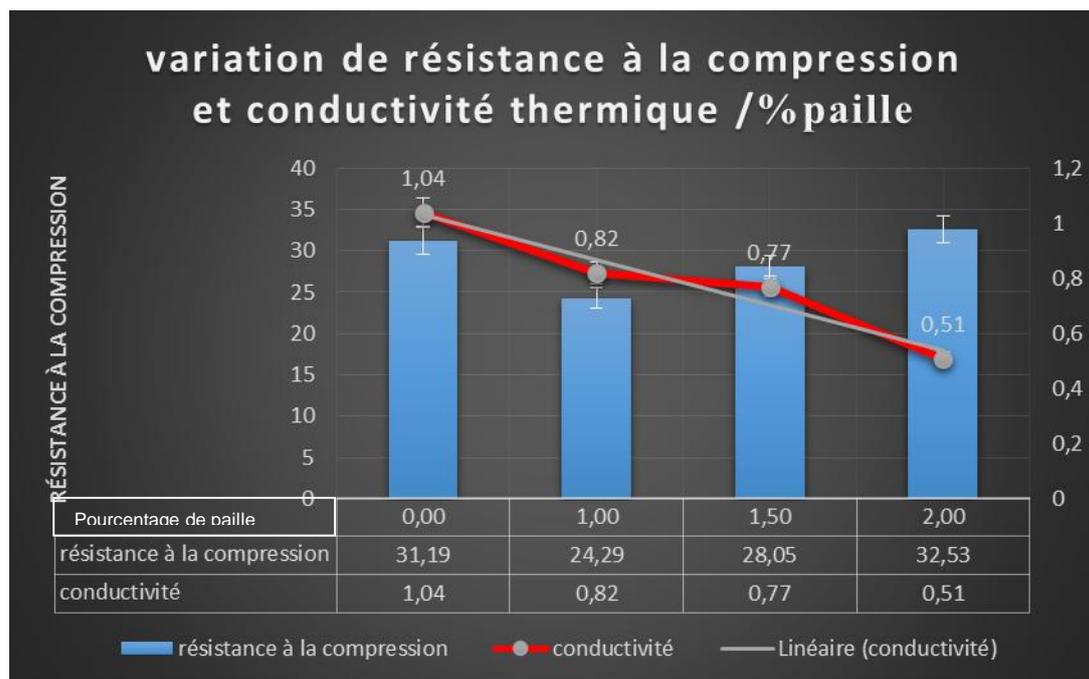


Figure : V. 6 Conductivités thermiques M1 et M2 en fonction pourcentage de la paille. [l'auteur]

Il est clair dans ce graphe figure [V.6], que plus le pourcentage de la paille élevé plus que la conductivité de l'adobe amélioré et diminué, contrairement à ce qu'on a vu dans la résistance à la compression qui varie d'un pourcentage à l'autre.

### V.3.2 Les caractéristiques thermophysiques selon pourcentage de la paille M2

Les variations de résistance à la compression et conductivité thermique.



**Figure : V. 7 Variations de résistance à la compression et conductivité thermique en fonction % paille. [l'auteur]**

Le graphe représente toutes les données obtenues, une moyenne de courbes a été introduite dans le but d'illustrer la croissance de la courbe et vérifier la validité des résultats pour chaque pourcentage de paille ; ci-dessus le tableau représentant les différentes moyennes de résistances en compression et la conductivité thermique en fonction au pourcentage d'argile et de la paille.

En conclusion, on peut dire que l'ajout de la paille et d'argile à la terre augmente son aptitude à la compressibilité et à la déformation et à la conductivité, donc elle lui offre une plasticité. La plasticité apportée, se trouve plus remarquable pour les terres les plus argileuses M2.

L'influence de la paille ne se limite pas seulement au comportement, mais elle entraîne (avec certains pourcentages) pour les terres les plus argileuses des augmentations dans la résistance à la compression. Nous constatons que plus le pourcentage de la paille augmente plus la résistance à la compression augmente aussi et la conductivité connue une diminution remarquable.

Pour la terre M1, les pourcentages optimums de fibres correspondant aux résistances maximales à la compression des briques ne changent pas beaucoup par rapport à l'ancien adobe A, B, C.

Pour tous les pourcentages de paille, on constate que l'accroissement de la résistance à la compression en fonction de l'âge dépend de la nature de terre avec celui enregistré pour terre M2 la plus haute. De même, cet accroissement dépend aussi avec celui de pourcentage de fibre où l'augmentation la plus haute est enregistrée pour la plus grande teneur de fibre (2 %).

#### V.4Présentation générales de la ville de Laghouat :

Laghouat, porte d'accès aux espaces sahariens, située au pied du contrefort de djebel Amour, à 400 km au sud d'Alger sur l'axe de la RN n° 1, reliant la capitale au sud du pays, à 751 m d'altitude à une latitude de 33°41' Nord et à une Longitude de 2° 53' est, le climat de cette région est de type présaharien connu par sa faible pluviométrie, caractérisé par des étés très chauds et des hivers froids, et l'enregistrement d'importants écarts de températures. La température maxima thermométrique durant le jour atteint facilement les 40 °C, voir plus en été, et le minima avoisine les 6 °C en hiver, la nuit cette température peut descendre jusqu'à -2 °C. Les vents dominants sont ouest et sud-ouest.

– Le quartier Zgag el hadjedj, figure V.8, a une superficie de 3 ha environ, il abrite des habitants de classe moyenne, le nombre des habitants occupants ce Quartier en 2000 était de 3 000 habitants.

Le Quartier accuse une densité des plus fortes (entre 120 et 500 hab/ha), on dénombrait 251 maisons, 40 locaux commerciaux, 03 mosquées, une école, un hôtel, et 3 hammams, Takhi [85].



Figure : V. 8 Le Quartier actuellement de Zgag el hadjedj, source : Google Earth. [l'auteur]

Ces dernières années, cette ville a subi une métamorphose avec un taux d'urbanisation très élevé. L'utilisation de matériaux de construction inadaptés au climat saharien a poussé l'habitant au recours à des solutions de chauffage et de climatisation artificielles.

##### V.4.1 Analyse des éléments du climat :

A fin de mieux caractériser le climat de la ville de Laghouat, il est utile d'analyser les différents paramètres qui le constituent, en interprétant les données météorologiques qui s'étale sur une période de dix ans, relative à la période [87].

D'après le zonage de la figure V.9, la ville de Laghouat fait partie de la zone climatique **E3** (zone d'été) et **H3a** (zone d'hiver) déterminée par deux saisons principales :

\_ Un été très chaud et sec, mais moins pénible qu'en zone E4.

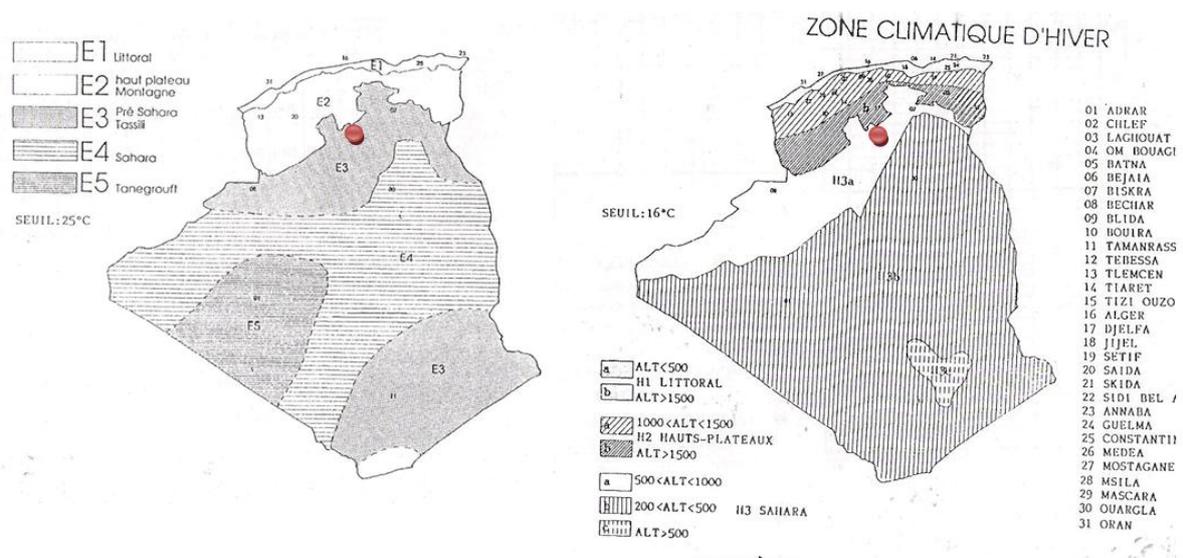


Figure : V. 9 Situation de la ville de Laghouat par rapport aux zones climatiques (source : [87])

Un hiver très froid la nuit par rapport au jour. Les écarts de température entre le jour et la nuit sont importants.

Fig.V.10 montre le diagramme psychométrique du Givoni établi pour la ville de Laghouat, en fonction de température et d'humidité relative de l'air moyen annuelles extraites de la station météorologique de la ville, pendant 10 ans (2006-2016).

Les réponses bioclimatiques de l'habitat pour un bon confort thermique dépendent à la fois de la situation géographique - longitude, latitude et altitude- (par laquelle le type du climat peut être défini) et de la saison de l'année [90].

#### V.4.2 Le diagramme bioclimatique de Givoni :

A partir des données illustrées dans la Fig.V.10, une analyse a été faite afin de relever les dispositifs architecturaux et les techniques, qui peuvent être utilisées pour remédier aux sollicitations du climat semi-aride de la ville de Laghouat et accroître le confort thermique des occupants. Les réponses architecturales sont, en global, de trois ordres :

- la période de novembre à Mars ; elle est caractérisée par un climat froid et sec, le dispositif conseillé est essentiellement le chauffage solaire passif (système à gain direct /indirect) cette solution répond à la fois au problème du confort et de consommation énergétique. En effet, la mise en place de tel dispositif peut engendrer une économie de 60 à 70% des besoins de chauffage.
- la période d'avril à mai, y compris le mois de septembre et d'octobre ; elle est caractérisée par un climat relativement confortable, avec une faible amplitude de température ;

- la période de juin à aout ; un climat sec et chaud caractérise cette période ; une grande inertie thermique et une ventilation nocturne pourront être utiles, pour un déphasage important des apports de chaleur externes et un rafraîchissement du bâtiment [90].

Rappelons succinctement que ces réponses sont liées à la bonne adaptation climatique qui était, au passé, issue d'une rencontre entre les besoins humains et l'art de construire.

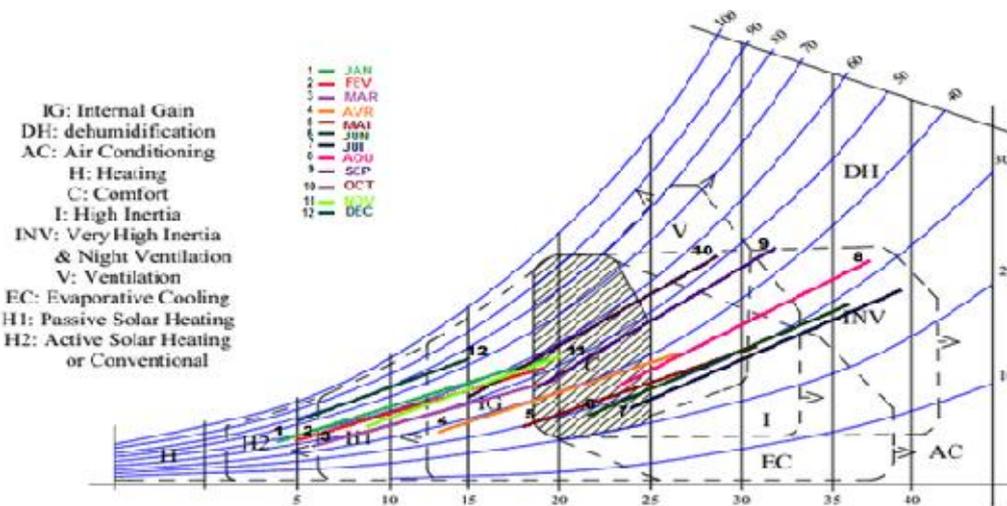


Figure : V. 10 Diagramme Givoni les zones de confort de la ville de Laghouat 2017. [Ben Cheikh.D]

### V.4.3 Présentation du cas d'étude maison ksourienne :

Au-delà des quelques petites variations qui peuvent exister entre les différents types de maisons dans ce quartier, un certain nombre de caractéristiques communes identifie ce qu'on peut appeler la maison traditionnelle type [85].

Il s'agit d'une maison marquée par son introversion et sa centralité. L'entrée se fait par une ouverture en général unique sur la façade. L'entrée en chicane interpose ses écrans à la pénétration du regard au cœur de la maison. Elle ouvre sur la pièce la plus vaste de la maison qui est aussi la plus éclairée, le « Wast Eddar » littéralement le centre de la maison.

### V.4.4 Le Quartier sélectionné dans le secteur sauvegardé : (Quartier Z'gag El Hedjaj).

Elle résulte des expressions socioculturelles des habitants de l'époque. Les similitudes fonctionnelles et morphologiques de base ont opéré une fusion (juxtaposition et superposition). La communication avec l'extérieur ne se fait qu'à l'aide de deux ouvertures : la porte d'entrée et le vide de la cour qui est souvent réduit à un orifice pratiqué dans le toit qui couvre la cour. La forte luminosité et l'ensoleillement excessif nécessitent une telle disposition, il règne alors une agréable ombre à l'intérieur. Par conséquent, ce qui était à l'origine une cour devient dans cette architecture, une pièce, mais pas n'importe quelle pièce ; elle est le cœur de la maison qui bat au rythme des activités domestiques, cuisinées, mangées, séjour, tissage, etc. Une succession de

pièces s'aligne autour de la cour. Les chambres « Biout » plurielles du « Beit » sont polyfonctionnelles. Un escalier, pour les habitations à deux niveaux, et permet l'accessibilité à l'étage dans lequel on trouve la « Satha » qui est une terrasse couverte d'une natte de branches de palmiers.

Les habitations de forme cubique ont généralement un seul niveau moyen (Rez-de-chaussée) d'environ 2,80 m de hauteur, les terrasses peuvent parfois être accessibles. Elles sont constituées de plusieurs volumes organisés autour d'une cour. Une habitation dont le rez-de-chaussée est destiné au commerce.

