UNIVERSITÉ MOULOUD MAMMERI – TIZI OUZOU
FACULTÉ DU GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
DÉPARTEMENT D'ARCHITECTURE

MÉMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Architecture

Option: Architecture et Développement durable

Présenté par :

AHMED ALI Ep. AIT KADI Salima

Thème: Performances thermiques du matériau terre pour un habitat durable des régions arides et semi-arides : cas de Timimoune

Devant le jury composé de :

Mr AIT TAHAR Kamal	Professeur	UMMTO	Président
Mr. DAHLI Mohamed	Maitre de conférences (A)	UMMTO	Rapporteur
Mr CHENAK Abdelkrim	Chargé de recherche	CDER	Examinateur
Mr BENA Youcef	Chargé de recherche	CNERIB	Invité

Soutenu le : 14/06/2012

Remerciements

Le présent travail est réalisé au département d'architecture, université Mouloud Mammeri, est plus précisément au sein de la Post-Graduation « Architecture et développement Durable », une PG née en 2006 grâce à tout l'effectif qui la compose, je tiens sincèrement à les remercier tous, pour tous les efforts accomplis en première année théorique et les encouragements que j'ai reçu de leur part.

Je tiens surtout à remercie mon directeur de mémoire, Dahli Mohamed, Maitre de conférences à l'UMMTO, Directeur de notre post-graduation, pour sa disponibilité et ses idées innovantes.

Je remercie Mr Ait Tahar Kamal d'avoir accepté la présidence du jury de soutenance, mes remerciements également sont adressés à celui qui a accepté d'examiner mon travail de recherche, Mr Chenak Abdelkrim, chargé de recherche au centre de développement des énergies renouvelables d'Alger.

Je tiens également à remercier la Direction du CNERIB, d'avoir accepté de nous ouvrir les portes de leur laboratoire où toute la partie expérimentale a été effectuée.

Enfin, merci aux membres de ma famille pour leur confiance, et leur soutien total, spécialement à mon mari qui n'a cessé de m'encourager pour la rédaction de ce mémoire et qui a toujours respecté mes choix.

RÉSUMÉ

Les nouveaux modèles architecturaux produits durant ces dernières décennies en Algérie, qu'on appelle « constructions moderne » sont négligeant des aspects climatiques, gros consommateurs d'énergie et très souvent inadaptées aux exigences des occupants, en termes de confort. Pour palier à ce problème d'inconfort, on a souvent recours à des dépenses supplémentaires de chauffage et de climatisation.

La région du Sud-ouest Algérien, région semi-aride, est une fraction du territoire composé de quatre sous ensembles à savoir, les monts des Ksour, la Saoura, le Gourara et le Touat. Epaisseur historique, continuité géographique, singularité des paysages, originalité architecturale et urbanistique, homogénéité culturelle et grande richesse patrimoniale sont autant de traits communs à ces contrées. Le secteur du bâtiment en général et plus précisément l'architecture en terre peut devenir la force motrice dans le développement de ces régions, pauvres en emploi et riches en exode.

Le nouvel intérêt pour cette architecture en terre crue a permis de redécouvrir une gamme de techniques bien plus raffinées et diversifiées que la rusticité du matériau ne l'aurait laissé supposer. Les connaissances et le savoir-faire des populations de ces régions constituent une ressource précieuse dans la gestion des environnements difficiles par contraste avec les technologies introduites dont beaucoup ont échoué sur le plan confort (thermique ou physiologique), stabilité et surtout durabilité.

Toutes ces préoccupations additionnés à une architecture durable et écologique nous pousse à passer d'une production quantitative pure et simple à une préoccupation qualitative annonciatrice des mesures visant à purger le parc bâti de l'habitat insalubre et des matériaux à risque, tandis que s'éveille une curiosité pour les matériaux traditionnels qui ont fait leurs preuves en matière de respect environnemental et de confort de toute nature.

Mots clés : Terre crue, confort, région semi-aride, bâtiment, architecture durable, écologique, aspect climatique, chauffage, climatisation, énergie

Abstract

The new architectural models produced during last decades in Algeria, called "modern constructions" are neglecting climate aspects, consuming large quantity of energy and very often unsuitable for the occupants' requirements, in terms of comfort. To overcome this problem of discomfort, we have often recourse to additional costs of heating and air conditioning.

The Southwest Algerian region, semi-arid region, is a fraction of a territory consisting of four subgroups which are the mountains of the Ksour, the Saoura, the Gourara and the Touat. Historic thickness, geographic continuity, singularity of landscapes, urban and architectural originality, cultural homogeneity and rich heritage are common to these regions. The sector of the building in General and more specifically the earthen architecture can become the driving force in the development of these regions which suffer from unemployment and rural depopulation

The new interest for this pure earthen architecture allowed rediscovering a range of more sophisticated and diversified techniques that the rustic character of the material would have let it suppose. The knowledge and expertise of the local populations constitute a precious resource in the management of difficult environments in contrast with introduced technologies among which many failed on the plan of comfort (thermal or physiological), stability and mainly durability.

All these concerns added to a durable and ecological architecture urges us to move from a pure quantitative production to a qualitative concern presaging measures to clean out the unhealthy building stock and risky materials, whereas our curiosity for the traditional materials which showed the ability in environmental respect and comfort of any kind, is woke up.

Keywords: raw earth, comfort, semi-arid region, building, durable architecture, ecological, climate aspect, heating, air conditioning, energy

الملخص

إن النماذج العمرانية الجديدة المنتهجة خلال العقود الماضية في الجزائر المدعوّة "بالمباني الحديثة " لا تستوفي للظروف المناخية. فهي شرهة في استهلاك الطاقة، و غالبا ما لا تلبي مطالب المقيمين فيها من حيث الراحة. و لمواجهة هذا المشكل، يلجأ المقيمون في غالب الأحيان إلى دفع مصاريف إضافية في التدفئة و التبريد .

إن منطقة جنوب غرب الجزائر هي منطقة شبه قاحلة من التراب الوطني، و المتكونة من أربع مجموعات فرعية: جبال القصور، الساورة، القورارة و التوات. إن البعد التاريخي، الاستمرارية الجغرافية، الفرادة في المناظر الطبيعية،الأصالة الهندسية و المعمارية، الانسجام الثقافي وثراء التراث هي سمات مشتركة لهذه المنطقة. يمكن لقطاع البناء و التشييد بشكل عام و العمارة الطينية بشكل خاص أن يصبح القوّة الدّافعة في تنمية هذه المناطق التي تعاني من الفقر و كثرة النزوح فيها.

إن الاهتمام الجديد لبناء العمارة الطينية الخامة أمكن من اكتشاف مجموعة من التقنيات أكثر تنوعا و تطورا مما تفترضه بساطة المادة. إن معارف ومهارة سكان المنطقة تكوّنان مصدرا قيّما في تسيير البيئات الصعبة بتباين مع التقنيات التي ادْخلت و التي فشل العديد منها من حيث توفير الراحة (من الجانب الحراري و الفسيولوجي) و الاستقرار و خاصة الاستدامة.

كل هذه الانشغالات إضافة إلى العمران المستدام و البيئي تدفع بنا للانتقال من انتاج كمي محض إلى الاهتمام بالنوعية التي تبشر بإجراء ات ترمي إلى تطهير الحظيرة السكنية من السكن الغير اللائق و المواد الخطيرة في حيث يزداد الفضول للمواد التقليدية التي أثبتت احترامها للبيئة وتوفيرها لكل أنواع الراحة.

الكلمات الرئيسية: الطين الخام، منطقة شبه قاحلة، عمارة، هندسة معمارية مستدامة و بيئية، الناحية المناخية، التدفئة، التبريد، الطاقة.

SOMMAIRE

Remerciements……...i

Sommaire……..ii

Résumé……...…...vii

Abstract……..viii

الملخص ix

CHAPITRE INTRODUCTIF 1

Introduction 2

Problématique..... 3

Hypothèses 4

Objectifs de la recherche 4

Méthodologie de recherche 4

Structure du mémoire 5

PREMIER CHAPITRE..... 7

Introduction..... 8

I. L'architecture en terre..... 8

I.1 Historique et processus d'évolution de l'architecture en terre..... 8

I.2 Situation de l'architecture en terre a travers le monde..... 13

I.2.1 Codes, normes, directives et orientations..... 13

I.2.2 L'architecture en terre en Algérie 15

I.2.3 Actualité de l'architecture de terre en Algérie 15

I.3 Les procédés constructifs 16

I.3.1 La terre creusée 17

I.3.2 La terre couvrante 17

I.3.3 La terre remplissante..... 17

I.3.4 La terre découpée..... 18

I.3.5 La terre comprimée 18

I.3.6 La terre façonnée..... 19

I.3.7 La terre empilée 19

I.3.8 La terre moulée 19

I.3.9 La terre extrudée 20

I.3.10 La terre coulée 20
I.3.11 La terre paille 20
I.3.12 La terre garnissage 20
I.4 Les formes architecturales 21
I.4.1 Les ressources du plan 21
I.4.2 Le système constructif 22
I.4.3 Les ouvertures 23
I.4.4 Les modules de base 23
I.5 Les avantages et inconvénients de l'architecture en terre 24
I.5.1 Les avantages du matériau terre 25
I.5.2 Les inconvénients du matériau terre 26
I.5.3 Quelques pathologies des constructions en terre 27
I.5.3.1 Les principales causes de désordre 27
I.5.3.2 Les pathologies humides 28
I.5.3.3 Les pathologies structurelles 29
I.5.4 Les principes de bonne conception d'une architecture de terre 30
I.5.4.1 Protection des terrasses et toiture 30
I.5.4.2 Protection des parois 30
I.5.4.3 Protection des ouvertures 30
I.5.4.4 Protection de la base du bâtiment 30
CONCLUSION 31
DEUXIEME CHAPITRE 32
Introduction 33
II. L'architecture et le confort thermique 34
II.1 Relation : Architecture-Climat 34
II.2 Le confort thermique et l'analyse bioclimatique 35
II.2.1 Le confort thermique 35
II.2.1.1 Les outils d'évaluation du confort thermique 35
II.3 Les facteurs influant le confort thermique 38
II.3.1 La démarche bioclimatique 38

II.3.1.1 Principes de bases de l'architecture bioclimatique 39
II.3.1.2 Les systèmes bioclimatiques 40
II.3.1.3 La conception bioclimatique 41
- L'implantation 41
- L'orientation 42
- La forme 43
- Organisation générale de la maison 43
- Le choix des couleurs 44

II.3.2 L'isolation thermique 46
II.3.2.1 Caractéristiques des matériaux d'isolation thermique 46
II.3.2.2 Les matériaux isolants 47
II.3.3 L'inertie thermique 48
II.3.3.1 Exemples d'application de l'inertie thermique dans la construction 50
TROISIEME CHAPITRE 54
Introduction 55
III. Le contexte 55
III.1 Situation historique et géographique 55
III.1.1 Les caractéristiques physiques et sociales de la région 55
III.1.1.1 Le contexte physique 55
III.1.1.2 La société ksourienne 57
III.1.2 L'habitat ksourien 58
III.1.2.1 Les ksour, architecture et typologies 58
III.1.2.2 Typologie : J. Bisson 1957, géographe 59
III.2 L'habitation ksourienne et son processus typologique 63
III.2.1 L'habitation à organisation centrale (à Rahba) 63
III.2.2 L'habitation à organisation linéaire (à Sabat) 65
III.2.3 L'habitation a organisation centrale et linéaire (Sabat et Rahba) 66
III.2.3.1 L'entité entrée 66
III.2.3.2 L'entité centre 67
III.3 Les éléments et étapes de la construction d'une maison ksourienne 68

III.3.1 Les techniques de construction en terre crue dans la région 68
III.3.2 La préparation du Thob 69
III.3.3 Les murs 71
III.3.4 Les soubassements 72
III.3.5 Les piliers 72
III.3.6 Les linteaux 72
III.3.7 Les Fondations 72
III.3.8 Les planchers 72
III.3.9 Les escaliers 73
III.3.10 Traitement de surfaces 73
III.3.11 Les ouvertures et les décorations 74
III.4 Pathologies et désordres des constructions Ksouriennes 75
III.4.1 Pathologies humides 75
III.4.2 Pathologies structurelles 75
QUATRIEME CHAPITRE 79
Introduction 80
III.1 Les grandeurs thermo-physiques 81
III.1.1 La conductivité thermique 81
III.1.2 Diffusivité thermique 81
III.1.3 La chaleur spécifique 82
III.1.4 L'effusivité thermique 82
III.1.5 L'inertie thermique des matériaux 83
III.1.6 La capacité thermique 83
III.2 Les principales méthodes de mesure des propriétés thermo-physiques 84
III.2.1 Les méthodes en régime permanent 84
III.2.1.1 Méthode de la plaque chaude gardée 84
III.2.1.2 Méthode des boîtes 85
III.2.2 Les méthodes en régime transitoire 86
III.2.2.1 Méthode de la plaque chaude avec excitation sinusoïdale 86
III.2.2.2 Mesure de la conductivité thermique par la méthode du fil chaud 87
III.2.2.3 Mesure de l'effusivité thermique par la méthode du plan chaud 88

III.2.2.4 Méthode de mesure de la chaleur spécifique 88
Conclusion 89
III.3 Caractérisation thermo-physique 90
III.3.1 Fabrication des éprouvettes 90
III.3.1.1 Le choix du stabilisant 90
III.3.1.2 Quantité de stabilisant 90
III.3.1.3 Dispositif expérimental de fabrication 90
III.3.1.4 Préparation des mélange à compacter 90
III.3.2 Mesure de la conductivité thermique et de la chaleur spécifique 91
III.3.2.1 Description du dispositif de mesure 91
III.3.2.2 Résultat de mesure des conductivités thermiques 92
III.3.2.3 Résultat de la mesure de la chaleur spécifique 92
III.3.2.4 Interprétation des résultats 93
III.4 Essai d'un projet durable en brique de terre crue 94
III.4.1 Les pratiques de l'architecture bioclimatique 94
III.4.1.1 Les protections contre le rayonnement solaire 94
III.4.1.2 La ventilation naturelle 95
III.4.1.3 La compacité du volume 96
III.4.2 Du point de vue constructif et architectural 96
III.4.3 Les plans d'architecture 98
III.4.3.1 Division de l'habitation en deux parties : Partie « invités » et Partie « Famille » 98
III.4.3.2 Autonomie et spécialisation des espaces 98
III.4.3.3 Le « dedans » et le « dehors » 98
III.4.3.4 La tendance aux grands espaces 99
III.4.4 Le projet 99
Conclusion 102
CONCLUSION GENERALE 104
Références 106

CHAPITRE INTRODUCTIF

Introduction

A l'heure où l'on se rend compte des limites de notre planète, qu'elle est quantifiée, qualifiée, estimée, mesurée, analysée, « rééquilibrée », il se produit une prise de conscience de l'importance de ne pas porter gravement atteinte à notre environnement. On doit répondre à cette exigence et chercher des solutions alternatives, afin de limiter l'impact des différents secteurs, entre autre le bâtiment, sur la qualité environnementale.

Notre volonté de concevoir une architecture qui s'ajuste aux modes de vie ne doit pas faire du secteur du bâtiment un consommateur irraisonné de ressources naturelles. Il est aujourd'hui, à la fois, gros consommateur de ressources naturelles et d'énergie et une source importante de rejets de déchets majoritairement non recyclables. A la quantité vient s'ajouter la diversité des matières premières et des procédés hasardeux utilisés par l'industrie du bâtiment pour fabriquer nos matériaux de construction.

La transformation de la matière première en matériaux de construction est souvent source de pollution, consommatrice d'énergie et ses effets sur l'environnement sont souvent irréversibles. Le secteur du bâtiment est aujourd'hui confronté à un enjeu de taille pour atteindre une réelle pratique de développement durable : il va falloir qu'il compte sur la nature plutôt que de la bannir afin de devenir un véritable écosystème.

Devant l'émergence de ces problèmes, on s'intéresse aux modèles nouveaux plus adaptés à leur contexte environnant, en valorisant les gisements naturels locaux, l'énergie et les matériaux entre autres. Bien que ces objectifs soient plutôt globaux, nous devons trouver des solutions locales spécifiques à chaque territoire présentant des opportunités qu'il faut savoir reconnaître, valoriser et exploiter. La région d'Adrar n'est pas en reste, son originalité architecturale réside dans le matériau utilisé, la terre crue via la technique du « tob », qui non seulement répond aux exigences du développement durable mais aussi nous permet de sauvegarder un savoir-faire local en perdition. Il est souvent intéressant d'utiliser de la matière plutôt que des matériaux, car elle subit moins de transformations, mais nécessite un savoir-faire particulier.

Dans la présente recherche notre préoccupation sera de montrer les avantages que peut avoir une architecture bioclimatique alliée aux performances thermiques des briques de terre crue pour arriver a un habitat durable qui réponde aux exigences du confort thermique. Et pour ce faire nous allons analyser les performances thermiques du matériau terre en climat arides et semi-aride, nous nous sommes intéressés à la technique du « tob » spécifique à la région du Twat-Gourara mais aussi et surtout à la technique du B.T.C, parce que ses

avantages sont nombreux : disponibilité du matériau terre, bonne inertie thermique, technique de fabrication très simple, utilisation d'une énergie gratuite...

Le choix du site d'intervention, à savoir Timimoune, est motivé par la présence d'une architecture en terre crue assez riche, mais dans un état de dégradation très avancé, également à des conditions climatiques extrêmes, torrides en été et froides durant les nuits d'hiver. Les performances thermiques du matériau terre crue et la conception architecturale, soucieuse des contraintes climatiques, restent des solutions à la contrainte du confort thermique.

Problématique

L'industrialisation massive choisie par l'Algérie au lendemain de l'indépendance, ainsi que l'augmentation rapide de sa population urbaine voir figure 1, avaient des répercutions négatives sur la qualité de l'habitat.

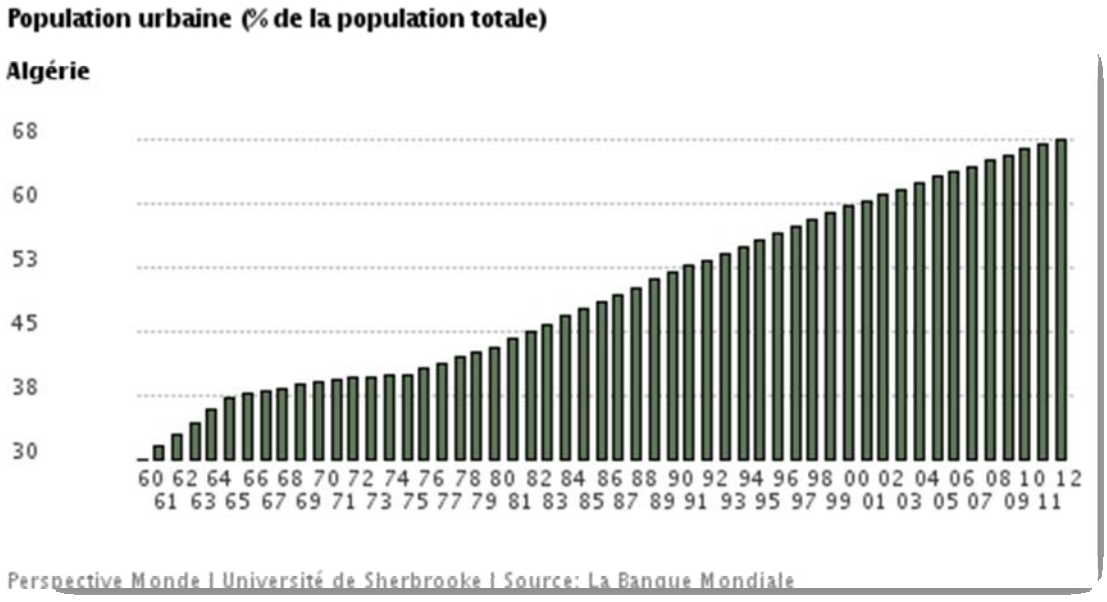


Figure 1: Population urbaine en Algérie (source : revue en ligne perspective monde, Université de

En effet, devant ce besoin urgent en logements sociaux, l'état a eu recours à l'importation de modèles étrangers dits bon - marchés, qui se sont généralisés sur tout le territoire algérien, en l'espace de trois décennies. Inappropriées au contexte culturel, social et climatique du pays, ces expériences ont été des échecs

Devant l'influence de nouvelles techniques constructives et de nouveaux matériaux et éléments de construction, comme l'acier, les bétons, les éléments de parpaing et de briques en terre cuite pour ne citer que cela, nous assistons à un délaissement des techniques anciennes, du savoir-faire local et des matériaux locaux souvent respectueux de l'environnement. A tous

ces phénomènes s'ajoute le recours à des modèles architecturaux souvent étrangers à la région et donc complètement inadaptés au contexte climatique, culturel, et social. L'absence de toutes ces considérations se traduit par des logements qui subissent des transformations avant même qu'ils ne soient habités. Celles ci touchent aussi bien la réorganisation des espaces intérieurs que le rajout d'équipements ou d'élément architecturaux de protection des nuisances extérieures (chaleur, bruit, etc.).

Ces résultats décevants conjugués à la crise économique que traverse le pays ont entraîné une prise de conscience générale qui oriente actuellement le gouvernement vers la recherche de solutions plus appropriées, on s'intéresse à rechercher des modèles qui valorisent le patrimoine local : l'architecture en terre entre autres. On a pris conscience qu'il était possible d'assurer un bon niveau de confort tout en sauvegardant la richesse architecturale qui fait la singularité de l'architecture en terre en générale et celle de Timimoun en particulier. Et cela par l'utilisation de matériaux locaux connus par leurs performances thermiques et hygrométrique (adsorption et désorption de la vapeur d'eau contenue dans l'ambiance et régulateur thermique) qui permettent de réguler les conditions d'ambiances intérieures (température et degré d'humidité), et assurer ainsi le confort des occupants.

Hypothèses

Pour répondre à la problématique posée, nous avons construit les hypothèses suivantes :

- La réinterprétation des principes bioclimatiques alliés à une architecture en terre qui s'intègre à son environnement peut participer fortement à l'amélioration des performances thermique de l'habitat et par conséquent au confort des habitants ;
- Les performances thermiques du matériau terre justifient pleinement l'emploi de ce matériau pour assurer le confort thermique des occupants.

Objectifs de la recherche

Les objectifs de notre recherche sont comme suit :

- L'objectif principal de notre recherche est de projeter un habitat durable par une prise en charge de la conception architecturale bioclimatique, de la valorisation des performances thermique de la terre crue et des potentialités d'un savoir-faire local riche en enseignements. A travers cet habitat durable le confort thermique des habitants sera une évidence.

Méthodologie de recherche

Afin de réaliser notre objectif plusieurs phases sont nécessaires à savoir :

1.1. La recherche bibliographique et l'analyse des données

- Les références thématiques ainsi que des études spécifiques et 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 métrique et d'architecture des espaces habités sont des instruments indispensables pour connaître l'habitat traditionnel ksourien, son origine, son évolution et ses transformation ;
- Les documents graphiques afin de faire une lecture des ksour et leurs évolutions ;
- Les relevés des détails techniques concernant le matériau, sa mise en œuvre et les type de dégradations se révèlent être des instruments indispensable pour définir les qualités et les insuffisances du matériau et de sa mise en œuvre ;
- Le relevé des détails architectonique 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-physique du matériau terre et d'apporter des solutions architecturale en vu d'u habitat durable, tout en sauvegardant le cachet typique de l'architecture Ksourienne.

Structure du mémoire

Le mémoire est organisé en quatre chapitres :

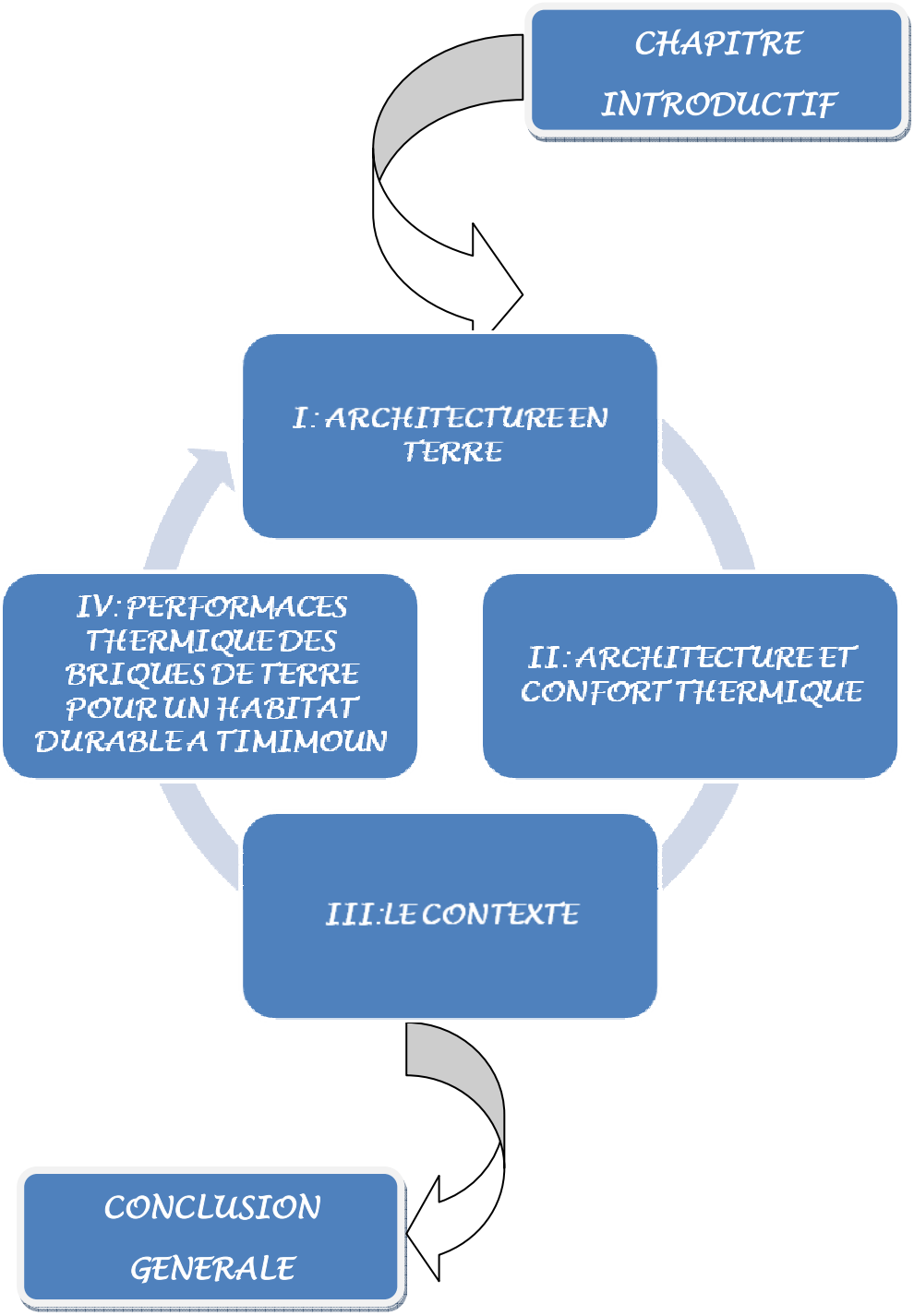
Le premier chapitre présente un état de l'art sur l'architecture de terre, il traite des procédés techniques de production de la construction en terre et des expériences menées à travers le monde pour sa revalorisation, il évalue la situation de l'architecture en terre en Algérie et dans le monde sur le plan réglementaire et de la formation dans le secteur du bâtiment.

Le deuxième chapitre concerne le confort thermique qui est assuré par une conception architecturale bioclimatique de départ et les performances thermiques des matériaux.

Le troisième chapitre est consacré à un état des lieux du contexte de la région de Timimoun, ses ksour et l'habitat ksourien en général.

Le quatrième chapitre présente la composition de la brique de terre et précise les différentes méthodes de calcul des performances thermo-physiques ainsi que les résultats obtenus au laboratoire. Pour enfin conclure sur un essai de proposition d'habitation durable qui s'adapte

au contexte ksourien et précise les différentes repenses apportées aux problèmes de confort thermique.



PREMIER CHAPITRE

L'ARCHITECTURE EN TERRE

Introduction

Les constructions en terre recèle de nombreuses caractéristiques, grâce aux qualités du matériau terre, elles sont en effet, résistantes au feu et régulatrice de la température et du degré d'humidité des espaces intérieur en comparaison aux constructions moderne en béton armé. Rien n'empêche, de grave pathologies peuvent surgir menaçant à terme l'effondrement de ces édifices si bien sure les règles essentiels de l'art de bâtir en terre crue sont négligées.

Ce chapitre montre que l'aspect technique de l'architecture en terre est relativement connu par les scientifiques, il présente la situation de l'architecture en terre dans le monde et fait la lumière sur la réglementation en vigueur de cette architecture.

Sont également traité les procédés constructifs témoignant de la richesse de cette architecture en offrant des variétés de formes adaptable à tous types de plans, traditionnels ou modernes.

Ne sont pas également oubliées les pathologies ayant trait a cette architecture nécessaires pour l'établissement d'un diagnostique d'une éventuelle opération de réhabilitation.