Dans la cour située à l'entrée de l'habitation, on peut manger, accueillir des invités, et y dormir en été, utilisé aussi pour des activités domestiques, lessive, vaisselle, et cuisine.

Les différentes pièces sont organisées autour d'une cour, qui est considérée aussi comme un espace de vie indispensable, beaucoup d'activités s'y déroulent[85].

#### **V.4.5 Techniques de construction :**

La construction de ce quartier obéit à plusieurs règles architecturales. Sur des fondations en pierres reposent des murs en briques d'adobe : un mélange de terre et de paille selon un procédé qui consiste à mouler de la terre crue dans des moules en bois et de les faire sécher ensuite au soleil. Ces murs d'adobe isolent de la chaleur et du froid.

Le Quartier, construit en adobe, matériau principal, prend la couleur de sa terre d'origine, qui, passant de l'ocre au brun.

Les matériaux et les éléments constructifs intervenant dans la construction de la maison sont d'usage traditionnel et de diversité limitée.

Comme tous les vieux Ksour traditionnels, la construction est réalisée à partir des matériaux locaux, des murs porteurs ou des cloisons. Tous les deux ont presque la même épaisseur de mur (entre 40 et 60 cm). L'assise de la grande partie du quartier est réalisée par la roche des montagnes.

Les principaux matériaux utilisés demeurent : la pierre, l'adobe, le roseau, le tronc de palmier, le mortier à base de terre, de sable, et de chaux. la figure V.11.

La confection de l'adobe fait généralement appel à une terre à dominante salope limoneuse, avec ou sans amendements de paille.

L'analyse raisonnée du patrimoine bâti révèle que l'adobe ou la brique de terre crue s'intègre dans un véritable système constructif faisant appel à d'autres matériaux appropriés pour le traitement des points sensibles, afin de pallier les performances limitées du matériau terre, galets, moellons, pierres taillées, bois, béton de chaux ou de ciment, etc. sont diversement sollicités pour le traitement des soubassements, chaînes d'angle, encadrements d'ouvertures, murs courants avec assises alternées, corniches, divers décors, etc.

Le rez-de-chaussée a généralement une hauteur moyenne de 2,80 m est le premier niveau de 2,50 à 2,60 m. La maison peut mesurer dans sa partie la plus haute de toiture environ 7 m en moyenne. Les maisons sont toutes édifiées sur des fondations en pierre, leurs murs en briques d'adobe et leurs toitures en bois par l'utilisation des troncs de palmier et des roseaux. Figure : V.11

Les adobes qu'on fabriquait sont de dimensions différentes une confection proportionnelle à la largeur variable en hauteur du mur, qui diminue lorsque le mur avance en élévation.

L'assemblage est minutieux et le mortier est préparé avec beaucoup de soin.

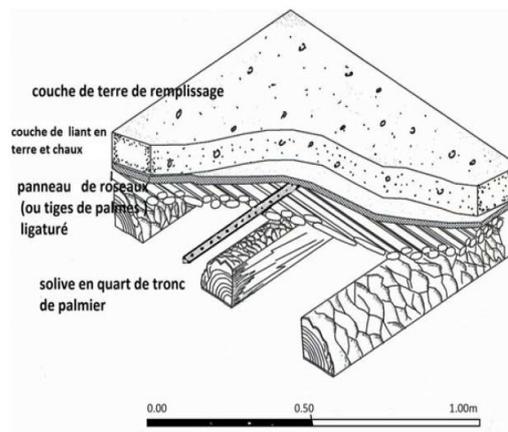


Figure : V. 11 Coupe et vue sur le plancher.

#### V.4.6 Description de la maison (modèle) :

En vue d'étudier l'effet de l'enveloppe sur le comportement thermique du bâtiment, nous avons conçu une maison dans l'architecture traditionnelle.

L'organisation spatiale de cette maison (fig.V.12) s'articule autour d'un patio central dans le rez-de-chaussée, où sont implantés des espaces de vie, une 03 chambre et un séjour et une cuisine. À l'étage, on retrouve les 3 chambres qui donnent aussi sur le patio central.

L'accès à l'étage se fait à travers des escaliers d'une hauteur de 3,00 m, au milieu du patio on remarque. La présence de la végétation aux abords adoucira la température de l'air intérieure de cette cour [85].

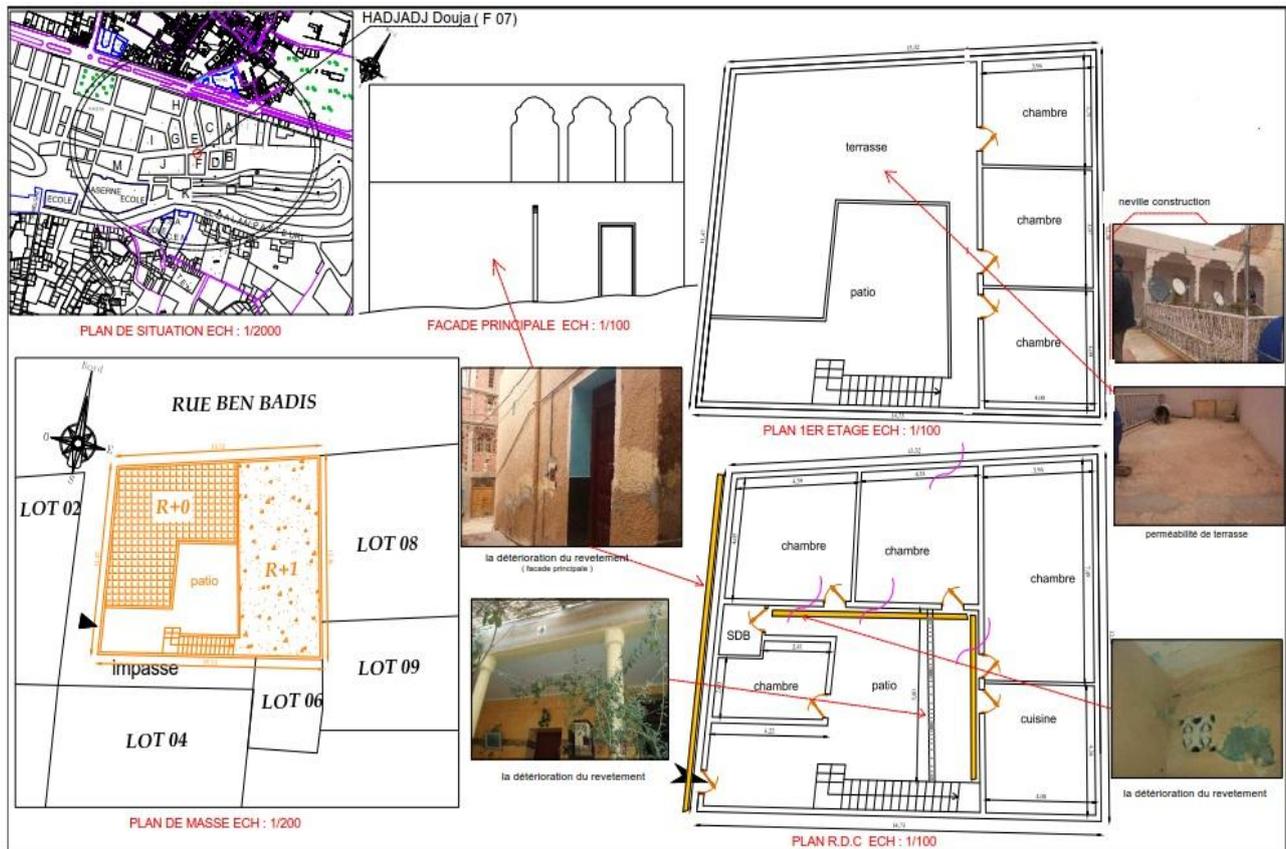


Figure : V. 12 les plans de l'habitat simulé. [l'auteur]

Les murs porteurs en adobe, la hauteur de chaque niveau sont de 3,00 m. Les caractéristiques de l'enveloppe de cette habitation sont :

- les murs extérieurs sont soit en doubles parois en briques de terre crue d'épaisseur 60 Cm, les murs intérieurs en adobe de 40 Cm d'épaisseur.
- les murs intérieurs sont de simples parois en briques en terre crue de 40 cm d'épaisseur.
- l'enduit extérieur est en mortier de chaux.
- l'enduit intérieur est en mortier chaux.
- la toiture est composée d'une dalle traditionnelle composée par différente couche des matériaux badigeonnage à la chaux et une couche en mortier chaux une couche d'une terre argileuse une couche de tapie roseau et des poutres en tronc de palmier.

À savoir que l'Adobe est un produit local composé d'une terre locale malléable avec d'eau et un peu de paille. Le mélange est aggloméré dans un moule parallélépipédique. Une fois, sécher on l'utilise pour la construction de la paroi.

V.4.7 Amélioration et correction thermique [l'auteur] :

Tableau V. 5 Paramètre des matériaux utilisés l'ancien adobe [l'auteur].

Designation paroi	Matériau Constitution Et épaisseur En (cm)	Paramètres thermophysiques				
		Conductivité Thermique en (W/m <sup>2</sup> .K)	Chaleur Spécifique en (MJ/m <sup>3</sup> .K)	Masse Volumique en (kg/m <sup>3</sup> )	Diffusivité Thermique 10 <sup>-6</sup> (m <sup>2</sup> /s)	Effusivité thermique en (J.K-1.m <sup>2</sup> .s-1/2)
<b>Mûr extérieur/ mur Intérieur</b>	Mortier de chaux : 2 cm	0,87	1080	1800		
	Brique de Terre 60 cm	0,71	1168	2564	0,611	8 572
	Mortier de chaux : 2 cm	0,87	1080	1800		
<b>Toiture</b>	Stipe de palmier/ Nervures de palmier : 10 cm	0,102	703	332	4 368	
	Panneau de roseau	0,06	0,17	250		447
	Sable argileux : 20 cm	1,10	1500	1900	4,10	29,51
	Mortier de chaux : 2 cm	0,87	1080	1800		
	Enduit de chaux	0,7	864	1550		
<b>Plancher</b>	Carrelage : 3 cm	2,1	936	2200		
	Sable : 2 cm	0,625	990	1900		
	Argile : 8 cm	1,10	1500	1900	4,10	29,51
	Pierre : 40 cm	2,4	936	2350		
<b>Fenêtre</b>	Vitrage :	1,10	792	2700		
<b>Porte</b>	Métallique :	54	468	7780		
	bois	0,23	2160	750		

V.5 Choix de la composition optimale :

A la suite des essais mécaniques savoir la résistance à la compression et savoir les propriétés thermo-physiques des différents mélanges de la terre crue le choix de l'adobe comme nous avons vu dans les chapitres précédents que l'adobe M2 + 2 % de paille avec une résistance à la compression de 32.50 bars une conductivité thermique 0,51 w/m.k. que cet adobe sélectionné qu'on va effectuer la dernière partie de l'étude.

Le travail actuel vise à étudier les effets propriétés thermo-physiques de ce type de briques terre crue de la terre par la recherche expérimentale, et leur exécution thermique dynamique (capacité thermique, l'amplitude et le déphasage et retard thermique) en fonction de l'épaisseur de paroi. L'objectif est à de déterminer l'épaisseur idéale d'un mur cru de la terre, établie par ces briques, pour réaliser les valeurs optimums de l'inertie thermique. Ces briques étaient produites manuellement dans le laboratoire de génie civil l'université Amar Thelidji Laghouat. Le processus utilisé était le recyclage de l'ancien adobe trouvé dans les Murs démolis au niveau de l'ancien noyau du secteur sauvegardé de la ville de Laghouat Quartier Zgag el hadjedj. La différence principale entre les deux types de briques est quantité d'argile ajoutée qui a été extraite à partir de carrières de Mraigha pour la fabrication de brique de terre cuite et le pourcentage de la paille. Elles ont été caractérisées pour déterminer leurs propriétés physiques, et géotechniques, et pour identifier son impact sur le développement et la production des briques de la terre crue.

Tableau V. 6 paramètres des matériaux utilisés. M2 : 70 % sol +30 % argile sofabril+ pourcentage de paille. [l'auteur].

Designation	Matériau	Paramètres thermophysiques				
		Conductivité Thermique en (W/m <sup>2</sup> .K)	Chaleur Spécifique en (MJ/m <sup>3</sup> .K)	Masse Volumique en (kg/m <sup>3</sup> )	Diffusivité Thermique 10 <sup>-6</sup> (m <sup>2</sup> /s)	Effusivité thermique en (J.K-1.m <sup>2</sup> .s-1/2)
<b>paroi</b>	Constitution Et épaisseur En (cm)					
	Mûr extérieur /mur Intérieur	Mortier de chaux : 2 cm	0,87	1080	1800	
		Brique de Terre 40 cm	0,51	850	1393	0,60
		Mortier de chaux : 2 cm	0,87	1080	1800	
<b>Toiture</b>		Stipe de palmier/ Nervures de palmier : 10 cm	0,102	703	332	4 368
		Panneau de roseau	0,06	170	250	447
		Sable argileux : 20 cm	1,10	1500	1900	4,10
		Mortier de chaux : 2 cm	0,87	1080	1800	
		Enduit de chaux	0,7	864	1550	
<b>Plancher</b>		Carrelage : 3 cm	2,1	936	2200	
		Sable : 2 cm	0,625	990	1900	
		Argile : 8 cm	1,10	1500	1900	4,10
		Pierre : 40 cm	2,4	936	2350	
<b>Fenêtre</b>		Vitrage :	1,10	792	2700	
<b>Porte</b>		Métallique :	54	468	7780	
		bois	0,23	2160	750	

Ce travail a identifié l'épaisseur optimum du mur construit par ces briques crues de la terre (il était de 0,4 m). Ces les épaisseurs assurent la plus grande capacité de chaleur et un retard thermique entre quelques heures, ce que nous allons le voir dans les démarches suivantes.

### V.5.1 Méthode de mesure des propriétés thermo physiques ( $\lambda$ ) :

Méthode du hot disk par la même méthode de mesure dans les essais préliminaire les

Caractéristiques thermo physiques optimales pour la préparation de l'échantillon

On à fait couper l'adobe pour le façonné en forme parallélépipède rectangle de dimension :

4×4×8 cm

#### V.5.1.1 Conductivité thermique ( $\lambda$ ) :

. Les résultats de ces analyses sont présentés dans le tableau suivant. Par rapport à l'échantillon

Cas l'amélioration de l'adobe : la confection de nouvel adobe M2 :

M1 : 70 % sol +30 % argile sofabril+ pourcentage de paille

Tableau V. 7 la conductivité thermique en fonction pourcentage de la paille [l'auteur]

Échantillon	M2+P=0%	M2+P=1%	M2+P=1,5 %	M2+P=2%
Dimensions L × l × h (mm)	280×120×80	280×120×80	280×120×80	280×120×80
Densité (kg/m <sup>3</sup> )	1499	1507	1433	1393
Conductivité thermique (W/m. K)	1,04	0,82	0,77	0,51
Capacité de chaleur spécifique (J/kg. K)	1,58	1,53	1,78	0,85
Diffusivité thermique (10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> /s)	0,66	0,50	0,46	0,60
Effusivité thermique (J.K-1.m-2.s-1/2)	6,28	6,35	6,06	5,99

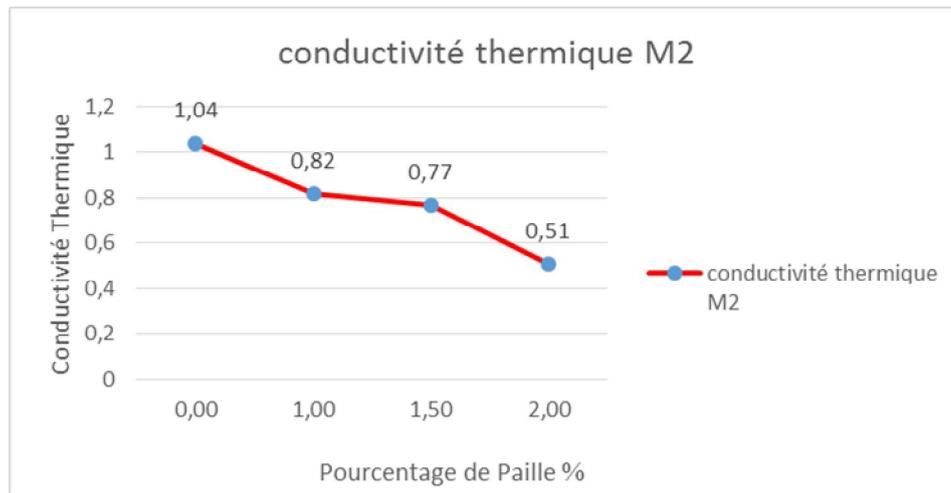


Figure : V. 13 la conductivité thermique en fonction pourcentage de la paille [l'auteur]

Un autre élément qui caractérise les propriétés thermiques des matériaux est la capacité de chaleur spécifique ( $c$ ). La capacité de chaleur spécifique est principalement déterminée basée sur le processus de stockage de chaleur d'un matériel. Le dispositif de mesure est identique que pour la conductivité de mesure et seulement les contraintes thermiques imposées être différent.

#### V.5.1.2 Résistance thermique ( $c$ ) :

La résistance thermique d'un matériau caractérise sa capacité à ralentir le transfert de chaleur Réalisé par conduction. C'est le rapport entre l'épaisseur du matériau et le coefficient de conductivité thermique.

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

Plus le  $R$  est élevé, plus le matériau ou la paroi est isolant. Elle s'exprime en  $(m^2.K)/W$  ou  $(m^2. ^\circ C)/W$ .

Énergie, comme exprimée par la formule suivante, où  $C$  est la capacité  $(J/.K.m^2)$ ,  $\Delta\phi$  est différence des écoulements mesurés (avec  $m^2$ ) et décollement est le temps d'acquisition.

[65].[86] :

#### V.5.1.3 Diffusivité thermique et effusivité thermique:

Basés sur la conductivité thermique ( $\lambda$ ) et la capacité de chaleur spécifique ( $c$ ), nous pouvons déterminer la diffusivité thermique ( $d$ ) et l'effusivité thermique ( $e$ ), qui sont les deux dispositifs essentiels pour des conditions thermiques régulières.

#### V.5.1.4 Diffusivité thermique:

Représente la vitesse de pénétration et atténuation d'une onde thermique dans un milieu, Plus la diffusivité thermique est petite, plus grande sera la capacité thermique et meilleur sera le confort d'été. La diffusivité thermique est une propriété dynamique du matériau,

car elle intervient dans les transferts en régime transitoire de température.

Elle s'exprime en  $(m^2 \cdot s^{-1})$ .

$$D = \frac{\lambda}{\rho \cdot cp}$$

..... [65]. [86].

#### V.5.1.5 Effusivité thermique (e):

L'effusivité thermique d'un matériau caractérise sa capacité à échanger de l'énergie thermique avec son environnement. Elle indique la capacité des matériaux à absorber (ou restituer) plus ou moins rapidement un apport de chaleur. L'effusivité caractérise la sensation de « chaud » ou de « froid » que donne un matériau. Elle est donnée par :

$$E = \lambda \cdot \rho \cdot c$$

Où

$\lambda$  : est la conductivité thermique du matériau en  $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$

$\rho$  : la masse volumique du matériau en  $[kg \cdot m^{-3}]$

$c$  : la capacité thermique massique du matériau en  $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$ , [65]. [86].

Elle s'exprime donc en  $J \cdot K^{-1} \cdot m^{-2} \cdot s^{-1/2}$ .

Pour étudier et comparer l'effet de l'ancien matériau et le nouveau matériau (confectionné), la simulation est faite en multizones. La zone extérieure cinq (5) zones à la RDC, le séjour, le salon le patio et une chambre et 1 zone au 1er étage et une zone de la chambre (2). Nous présentons les résultats de la chambre n° 3. Le choix de cette dernière est dicté par son orientation pleine sud, de son ouverture, de ses parois et de son plafond qui sont en contact avec le milieu extérieur.

La simulation est réalisée pour toute l'année. Les résultats présentés concernent uniquement la journée la plus froide (15 janvier) et la journée la plus chaude (15 juin). Trois cas de figure de parois sont étudiés :

#### V.5.2 l'évaluation de l'épaisseur de mur optimale :

##### V.5.2.1 avant l'amélioration :

Par l'ancien (adobe) et l'épaisseur réelle du mur de 60 cm et, quelquefois dépasse et avec le nouveau matériau (adobe amélioré) d'une épaisseur de mur réduit qui atteindra (40 cm et une conductivité de 5,1 w/m.k..

Cas n° 1 : murs extérieurs en brique de terre crue 60 cm et une conductivité de 7,1 w/m.k. la résistance thermique totale est égale à  $R = \frac{e}{\lambda} = \frac{0,6}{0,71} = 0,860 m^2 \text{ } ^\circ k/w..$

### V.5.2.2 Caractéristique du brique de terre après l'amélioration :

Après les essais mécaniques savoir la résistance à la compression et savoir les propriétés thermo-physiques des différents mélanges de la terre crue, les travaux de caractérisation sur la brique de terre nommé M2 + 2 % de paille avec une résistance à la compression de 32 bars une conductivité thermique  $\lambda = 0,51$  w/m.k. que cet adobe sélectionné qu'on va effectuer la dernière partie de l'étude.

On a  $R = \frac{e}{\lambda} = \frac{0,6}{0,71} = 0,845$  m<sup>2</sup> °k/w. En fonction de cette

équation  $R = \frac{e}{\lambda}$  donc  $e = R \cdot \lambda = 0,845 \times 0,51 = 0,43$  m 40 cm et on fonction de cette équation

on trouve que :

– pour un mur d'épaisseur de 70 cm et une conductivité de 0,71 w/m.k. avec l'adobe ancien, l'épaisseur du mur optimale = 50 cm. Avec une conductivité de 0,51 pour l'adobe confectionné

– pour un mur d'épaisseur de 60 cm et une conductivité de 0,71. w/m.k.

L'épaisseur du mur optimale = 43 cm.

– pour un mur d'épaisseur de 50 cm et une conductivité de 0,71. w/m.k.

L'épaisseur du mur optimale = 35 cm.

Donc l'épaisseur optimale :

Cas n° 2 : murs extérieurs en brique de terre crue 40 cm et une conductivité de 0,51 w/m.k..

### V.5.2.3 après l'amélioration + nylon :

Cas n° 3 : suppose qu'on va utiliser (l'adobe amélioré) murs extérieurs en adobe d'épaisseur 40 cm et une conductivité thermique  $\lambda = 0,51$  w/m.k. et on et une couverture démontable en nylon leur conductivité = () pour le patio dans la période d'hiver.

### V.6 les propriétés thermo-physiques de la brique de terre M2:

L'inertie thermique peut simplement être définie comme la capacité d'un matériau à stocker de la chaleur et à la restituer petit à petit. Cette caractéristique est primordiale pour assurer un bon confort notamment en été, c'est-à-dire pour éviter les surchauffes.

Cette capacité permet de limiter les effets d'une variation « rapide » de la température extérieure sur le climat intérieur par un déphasage entre la température extérieure et intérieure des murs et par amortissement de l'amplitude de cette variation.

D'après H. Asan [119], L.Chahwane [121], C.Spitz [122] et H.Bencheikh [120], ces propriétés de l'enveloppe du bâtiment sont intéressantes, car d'une part, elles peuvent être évaluées en fonction de la température des surfaces et fournissent des informations sur le comportement de celle-ci. D'autre part, elles peuvent aussi être simulées à partir des propriétés thermo physiques des matériaux constituent l'enveloppe.

### **V.6.1 Amplitude de la température harmonisée :**

Elle est définie par la différence des températures maximales et minimales pour un jour pour les deux surfaces externes et internes du mur, elle est déterminée par la formule suivante :

$$A_s = t_{se(max)} - t_{se(min)}$$

$$A_i = t_{si(max)} - t_{si(min)}$$

### **V.6.2 Temps de retard (déphasage) :**

C'est le temps de retard entre les pics de la température ( $t_e$ ) à la surface externe et de la température ( $t_i$ ) de la surface interne, il est déterminé par la formule suivante :

$$\emptyset = t_{T_{se-max}} - t_{T_{si-max}}$$

Avec :

$\emptyset$  : le temps de retard en (h).

$t_{T_{se-max}}$  : temps correspondant à la température maximale de surface extérieure.

$t_{T_{si-max}}$  : temps correspondant à la température maximale de surface intérieure.

### **V.6.3 Facteur d'amortissement :**

C'est le rapport des amplitudes de la température de surface intérieure et de la température de surface extérieure, plus le facteur d'amortissement est faible plus les températures intérieures sont amorties, il est déterminé par la formule suivante :

$$F = A_i / A_e$$

Avec :

$A_i$  : l'amplitude de la température de surface intérieure en ( $^{\circ}C$ )

$A_e$  : l'amplitude de la température de surface extérieure en ( $^{\circ}C$ ).

Dans notre cas, l'excitation est la température froide. Le facteur de décroissance et le retard thermique caractérisent principalement l'inertie thermique de transmission de toute l'épaisseur du mur, qui absorbe et des déphasages des variations de la température entre l'intérieur et l'extérieur [88].

### **V.7 Présentation de logiciel de simulation :**

Aujourd'hui le monde connu un développement rapide surtout dans le domaine de l'énergie du bâtiment cette énergie ou plus tous cette consommation d'énergie à une profondeur dans la notion du développement durable. Beaucoup de programmes sont apparus dans ce siècle que pour aider les architectes les ingénieurs afin d'estimer et maîtriser l'utilisation de cette énergie dans le bâtiment et parmi les programmes les plus célèbres.

Un nouveau programme de simulation d'énergie de bâtiment, connu sous le nom d'EnergyPlus, a été la première fois libéré en avril 2001. EnergyPlus a ses racines dans les programmes SOUFFLE et DOE-2. SOUFFLE (analyse de charges de bâtiment et la thermodynamique de système) et les DOE-2 ont été développés et libérés vers la fin des années 70 et tôt les années 80 en tant qu'outils de simulation d'énergie et de charge.

Les deux programmes sont employés couramment dans le monde entier. La différence principale entre les programmes est dans leurs utilisations du calcul method-DOE-2 de charge une approche de facteur de pondération de pièce tandis que le SOUFFLE emploie une approche d'équilibre thermique de zone[91].

À l'instar de ses programmes parents, EnergyPlus est un programme d'analyse énergétique et de simulation de charge thermique. Basé sur la description d'un bâtiment du point de vue de la composition physique du bâtiment, des systèmes mécaniques associés, etc., EnergyPlus calcule les charges de chauffage et de refroidissement nécessaires pour maintenir les consignes de régulation thermique, les conditions dans un système CVC secondaire et les charges, et la consommation d'énergie du matériel d'usine primaire ainsi que de nombreux autres détails de simulation qui sont nécessaires pour vérifier que la simulation fonctionne comme le serait le bâtiment réel. De nombreuses caractéristiques de simulation ont été héritées des programmes hérités de BLAST et DOE-2.

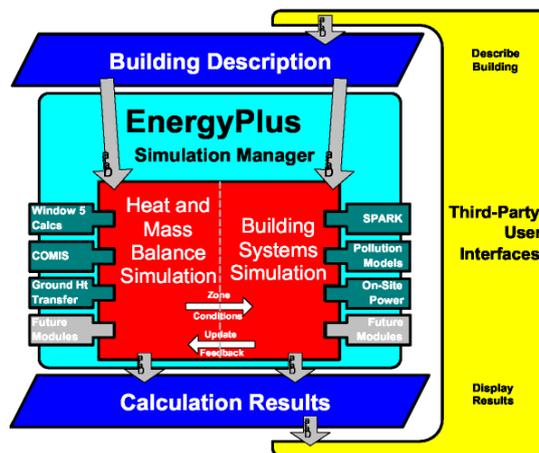


Figure 1. Overall Structure of EnergyPlus

Figure:V. 14 le schéma montre la structure globale d'EnergyPlus. [91]

Le schéma V.14 montre la structure globale d'EnergyPlus, avec le directeur de base de la composant simulation trois, la chaleur et le module de simulation de bilan de matière, et le module de simulation de systèmes de bâtiment. Le directeur de simulation commande le procédé entier de simulation. La chaleur et les calculs de bilan de matière sont dérivés de la version de recherches d'IBLAST-a du SOUFFLE avec la simulation intégrante de systèmes de la CAHT et de charges de bâtiment[91].

### V.7.1 Fichiers d'entrées d'Energyplus :

- SketchUp un rédacteur de la géométrie pour EnergyPlus. Il nous permet de créer la géométrie de bâtiment à partir de zéro : ajouter les zones thermiques, dessiner les surfaces de transfert de chaleur, dessiner les fenêtres et les portes, les surfaces d'ombrage d'aspiration, etc.