L'architecture en terre

I.1 Historique et processus d'évolution de l'architecture en terre

Qu'est ce que la terre ?

Elle représente la couche superficielle, meuble, de la croûte terrestre résultant de la transformation de la roche mère, enrichie par des apports organiques.

L'altération de la roche mère peut être d'ordre mécanique et/ou chimique sous l'action des phénomènes climatiques et organismes vivants[1].

La terre est composée de matériaux de granulométrie différente en proportion plus ou moins variable :

- Les argiles: Particules inférieures à 2 micromètre } Servent de liant entre les éléments plus
- Les limons: Particules comprises entre 2 et 50 mm ;
- Les sables: Particules comprises entre 0,5 et 2 mm ;
- Les graviers : Particules comprises entre 2 et 10mm. } Stables en présence de l'eau – Squelette du sol

[1] C. Delbecque, Approche contemporaine de la construction en terre, « Histoire de la construction en terre » 21 octobre 2011.

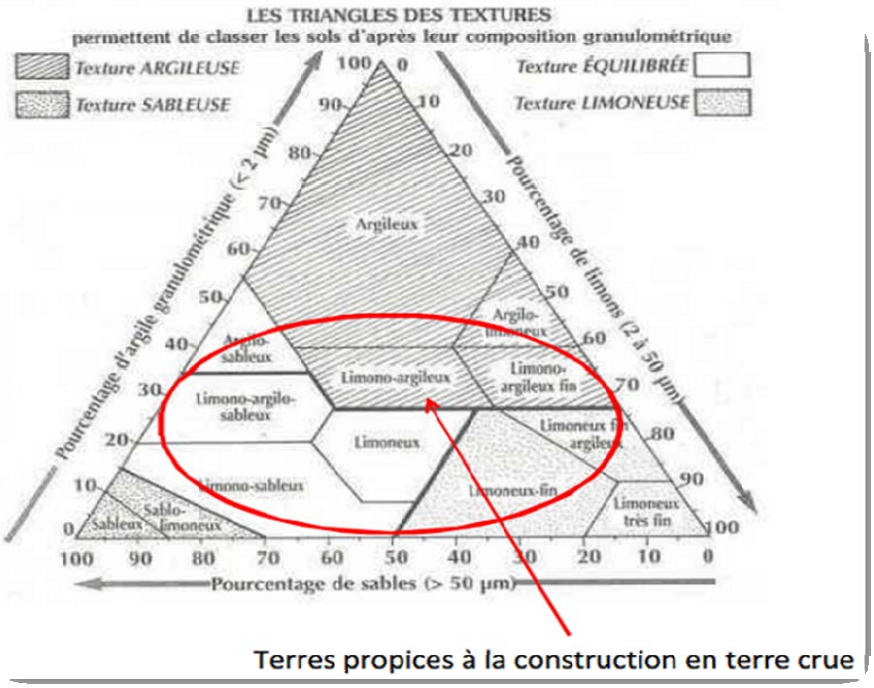


Figure I.1: Classement des sols d'après leur composition granulométrique,
(Source : C. Delbecque)

L'histoire de la construction en terre est mal connue, l'intérêt pour ce matériau jugé antique et médiocre était éclipsé par celui accordé à la pierre ou au bois matériaux dit plus noble.

Pourtant des trouvailles archéologiques témoignent de l'importance du matériau terre dans l'histoire, presque toutes les civilisations l'avaient adoptée à un moment ou un autre : (la terre fut associée aux époques décisives de la révolution urbaine et servait la quotidienneté autant que le prestige des plus glorieuse civilisations de l'antiquité)[2]. Des âges les plus lointains à nos jours, elle s'affiche comme étant le matériau privilégié de l'homme bâtisseur, et le temps passant n'a pas pus effacé les preuves accumulées de cet usage de la terre.

Quelques repères chronologiques de la construction en terre

- **11000 ans :** premières traces de la construction en terre en Amérique du sud ;
- **10000 ans :** en Syrie construction en terre par empilement de pains de terre façonnés à la main ;
- **8500 ans :** apparition de la brique de terre en Turquie ;
- **8000 ans :** apparition de l'utilisation de la terre dans l'habitat en Europe occidentale (recouvrement de clayonnage) ;

[2] CRATerre, Traité de construction en terre, Ed. PARENTHESES, 1995, P. 16-17.

- **5000 ans :** apparition des premières villes d'architecture de terre crue en Mésopotamie.

Ses premières cités découvertes dans l'ancienne Mésopotamie date d'avant même l'invention de l'écriture. La terre crue étant matériau qui se dégrade plus rapidement que la pierre on à moins de vestiges aussi marquants que les pyramides d'Egypte, ils existent pourtant, mais sont moins connus : (Tchoga Zambil en Iran, Mari en Syrie, Shibam au Yémen).

Figure I.2: Tchoga zambil en Iran, (source : Encyclopédie interactive wikipédia).

Figure I.3: Mari en Syrie, (source : Encyclopédie interactive wikipédia).

Figure I.4: Shibam au Yémen, (source : Encyclopédie interactive wikipédia).

Dans les vallées fertiles de la Mésopotamie, de l'Egypte, de l'Inde et de la chine, les terres alluviales et la paille des céréales ont permis la mise au point de technologies multiformes et leur diffusion a partir de ces principaux foyers de civilisation pour ensuite se généralisé au grés des migration et des conquêtes[3].

Dans le continent africain une très grande partie du parc immobilier des zones rurales et même urbaine est en terre utilisé sous une diversité linguistique qui exprime aussi une

[3] Bruno Pignal, Terre crue : Techniques de construction et de restauration, Ed. EYROLLES, 2005, P. 9.

diversité des techniques de construction ainsi qu'une connaissance très affiné des possibilités qu'offre la terre[4].

Les premières utilisations de la terre crue en Afrique remontent à 8000 ans, (des cabanes de bois enduites de terre). Les civilisations antiques maitrisaient l'utilisation de ce matériau on peut citer par exemple la pyramide de Saqqarah, par la suite, son utilisation s'étend sur tout le continent, produisant une diversité et une richesse architecturale exceptionnelles. (L'exemple des mosquées maliennes de Tombouctou XIII^{e} siècle, et de Djenné, le tombeau des Askia de l'empire Songhaï du XIV au XVI^{e} siècle ainsi que les palais d'Abomey au Benin XVII^{e} siècle).

Figure I.5: La grande mosquée de Djenné, (Source : C. Delbecque).

C'est le plus grand édifice au Monde construit en adobes et recouvertes d'un enduit. Le bâtiment mesure 75m x 75m et 20m de haut. Les murs font de 40 à 60cm d'épaisseur. Des branches de palmiers ont été incluses dans la maçonnerie pour réduire les risques de fissures sur pareil édifice et servent d'échafaudage pour les opérations d'entretien.

D'après les statistiques de l'UNHCR (United Nation High Commission for Refugees). Près de 30% de la population mondiale habites 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 sont bâties en Adobe ou en pisé, à Kigali, 38% des logements sont en terre et le

[4] CRATerre, Traité de construction en terre, édition PARENTHESES, 1995, P. 16-17.

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[5], c'est dire la longévité qu'offre ce matériau de construction.

Le matériau terre a été extrêmement employé jusqu'au lendemain de la seconde guerre mondiale, le caractère d'urgence des reconstructions qui ont suivi les deux guerres s'adaptait mal a l'aspect saisonnier et a la lenteur de sa construction, la désertification des compagnes, la généralisation du travail salarié et l'abandon en milieu rural des systèmes d'entraide familiale ont ensuite participé à la disparition de cette architecture.

Au même moment le recourt systématique a la production industrielle induit une mutation des pratiques et des techniques, des matériaux performants et attractifs sont proposés à des prix très concurrentiels. La standardisation des mises en œuvre et le fait que ce matériau soit associé a un contexte de pauvreté (a fuir et a oublié) contribue à déconsidérer les savoir-faire anciens qui tombe rapidement dans l'oubli.

Les crises énergétiques qui ont suivi les trente glorieuses ont fait resurgir l'intérêt porté au matériau terre, ainsi que pour ses qualités thermiques et sa bonne compatibilité avec l'environnement.

Les problématiques contemporaines font que l'on soit dans un contexte ou la valorisation du patrimoine rural construit en terre s'inscrit dans une dynamique prometteuse[6]. Parallèlement à un ralentissement de la croissance démographique, on assiste à une critique de la production industrielle ainsi qu'a un marché de la construction qui s'oriente vers la réhabilitation de l'existant alors qu'autrefois il était axé sur la construction neuve. Cela fait que l'on est passé d'une production quantitative pure et simple à une préoccupation qualitative visant à purger le parc bâti de l'habitat insalubre.

En Algérie après l'indépendance et face à la situation du logement qui a pris une proportion préoccupante et qui a provoqué une dégradation menaçante du cadre de vie de la population, plusieurs plans de développement du secteur ont été lancés. Cependant leur politique a accordé peu d'intérêt au développement de constructions spécifiques et caractéristiques des différentes localités du pays, et toutes les opérations lancées jusqu'à présent se sont apparentées aux produits de la modernité et l'usage de matériaux importés et donc coûteux.

[5] C. Delbecque, Approche contemporaine de la construction en terre, Histoire de la construction en terre 21 octobre 2011.

[6] Bruno Pignal, Terre crue : Techniques de construction et de restauration, Ed. EYROLLES, 2005, P. 10.

Plusieurs ville n'ont malheureusement pas été épargnées de tous ces plans d'actions 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 vue imposées une architecture étrangère.[7]

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 recèle ces villes, puisque plusieurs constructions en terre ont été démolies pour être remplacées par des bâtiments dits ''modernes''.

I.2 Situation de l'architecture en terre a travers le monde

Ce paragraphe traite de la situation institutionnelle de l'architecture de terre, il s'agit notamment des indicateurs de sa situation, la règlementation et la formation. A travers le monde, nous allons voir les pays qui possède des réglementations spécifiques et offrent des formations sur l'architecture de terre.

I.2.1 Codes, normes, directives et orientations

Actuellement, les seuls codes complets qui traitent spécifiquement de la construction en bloc de terre comprimée (BTC) se trouvent en Allemagne et en nouvelle Zélande[8]. D'autres pays possèdent des codes qui sont, selon le CRATerre[9], aujourd'hui, largement dépassés comme c'est le cas en Afrique du sud ou en Australie. La Nouvelle Zélande a publié son code pour les bâtiments en terre crue en 1998. Ce code spécifique est annexé aux réglementations

[7] Saliha Benmessaoud, 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

[8] Site web http://www.terra-ram.com/.

[9] Noureddine Kebaili, l'architecture de terre contemporaine en Algérie ; évaluation post-occupation d'habitations rurales dans la région centre des hauts plateaux ; mémoire de magistère 2006.

en vigueur dans le secteur du bâtiment. Il comporte entre autres les critères de performances des bâtiments en terre pour ce qui est de la résistance aux tremblements de terre.

D'autres pays ont développé des recommandations ou des prescriptions, tel que le Maroc et la côte d'ivoire qui sont continuellement mis à jour. Le Pérou a intégré des normes parasismiques pour les bâtiments en terre dans le règlement national de la construction et l'Inde a publier en (1994) des directives pour l'amélioration de la résistance au tremblements de terre des bâtiments en maçonnerie non renforcée dont la terre crue[10].

Aux Etats-Unis la construction en adobe est intégrée aux codes nationaux de construction[11]. Le « National bureau of Standards » a publié plusieurs documents durant les années 1940. Pendant les années 1970 le « Uniform Building Code (UBC) » était publié au niveau national. Il a subi des modifications pour être adopté dans les différents états, ses règles concernent les briques de terre « adobe » fait à la main. Actuellement, aux USA, il n'y a pas de code spécifique pour le BTC et les projets réalisés appliquent l'UBC conçu à l'origine pour l'adobe[12].

En France trois anciens textes officiels se rapportent à la construction en terre *"Reef DTC 2001 béton de terre et béton de terre stabilisée, 1945", "Reef DTC 2101construire en béton de terre, 1945"* et *"Reef DTC 2102 béton de terre stabilisée aux liants hydraulique, 1945"*[13]. En 1982, à l'occasion du projet du « Domaine de la terre de la ville nouvelle de l'isle d'Abeau » en France, un cahier de charges a été élaboré. Il constituait une référence pour les différents intervenants[14]. Le centre du CRATerre à Grenoble développe un code du BTC pour le gouvernement Français, il est élaboré sur la base d'une concentration entre 22 pays où il sera appliqué[15].

Sur le plan international, des codes de bon emploi ont été élaborés par l'ONU entre 1958 et 1964 concernant la construction en béton de terre stabilisée. En 1973 le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD) a établi un texte normatif à l'occasion du projet « Cissin » à Ouagadougou Burkina Faso[16]. La Réunion International des Laboratoires

[10] Ibid.

[11] Ibid.

[12] Ces règles sont disponibles sur les sites internet :

http://www.earthbuilding.com/nm-adobe-code.html. Pour le Nouveau Mexique.

http://www.earthbuilding.com/san-diego-adobe-code. Pour la Californie.

[13] H. Houben et H. Guillaut, traité de construction en terre, Ed. Parenthèse, Marseille, 2006. V6, P.158.

[14] Ibid.

[15] Courier adressé aux chercheurs de CRATerre.

[16] H. Houben et H. Guillaut, traité de construction en terre, Ed. Parenthèse, Marseille, 1989. V1, P. 159.

d'Essais et de recherche sur les Matériaux et les constructions (RILEM) et le Conseil International du Bâtiment pour la Recherche l'Etude et la documentation (CIB) possèdent depuis 1987 un comité technique sur la construction en terre qui élabore des recommandations et spécifications qui peuvent être adoptées comme normes[17].

Beaucoup de pays dans le monde ont déjà légitimé la pratique de la construction en terre sur leurs territoires ce qui procure plus de garanties aux opérateurs et aux utilisateurs à la fois. Cela implique la reprise d'intérêt de cette architecture. Les actions des organismes internationaux encouragent les pays à se lancer dans les voies de la revalorisation de l'architecture de terre.

I.2.2 L'architecture en terre en Algérie

Au moment où l'architecture de terre reprend de l'intérêt dans le monde, la situation en Algérie semble au point mort. En effet, notre pays a manifesté très tôt son intérêt pour la revalorisation de l'architecture de terre mais l'échec des premières opérations qui n'ont pas réussi à surmonter l'obstacle psychologique a limité ou même réduit à néant leurs effets. Dans ce paragraphe nous allons voir la première expérience algérienne connue et nous étudierons la situation de la réglementation et de la formation en architecture de terre en Algérie.