- Dans SketchUp, chaque objet que vous dessinez sur l'écran s'appelle une entité. Les entités incluent des groupes, des visages, et des bords. Ces limites sont compatibles à la documentation de SketchUp, qu'un utilisateur vétérinaire identifier.
- Le fichier de données d'entrée d'EnergyPlus (IDF) se compose également d'objets. Un objet d'entrée d'EnergyPlus est un bloc de texte avec des valeurs de données séparées par des virgules et terminées par un point-virgule. Des valeurs permises pour chaque champ de l'objet sont définies par le dictionnaire des données d'entrée (IDD). [118]

### V.8 Raisons et choix des compositions idéales :

L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement thermique d'un habitat traditionnel en utilisant nouveau de matériaux (brique de terre crue), tout en tenant compte des spécificités du climat de la région considéré. L'habitat étudié est constitué d'un rez-de-chaussée et un étage. Il est implanté dans le vieux ksar de Laghouat (Algérie) qui est caractérisée par un climat aride et semi-aride. Le but de cette étude est de valoriser l'utilisation des matériaux locaux (l'Adobe) dans la construction de logement situé dans un climat aride, tout en respectant l'architecture locale et le confort thermique vis-à-vis de la température.

Pour réaliser cette étude, nous avons analysé l'effet, de la conception architecturale et de différents matériaux constituant l'enveloppe du bâtiment, sur le confort thermique. La simulation numérique est réalisée à l'aide du logiciel EnergyPlus V8. Nous présentons l'évolution journalière des températures ambiantes intérieures et la température extérieure.

La prise en compte d'informations sur le climat et l'amélioration des techniques au niveau des matériaux de construction et d'isolation permettent aujourd'hui de réaliser des bâtiments économiques en énergie et confortables.

Grâce à l'outil de simulation numérique EnergyPlus, nous avons pu tester l'efficacité énergétique pour différentes dispositions, matériaux et technique, en tenant compte de l'influence des paramètres climatiques de la ville de Laghouat au sud de l'Algérie.

### V.9. Description du système de mesure l'humidité relative :

L'acquisition des données de l'humidité relative à été récupérée d'une étude qui déjà faite auparavant sur le vieux ksar « *The effect of earthen vernacular buildings rehabilitation on the thermal comfort, in southern Algeria* » [90]. La campagne de mesure est menée avec plusieurs appareils : du modèle : TESTO 615 et un hygromètre digital du modèle : TESTO 415 les capacités et les détails de fiabilité de ce dernier sont représentés dans le tableau V.8.

Tableau V. 8 les instruments de mesure utilisés dans l’investigation Source : [87]

Les instruments de Mesure		Description
TESTO 415 Thermo-hygromètre		Permet de mesurer la Température de l’air et « humidité ambiante : Temp (°C)/ HR (%) /

**V.9.1 Méthodologie :**

Les relevés horaires d’humidité relative ont été effectués dans les conditions d’hiver (janvier) et d’été (juillet), où des chutes et des pics de températures ont été prédits, à l’aide d’un thermo-hygromètre, à enregistrement mécanique autonome ; celle-ci a permis de mesurer l’humidité relative par un hygromètre à cheveux (Précision :  $\pm 2,5\%$ ).

Afin de valider les résultats aperçus, des simulations numériques par logiciel Energyplus version 1.2.2 ont été élaborées. Auparavant des essais ont été effectués au niveau du laboratoire sur un échantillon de terre crue. En fait, ces essais ont permis de déterminer les caractéristiques nécessaires pour l’étude (densité, conductivité thermique et chaleur spécifique) pour réaliser ces simulations.

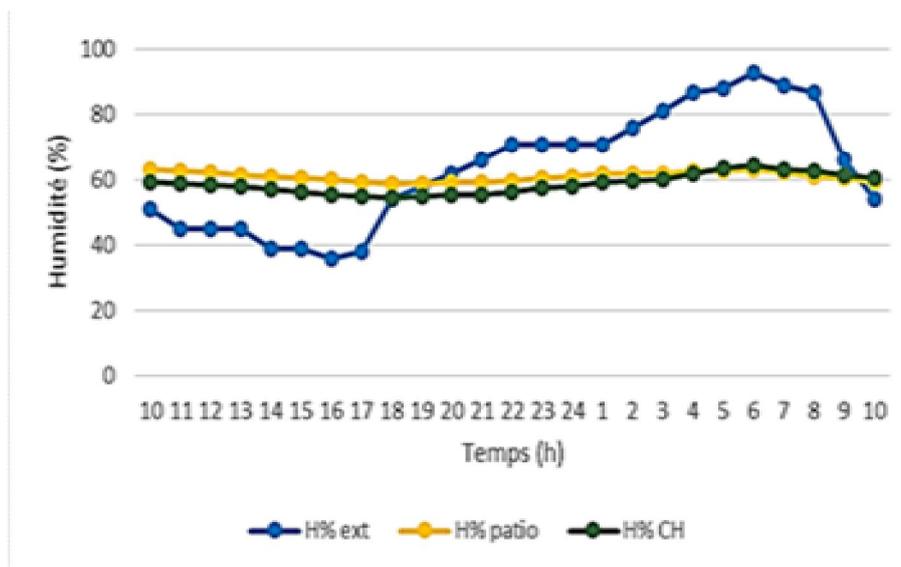


Figure : V. 8 Variations de l’humidité relative moyenne intérieure et extérieure de janvier 2017 (Source : Ben Cheikh [90])

La lecture des graphes ci-dessus, le taux d'humidité relative, est autant stable avec un écart de 5%, entre sa valeur max et sa valeur min (Fig.V.15) ; ceci s'explique par l'effet régulateur hygrométrique de l'adobe, qui permet une hygrométrie d'environ 55% ; il capte ou restitue l'humidité de l'air en fonction de l'humidité ambiante, grâce à sa capacité d'absorptions et de désorption de vapeur d'eau [90].

L'adobe avec ses propriétés hygrométriques de l'absorption et la désorption de la vapeur d'eau contenue dans l'ambiance permet de réguler les conditions intérieures. Assurant donc le confort hygrométrique intérieur[87].

Dans les murs en Toub, durant la saison chaude, l'eau est captée par évaporation. Un phénomène qui accroît sensiblement le confort par une baisse de la température intérieure de la maison.

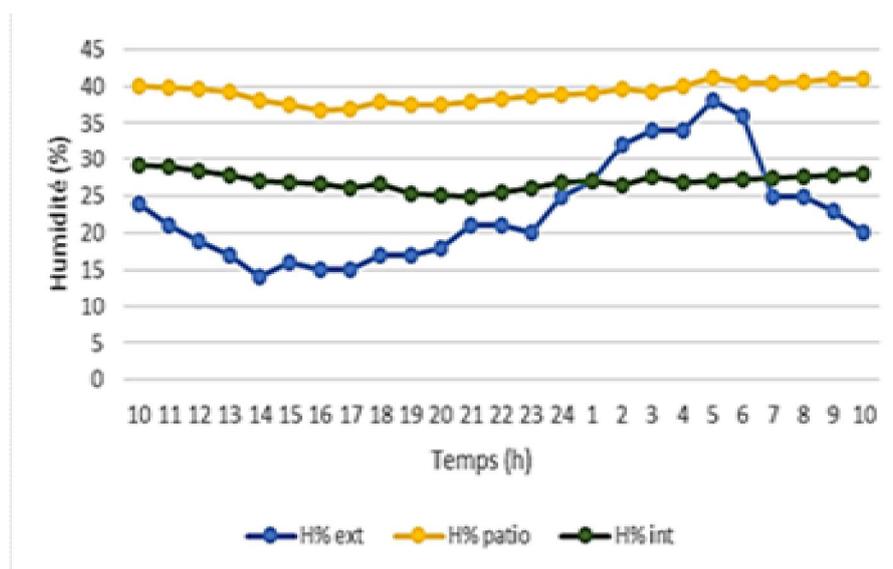


Figure : V. 9 les résultats de l'humidité de l'air de juillet 2017 (Source : Ben Cheikh.D)

La plage du confort thermique est limitée selon Givoni entre 20 et 27°C. À cet effet, on constate que le confort thermique est quasi assuré dans la période estivale, à l'intérieur de la maison (chambre et patio), où les températures fluctuent légèrement de 29 à 30,76°C à l'ombre, et l'humidité est approximativement constante (Fig.V.16). En revenant au diagramme psychométrique (Fig.V.11), l'inertie thermique et la ventilation nocturne sont les solutions recommandées, sous les conditions climatiques de mois de juillet[90].

Toutes ces données nous permettent d'avoir une appréciation quantitative sur les différents paramètres qui influent sur le comportement des usagers des maisons ksouriennes.

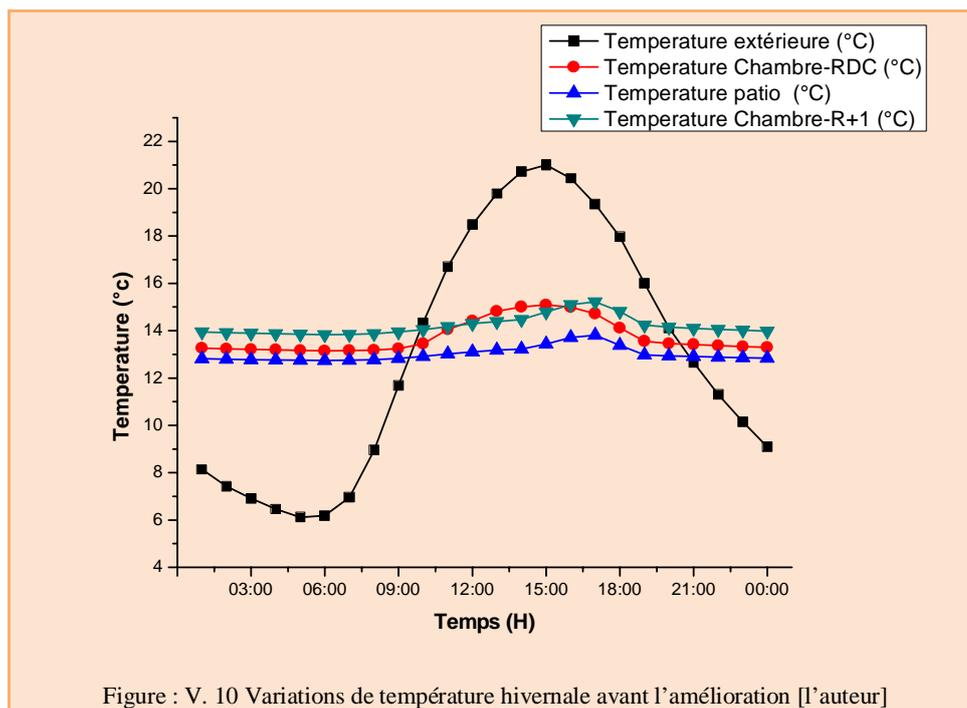
En effet ces résultats numériques reflètent en temps réel la performance des matériaux locaux dans un contexte compact (ksar).

## V.10 La température extérieure :

### V.10.1 Avant l'amélioration, période hivernale :

L'évaluation du confort thermique a été menée sur les espaces les plus exposés aux conditions climatiques hostiles à savoir ; le patio, une chambre qui se trouve au rez-de-chaussée et autre au niveau de l'étage, afin de comparer leurs résultats avec les températures extérieures, ce que amènera a la détermination de la performance thermique du matériau constituant le mur de cette maison dans son état initial (dont la conductivité thermique est de 0,71 w/m.k et l'épaisseur de mur égale à 0,6 m).

La lecture du graphe présenté ci-après montre que les températures extérieures présentent une forte amplitude de 14 °C entre la valeur maximale (21 °C) marquée à 15h : 00 (du soir) et celle minimale (6 °C) marquée vers 5h : 00. (du matin) en revanche, les températures ambiantes du patio et ceux de la chambre de l'étage sont quasi constants, dont les amplitudes sont à l'ordre de 2 °C, contrairement aux températures marquées dans la chambre de rez-de-chaussée qui suivent approximativement le cheminement de la courbe des températures extérieures.



La stabilité des températures marquées pendant les premiers dix heures dans le patio (environ 12 °C) se traduit par l'amortissement des apports externes (dont les températures fluctuent entre 6 et 14 °C) assurée par la brique d'adobe [96], en retardant le transfert de froid à travers les parois six heures (de 6h : 00 : AM à 12h : 00 PM) grâce à son inertie thermique ainsi que son épaisseur. Cet amortissement avait un impacte négative sur le comportement thermique de trois espaces évalués durant l'après-midi, dont les températures extérieures étaient plus agréables, elle atteint la plage de confort arrêtée par Givoni entre 20 et 27 °C, vers 14h : 00 ).

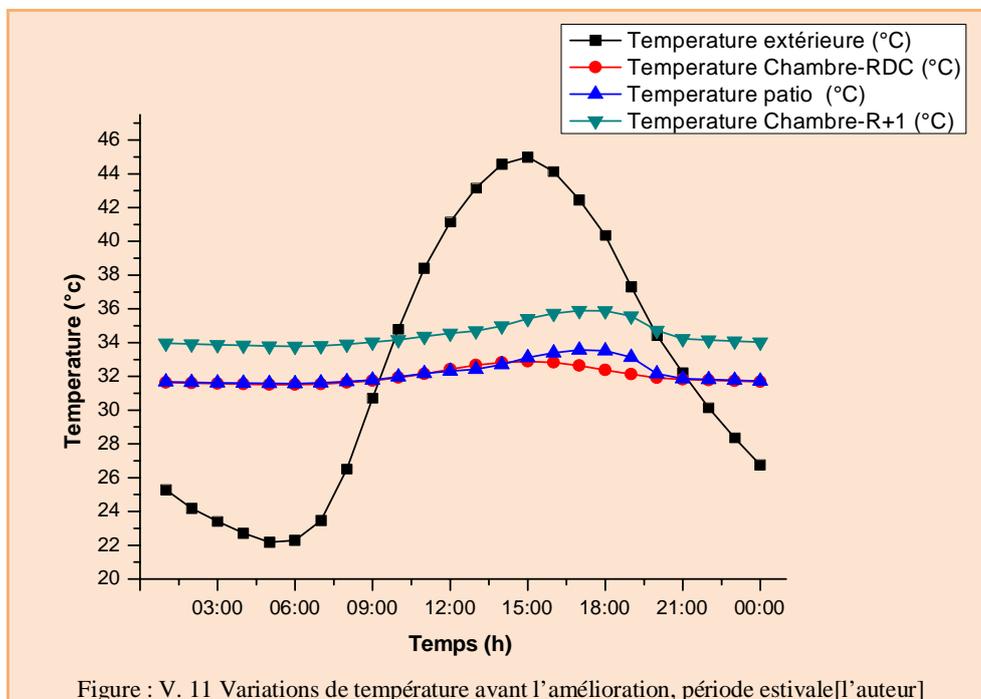
Cependant, les températures intérieures sont plus élevées que ceux de milieu extérieur pendant la nuit, cela est dû à la chaleur cumulée tout au long de la journée et qui reste emmagasinée à l'intérieur de la chambre. Ceci s'explique aussi par la masse thermique de l'adobe.