I.2.3 Actualité de l'architecture de terre en Algérie

Aujourd'hui les attitudes ont changé, malgré l'échec de l'opération de Mustafa Ben Brahim[18]. En effet le BTS est un matériau reconnu officiellement et le Centre National d'Etude et de Recherche Intégrées du Bâtiment (CNERIB) mène ses recherche sur ce sujet depuis plus de vingt ans. Plusieurs projets ont pu voir le jour tel que le montre le tableau qui suit :

Tableau I.1: Les opérations de construction en terre en Algérie (source : CNERIB)

Années	Réalisations
1969	La réalisation de 136 logements en pisé au village agricole de Bouhlilet à Batna.
1971	Une équipe franco-belge réalise à Zéralda un groupe expérimental d'habitations rurales[19]
1973	30 des 300 logements du village de Moustafa ben Brahim, sont réalisé en pisé.

[17] Ibid.

[18] Ibid. P 52.

[19] J. Dethier, Des architectures de terre ou l'avenir d'une tradition millénaire, Ed. CGP, paris, 1982, P. 52.

1975	Le village d'Abadla a été construit selon le procédé de la terre remplissante[20]
1976	100 logements du village agricole de Felliache à Biskra sont réalisés en Thoub.
1980	120 logements du village agricole de Madher à Boussaâda sont réalisés en BTS
1981	40 logements sont réalisés à Chéraga près d'Alger en Blocs de terre comprimée.
1984	Un Prototype bioclimatique fut réalisé à Tamanrasset en Blocs de terre comprimée.
1984	Un prototype fut réalisé au CNERIB en Blocs de terre comprimée.
1986	10 logements sont réalisés à Adrar en Blocs de terre comprimée.
1986	10 logements sont réalisés à Reggane en Blocs de terre comprimée
1994	24 logements sont réalisés à Tamanrasset par l'office de promotion et de gestion immobilière en Blocs de terre comprimée.
1994	44 logements sont réalisés par l'ETR de Tamanrasset en Blocs de terre comprimée.
1998	Un prototype en pisé fut réalisé au CNERIB.
2006	un projet intitulé "réalisation d'un logement rural avec efficacité énergétique" est lancé au CNERIB et financé par l'union européenne

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[21]. Jusque-là nous n'avons pas encore rencontré d'étude spécifique sur les techniques pratiquées en Algérie. L'ouvrage de P. Odul[22] ne présente que quelques exemples et ne s'étale pas sur l'ensemble des procédés traditionnels algériens.

I.3 Les procédés constructifs

L'architecture de terre est chargée de solutions techniques toutes aussi impressionnantes et ingénieuses les unes que les autres. Nous avons utilisé principalement l'ouvrage de H. Houben et H. Guillaut, "*Traité de construction en terre*", édité en 1989 par les éditions Parenthèses de Marseille. Nous essayerons de présenter les procédés les plus connus de façon succincte afin de montrer la richesse formelle et technique de cette architecture.

Jusqu'à présent, une douzaine de procédés constructifs fondamentalement différents, sont connus à travers le monde, à partir desquels dérivent près d'une centaine de variantes qui peuvent être traditionnelles ou modernes.

[20] H. Houben et H. Guillaut, traité de construction en terre, Ed. Parenthèse, Marseille, 1989. V1, P. 168.

[21] CNERIB, Conception de logements économiques à base de produits localement disponible, CNERIB, Alger, 2000, P 01

[22] P. Odul, Des architectures de terre en Algérie, projet earth construction technologies appropriate to developing countries, Belgique, 1983.

I.3.1 La terre creusée

Cette technique est répondue sous les climats chauds et secs ou le sol présente une croûte tendre, en l'occurrence du tuf, du lœss ou de la lave poreuse. Ce procédé permet une protection contre la chaleur diurne et amortit la différence de températures entre le jour et la nuit grâce à l'effet de volant thermique[23] et de masse de la terre. Ce procédé présente deux variantes ; le troglodyte horizontal ou les cavités sont creusées sur des parois verticales et troglodyte vertical creusé dans des sites plats de plateaux ou de plaines.

Le site de Matmata en Tunisie et les gorges du Roufi en Algérie sont des exemples dans les pays du Maghreb[24]. En chine, il ne s'agit pas seulement d'habitations creusées autour d'un patio mais aussi d'écoles, de bureaux, d'hôtels et d'ateliers pour les petites industries.

Les maisons sont à la fois, abritées des vents dominants, aérées et remarquablement tempérées.

I.3.2 La terre couvrante

Cette technique permet de profiter de l'isolation de la couche de terre et est autant utilisée sous les climats chauds que froids. Elle compte deux variantes :

- La maison enterrée : la terre ne rentre pas dans la structure de la construction mais elle couvre la bâtisse.
- La maison recouverte de terre : Cette technique améliore aussi l'isolation acoustique et propose une nouvelle relation avec l'environnement (toits jardin). Le problème qui se pose dans cette technique c'est celui de l'humidité et des charges supplémentaires qu'elle occasionne sur la structure.

I.3.3 La terre remplissante

A l'état sec, la terre remplit toutes sortes de matériaux creux. C'est avec ce procédé que la Muraille de Chine fut construite ainsi que de nombreux ouvrages romains. Le village de Guir Lotfi à Béchar[25] était réalisé grâce à cette technique. Les blocs de parpaings creux étaient remplis de terre crue avant leur pose dans les murs.

---

[23] C'est la réserve d'énergie thermique emmagasinée le jour et restituée la nuit.

[24] Les gorges du Roufi dans les Aurès correspondent bien à cette description mais restent malheureusement peu connues.

[25] Noureddine KEBAILI, l'architecture de terre contemporaine en Algérie ; évaluation post-occupation d'habitations rurales dans la région centre des hauts plateaux ; mémoire de magistère 2006, P. 17.

I.3.4 La terre découpée

La terre est découpée à la surface d'un sol de bonne cohésion naturelle. Les blocs ou les mottes de terre sont extraites avec un outillage très simple (bêche, pioche, outils de carrières) et peuvent être utilisés aussitôt découpés. Cette technique pose les problèmes de tassement des murs.

Figure I.6: Presse Hydraulique (Source : auteur)

I.3.5 La terre comprimée

C'est la technique la plus appréciée, qui a capté très vite l'attention des techniciens et des scientifiques. Elle comporte deux variantes :

- **La brique compressée :** elle consiste à comprimer la terre dans un moule de la taille d'une brique, en bois ou en acier, par un martelage continue. Le bloc de terre comprimée est une forme modernisée de cette technique. La compression à la machine a remplacé les dames manuelles. La première machine à damer fut inventée par l'architecte et entrepreneur français François Cointeraux « la CRECISE » au 18e siècle.

  C'est l'invention de la presse manuelle « CINVA-RAM » en 1952 par l'ingénieur Raul Ramirez au centre CINVA de Bogota en Colombie qui marque le regain d'intérêt pour la construction en blocs de terre comprimée qui peut être stabilisée ou non[26].

- Les blocs monolithiques ou **le Pisé :** il est réalisé grâce à une banche dans laquelle la terre est remplie et damée. C'est la technique

Figure I.7: Presse manuelle (Source : auteur)

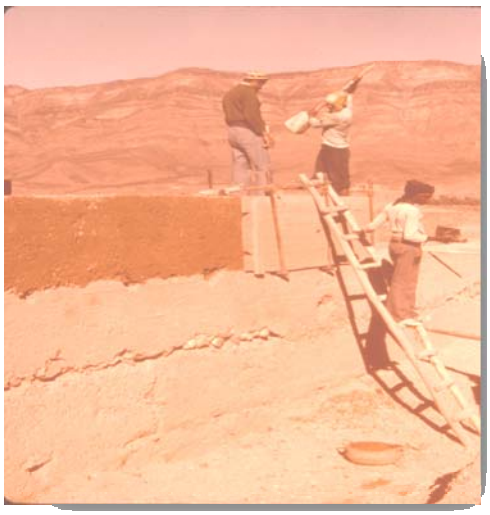


Figure I.8: Construction d'un mur en pisé au Maroc (Source : N. Baloul)

[26] H. Guillaud T.Joffroy P. Odul, CRATerre, Compressed earth blocks manual of design and construction, Ed. Eschborn, 1995, P. 7.

la plus connue. Le développement des pressoirs à vibreur permet une meilleure qualité des ouvrages

I.3.6 La terre façonnée

Elle consiste à modeler la terre à l'état humide sans l'aide d'un coffrage ou d'un moule. Son utilisation est connue dans les pays du sahel, en Afrique et dans les régions équatoriales.

Figure I.9: Séchage de brique en adobe (Source : Encyclopédie interactive Wikipédia)

I.3.7 La terre empilée

La terre est utilisée à l'état de pâte à laquelle on ajoute un dégraissant (paille ou balle de grains). Elle est pétrie à l'avance pour former de grosses boules qui sont empilées ou jetées avec force. Des murs épais sont ainsi bâtis en plusieurs couches. Elle compte plusieurs variantes, entre autres :

- Les boules empilées
- Les boules de terres jetées.

I.3.8 La terre moulée

Ou encore **ADOBE,** de l'arabe « **Thoub** », c'est une brique de terre formée à l'aide de moules ou façonnée et séchée au soleil.

Plusieurs variantes existent :

- La brique piriforme : c'est la forme la plus ancienne de brique, elle est utilisée au Togo et au nord du Nigéria où elle est appelée « Tubali ». les *Tubali* sont réalisé de terre et de paille et sont montés tête-bêche dans des murs épais avec une grande quantité de mortier de même composition. Le Niger comporte des exemples d'habitats urbains de plusieurs étages.
- La brique cylindrique : le cylindre moulé de

Figure I.10: Montage d'un mur en adobe (Source : Encyclopédie interactive Wikipédia)

Figure I.11: Mur en adobe déjà monté (Source : Encyclopédie interactive Wikipédia)

terre fraîche est utilisé comme remplissage pour une ossature en bois.

- La forme prismatique : c'est la plus connue, elle est produite selon deux techniques ; *la goutte d'eau* et *le coup de sabre.* Depuis les années 1970, des milliers de logements ont été construits selon cette technique au sud-ouest des USA. Partout dans le monde, l'adobe est en rivalité avec le bloc de terre comprimée[27].

I.3.9 La terre extrudée

La terre est extrudée par une puissante machine

I.3.10 La terre coulée

La terre est coulée dans des coffrages ou dans des moules comme un béton.

I.3.11 La terre paille

La terre débarrassée de ses gros grains, est dispersée dans des futs pleins d'eau et remuée jusqu'à l'obtention d'une barbotine, la paille (blé, orge, seigle, froment…) est ajoutée (le dosage étant de 70kg de paille pour 600kg de terre pour une masse volumique de 700kg/m3)[28] et malaxée jusqu'à l'obtention d'un mélange paillé qui sera utilisé, à l'aide d'un coffrage, comme remplissage à une ossature en bois. Cette technique présente plusieurs avantages dont la résistance au feu, aux intempéries et une bonne durabilité.

I.3.12 La terre garnissage

Une partie du château de Versailles est bâtie selon ce procédé qui a l'avantage de résister au séisme. Il consiste à appliquer de la terre sur un support, le plus souvent en bois cloué ou entrelacé, de façon à le recouvrir. La terre est très argileuse et mêlée à de la paille ou d'autres fibres végétales. Construite ainsi selon certaines précautions, la durabilité des maisons sera garantie, les exemples européens témoignent de plus de cent ans d'existence. Les variantes sont :

- Le **bauge** entre claies : l'ossature est entièrement en matière végétale, le recouvrement en terre fait entre 10 et 15 cm d'épaisseur. Cette technique reste utilisée dans les pays tropicaux.

[27] http://www.inti.be/ecotopie/

[28] Noureddine KEBAILI, l'architecture de terre contemporaine en Algérie ; évaluation post-occupation d'habitations rurales dans la région centre des hauts plateaux ; mémoire de magistère 2006, P. 19.

- Les boules de paille : c'est une technique localisée en Allemagne. Une corbeille en paille est remplie de boules de terre. La mise en œuvre se fait sur une charpente en bois.
- Le **torchis** : l'une des plus anciennes et des plus utilisées dans le monde. C'est une technique de hourdage qui consiste en l'application d'une terre mélangée à de la paille sur un clayonnage maintenu dans une ossature porteuse en bois[29].

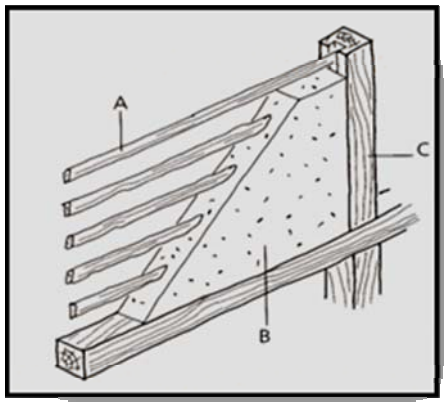


Figure I.12: Torchis sur barreau
(Source : N. Baloul)
A : barreau, **B** : remplissage terre paille
C : ossature en bois

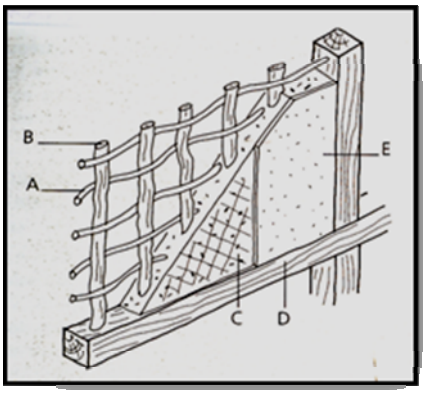


Figure I.13: Torchis sur clayonnage
(Source : N. Baloul)
A : latte, **B** : Palançon, **C** : terre paille
D : ossature en bois, **E** : enduit

- La terre projetée : elle consiste à jeter manuellement la boule de terre d'une certaine consistance sur le support, cette technique a fait l'objet de plusieurs essais pour sa modernisation par l'utilisation de pompes pneumatiques.

I.4 Les formes architecturales

L'architecture de terre offre une grande diversité de formes. En effet, ces formes varient selon les régions et les cultures des populations qui pratiquent la construction en terre[30], et cela est possible grasse a La diversité de plans, de couvertures, d'ouvertures et de systèmes constructifs existants.

I.4.1 Les ressources du plan

Les travaux réalisés au centre du CRATerre montrent que la construction en terre n'est pas réductrice de la créativité des architectes. En effet, elle permet un large choix de formes tout

[29] Bruno Pignal, Terre crue : Techniques de construction et de restauration, édition EYROLLES, 2005, P. 77.

[30] J. Dethier, Des architectures de terre ou l'avenir d'une tradition millénaire, CGP, Paris, 1982.

autant que celles utilisant d'autre matériaux. Les plans peuvent être crées sous différents styles de conception ; traditionnels ou modernes[31]. Dans tous les cas de figure, l'architecture de terre est parfaitement adaptable. La variété de couvertures offre d'innombrables possibilités de compositions formelles, en plus des choix disponible en pisé, la brique de terre offre la possibilité de couvertures en coupole

I.4.2 Le système constructif

Plusieurs systèmes constructifs peuvent être envisagés, selon le type de plan recherché. La structure monolithique offre un espace contenu, la structure auto stable est plus favorable à un espace cerné ou tramé et la structure en trumeau convient plus pour un espace fluide.

La brique de terre permet le système poteau et arc grâce à la taille relativement réduite de son module de base (voir figure I-14 et I-15).

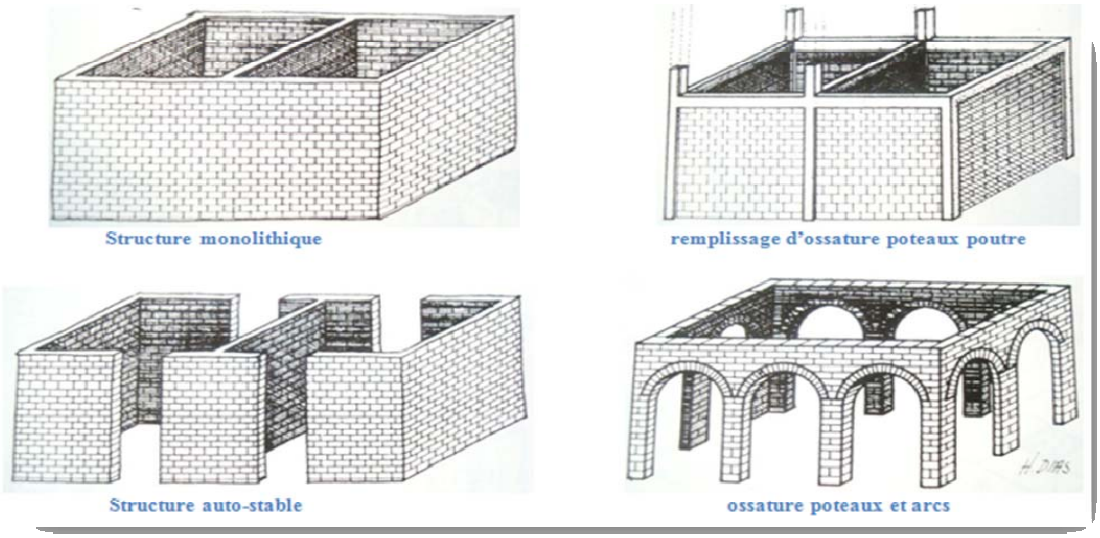


Figure I.14: Les systèmes constructifs possibles avec la brique de terre crue, (source CRATerre)

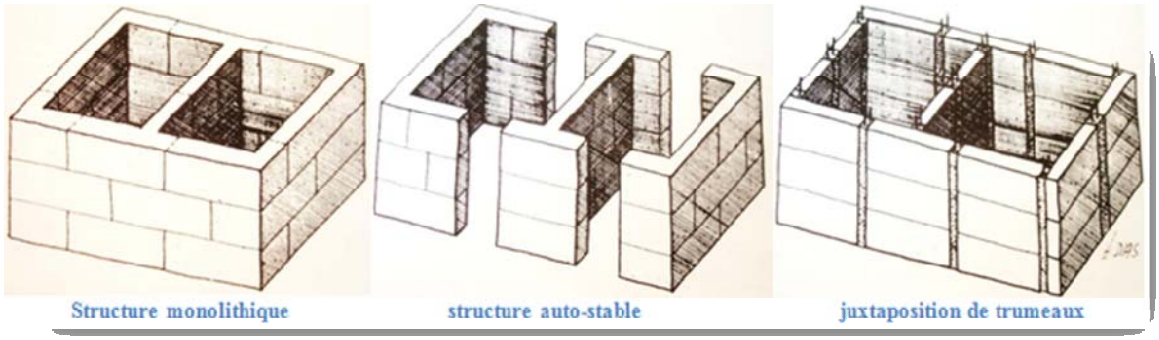


Figure I.15: Les systèmes constructifs possibles avec le pisé, (source CRATerre).

[31] CRATerre, Marrakech 87, habitat en terre, Grenoble, 1987, P. 26 et 34.

I.4.3 Les ouvertures

Selon le système constructif utilisé, diverses ouvertures peuvent être adoptées (figure I-16 et I-17). Elles peuvent apparaître sous forme de percement dans une structure monolithique ou bien sous forme de remplissage dans une structure auto stable ou bien aussi, sous forme de remplissage d'un pan de mur dans une structure à ossature poteaux poutres ou à trumeaux.

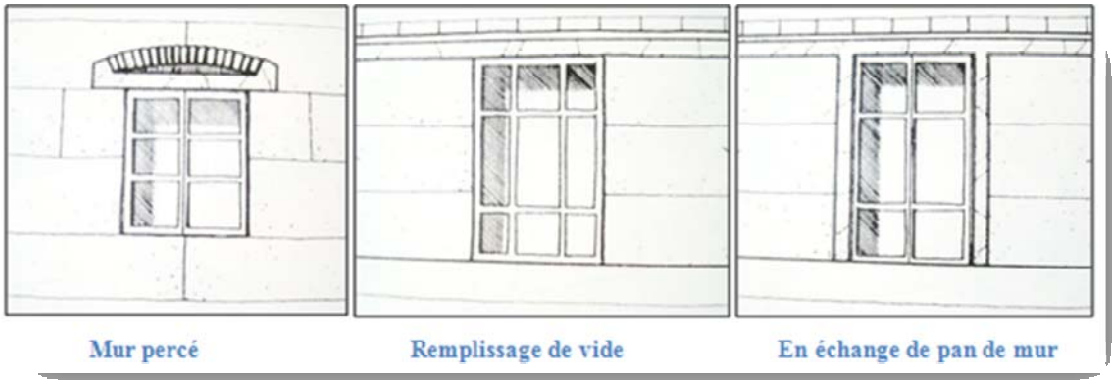


Figure I.16: Les possibilités de percement pour un ouvrage en pisé, (source CRATerre)

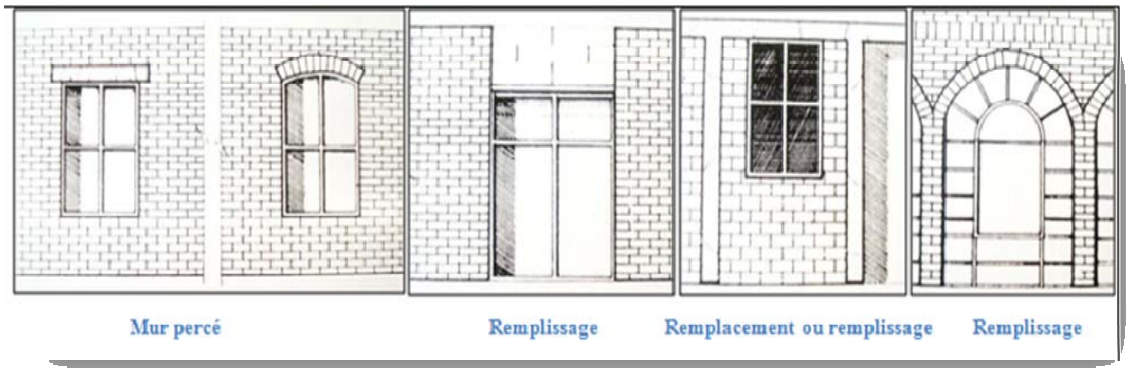


Figure I.17: Les possibilités de percement pour un ouvrage en briques de terre, (source CRATerre)

I.4.4 Les modules de base

Nous pouvons voir dans les figures qui suivent (figure I-18 et I-19) les modules de base qui peuvent permettre la diversité des formes architecturales. Comparé à la brique de terre où le plus petit assemblage peut constituer un élément de structure, le plus petit assemblage en pisé est un espace.

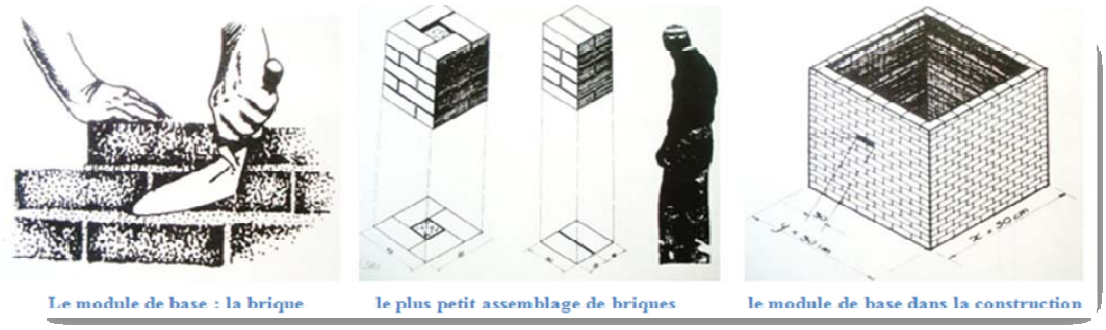


Figure I.18: Le module de base pour la brique de terre crue, (source CRATerre)

Figure I.19: Le module de base pour le pisé, (source CRATerre)

I.5 Les avantages et inconvénients de l'architecture en terre

Le génie de la terre a permis d'édifier des architectures solides à travers le monde, qui existent encore aujourd'hui (en Afrique, depuis le XIIéme siècle et au sud-ouest des Etats-Unis d'Amérique depuis le XVIéme siècle). Comme il a permis la réalisation de constructions d'une extraordinaire diversité de formes et de fonctions (case africaine, palais, temples, mosquées, églises, greniers, moulins, porte monumentale etc.).

Les architectures en terre se sont intégrées aussi bien dans les sites ruraux (en Afrique, Asie, Moyen Orient, Amérique latine, en Europe et aux Etats-Unis), sous forme de groupements, compacts, parfois défensifs ou dispersés, que dans les sites urbains (Lyon en France, Santa Fe au nouveau Mexique, Bogota en Colombie, les villes en terre de l'Afrique et du moyen Orient). Le génie de la terre a permis aussi de réaliser des constructions très hautes telles que les immeubles de la ville de Shibam au Yemen entièrement construits en terre et qui atteignent une hauteur de 30 m et des constructions vastes telles que la mosquée de Mopti au Mali, et l'église San Xavier au Nouveau Mexique. Enfin le génie de la terre a permis de doter les architectures en terre d'un confort tout aussi thermique que spirituel émanant sans doute

de l'aspect naturel du matériau et dont la plasticité permet toutes les expressions artistiques et tous les décors[32].

En plus de ses qualités de régulateur hygrométrique et d'isolant phonique, la terre crue présente de gros avantages aussi bien sur le plan environnemental qu'économique. 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.

I.5.1 Les avantages du matériau terre

Le matériau terre, partout et largement disponible, présente beaucoup d'avantages parmi eux on peut citer[33] :

- 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 recyclées et utilisées 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 comprimé 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[34] ;
- Pendant sa fabrication ce matériau ne produit aucun rejet de déchets, Son utilisation garantit aussi 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 ;

[32]J. Dethier, Des architectures de terre ou l'avenir d'une tradition millénaire, centre George Pompidou, Paris 1982, P. 27-132.

[33]A. Aguarwal, bâtir en terre, Ed. Earscan, Londres 1981, P. 44-54.

[34] H. Benouali**,** Proposition pour la relance des constructions en terre en Algérie, CNERIB, décembre 2004, p.4

- 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[35]

I.5.2 Les inconvénients du matériau terre

Malgré tous les avantages que peut présenter le matériau terre cependant, il présente aussi des inconvénients majeurs[36] :

- Il s'érode facilement, ce qui rend son emploi délicat dans les régions à forte pluviométrie ;
- Utilisée en couverture elle peu 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 (voir tableau 2)[37] .

Tableau I.2 : Mesures préventives pour la maîtrise des pathologies des constructions en terre (source : Aguarwal.A, bâtir en terre, p.51)

Climat /précipitations	**Inconvénients courants**	**Mesures préventives**
Désertique (aride) et semi-aride moins de 250 mm	-Erosion des murs par le sable -Tassement et fissures de retrait peu graves -Dégâts mécaniques	-Enduit anti-érosion en béton maigre - Bon choix de la terre - Agencement soigneusement pensé - Meilleure réalisation

[35] Kur.F, l'habitat écologique : quels matériaux choisir, Edit. Terre vivante, France, juillet 2001, P. 139.

[36] A. Aguarwal, bâtir en terre, Ed. Earscan, Londres 1981, P. 50.

[37] A. Aguarwal, bâtir en terre, Edit.Earscan, Londres 1981, P. 51.

Humide 700 à 1270 mm	- Erosion des murs et fondations - Erosion par les eaux de ruissellement -Tassement et fissures de retrait très importants -Dégâts Mécaniques	-Bon agencement, bon écoulement -Dallage en béton autour de la construction -Gouttières et tuyaux -Bonne couverture, toit en surplomb -Enduit anti-érosion, imperméable -Bon choix de la terre -Meilleure réalisation
Très humide plus de 1270 mm	Idem	Idem

I.5.3 Quelques pathologies des constructions en terre

Afin de mieux profiter des avantages 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 :

- A la base du mur à cause des remontées capillaires ;
- Au haut du mur à cause du rejaillissement ou du ruissellement des eaux pluviales ;
- A des endroits précis tels que les ouvertures, acrotères de nature du terrain terrasses saillies, gorge ou saignée[38] etc.

I.5.3.1 Les principales causes de désordre

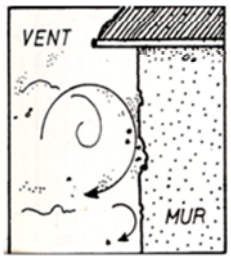
Les désordres sont principalement causés par la sollicitation du matériau ou du système à l'encontre des propriétés mécaniques. Le matériau terre ne doit pas être soumis aux efforts de traction ou de flexion car il ne résiste qu'à la compression. Nous pouvons dénombrer plusieurs causes de désordre[39] ;

- La forte pathologie humide
- Les mauvais terrains sur lesquels sont bâties les constructions : sol instable, de résistance trop faible, sol gonflant etc. ;

[38] Uniquement dans les pathologies humides.

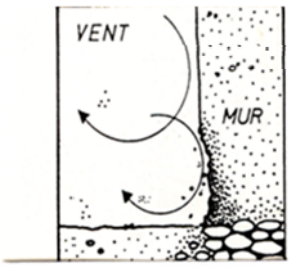
[39] Encyclopédie du bâtiment, V3, P. 3-21-35

- La mauvaise conception du bâtiment : des fondations sous dimensionnées ou excentrées, mur non chaînés, trop élancés, trop percés d'ouvertures, des tableaux de baies 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 (schémas 26 et 27)[40], plus ou aggravées par l'impact d'objets transportés, ainsi que par l'impact du sable (caractéristique du sud Algérien).
- Les autres causes annexes : les influences climatiques et actions des êtres vivants tels que les insectes et les rongeurs.