La valeur maximale des températures ambiantes des chambres a atteint le 15 °C vers 15h : 00, cela est justifié par l'orientation sud [92] de l'un des murs constituant ces chambres et l'exposition totale des plafonds aux rayons solaires directs, ce qui explique l'effet des radiations solaires sur les parois qui reçoit une quantité importante de radiations.

### V.10.2 Avant l'amélioration, période estivale :

Les résultats obtenus du graphe présenté ci-dessous montrent une variation de température entre l'extérieur et l'intérieur qui atteint les 10 °C (avec une température extérieure maximale de 45 °C et intérieur maximale, de 35 °C marqués a la chambre d'étage vers 15h : 00 PM).

Ces résultats se justifient par la capacité du matériau à stocker la chaleur pendant la journée et la restituer pendant la nuit. [94] Cependant, ce n'est pas tant la capacité thermique du matériau mis en place qui influence la surchauffe éventuelle, mais l'utilisation d'une ventilation intensive la nuit, afin de refroidir la masse du bâtiment. À cet effet, une ventilation nocturne est primordiale afin d'évacuer l'air chaud accumulé dans l'espace à rafraîchir. Ceci est clairement établi d'après les températures du patio qui présente l'espace le plus au moins agréable (dont la température moyenne est de 32 °C). Néanmoins, cette température reste supérieure à la plage de confort citée auparavant.

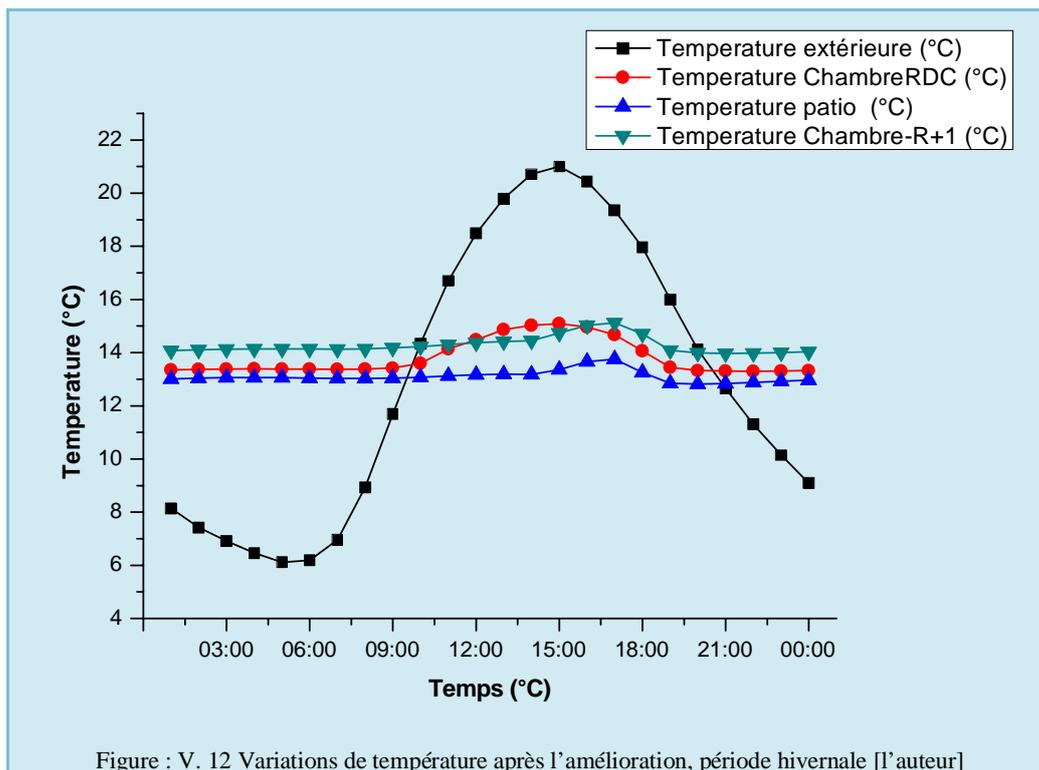


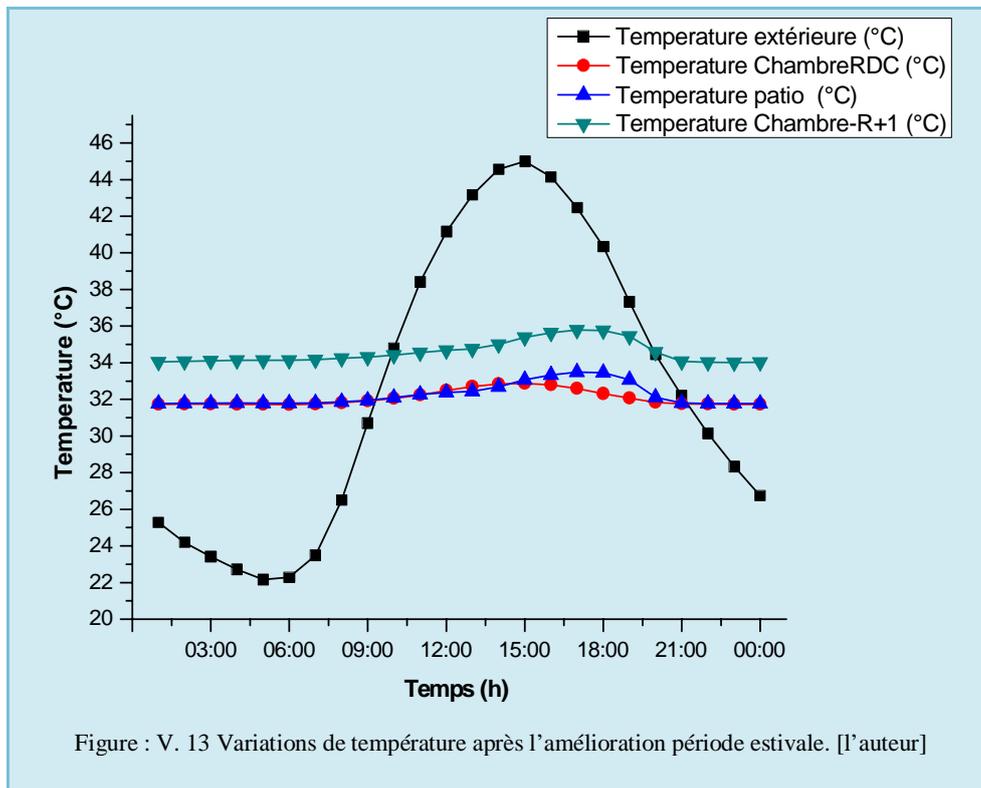
Notant que le faible ratio des ouvertures par rapport aux surfaces a permis d'éviter la surchauffe (la technique de construction en terre a obligé les habitants à limiter le nombre des ouvertures et à réduire leurs surfaces afin de garder la stabilité des murs).

A cela s'ajoute l'épaisseur de l'enveloppe des chambres, plus l'épaisseur et par conséquent la performance thermique de la paroi est grande, plus la température intérieure de la pièce est basse [93] et la typologie d'habitat traditionnelle, dont les chambres s'alignent autour d'une cour centrale (patio) qui génère une sorte de microclimat, notamment dans l'habitat des zones arides, il provient une maîtrise du climat au niveau de l'ensemble de la maison par la circulation de l'air frais et la Maîtrise d'ensoleillement [95].

### V.10.3 L'effet de l'amélioration de la conductivité thermique de l'adobe :

Comme résultats de simulation, on n'obtient que l'amélioration faite sur la conductivité thermique de l'adobe a permis d'optimiser les performances thermiques de la maison, malgré l'épaisseur réduite du mur (de 0,6 à 0.4 m). Une augmentation de température ambiante a été marquée dans tous les espaces évalués, avec un moyen de 0,3 °C, dans la journée type hiver (fig.V.20). Cependant, une stabilité de températures intérieures a été marquée après l'amélioration du matériau dans la période estivale (Fig.V.21), dont la résistance thermique a été préservée, en fonction de l'épaisseur de mur et de la conductivité thermique (0,51 w.m/K).





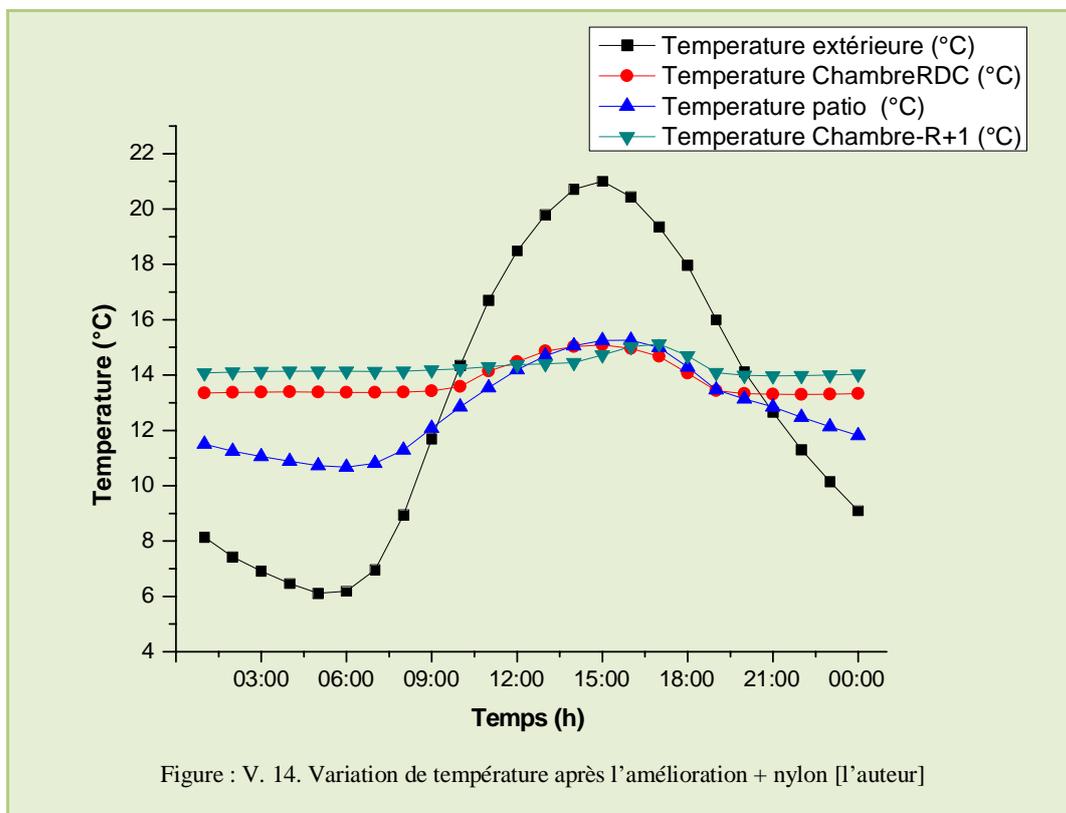
On comparant les résultats de cette simulation (après l'amélioration) avec la plage de confort arrêté par Givoni (20-27°C), on fait sortir que le comportement thermique de la maison objet d'étude est hors plage de confort, dont la température hivernale moyenne est environ 13 °C et celle qui est estivale est égale à 33 °C. L'inertie thermique et la ventilation nocturne sont les solutions recommandées sous les conditions climatiques de mois de juin dans la ville de Laghouat. La ventilation nocturne a été négligée pendant la simulation ce que justifier les résultats estivaux obtenus. [95] En revanche, tous les paramètres influant le confort thermique ont été pris en considération lors de l'évaluation de comportement thermique hivernal de la maison, cela ressorte que les résultats de la journée type hiver reflètent le comportement réel des espaces évalués, pour cela, une amélioration de performance thermique de la maison a été proposée tout en utilisant une solution qui a été remarquée pendant la visite de quelques maisons ksouriennes. Une couverture en nylon a été ajoutée au patio afin d'assurer un réchauffement passif grâce à l'effet de serre, et d'éviter la déperdition thermique à travers le patio.

#### V.10.4 La protection du patio par couverture plastique transparente (P.V.C) :

Le patio a un effet négatif sur le confort d'hiver, l'ajout d'une couverture transparente en P.V.C tel que à été utilisée par l'un des habitant du ksar, permis d'amélioré le confort d'hiver le type de P.V.C utilisé à les caractéristiques suivant : l'épaisseur....., conductivité.....,

La lecture du graphe ci-après (Fig .V.21) à montré que la couverture en nylon (plastique transport) placée au patio avait un impacte positive sur l'ambiance thermique des espaces évalués, qui se résume par le chauffage passive assurée grâce à l'effet de serre. Ceci et clairement établi à partir des résultats, dont une augmentation de température a été à marquée et surtout pendant l'après-midi (rayonnements solaires directs).

En comparant le tracé des graphes présentés ci-dessous avec ce qui est présenté auparavant (l'état amélioré), on observe une grande fluctuation de température dans la courbe du patio (la température a atteint les 15,5 °C, contrairement à la température de l'état amélioré, dont la maximale était 13 °C). Cette fluctuation est ainsi remarquable dans la courbe de la chambre de rez-de-chaussée, avec une température maximale de 15 °C et celle qui est minimale de 13 °C. La couverture en nylon a permis davantage de freiner l'évacuation de l'air chaud accumulé à l'intérieur de la maison.



**V.11 . Conclusion :**

Cette partie de travail avait pour but d'évaluer la performance thermique de l'ancien matériau de construction (adobe) après l'amélioration de sa conductivité thermique, afin de réduire l'épaisseur de mur tout en préservant la même qualité d'environnement intérieur de la maison objet d'étude. Les résultats ont montré que l'amélioration faite a permis d'optimiser le confort thermique de l'habitat ksourien pendant la période hivernale, et de préserver les mêmes performances pendant l'été. Or, ces résultats ont été hors la plage de confort pour cela, une amélioration a été proposée afin d'améliorer le confort thermique hivernal. L'ajout d'une couverture en nylon (plastique transparent) au niveau du patio a permis d'augmenter la température intérieure dont une différence de 2 °C entre les deux améliorations a été marquée. Cette couverture est souvent utilisée par les habitants de l'ancien ksar de Laghouat pendant la période hivernale pour protéger contre les pluies aussi, afin de l'enlever durant l'été pour laisser rafraîchir l'air.