Erosion accentuée par la présence d'une corniche saillante

Figure I.20 : Haut du mur (source : CRATerre)



Creusement sur matériau déjà humide

Figure I.21: Bas du mur (source : CRATerre)

CRATerre a défini deux types de pathologies, les pathologies humides et structurelles[41].

I.5.3.2 Les pathologies humides

Les pathologies liées à l'eau sont relativement bien connues, elles sont dues à[42] :

- Présence de l'eau à la surface du bâtiment ;
- Présence d'ouvertures dans cette surface (fenêtre 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, accentuées très souvent par des actions tels que l'absence d'entretien, la

[40] CRATerre, Marrakech 87, Habitat en terre, P. 21.

[41] CRATerre, Traité de construction en terre, Op. Cit, P. 241-245.

[42] Encyclopédie du bâtiment, V3. P. 245.

non protection des gargouilles, les tableaux d'ouverture, l'arrosage etc. Les pathologies humides entraînent aussi 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 affaiblie la structure porteuse.

I.5.3.3 Les pathologies structurelles

CRATerre identifie cinq types de pathologies[43], elles sont typiquement identifiées par l'apparition de fissures ou de décomposition du matériau, elles peuvent aller à partir de l'apparition de simples fissurations, puis des bombements (ventres), des écartements, de faux aplombs, jusqu'à engendrer à long terme, un déséquilibre causant l'effondrement des constructions[44].

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 ultérieurs. La forte compression, due aux surcharges propre 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 chîné 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 cyclique

[43] CRATerre, Construire en terre Op. Cit, P. 244-245.

[44] N. Baloul, Conservation et valorisation du patrimoine architectural en terre de la région du Twat-Gourara : cas du ksar de Tmassekht, mémoire de magister 2007.

et de la forte chaleur. Cette pathologie est accélérée par la fixation des sels et des parasites organiques.

La métrise des performances du matériau terre et de ses techniques constructives permet aussi de surmonter certains de ses inconvénients structuraux, il faut signaler que l'entretien des enduits extérieurs est essentiel, car lorsqu'ils se désagrègent, la maçonnerie de terre crue subit directement l'attaque des eaux pluviales, qui altèrent les joints puis les briques elles-mêmes.

I.5.4 Les principes de bonne conception d'une architecture de terre

L'art de construire en terre obéit à des règles très strictes qui demandent un savoir-faire propre. Mal conçues, les constructions peuvent être l'objet de grave 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[45].

I.5.4.1 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.5.4.2 Protection des parois

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

I.5.4.3 Protection des ouvertures

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

I.5.4.4 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.

[45] CRATerre, Marrakech 87, Habitat en terre, P. 18-19.

CONCLUSION

L'architecture de terre, a depuis longtemps montré ses capacités techniques et sa richesse architecturale. Les performances physiques, mécaniques et de la durabilité du matériau terre ne sont plus un obstacle. Les systèmes constructifs des bâtiments en terre sont suffisamment connus par le corps scientifique pour permettre des réalisations en terre comparables à celles réalisées avec d'autres matériaux. Les formes architecturales sont aussi diverses pour permettre des compositions formelles riches et variées. Il ne s'agit plus d'évoquer ce type d'obstacle aujourd'hui.

Des études récentes affirment que l'apport de la tradition locale est une condition nécessaire pour tout projet réalisé en terre[46]*. Contrairement aux expériences étrangères qui montrent les bienfaits de cet apport sur la revalorisation architectural et la réussite des projets, dans notre pays la tradition constructive en terre forme un obstacle pour le développement et modernisation de ses techniques de construction.*

La relance de la construction en terre en Algérie commence petit a petit a se dessiner, vu que sa réglementation commence à être effective, il reste cependant à inciter à son application systématique dans les régions du sud.

[46] Z. Derradj, Etude des conditions techniques optimales du mélange « terre paille » en vue de la construction de logements à Ronquières en Belgique, mémoire de Magistère à l'université catholique de Louvain, 1987, P. 102.

DEUXIEME CHAPITRE

ARCHITECTURE ET CONFORT THERMIQUE

Introduction

Le confort thermique est défini comme 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.

L'adaptation de l'habitat à l'égard du rayonnement solaire et des facteurs climatiques en général se faisait de manière naturelle, les villes sahariennes et méditerranéennes, les villages chinois enfoncés dans le sol ont toujours étonné par leur fraîcheur. Ainsi, l'architecture bioclimatique a trouvé en l'architecture vernaculaire des pays chauds, de bonnes raisons d'être appréciée.

L'idée de base est de donner à une construction l'orientation et la forme les mieux aptes à la faire bénéficier des variations saisonnières du soleil, en position et en intensité, et à pouvoir répondre, grâce à lui, aux besoins de chauffage, de climatisation, de ventilation et d'éclairage. Laisser le soleil pénétrer à l'intérieur pour y stocker sa chaleur permet d'élever la température ambiante en hiver et en voilant son rayonnement par un écran en été, permet la ventilation, en somme, c'est la façon la plus simple de faire la régulation thermique en cachant ou en exposant. Tirer le meilleur parti de l'ensoleillement s'obtient en jouant sur les caractéristiques énumérées ci-dessus, lesquelles relèvent de la géométrie, de la nature des matériaux utilisés et des protections fixes ou mobiles[47].

Ce chapitre montre la relation entre l'architecture et le climat. On commencera par la présentation du 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 bioclimatique qui rentrent en jeu dans l'amélioration du confort. Par la suite nous aborderons l'aspect isolation thermique, les caractéristiques des matériaux isolant et les différents types d'isolants. Sans oublier le volet inertie thermique, à travers la chaleur spécifique des matériaux utilisés.

[47] I. Hurpy, la climatisation de l'habitat par cheminée solaire et le système du « Melkaf » solaire, cahier AFADES, énergies nouvelles, Ed. n°5, P. 105-110.

L'architecture et le confort thermique

II.1 Relation : Architecture-Climat

De tous temps, l'homme a essayé de tirer parti du climat pour gagner du confort et économiser l'énergie dans son habitation. Aujourd'hui, des règles d'adaptation à l'environnement, à l'architecture et aux climats permettent d'allier une tradition millénaire et des techniques de pointe.

De nos jours, les exigences du confort augmentent et se multiplient de plus en plus et les concepteurs semblent avoir négligé la fonction d'adapter le bâtiment au climat et à la maîtrise de l'environnement intérieur et extérieur. Ils ont confié le soin à la technologie de créer un environnement artificiel.

En considérant l'architecture dans une recherche d'intelligence, celle-ci doit créer elle-même, par son enveloppe (forme, matériaux, répartition des ouvertures) et ses structures intérieures, un microclimat confortable. L'architecture doit être étudiée en fonction du climat[48] et s'adaptée à son environnement le plus proche, en utilisant les matériaux locaux et de recyclage capables d'améliorer non seulement le confort thermique mais également l'environnement.

Aujourd'hui, il faut réorganiser la relation entre l'architecture et son milieu, sous l'angle de la double responsabilité ; par rapport au milieu actuel et par rapport à celui des générations futures. En d'autre terme, on doit adapter le bâtiment au climat et au mode de vie des futurs habitants, car un mauvais choix peut coûter très cher à long terme sur le plan énergétique.

Dans les pays à climat chaud, aujourd'hui encore, le constat des conditions d'inconfort extrême que l'on rencontre dans les bâtiments est sévère : les conséquences néfastes pour les occupants sont nombreuses.

Pour cela, des concepts nouveaux dans le vocabulaire architectural tel que : « Architecture bioclimatique », « solaire passive », « architecture climatique » où une conception consciente de l'énergie, bâtiment à énergie zéro et à énergie positif a pris en considération les mécanismes du confort et l'économie d'énergie[49] insistent sur la relation de l'habitation au climat en vue de créer des ambiances « confortables » par des moyens spécifiquement architecturaux.

[48] Lavigne Pierre, Architecture climatique une contribution au développement durable Tome1 : bases physiques, EDISUD 1994, P. 13.
[49] G. Alexandroff et J .M, Architecture et climat soleil et énergies naturelles dans l'habitat; édition architectures Berger-Levrault, Paris1982, P. 216.

II.2 Le confort thermique et l'analyse bioclimatique

II.2.1 Le confort thermique

Le confort thermique est la sensation d'équilibre et de contentement exprimé par l'individu envers les conditions thermiques. ASHRAE[50] le définie : "*Thermal Comfort is that condition of mind that expresses satisfaction with the thermal environment"*. Selon la norme ISO 10551[51], l'homme perçoit et interprète son état thermique en fonction de ses préférences individuelles. Il porte un jugement qui peut être, perceptif, évaluatif ou préférentiel. Donc le confort thermique ne se résume pas à des paramètres physiques, mais il fait aussi intervenir des données subjectives.

Le confort thermique est le résultat d'un enchaînement successif de plusieurs phénomènes qui relèvent de différentes disciplines. En génie climatique, il s'agit de déterminer les effets du climat extérieur sur le bâtiment pour le dimensionnement des équipements. Les thermiciens font des études poussées pour connaître les champs de température et l'indice de confort. Tandis qu'en thermo-physiologie, on étudie d'avantage les effets de l'environnement thermique intérieur sur le corps humain pour le calcul des grandeurs thermo-physiologiques. En fin en psycho-sociologie, on s'intéresse à l'évaluation du climat intérieur par l'être humain grâce à l'interprétation en termes d'acclimatation qui est la composante subjective[52].

II.2.1.1 Les outils 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'

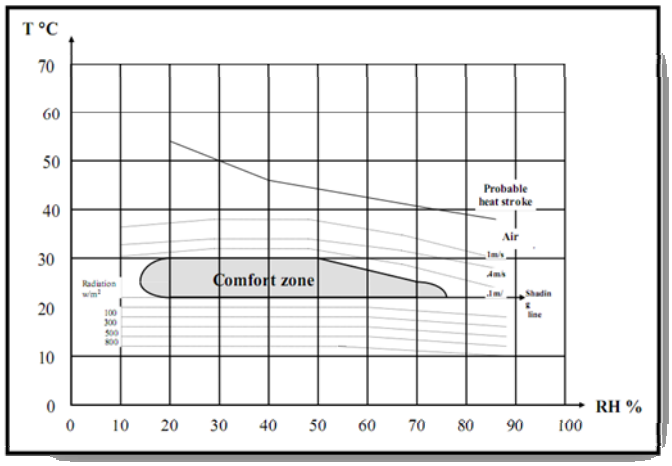


Figure II.1: Diagramme bioclimatique d'Olgay, (source: Olgay, 1953)

[50] ASHRAE: American Society of Heating Refrigerating and Air conditionnig Engineers.

[51] ISO 10551 (International Standard Organization) : Evaluation de l'influence des ambiances thermiques à l'aide d'échelle de jugements subjectifs.

[52] Thelier. F et al, Les outils d'évaluation du confort thermique, Journée SFT/ CSTB, 04/02/2003, Nantes.

par F. Houghton et C. Yaglou[53]. 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.1. 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 :

$$\mathbf{T_n = 11.9 + 0.534\ T_0}$$

Où:

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

A l'encontre de la méthode d'Olgay qui est plutôt recommandée 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 Figure II.2.

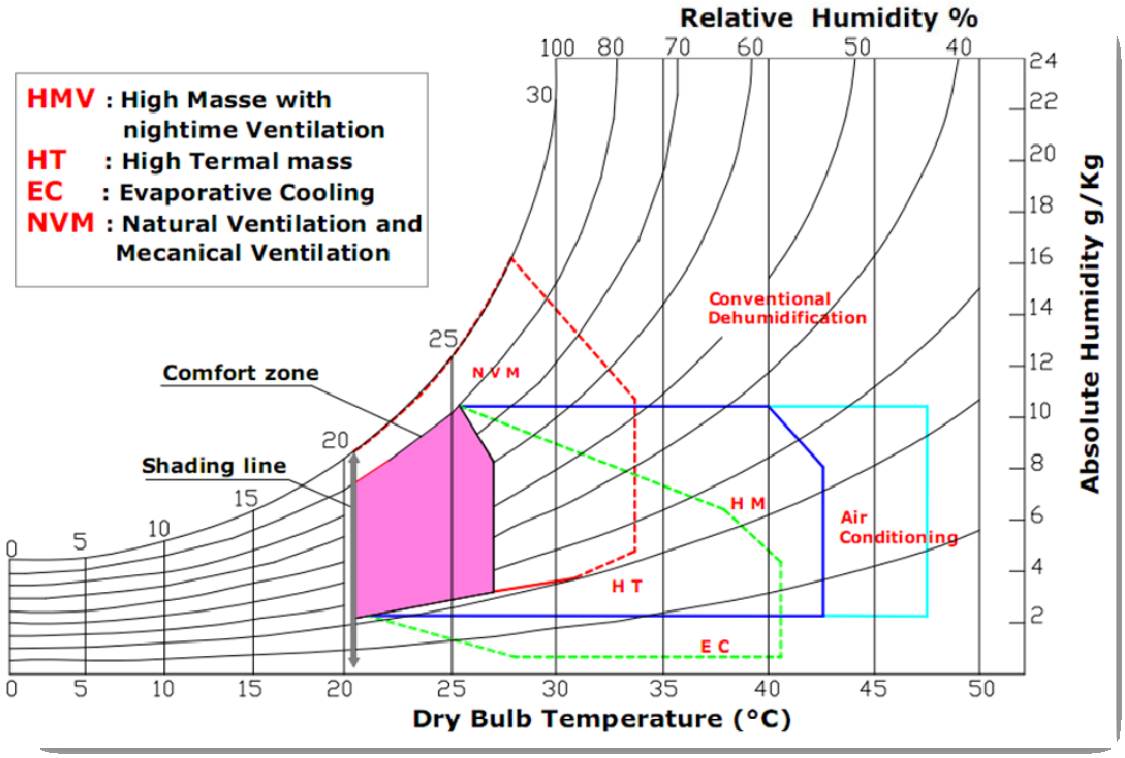


Figure II.2: Diagramme bioclimatique de Givoni (source: Givoni 1978)

[53] D. Medjelekh, Impact de l'inertie thermique sur le confort hygrothermique et la consommation énergétique du bâtiment, Cas de l'habitation de l'époque coloniale à Guelma, Mémoire de magistère, université de Constantine, 2006.

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 perçu par les sujets.

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

$$\mathbf{T_n = 17.6 + 0.31\ T_0}$$

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[54].