### **Conclusion générale :**

L'architecture de terre est méconnue et méprisée, car elle est liée à des images d'archaïsme et de pauvreté. Depuis près de 9 000 ans, l'homme avait tendance de bâtir des villes entièrement en terre crue et demeure, un des matériaux de construction le plus utilisés sur la planète. Ce remarquable patrimoine culturel universel a été occulté, depuis que l'homme a connu la technique des transformations. Il nous faut donc redécouvrir les évidences de ce que certains ont bien cru synonyme de pauvreté et de précarité.

C'est dans ce cadre-là que des travaux sur la terre, en tant que matériau ont été entrepris par certains pionniers comme François Coentaux et Hassan Fathy. Ces derniers ont bien redonné confiance aux concepteurs et autres, qu'il est bel et bien possible de construire en terre. La revalorisation de l'architecture de terre doit passer par faire une lumière sur la connaissance plus approfondie de la matière. Afin de la maîtriser et mettre en valeur toutes ses vertus écologiques et ses performances thermiques, avec toutes les incidences positives qu'elle peut réaliser sur le plan énergétique, environnemental et esthétique.

Dans les pays en voie de développement, la recherche de solutions aux problèmes posés par l'habitat est devenue difficile de par un contexte économique peu favorable. En Algérie, l'utilisation de la terre est une tradition très ancienne. Elle était employée non seulement dans les campagnes, mais également dans les villes et les Ksour. Actuellement, malgré la tendance à utiliser le béton de ciment, plus de 50 % des habitations du Sahara algérien sont encore en « toub ». Presque toutes les constructions dites traditionnelles sont réalisées avec la terre associée à d'autres matériaux d'appoint telles que les ajouts végétaux (paille et autres) ou minéraux.

Depuis quelques années, nous assistons à un ressaut intéressant de la recherche sur les matériaux dits traditionnels. Nous cherchons des logements économiques suite à la rareté et au coût excessif des logements pour les pays en développement, notamment l'Algérie, où les architectes étaient convaincus que la solution était dans le passé. Néanmoins, le problème qui évoque certaines préoccupations est l'amélioration de sa durabilité lorsqu'il est soumis à des conditions climatiques délétères.

En effet, il reste beaucoup à faire pour améliorer l'image médiocre qu'offre actuellement la construction en terre et développer une technique appropriée destinée à jeter les bases d'une promotion de ce matériau et d'une future garantie de qualité bien adaptée.

Pour une meilleure connaissance des limites de ce matériau destiné à l'habitat, une étude approfondie serait nécessaire, l'objectif principal de ce mémoire rentre dans ce contexte. Afin d'appréhender le comportement du matériau de la terre utilisée dans nos essais, des modèles de comportement pourront être recherchés et validés à partir des données précitées. Une continuation de cette étude est à envisager d'une manière plus exhaustive afin de nous permettre une compréhension partielle des phénomènes mis en jeu.

L'objectif de ce travail était d'améliorer la résistance mécanique et thermique des briques en terre crue, ainsi que de prouver les bienfaits des matériaux en terre crue.

Dans un premier temps, une caractérisation physique et géotechnique des trois échantillons de sols, extraits des trois maisons dans le secteur sauvegardé de Laghouat.

Cette identification a permis d'analyser et de comprendre les phénomènes observés lors de la caractérisation des briques, et de présenter une aide à la décision pour les améliorations thermiques et mécaniques proposées. Le travail réalisé a permis d'avoir une fiche technique des différents échantillons, participant ainsi à la formation d'une base de données pour les matières premières utilisées dans le vieux ksar.

Suite à cette caractérisation, nous avons commencé le travail par l'étude des performances thermiques de deux types de briques en terre crue (échantillon M1 et M2). Elles sont produites principalement de trois matières premières caractérisées précédemment. L'étude menée à l'échelle du laboratoire a mis en évidence que ces matériaux on peut être utilisés et recerclé pour l'isolation thermique, vue leur conductivité thermique diminue qui se situe autour de 0,5 W/m.K.

Parallèlement à cette étude sur la terre crue, nous avons travaillé sur l'amélioration des performances thermiques des briques en terre crue (adobe) existantes et ont été produites par indigènes de ksar, ainsi que le développement de nouveaux produits, tel que les briques d'adobe. Dans un premier temps, nous avons tenté de faire une correction granulométrique et ça par le relevé du pourcentage d'argile, et nous avons étudié l'impact de l'incorporation des adjuvants sur les propriétés physiques, mécaniques et thermiques des briques. Quatre pourcentages ont été testés : 0 %, 1 %, 1,5 % et 2 % les résultats expérimentaux ont montré que les mélanges contenant 2 % de paille semblent être les plus efficaces, puisqu'ils permettent respectivement d'améliorer la conductivité thermique de 0,71 à 0,51w/m.k par rapport à l'état sans adjuvant paille. Ces proportions ont entraîné une augmentation de la résistance à la compression de 19 bars à 32 bars et qui située dans la fourchette de littérature.

## *Conclusion Générale*

---

Ce travail a présenté des résultats intéressants pour augmenter le pouvoir d'isolation des briques. Quelques essais ont été effectués à l'échelle de laboratoire l'influence des différents paramètres (conductivité thermique, épaisseur des cloisons, épaisseur des parois...) sur la résistance thermique de la brique a été étudiée. Ce travail a permis de proposer différentes possibilités d'amélioration de la résistance thermique.

Cependant, la détermination des performances thermiques dynamiques de ces briques a montré les atouts de la terre crue et sa contribution dans le confort. En effet, l'étude a montré qu'une épaisseur de 40 cm pour les briques M2 + P= 2 %, une stabilité de températures intérieures a été marquée après l'amélioration du matériau dans la période estivale dont la résistance thermique a été préservée, en fonction de l'épaisseur de mur et de la conductivité thermique (0,51 w.m/K).

Cette partie de travail visait l'évaluation de la performance thermique de l'ancien matériau de construction (adobe) après l'amélioration de sa conductivité thermique, afin de réduire l'épaisseur de mur tout en préservant la même qualité d'environnement intérieur de la maison objet d'étude. Les résultats ont montré que l'amélioration faite a permis d'optimiser le confort thermique de l'habitat ksourien pendant la période hivernale, et de préserver les mêmes performances pendant l'été. Or, ces résultats ont été hors la plage de confort, pour cela, une amélioration a été proposée afin d'améliorer le confort thermique hivernal. L'ajout d'une couverture en nylon au niveau du patio a permis d'augmenter la température intérieure dont une différence de 2 °C entre les deux améliorations a été marquée. Cette couverture est souvent utilisée par les habitants de l'ancien ksar de Laghouat pendant la période hivernale, afin de l'enlever durant l'été pour laisser rafraîchir l'air.

La simulation effectuée sur un type de maison traditionnelle avec patio, ces simulations ont permis d'observer le rôle de ce matériau dans l'amortissement des fluctuations des températures extérieures et dans la stabilisation de la température intérieure. Cette dernière qui n'arrive pas 32 °C, pendant les mois d'été, limitant ainsi la surchauffe de la maison.

Ce projet a favorisé le développement de la construction en terre crue dans le secteur sauvegardé. Il a permis désormais à l'entreprise de commencer quelques chantiers importants de construction.

Cette étude nous a permis de comprendre aussi que la mauvaise image de l'architecture de terre est due à un ensemble de facteurs, autrement dit elle est perçue à travers des éléments tels l'aspect du cadre bâti et le matériau de construction. Cette image des constructions traditionnelles est marquée négativement par l'état du cadre du bâti tout autant que le matériau. D'une manière générale pour améliorer l'image de l'architecture de terre il est nécessaire de passer par la revalorisation du patrimoine culturel, la nécessité de la normalisation de la terre en tant que matériau de construction et engager des travaux de recherches sur cette techniques.

**Références bibliographiques :**

- [1] **H. Houben et H. Guillaut**, « *Traité de construction en terre* », Éd. Parenthèse, Marseille 2006. V6.
- [2] **Gernof Minke**, « *Building with earth, design and technology of a sustainable architecture* » 2006 Birkhauser, Berlin Germany.
- [3] **Giovanni Peirs**, « *la brique, fabrication et tradition constructive* » groupe Eyrolles, 2005
- [4] **Jean Dethier**, « architectures de terre » centre George Pompidou, Paris 1982
- [5] **Bruno Pignal**, *Terre crue : Techniques de construction et de restauration*, édition EYROLLES, 2005
- [6] **CNERIB**, Conception de logements économiques à base de produits localement disponibles, CNERIB, Alger, 2000.
- [7] **CRATerre**, P.Doat, A. Hays, H. Houben « Construire en terre » en France 1979
- [8] **Ahmed kadi Ali et Ait salima**, performances thermiques du matériau terre pour un habitat durable des régions arides et semi-arides : cas de Timimoune, mémoire Magister 2012
- [9] **H. Benouali**, Proposition pour la relance des constructions en terre en Algérie, CNERIB, décembre 2004.
- [10] **Festival Architerre 2015** \_ EPAU d'Alger, Algérie \_ avril 2015 Fenêtre ouverte sur les architectures de terre dans le monde UNESCO-WHC | Programme WHEAP (2007-2017)
- [11] **Yasmine Terki** « *stratégie algérienne pour la réhabilitation de l'image des architectures de terre* » journées d'information et de sensibilisation, 4<sup>e</sup> Édition du festival culturel international de Promotion des Architectures de Terre.
- [12] **Hamid Benouali**, « *La réglementation technique Algérienne de construction avec les Matériaux locaux* », Festival ArchiTerre, 2015 CNERIB
- [13] **Jean-Marie Le Tiec**, « *Architectures de terre contemporaines, dans le monde* » CRATerre - ENSAG
- [14] **Teresa Diaz Gonçalves, Maria Idália Gomes**, « *L'architecture en terre construction nouvelle et conservation du patrimoine historique* »
- [15] **Berrehail .Tahar**, « *La terre un matériau de construction, une alternative pour une solution durable* » mémoire Magister 27 octobre 2009.
- [16] **M. Carmen Jimé'nez Delgado**, « *Le choix des sols pour le bâtiment non stabilisé de la terre Une revue normative* » département de construction Université Madrid, admis 8 août 2005.
- [17] *Construction en terre, l'architecture traditionnelle de charouine et de Timimoune*, PNUD, Alger, 2007.
- [18] **N. Baloul**, Conservation et valorisation du patrimoine architectural en terre de la région du Twat-Gourara : cas du ksar de Tmassekh, mémoire de magister 2007.
- [19] **C. Delbecque**, Approche contemporaine de la construction en terre, Histoire de la construction en terre 21 octobre 2011.
- [20] **Saliha Ben messaoud**, Prospection pour l'introduction de la construction en matériaux locaux dans le secteur du logement à Tamanrasset, Mémoire du diplôme de spécialisation et d'approfondissement- Architecture de Terre ; DSA-Terre 2004-2006
- [21] **Younès BABANEDJAR, Yasmine TERKI**, LES ATELIERS DE BÂTISSEURS, la matière en grains, de la géologie à l'architecture, CONSTRUIRE AVEC LES ADOBES
- [22] **Liébard A. De Herde** : *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique, concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*, Éd. Le Moniteur, Paris 2005.
- [23] **BERKOUK Djhed 2017**, « Évaluation du confort thermique et lumineux dans le logement collectif : Étude comparative entre le social et le promotionnel, dans la ville de Biskra ». Doctorat en Architecture.
- [24] **ASHRAE55** (1992) ASHRAE STANDARD: An American Standard: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. American Society of Heating refrigeration and air conditioning engineers.
- [25] **Auliciems, A. and Szokolay, S. V** (1997) 'Thermal comfort', in. PLEA.
- [26] **Azizpour, F., Moghimi, S., Salleh, E., Mat, S., Lim, C. H. and Sopian, K.** (2013) 'Thermal comfort assessment of large-scale hospitals in tropical climates: A case study of University Kebangsaan Malaysia Medical Centre (UKMMC)', *Energy and Buildings*, 64, pp. 317–322. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.05.033>.

- [27] **Berghout, B., Forgues, D. and Monfet, D.** (2014) « Simulation du confort thermique intérieur pour l'orientation d'un bâtiment collectif à Biskra, Algérie. » International Building Performance Simulation Association.
- [28] **Butera, F. M.** (1998) 'Chapter 3—Principles of thermal comfort', Renewable and Sustainable Energy Reviews. Elsevier, 2(1), pp. 39–66.
- [29] **Capderou, M.** (1986) Atlas solaire de l'Algérie : aspect géométrique, synthèse géographique. Office des publications universitaires.
- [30] **Castilla, del M. M., Álvarez, J. D., Rodriguez, F. and Berenguel, M.** (2014) Comfort control in buildings. Springer.
- [31] **Fabbri, K.** (2015) Indoor Thermal Comfort Perception: A Questionnaire Approach Focusing on Children. Springer.
- [32] **Fanger, P. O.** (1973) 'Assessment of man's thermal comfort in practice,' British journal of industrial medicine. BMJ Publishing Group Ltd, 30 (4), pp. 313–324.
- [33] **Gagge, A. P., Fobelets, A. P. and Berglund, L. G.** (1986) 'A standard predictive index of human response to the thermal environment', ASHRAE Trans.; (United States), 92:2B.
- [34] **Hensen, J. L. M.** (1990) 'Literature review on thermal comfort in transient conditions', Building and Environment, 25(4), pp. 309–316. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0360-1323\(90\)90004-B](http://dx.doi.org/10.1016/0360-1323(90)90004-B).
- [35] **Hensen, J. L. M.** (1991) On the thermal interaction of building structure and heating and ventilating system. PhD thesis. Technische Universiteit Eindhoven. Available at: [http://www.esru.strath.ac.uk/Documents/PhD/hensen\\_thesis.pdf](http://www.esru.strath.ac.uk/Documents/PhD/hensen_thesis.pdf).
- [36] **De Herde, A. and Liébard, A.** (2005) Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques : Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable. Le Moniteur. Paris: ISBN 2-913620-37-X.
- [37] **Holm, D. and Engelbrecht, F. A.** (2005) 'Practical choice of thermal comfort scale and range in naturally ventilated buildings in South Africa', Journal of the South African Institution of Civil Engineering, 47(2), pp. 9–14.
- [38] **Höppe, P.** (1988) 'Comfort requirements in indoor climate', Energy and Buildings. Elsevier, 11(1), pp. 249–257.
- [39] **Houghton, F. C. and Yaglou, C. P.** (1923) 'Determining equal comfort lines', J ASHVE, 29, pp.165–176.
- [40] **Humphreys, M.** (1978) 'Outdoor temperatures and comfort indoors', Batiment International, Building Research and Practice. Taylor & Francis, 6(2), pp. 92–105.
- [41] **Izard, J.-L. and Millet, J.-R.** (1993) Architectures d'été : construire pour le confort d'été. Edisud.
- [42] **Jannot, Y. and Djiako, T.** (1994) « Économie d'énergie et confort thermique dans l'habitat en zone tropicale », International Journal of Refrigeration, 17(3), pp. 166–173. doi : [http://dx.doi.org/10.1016/0140-7007\(94\)90015-9](http://dx.doi.org/10.1016/0140-7007(94)90015-9).
- [43] **Macpherson, R. K.** (1962) 'The Assessment of the Thermal Environment. A Review,' British Journal of Industrial Medicine, 19(3), pp. 151–164. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1038191/>.
- [44] **Mallick, F. H.** (1996) 'Thermal comfort and building design in the tropical climates', Energy and buildings. Elsevier, 23(3), pp. 161–167.
- [45] **McIntyre, D.** (1973) 'A guide to thermal comfort', Applied Ergonomics. Elsevier, 4(2), pp. 66–72.
- [46] **Nematchoua, M. K., Tchinda, R. and Orosa, J. A.** (2014) 'Thermal comfort and energy consumption in modern versus traditional buildings in Cameroon: A questionnaire-based statistical study', Applied Energy, 114, pp. 687–699. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.036>.
- [47] **Olgay, V.** (1963) Design With Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism, 1963. Princeton: Princeton, NJ: Princeton University Press.
- [48] **Sadafi, N., Salleh, E., Haw, L. C. and Jaafar, Z.** (2011) 'Evaluating thermal effects of internal courtyard in a tropical terrace house by computational simulation', Energy and Buildings, 43(4), pp. 887–893. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.009>.
- [49] **Tham, K. W.** (1993) 'Conserving energy without sacrificing thermal comfort', Building and

Environment, 28(3), pp. 287–299. doi: 10.1016/0360-1323(93)90034-Z.

[50] **Volkov, A. a, Sedov, A. V and Chelyshkov, P. D.** (2014) ‘Modelling the Thermal Comfort of Internal Building Spaces in Social Buildings,’ *Procedia Engineering*. Elsevier B.V., 91(TFoCE), pp. 362–367. doi: 10.1016/j.proeng.2014.12.07

[51] **WHO (1999) Basic documents.** 42nd edn., WHO Regional Office for Europe. 42nd edn. Geneva (Switzerland).

[52] **Madi Kaboré,** « *Enjeux de la simulation pour l'étude des performances énergétiques des bâtiments en Afrique subsaharienne* ». thèse pour obtenir le grade de doctorant 2015.

[53] **Iwaro, Joseph, and Abraham Mwashia.** 2010. “A review of building energy regulation and policy for energy conservation in developing countries.” *Energy Policy* 38 (12) : 7744 – 7755. Special Section.

[54] **Janda, Kathryn B., and John F. Busch.** 1994. “Worldwide status of energy standards for buildings.” *Énergie* 19 (1) : 27 – 44

[55] **ISO 7730** : Ambiances thermiques modérées — Détermination des indices PMV et PPD et spécification des conditions de confort thermique.

[56] **B.Givoni,** « *l'homme, l'architecture et le climat* », édition du moniteur 1978.

[57] **Haddam Muhammad Abdalkhalaq Chuayb,** « *Application de quelques notions de la conception bioclimatique pour l'amélioration de la température interne d'un habitat* » mémoire Doctorat en Sciences physiques, Année universitaire 2014 ~2015

[58] **Mzari Mohammed,** « *étude et évaluation du confort thermique des bâtiments à caractère public : cas du département d'architecture de Tamda (Tizi-Ouzou)* » Mémoire magister septembre 2012.

[59] **Mohammed Hichem Benzaama,** « *étude du confort thermique dans l'habitat par des procédés géoheliothermiques* » mémoire doctorat 2017.

[60] **DTU N°65.8,** « 'Exécution des Planchers chauffants utilisant des Tubes en Matériaux de Synthèse à Eau chaude', Documents techniques unifiés, février (1990).

[61] **Claude-Alain Roulet,** « *Conditions de confort et de logement sain* », centre de recherche public henritudor – Luxembourg.2008

[62] **M. Foura Smir.,** « *Simulation des paramètres du confort thermique d'hiver en Algérie* », mémoire doctorat 2007—2008.

[63] **BLOCH J M – LAINE,** Guide pratique de l'isolation thermique des bâtiments, Édition Ayrolle 1977

[64] **Cécile Batier,** « *Confort thermique et énergie dans l'habitat social en milieu méditerranéen d'un modèle comportemental de l'occupant vers des stratégies architecturales* » mémoire doctorat 2016.

[65] **Ahmed kadi Ali et Ait salima,** performances thermiques du matériau terre pour un habitat durable des régions arides et semi-arides : cas de Timimoune, mémoire Magister 2012

[66] **D. Medjelekh,** Impact de l'inertie thermique sur le confort hygro-thermique et la consommation énergétique du bâtiment, Cas de l'habitation de l'époque coloniale à Guelma, Mémoire de magister, université de Constantine, 2006

[67] **Donald Watson et Roger Camous,** l'habitat bioclimatique « de la conception à la construction » 1979.

[68] **IZARD,J-L. KAÇALA,O.** « *Le diagramme bioclimatique* » Envirobat-Méditerranée, laboratoire abc, Esna- Marseille, 2008 téléchargé à partir du site <http://www.marseille.archi.fr/~izard/.2008>

[69] étude, **PPSMVSS** de ksar Laghouat, direction de la culture, Laghouat.2011

[70] **Messaoud Souici,** « *méthodologie de réhabilitation et de reconstruction des ksour* » *CNERIB Algérie.*

[71] **Samira Haoui Bensaada,** « *Contribution à la connaissance et à la préservation des architectures ksouriennes* », Département d'architecture, Université de Blida, Algérie. Cas : le Touât Gourara (Sud Ouest de l'Algérie).

[72] **Mustapha Ameer Djeradi,** « *L'architecture ksourienne (Algérie) entre signes et signifiants* », L'Architecture vernaculaire, tome 36-37 (2012-2013).

[73] **Messaoud Souici,** « *méthodologie de réhabilitation et de reconstruction des ksour* » Atelier international de Formation sur les Risques majeurs et les Catastrophes naturelles Stratégies de Prévention et de Protection,CNERIB Algérie.

- [74] **Illili Mahrouf\***, « Contribution à l'élaboration d'une typologie "umranique" des ksour dans le Gourara », *Insaniyatn*°s 51-52, janvier - juin 2011, pp. 197-219.
- [75] **Plan d'aménagement du territoire de la wilaya de Laghouat** « Agence Nationale à l'Aménagement et à l'Attractivité des territoires » centre Biskra.
- [76] **Dr.Ali Hamlaoui**, exemplaire des ksour de la région de Laghouat, étude historique et archéologique, 2006
- [77] **J. Bisson**, Le Gourara étude de géographie humaine, Mémoire de l'IRS n° 3, université d'Alger, 1957.
- [78] **C.N.E.R.I.B**, MATLOC, 91, 3,4 et 5 décembre 1991 à Biskra.
- [79] **Aouissi Fatima**, comportement physique et mécanique de l'adobe paille, mémoire Magister en matériaux, université Laghouat 2000
- [80] **Serge Bossini**, « *Béton d'Argile environnemental, Résultats d'un programme de recherche tourné vers l'application* » de décembre 2010 à décembre 2013. Des chercheurs de 3 laboratoires (CRAterre-ENSAG, MATEIS-INSA de Lyon, DGCB-ENTPE)
- [81] **Nouioua Tahar** , « *étude environnementale de la sebkha d'Oran* », Mémoire de magister.2009
- [82] **Ben saada Ahmed**, « *Valorisation des sols locaux dans la construction en terre Cas de la région de Laghouat* ». Mémoire de magister.2011.
- [83] **Lahcen Boukhattem**, « *caractérisation thermo-physique des matériaux et modélisation des transferts couples de chaleur à travers un bâtiment* » Mémoire Docteur Soutenu le 28/07/08
- [84] **Fayçal EL Fgaier**, Conception, production et qualification des briques en terre cuite et en terre crue, mémoire-doctorant, 12 décembre 2013
- [85] **Karoum Nadir**, contribution à la restauration des architectures de terre par la durabilité de leur enduit, ksar Laghouat, mémoire Magister, 2013.
- [86] **EL Fgaier, ZoubeirLafhaj** ,« *Exécution thermique dynamique de trois types de briques de la terre crue* » *technologie thermique appliquée*(2015), <http://dx.doi.org/doi de Fayçal :10.1016/j.applthermaleng.2015.09.009>.
- [87] **Moulay Redouane**, « *Performances thermiques des maisons ksouriennes en terre crue et en terre améliorée en zone aride, cas d'étude Laghouat* »mémoire Magister, 2016
- [88] **Kassou Younes**, contribution à l'amélioration de l'isolation thermique de l'enveloppe des bâtiments, mémoire Magister.
- [89] **BS EN 772-1 :2000**, « Methods of test for masonry units- part1:determination of compressive strength" of the European Standard EN 772-1:2000 has the status of a British Standard.
- [90] **Bencheikh Darda\***, **Bederina Madani**, "The effect of earthen vernacular buildings rehabilitation on the thermal comfort, in southern Algeria" MATEC Web of Conferences 149, 02049 (2018) CMSS-2017 doi.org/10.1051/mateconf/201814902049
- [91] **Drury B. Crawley1, Linda K. Lawrie2, Curtis O. Pedersen3, Frederick C. Winkelmann4**, "ENERGYPLUS: AN UPDATE" SimBuild 2004, IBPSA-USA National Conference Boulder, CO, USA, 4-6 August 2004.
- Les articles de simulation : (source)**
- [92] **Belkacem Berghout1, Daniel Forgues1 et Danielle Monfet1**, « *Simulation du confort thermique intérieur pour l'orientation d'un bâtiment collectif à Biskra* », Algérie,École de technologie supérieure, Montréal, Québec. Article
- [93] **Naïma Fezziouia<sup>1</sup>, MébirikaBenyamine<sup>b</sup>, Saleh Larbi<sup>c</sup>**, « *Impact of traditional and modern building materials on the thermal behaviour and energy consumption of a courtyard house in the hot and dry climate* »*international-conférence on construction materials and structures (iccmats)*, 24-26 nov 2014, Johannesburg, south Africa
- [94] **D. Medjelakh\* et S. Abdou**, « *Impact de l'inertie thermique sur le confort hygrothermique et la consommation énergétique du bâtiment* »*Revue des Énergies Renouvelables Vol. 11 N°3 (2008) 329 – 341.*
- [95] **S. Abdou, M. Boumaza** « *investigation sur l'intégration climatique dans la maison traditionnelle du ksar de Ouargla* », Université Mentouri, Constantine, Algérie, 2004.

[96] **Nabil Matari<sup>1</sup>, Abdelkader Mahi<sup>1\*</sup> et Mohammed Lachi<sup>2</sup>** « *Effet de l'enveloppe du bâtiment sur le confort thermique. Application au climat aride* » 1 Département de Génie civil, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran B.P 1505 El M'Naoeur, Oran Algérie. 2 Laboratoire de thermomécanique, GRESPI/URCA, Faculté des Sciences, B.P 1039, 51687 Reims France.

[97] **M. Bouhicha a, F. Aouissi a, S. Kenai b,** « Performance of composite soil reinforced with barley straw » doi:10.1016/j.cemconcomp.2004.09.013/*Cement & Concrete Composites* 27 (2005) 617–621

[98] **Jean-Claude Morel, Conand Honoré Kouakou,** « Performances mécaniques de l'adobe » 3es échanges transdisciplinaires sur les constructions en terre crue. Table - ronde de Toulouse, Editions de l'Espérou, Montpellier, 2009

[99] **S u'kru' Yetgin \*, O'zlem C, AVDAR, Ahmet C, avdar,** “The effects of the fiber contents on the mechanic properties of the adobes” 0950-0618/\$ - see front matter 2006 Elsevier Ltd. All rights reserved. doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.08.022

[100] **Hanifi Binici a,\*, Orhan Aksoganb, Tahir Shahc,** “Investigation of fibre reinforced mud brick as a building material”, *Construction and Building Materials* 19 (2005) 313–318

[101] **Rogiros Illampas, Ioannis Ioannou †, Dimos C. Charmpis,** « Adobe bricks under compression: Experimental investigation and derivation of stress–strain equation », *Construction and Building Materials* 53 (2014) 83–90

[102] **Fulvio Parisi a,†, Domenico Asprone a, Luigi Fenu b, Andrea Prota a,** « Experimental characterization of Italian composite adobe bricks reinforced with straw fibers », *Composite Structures* 122 (2015) 300–307

[103] **Enrico Quagliarini\*, Stefano Lenci,** « The influence of natural stabilizers and natural fibres on the mechanical properties of ancient Roman adobe bricks », *Journal of Cultural Heritage* 11 (2010) 309–314

[104] **Susana Serrano, Camila Barreneche, Luisa F. Cabeza ,** « Use of by-products as additives in adobe bricks: Mechanical properties characterisation », *Construction and Building Materials* 108 (2016) 105–111

[105] **Grytan Sarkar<sup>1</sup>, Jisu Saha<sup>2</sup>, Md. Rokonuzzaman<sup>3</sup>,** « Development of regression equation for optimizing the material requirements of lime and sand stabilizing adobe based on consistency and linear shrinkage », *Int. Journal of Applied Sciences and Engineering Research*, Vol. 1, Issue 3, 2012

[106] **Gabriela Calatana, Andreea Hegyia\*, Carmen Dicoa, Calin Mirceab,** « Determining the Optimum Addition of Vegetable Materials in Adobe Bricks », *Procedia Technology* 22 (2016) 259 – 265

[107] **IMBGA B kossi, KIENO .P Florent, OUEDRAOGO Emmanuel,** « Thermal and Mechanical Study of the Adobe Stabilized with Straws and /or Cement at different Dosage Rates », *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)* Volume 4, Issue 4 October 2014

[108]. **C.H. Kouakou a,b, J.C. Morel a,**” Strength and elasto-plastic properties of non-industrial building materials manufactured with clay as a natural binder”, *Applied Clay Science* 44 (2009) 27–34

[109] **Quintilio Piattoni, Enrico Quagliarini †, Stefano Lenci,** « Experimental analysis and modelling of the mechanical behaviour of earthen bricks », *Construction and Building Materials* 25 (2011) 2067–2075

[110] **Paula Vega, Andrés Juan †, M. Ignacio Guerra, Julia M<sup>a</sup> Morán, Pedro,** « Mechanical characterisation of traditional adobes from the north of Spain », *Construction and Building Materials* 25 (2011) 3020–3023

[111] **Fayçal El Fgaier, Zoubeir Lafhaj, Emmanuel Antczak, Christophe Chapiseau,**” Dynamic thermal performance of three types of unfired earth bricks », *Applied Thermal Engineering* (2015), <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.applthermaleng.2015.09.009>.