1984, la norme internationale ISO 7730[55], 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[56], fournit un avis statique moyen d'appréciation du confort de l'ambiance. Le second PMV[57], indique le nombre de divergents Figure II.3.

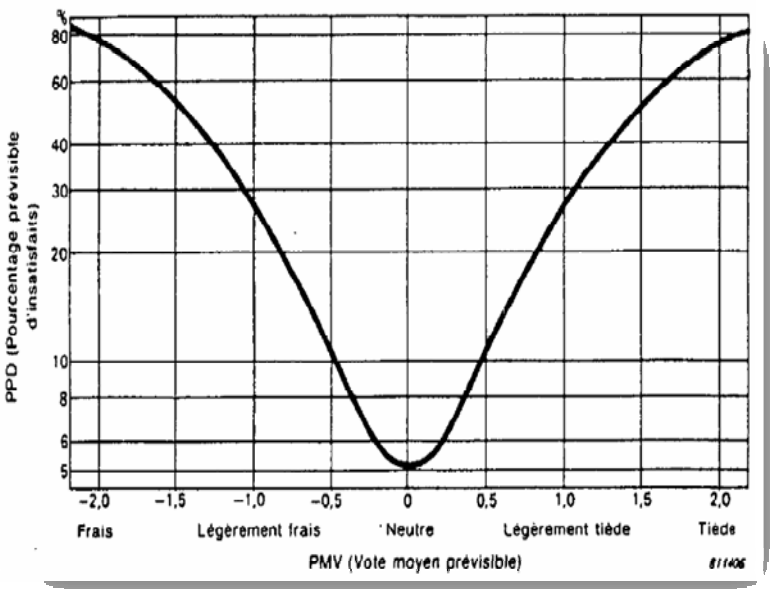


Figure II.3: PMV-PPD (source: Norme SN EN ISO 7730)

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 expérimentales de Fanger en 1970.

[54] Koenigsberger et al, Climatic design, London, New York: Ed LONGMAN 1974, P. 306.

[55] ISO 7730: Ambiances thermiques modérées- Détermination des indices PMV et PPD et spécification des conditions de confort thermique. Zone de confort: -0,5 < PMV < +0,5 moins de 10 % d'insatisfaits

[56] PPD: Predicted Percentage Dissatisfied (vote moyen prévisible)

[57] PMV: Predicted Mean Vote

La norme ISO 7730 a déterminé ainsi la température opérative en fonction des conditions climatiques, l'habillement et l'activité du sujet Figure II.4.

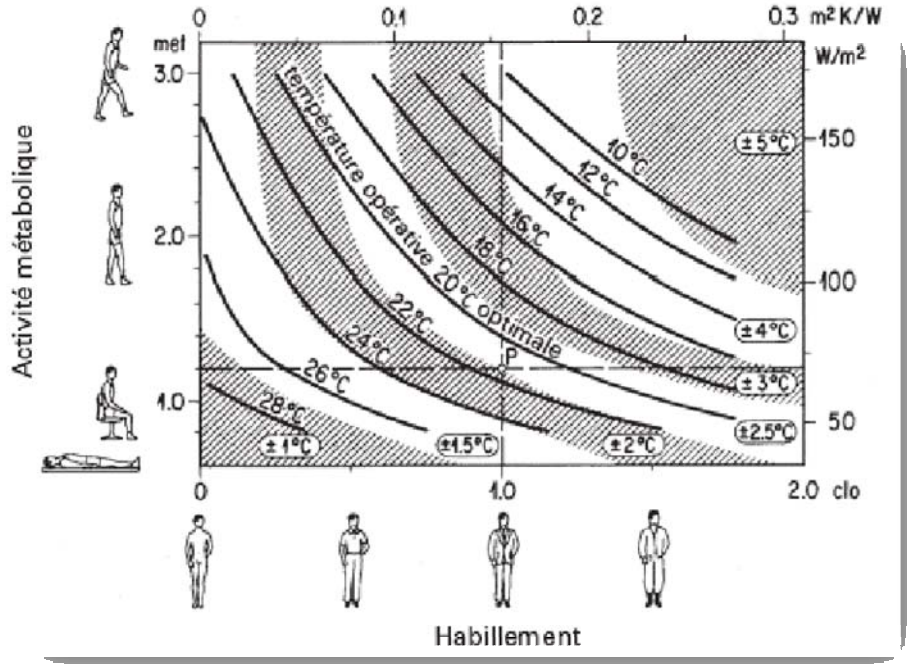


Figure II.4: Température opérative optimale en fonction de l'activité et de l'habillement. (source: Norme SN EN ISO 7730)

II.3 Les facteurs influant le confort thermique

II.3.1 La démarche bioclimatique

Nos climats n'offrent pas de conditions suffisantes pour assurer le confort thermique toute l'année, il est nécessaire de corriger ses données par le chauffage ou la climatisation des bâtiments. L'objectif à poursuivre est donc d'obtenir la meilleure adéquation entre le climat, le bâtiment et le comportement de l'occupant[58].

Redécouverte au début des années 70, l'architecture bioclimatique recherche une synthèse harmonieuse entre la destination du bâtiment, le confort de l'occupant et le respect de l'environnement. Elle permet de réduire les besoins énergétiques et de créer un climat de bien être dans les pièces avec des températures agréables, une humidité contrôlée et un éclairage naturel abondant.

En effet, une architecture bioclimatique tire le meilleur parti du rayonnement solaire et de la circulation naturelle de l'air. Il s'agit de trouver l'équilibre idéal entre l'habitat, le mode de

[58] A. Liébard A. De Herde : Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique, concevoir, édifier et aménager avec le développement durable, Ed. Le Moniteur, Paris 2005.

vie des occupants et le climat local, afin de rapprocher au maximum ses occupants des conditions de confort. Sous les climats arides, les variations de l'ensoleillement, du vent et des températures nécessite une mise en œuvre de diverses stratégies adaptées aux différentes saisons. En hiver, il importe de profiter des apports solaires et de se protéger du froid, en été par contre, il faut se préserver du soleil. L'habitat bioclimatique s'accorde enfin aux rythmes naturels en tirant le meilleur parti possible de la lumière naturelle (stratégie de l'éclairage naturel)[59].

En 1999, ces objectifs environnementaux étaient plutôt avant-gardistes. Aujourd'hui, «bâtir durable» est une tendance forte, tant auprès des particuliers que des entreprises. La conception architecturale bioclimatique s'inscrit dans la problématique contemporaine liée à l'aménagement harmonieux du territoire et à la préservation du milieu naturel. Cette démarche, partie prenante du développement durable, optimise le confort des habitants, réduit les risques pour leur santé et minimise l'impact du bâti sur l'environnement[60]. Parler d'architecture bioclimatique, au-delà des questions d'économie d'énergie et de protection de l'environnement c'est avant tout se référer au bien-être des habitants.

II.3.1.1 Principes de bases de l'architecture bioclimatique[61]

S'inscrivant dans une démarche de développement durable, l'architecture bioclimatique se base sur les principes suivants :

- Minimiser les pertes énergétiques en s'adaptant au climat environnant :
    1. Compacité du volume
    2. Isolation thermique performante pour conserver la chaleur
    3. Réduction des ouvrants et surfaces vitrées sur les façades exposées au froid ou aux intempéries.
- Privilégier les apports thermiques naturels et gratuits en hiver :
    1. Ouvertures et vitrages sur les façades exposées au soleil
    2. Stockage de la chaleur dans la maçonnerie lourde
    3. Installations solaires pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire
- Privilégier les apports de lumière naturelle :
    1. Intégration d'éléments transparents bien positionnés

[59] Ibid.

[60] Liebard. A et De Herde. A**,** Guide de l'architecture bioclimatique ; Tome4 ; Cours fondamental : Construire avec le développement durable, 2002.

[61] Karima. Benhalilou **:** Impact de la végétation grimpante sur le confort hygrothermique estival du bâtiment cas du climat semi-aride, mémoire pour l'obtention du diplôme de magistère option bioclimatique, 2008.

2. Choix des couleurs

- Privilégier le rafraîchissement naturel en été
  1. Protections solaires fixes, mobiles ou naturels (avancées de toiture, végétation,…)
  2. Ventilation
  3. Inertie thermique appropriée

  ==> Une construction bioclimatique n'a pas besoin ou peut de système de climatisation et de chauffage.

II.3.1.2 Les systèmes bioclimatiques

II.3.1.2.1 Le solaire passif

Concevoir le bâtiment pour qu'il profite naturellement des atouts d'un site et de l'énergie du rayonnement solaire. La conception solaire passive n'a de sens que si l'enveloppe du bâtiment est performante[62], elle doit pouvoir être bien conçue pour conserver l'énergie en fessant intervenir plusieurs paramètres :

- Garantir un niveau d'isolation thermique convenable et éviter les ponts thermique ;
- Eviter les infiltrations en ayant une enveloppe étanche ;
- Maximiser les apports solaires en choisissant l'orientation du bâtiment, et en travaillant sur les hauteurs angulaires du soleil pour le laisser pénétrer le plus profondément au cœur du bâtiment, les cours intérieurs, l'éclairage zénithal, etc. inversement pour éviter la surchauffe il faut limiter la surface des baies vitrées sur certaines orientations, utiliser un ombrage structurel de façade, et ventiler la maison ;
- Construire avec des matériaux stocker de chaleur et atténuer les fluctuations de températures. Ses masses seront disposées de manière à recevoir directement le rayonnement solaire.

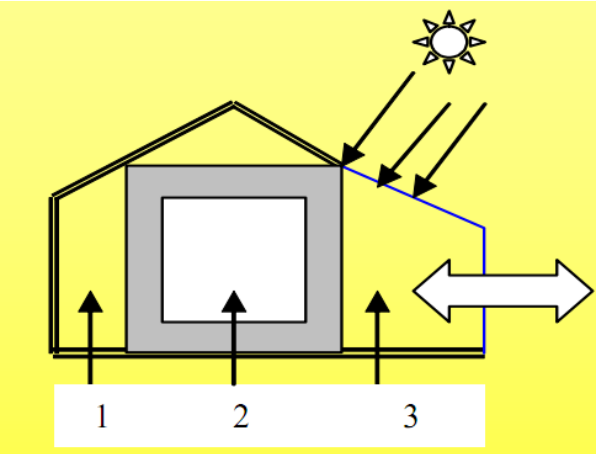


Figure II.5: Le système solaire passif, (Source A. Lièbard A. De Herde)

[62] A. Liébard A. De Herde, Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique, concevoir, édifier et aménager avec le développement durable, Ed. Le Moniteur, Paris 2005.

1) les volumes tampons au nord protègent l'espace central des déperditions thermiques, et du vent froid d'hiver ;
2) l'espace central, compact et à forte inertie reçoit la chaleur captée (transmission par conduction et convection) ;
3) les volumes vitrés au sud captent le soleil pendant la saison froide (vérandas, serres et jardins d'hiver).

II.3.1.2.2 Le solaire actif

L'énergie solaire est captée par un panneau solaire soit en toiture soit en façade. Cette énergie chauffe un fluide caloporteur (air, eau) qui la transfère à un stock. Cela nécessite une dépense d'énergie (électrique) qui représente une fraction de l'énergie captée. Parmi les systèmes actifs : le chauffe-eau solaire, le plancher solaire direct et les capteurs solaires.

II.3.1.2.3 Le solaire hybride

Ces systèmes ont un fonctionnement tantôt passif tantôt actif, parmi eux le collecteur-fenêtre qui lorsque le rayonnement est faible se comporte comme une fenêtre ordinaire (gains directs) et lorsque c'est le contraire, un store vénitien est abaissé dans la coulisse entre la fenêtre interne et externe et un ventilateur pulse l'aire en circuit fermé du collecteur vers le stock et inversement. Ses systèmes sont relativement complexes, encombrants et couteux.

II.3.1.3 La conception bioclimatique

II.3.1.3.1 Les options d'ensemble

- **L'implantation**

L'implantation judicieuse d'un édifice est la tâche la plus importante de l'architecte. Elle détermine l'éclairement, les apports solaires, les déperditions, les possibilités d'aération, etc. Mais aussi les qualités de l'habitat : communications, vues, rapports de voisinage, etc.[63].

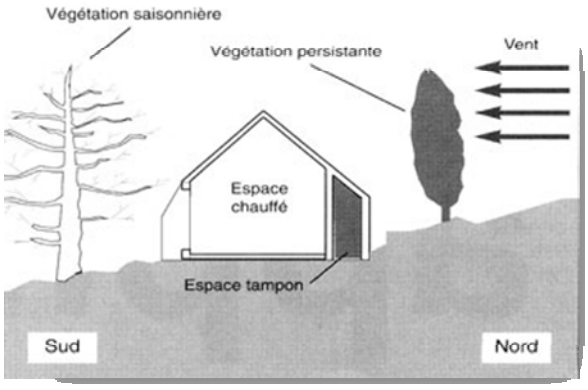


Figure II.6: Une bonne implantation de la maison, (source : A. Merzeg)

[63] A. Liébard A. De Herde, Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique, concevoir, édifier et aménager avec le développement durable, Ed. Le Moniteur, Paris 2005.

Les objectifs d'une bonne implantation sont :

- Le bâtiment doit être situé de façon à réduire les consommations d'énergie relatives à l'éclairage artificiel et au refroidissement mécanique, et à contrôler l'accès à l'énergie solaire pour l'éclairage naturel ;
- Réduction et contrôle du rayonnement solaire ;
- Amélioration de la ventilation naturelle et du refroidissement naturel des surfaces externes du bâtiment.

- **L'orientation**

L'orientation d'un bâtiment répond à sa destination : les besoins en lumière naturelle, l'intérêt d'utiliser le rayonnement solaire pour chauffer le bâtiment ou, au contraire, la nécessité de s'en protéger pour éviter la surchauffe, l'existence de vents pouvant refroidir le bâtiment en hiver ou le rafraîchir en été, sont autant de paramètres importants dans le choix de l'orientation.

Parfois agréable l'été, le vent est toujours source d'inconfort l'hiver. Par conséquent, protéger les façades des vents froids est toujours souhaitable, voire prioritaire, pour minimiser la consommation de chauffage.

Le soleil intervient pour dispenser lumière et chaleur. Une orientation adaptée aux contraintes du bâtiment permet ainsi de réduire les consommations de chauffage et d'éclairage. On constate une sensible diminution des besoins de chauffage pour une orientation sud, alors qu'il ne cesse d'augmenter pour une orientation Nord.

Les pièces orientées au Nord bénéficient toute l'année d'une lumière égale et du rayonnement solaire diffus. Pendant l'été, elles peuvent souffrir d'un rayonnement direct au petit matin et en soirée car le soleil est bas et ses rayons provoquent un éblouissement difficile à contrôler.