[112] **Pietro Picuno,** « Use of traditional material in farm buildings for a sustainable rural environment », *International Journal of Sustainable Built Environment* (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijse.2016.05.005>

[113] **Lutfullah Turanli, Afsin Saritas,** « Strengthening the structural behaviour of adobe walls through the use of plaster reinforcement mesh », *Construction and Building Materials* 25 (2011) 1747–1752

- [114] **A. Laborel-Préneron, J.E. Aubert ft, C. Magniont, C. Tribout, A. Bertron**, « Plant aggregates and fibers in earth construction materials: A review », *Construction and Building Materials* 111 (2016) 719–734.
- [115] **Hachem CHAIBa. , Abdelouahed Krikera, Abdessalam Mekhermechea**, “Thermal study of earth bricks reinforced by date palm fibers.”, *Energy Procedia* 74 ( 2015 ) 919 – 925
- [116] **Mohammed Ali Bahobail**, « the mud additives and their effect on thermal conductivity of adobe bricks », *Journal of Engineering Sciences, Assiut University*, Vol. 40, No 1, pp.21-34, January 2012
- [117] **Enrico Quagliarini \*, Stefano Lenci**, « L’influence des stabilisateurs normaux et des fibres normales sur les propriétés mécaniques des briques d’adobe romaines antiques »
- [118] Aide et documentation embrochables d’OpenStudio SketchUp de legs L’aide et la documentation sont assorties dans trois catégories.
- [119] **Ben Habib et al**, Analyse bioclimatique de l’habitat traditionnel des régions désertiques nord-sahariennes, Rapport d’étude, Université de La Rochelle et l’institut USTO d’Oran, 1995.
- [120] **Pierre Meukam**, valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l’isolation thermique de bâtiments, mémoire-doctorant, 10 décembre 2004
- [121] **Vincent Sambou**, Transferts thermiques instationnaires : vers une optimisation de parois de bâtiments, mémoire-doctorant, 05 février 2008.
- [122] **D. Medjelakh\* et S. Abdou**, Impact de l’inertie thermique sur le confort hygro-thermique et la consommation énergétique du bâtiment, *Revue des Énergies renouvelables* Vol. 11 N° 3 (2008) 329 – 341.
- [123] **Maatouk Khoukhi1\* and Naïma Fezzioui2** « *Thermal comfort design of traditional houses in hot dry region of Algeria* » *International Journal of Energy and Environmental Engineering* 2012 3:5.
- [124] **Grigoletto SophieA, Lebeau FrédéricB**, « *applications de l’argile crue en construction* » Conférence Internationale Francophone NoMaD 2015Mines Douai.
- [125] **A. Mokhtari<sup>1\*</sup>, K. Brahim<sup>1</sup> et R. Benziada<sup>2</sup>** « *Architecture et confort thermique dans les zones arides Application au cas de la ville de Béchar* » *Revue des Énergies Renouvelables* Vol. 11 N°2 (2008) 307 – 315.
- [126] **A. Kemajou et L. Mba\*** « *Matériaux de construction et confort thermique en zone chaude Application au cas des régions climatiques camerounaises* » *Revue des Énergies Renouvelables* Vol. 14 N°2 (2011) 239 – 248.
- [127] **Bellemare René, Kajl Stanislaw, Roberge Marc-Antoine**, « *MODÉLISATION DE SYSTÈMES CVCA À L’AIDE DU LOGICIEL ENERGYPLUS* ». École de Technologie Supérieure, 1100, rue Notre-Dame Ouest, Montréal H1C 1K3, Canada.
- [128] **Fezzioui Naïma1\*, Draoui Belkacem2, Roulet Claude-Alain3** « *Etude du comportement aérodynamique des maisons à ouverture zénithale* » *1st International Seminar on the Apport of the Simulation in Technological Innovation, Ghardaïa (Algeria), March., 07-08, 2017*
- [129] **N. Fezzioui1, B. Droui1\*, M. Benyamine1 et S. Larbi2**, « *Influence des caractéristiques dynamiques de l’enveloppe d’un bâtiment sur le confort thermique au sud Algérien* » *Revue des Énergies Renouvelables* Vol. 11 N°1 (2008) 25 – 34.
- [130] **H. M’Sellemet Djamel Alkam**, « *Le confort thermique entre perception et évaluation par les techniques d’analyse bioclimatique-Cas des lieux de travail dans les milieux arides à climat chaud et ...* » *Research Gate, Article : January 2009.*
- [131] **Dalal Laaouina1, Brahim Benhamou1\*, Amin Bennouna2.**« *Etude dynamique de l’effet de quelques systèmes passifs sur la charge thermique d’une maison type villa à Marrakech* » *Conference Paper · September 2011, DOI: 10.13140/2.1.4622.4649*
- [132] **A.DJELLOUL\*, B.Draoui\* N.Moumami** « *simulation du comportement énergétique des bâtiments résidentiels au sud algérien* » Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie, 2013.
- Legacy OpenStudio Plug-in.

# Annexes

Tableau. A.1. Analyse granulométrie par sédimentation échantillon.



Mettre un bloc d'adobe dans un gamète rempli d'eau 24h pour l'effondré et gardé la granularité de sol, afin de séparer les éléments fins, l'argile et le sol.



**« LA SEDIMENTOMETRIE »**

la préparation de l'échantillon a l'épreuve de la sédimentation les particules fines de l'échantillon afin de compléter l'analyse granulométrique



En remarque que la couleur de l'argile entre échantillon « B » et « C » elle ne pas de la même couleur



Échantillon « B » couleur rouge brique et échantillon « C » couleur jaune



Après le séchage de l'échantillon dans l'étuve, l'absence de l'eau a engendré des fissures donc l'échantillon est composé principalement de l'argile



La sédimentométrie :

Analyse granulométrie par sédimentation échantillon « A »

**Tableau A. 2. Analyse granulométrie par sédimentation échantillon « A » [l'auteur].**

9h :30 matinée	Temps(minute)	lecture R	temperature C°	correction	lecture correegé R1	Facteur F	diametre	tamiat % D < 80 µ	tamiat % totale
30"	0.5	21	26.5	2.4	23.4	0.01285	0.0625308	93.60%	40.707%
1'	1	17.5	26.5	2.4	19.9	0.01285	0.04675705	79.60%	34.618%
2'	2	15.5	26.5	2.4	17.9	0.01285	0.03404644	71.60%	31.139%
5'	5	14	26.5	2.4	16.4	0.01285	0.02198815	65.60%	28.529%
10	10	13	26.5	2.4	15.4	0.01285	0.01575894	61.60%	26.790%
20	20	12	26.5	2.4	14.4	0.01285	0.01129046	57.60%	25.050%
40	40	11	26.5	2.4	13.4	0.01285	0.00808632	53.60%	23.311%
80	80	10.5	26.5	2.4	12.9	0.01285	0.00575387	51.60%	22.441%
240	240	8	26.5	2.4	10.4	0.01285	0.00342399	41.60%	18.092%
24h	1440	7	26	2.2	9.2	0.0129	0.0014229	36.80%	16.004%

Analyse granulométrie par sédimentation échantillon « B »

**Tableau A. 3. Analyse granulométrie par sédimentation échantillon « B ».[l'auteur].**

10h :40 matinée	Temps(minute)	lecture R	temperature C°	correction	lecture correegé R1	Facteur F	diametre	tamiat % D < 80 µ	tamiat % totale
30"	0.5	16	29	3.25	19.25	0.0123	0.06391267	77.00%	43.782%
1'	1	15	29	3.25	18.25	0.0123	0.04585773	73.00%	41.508%
2'	2	14.5	29	3.25	17.75	0.0123	0.03265876	71.00%	40.371%
5'	5	14	29	3.25	17.25	0.0123	0.02080119	69.00%	39.233%
10	10	13.5	29	3.25	16.75	0.0123	0.01481116	67.00%	38.096%
20	20	13	29	3.25	16.25	0.0123	0.01054505	65.00%	36.959%
40	40	11.5	29	3.25	14.75	0.0123	0.00760713	59.00%	33.547%
80	80	10.5	29	3.25	13.75	0.0123	0.00544891	55.00%	31.273%
240	240	8	29	3.25	11.25	0.0123	0.00324457	45.00%	25.587%
24h	1440	5.5	28	2.85	8.35	0.01245	0.00138653	33.40%	18.991%

Analyse granulométrie par sédimentation échantillon « C »

Tableau A. 4. Analyse granulométrie par sédimentation échantillon « C ».[l'auteur].

9h :30 matinée	Temps(minute)	lecture R	temperature C°	correction	lecture corregeé R1	Facteur F	diametre	tamiset % D < 80 µ	tamiset % totale
30"	0.5	16	28	2.85	18.85	0.01245	0.06507433	75.40%	40.437%
1'	1	14.5	28	2.85	17.35	0.01245	0.04701421	69.40%	37.219%
2'	2	14	28	2.85	16.85	0.01245	0.03347638	67.40%	36.147%
5'	5	13	28	2.85	15.85	0.01245	0.02146316	63.40%	34.001%
10	10	12	28	2.85	14.85	0.01245	0.01537966	59.40%	31.856%
20	20	11	28	2.85	13.85	0.01245	0.01101667	55.40%	29.711%
40	40	10	28	2.85	12.85	0.01245	0.00788882	51.40%	27.566%
80	80	9	28	2.85	11.85	0.01245	0.00564728	47.40%	25.421%
240	240	7	29	3.25	10.25	0.0123	0.0032832	41.00%	21.988%
24h	1440	4.5	28	2.85	7.35	0.01245	0.00140197	29.40%	15.767%

Les limites d'Atterberg pour échantillon « A »

Tableau A. 5. les limites d'Atterberg pour échantillon « A ».[l'auteur]

	Nombre de coups	limite de liquidité				limite de plasticité	
		11	21	23	35	26	14
	Numero de la tare	B2	C1	A2	D2		
pois de sol humide + poids tare	Poids total humide	40	39	38	43	21.5	27
pois de sol sec + poids tare	Poids total sec	36	36.1	35.2	39.9	21	26
pois tare vide	pois de la tare	21	22	20	21	15	15
Poids total humide - Poids total sec	pois d'eau	4	2.9	2.8	3.1	0.5	1
Poids total sec - pois de la tare	pois net sec	15	14.1	15.2	18.9	6	11
pois d'eau / pois net sec	teneur en eau	26.67%	20.57%	18.42%	16.40%	8.33%	9.09%

Limite de liquidité (LL)	18.46%
Limite de plasticité (Lp)	8.71%
IP=LL-LP	9.75%

Les limites d'Atterberg pour échantillon « B »

Tableau A. 6. les limites d'Atterberg pour échantillon « B ».[l'auteur]

	Nombre de coups	limite de liquidité					limite de plasticité	
		15	19	25	34	37	2	26
	Numero de la tare	A2	B2	C2	E2	D2		
pois de sol humide + poids tare	Poids total humide	47.1	43.4	47.2	41.1	47.7	25.5	20.7
pois de sol sec + poids tare	Poids total sec	42.7	39.7	43.1	37.6	43.5	24.1	20
pois tare vide	pois de la tare	20.3	21.1	22.3	18.6	20.9	15	15
Poids total humide - Poids total sec	pois d'eau	4.4	3.7	4.1	3.5	4.2	1.4	0.7
Poids total sec - pois de la tare	pois net sec	22.4	18.6	20.8	19	22.6	9.1	5
pois d'eau / pois net sec	teneur en eau	19.64%	19.89%	19.71%	18.42%	18.58%	15.38%	14.00%

Limite de liquidité (LL)	19,22 %
Limite de plasticité (LP)	14,69 %
IP=LL-LP	4,53 %

✚ Les limites d'Atterberg pour échantillon « C »

Tableau A. 7. les limites d'Atterberg pour échantillon « C ». [l'auteur]

	Nombre de coups	limite de liquidité					limite de plasticité	
		14	19	22	33	37	28	25B
	Numero de la tare	4	25a	25b	40	F2		
poids de sol humide + poids tare	Poids total humide	34	37.1	40.1	39.2	38.4	24.6	25.4
poids de sol sec + poids tare	Poids total sec	30.5	33.2	36.4	35.5	34.4	23.3	23.7
poids tare vide	poids de la tare	13.7	13.6	18.3	14.3	14.3	15.1	13.2
Poids total humide - Poids total sec	poids d'eau	3.5	3.9	3.7	3.7	4	1.3	1.7
Poids total sec - poids de la tare	poids net sec	16.8	19.6	18.1	21.2	20.1	8.2	10.5
poids d'eau / poids net sec	teneur en eau	20.83%	19.90%	20.44%	17.45%	19.90%	15.85%	16.19%

Limite de liquidité (LL)	42,09 %
Limite de plasticité (LP)	33,37 %
IP=LL-LP	8,72 %



**Figure A.1** préparation du mélange



**Figure A.2** préparation du mélange à l'état humide



**Figure A. 3. le malaxage de la paille avec le sol à pieds**





Figure A. 4 stockage et séchage de l'adobe préparé au niveau de laboratoire



Figure A. 5 désignations de chaque adobe par un ticket coloris contient le pourcentage d'argile ajouté à chaque adobe



Figure A. 6 découpage de l'adobe pour donner une dimension déterminer 5x5x5cm



Figure A. 7 préparations des éprouvettes avant l'essai de l'écrasement



**Figure A.8** Il'appareillage utilisé pour mesurer la résistance à la compression



**Figure A.9** les testes d'écrasement