Les pièces orientées à l'Est bénéficient du soleil le matin mais la lumière est difficile à maîtriser car les rayons sont bas sur l'horizon. L'exposition solaire y est faible en hiver mais, en été, elle est supérieure à l'orientation Sud, ce qui est peu intéressant.

Les pièces orientées à l'Ouest présentent des caractéristiques identiques : possibilité d'inconfort visuel par éblouissement et surexposition en été. De plus, en été, ces pièces étant exposées à un rayonnement solaire intense qui s'additionne aux températures déjà élevées en fin de journée, il devient difficile de contrôler les surchauffes.

Les pièces orientées au Sud bénéficient d'une lumière plus facile à contrôler et d'un ensoleillement maximal en hiver et minimal en été. En effet, en hiver, le soleil bas (±17°)

pénètre profondément dans la maison tandis qu'en été, la hauteur solaire est plus élevée (±60°) et la pénétration du soleil est donc moins profonde. Le sud est l'orientation qui permet le meilleur contrôle passif de l'ensoleillement. Les apports solaires sur une surface verticale (fenêtre) sont également nettement inférieurs au Sud car ils sont diminués par un facteur égal au cosinus de l'angle d'incidence.

- **La forme**

L'effet de la forme du bâtiment sur son comportement thermique est grandement fonction du degré d'exposition de l'enveloppe à la température extérieure et au vent. Les conclusions de base proposées par « Olgay » pour la forme du bâtiment sont :

- Le bâtiment carré n'est pas une forme optimale où que l'on soit ;
- Toutes les formes allongées selon l'axe nord-sud fonctionnent hiver comme été avec une efficacité énergétique inférieure à celle du bâtiment carré ;
- L'optimum dans tous les cas est une forme allongée dans une direction voisine de l'axe est-ouest.

On constate une évolution constante de la forme des bâtiments quand on se déplace des climats froids vers les climats chauds et arides. Des études sur des formes carrées, oblongues de divers types et sur l'orientation des bâtiments dans la plupart des régions climatiques montrent qu'il existe quelques formes standard pour minimiser les transferts thermiques. Ces formes sont un équilibre entre la saison froide où les gains solaires peuvent être utiles et la saison chaude où ils doivent être évités.

- **Organisation générale de la maison**

Voici l'organisation générale de la maison bioclimatique :

- Au sud, les pièces de vie consacrées aux activités de jour : salon, salle à manger, cuisine, bureau. Ces pièces doivent posséder de grandes ouvertures vitrées vers le sud pour mieux capter le rayonnement solaire l'hiver;
- A l'est et au sud-est, les chambres profitent du soleil levant. A l'ouest et au sud-ouest, elles bénéficient du soleil couchant ;
- Au nord, les espaces de service et de circulation qui n'ont pas besoin de beaucoup de lumière : escaliers, halls, WC, salles de bain, buanderie, débarras, garage. Ces pièces ne doivent pas posséder de trop grandes ouvertures pour éviter de se refroidir au contact des vents froids du nord. Ainsi, ces pièces appelées espaces-tampons protègent le reste de la maison d'une perte d'énergie thermique.

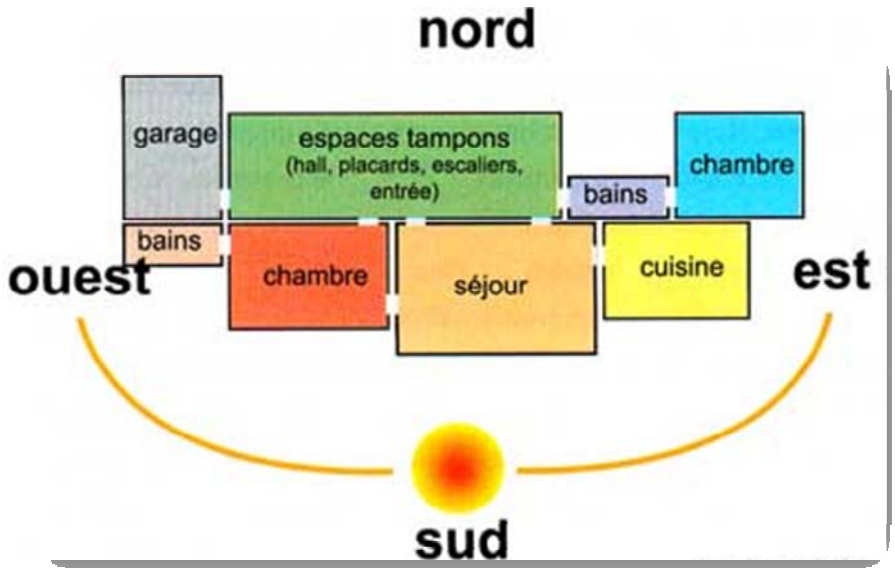


Figure II.7: Une orientation préférentielle des pièces de la maison (source : ADEME)

- **Le choix des couleurs**

Des sols et des murs sombres absorbent mieux l'énergie de la journée. Ce principe associé aux matériaux adéquats donne des performances optimales au niveau du stockage de chaleur.

II.3.1.3.2 Les dispositifs de protections solaires

On appelle protection solaire tout corps empêchant le rayonnement solaire d'atteindre une surface qu'on souhaite ne pas voir ensoleillée, dans le but de :

- Réduire les surchauffes dues au rayonnement solaire. Si l'on identifie un problème de surchauffe, il faudra préférer un système de protection solaire extérieure, qui bloque le rayonnement avant production de l'effet de serre ;
- Améliorer l'isolation en augmentant le pouvoir isolant des fenêtres. Cette propriété sera principalement recherchée durant les nuits d'hiver. Certaines protections intérieures peuvent réduire les déperditions thermiques des fenêtres de 25 % à 40 % ;
- Contrôler l'éblouissement. Un ensoleillement excessif peut rendre tout travail impossible. Ce phénomène est aussi important pour des fenêtres orientées au sud durant la saison chaude que lorsque le soleil est bas sur l'horizon : le matin, pour les fenêtres orientées à l'est, le soir, pour les fenêtres orientées à l'ouest, ou encore au sud en hiver. De même, dans les locaux orientés au nord, la vision directe d'un ciel trop

lumineux peut devenir gênante et nécessiter une protection. La luminosité peut être contrôlée par un système de protection Installé indifféremment à l'extérieur ou à l'intérieur.

Les protections solaires peuvent être intégrées à l'architecture : structurales (porche, véranda, brise-soleil) ou appliquées (stores, persiennes, volets). Elles peuvent également être fixes ou mobiles (louvres), intérieures ou extérieures, verticales (principalement pour l'est et l'ouest) ou horizontales.

Elles peuvent également être liées à l'environnement : la végétation à feuilles caduques procure un ombrage naturel saisonnier. On recherchera des essences avec peu de branchages, pour avoir un ombrage minimum en hiver, mais avec un feuillage dense pour la raison inverse, en été. En ville, les bâtiments voisins constituent un masque important au rayonnement solaire. Le relief peut aussi devenir un élément essentiel de l'accessibilité du rayonnement solaire sur un bâtiment. En effet, si un bâtiment se trouve sur un terrain en pente, exposé au nord, celui-ci risque de ne jamais recevoir de rayonnement solaire en hiver.

Figure II.8: Volets suspendu permettant de moduler l'ensoleillement (Source A. Lièbard A. De Herde).

Figure II.9: Volet coulissant permettant de tamiser la lumière (Source A. Lièbard A. De Herde)

Figure II.10: Avant toit protégeant des rayonnements du soleil (Source A. Lièbard A. De Herde).

Figure II.11: Protection solaire par la végétation (Source A. Lièbard A. De Herde)

II.3.2 L'isolation thermique

L'isolation thermique est la propriété que possède un matériau de construction pour diminuer le transfert de chaleur entre deux ambiances. Elle a pour but de protéger les bâtiments et leurs occupants contre les effets de variations de températures et des conditions atmosphériques ainsi que de l'humidité[64]. Généralement, ces matériaux, dits isolants thermiques d'origine minérale, végétale, organique ou hétérogène.

L'isolation thermique permet à la fois de réduire les consommations d'énergie de chauffage et/ou de climatisation et d'accroître le confort thermique. D'après la norme française NF P 75-101, l'appellation "isolant thermique" dans le bâtiment est réservée aux produits dont la résistance thermique est au moins égale à 0,5 m².K/W, et dont le rapport de l'épaisseur par sa résistance thermique (conductivité thermique λ) est au plus égal à 0,065 W/m. K[65]. La Figure II.12 présente en pourcentages indicatifs les pertes de chaleur d'une maison traditionnelle non isolée.

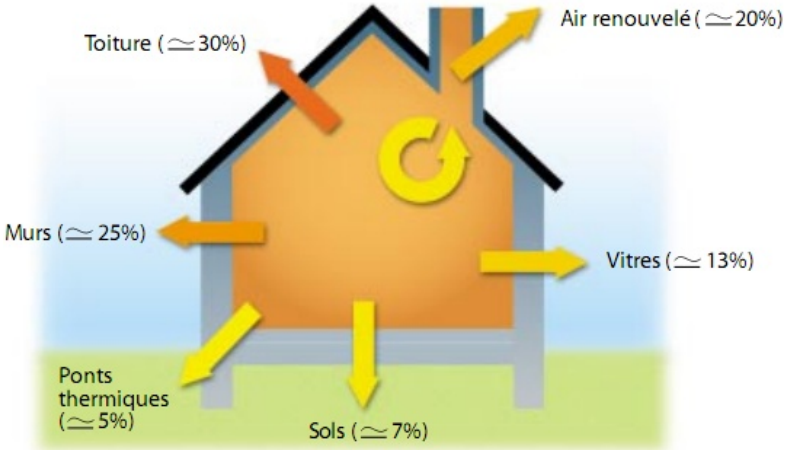


Figure II.12: Ensemble des déperditions thermiques d'une maison non isolée, (source ADEME Graphies).

II.3.2.1 Caractéristiques des matériaux d'isolation thermique

II.3.2.1.1 La résistance thermique

La résistance thermique R mesure combien un matériau «résiste» à la perte de chaleur, plus R est élevée, mieux c'est[66].

La résistance thermique **R** (m² K / W) est le rapport de l'épaisseur du matériau **e** (en mètre) sur sa conductivité thermique λ (en W/m ° C) :

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

[64] A. Bonhomme. Isolation thermique des bâtiments. 4e édition mise à jour et augmentée. Ed. du Moniteur, Paris 1979, P. 24.

[65] A. Merzeg. La réhabilitation thermique de l'habitat contemporain en Algérie, Mémoire de Magistère, UMMTO, 2010.

[66] P. G. Bellin. L'habitat bio-économique. Ed. Eyrolles. Pris 2008, P. 20.

Plus la résistance thermique est grande est plus le matériau s'opposera au passage de la chaleur. Elle est d'autant plus grande que l'épaisseur « **e** » est grande et que la conductivité thermique « **λ** » est faible.

II.3.2.1.2 La conductivité thermique

C'est le flux de chaleur, par mètre carré, traversant un matériau d'un mètre d'épaisseur pour une différence de température de un degré entre les deux faces. Elle s'exprime en watts par mètre et par degré Celsius (W/m. °C). C'est une donnée intrinsèque à chaque matériau, qui caractérise donc uniquement ses performances isolantes. Le coefficient λ (lambda) d'un matériau caractérise sa capacité à transmettre la chaleur par conduction, plus λ est grand, plus le matériau est conducteur de chaleur. Plus λ est petit, plus le matériau est isolant thermiquement[67].

II.3.2.2 Les matériaux isolants

Il existe plusieurs types d'isolants thermiques, dont le critère de classification suivant la norme française NF P 75-101, repose sur la structure de leur matrice solide et la nature chimique de la substance qui la constitue. Nous retiendrons à cet effet les types d'isolants suivants[68] :

II.3.2.2.1 Les isolants fibreux

Nous distinguons dans cette catégorie, les isolants fibreux minéraux manufacturés à partir de matières amorphes fondues tel que le basalte, le verre, la silice vitreuse. Les principaux représentants sont les laines minérales et les isolants en fibres céramiques. Les isolants fibreux organiques, par contre, sont d'origine naturelle, comme la laine de bois, la laine animale ou manufacturés à partir de matières plastiques comme les fibres de polyester.

II.3.2.2.2 Les isolants cellulaires

Ce sont les matériaux poreux à matrice solide contenant des cellules fermées, ouvertes ou partiellement ouvertes, contenant de l'air ou un autre gaz ayant servi à l'expansion du matériau initial. Parmi les isolants cellulaires d'origine minérale, on retrouve le béton cellulaire léger et le verre cellulaire. Parmi les isolants cellulaires organiques manufacturés on

[67] F. Jadoul, La Terre est notre maison, Construire, rénover, habiter en respectant l'Homme et l'environnement, Ed. Luc Pire, Bruxelles 2002, P. 50.

[68] C. Langlais et S. Klarsfeld, Isolation thermique à température ambiante, Techniques de l'ingénieur, Document n° C 3 371. France.

compte le polystyrène expansé et extrudé, le polyuréthane, le polychlorure de vinyle, la mousse phénolique et les mousses souples d'élastomère.

II.3.2.2.3 Les isolants pulvérulents, nodulaires ou granulaires

Les matériaux d'origine minérale sont la perlite et la vermiculite qui se présentent respectivement sous forme de grains et de paillettes obtenus à partir de l'expansion à chaud de roches volcaniques et de mica, le granulat de verre cellulaire, les flocons de laine de roche ou de verre. Les isolants d'origine organique sont les granulats de liège, les copeaux de mousse rigide de polychlorure de vinyle, les fibres de cellulose (obtenues à partir de papiers, de cartons, de pâte à bois avec ou sans liant et d'autres adjuvants) et les perles expansées à partir de granules de polystyrène.

II.3.2.2.4 Les super isolants

Ce sont des matériaux manufacturés, c'est-à-dire des matériaux microporeux de type cellulaire, comme des plaques aérogel de silice monolithique, ou pulvérulents, comme les poudres aérogel ou les poudres ultrafines (nanomatériaux) de silice. On peut les obtenir également à partir d'isolants en poudre ou en fibre, sous vide, confinés dans un espace étanche.

II.3.3 L'inertie thermique

D'après Liebard et De Herde[69], l'inertie thermique est une notion qui recouvre à la fois l'accumulation de chaleur et sa restitution, avec un déphasage dépendant des caractéristiques thermophysiques de la paroi de stockage. La vitesse de stockage ou déstockage de la chaleur est déterminée par deux autres grandeurs qui sont la diffusivité et l'effusivité.

Pour réduire l'amplitude d'un flux thermique, les parois de l'enveloppe doivent présenter une faible diffusivité et une forte effusivité. Cet objectif peut être atteint par un choix judicieux de matériaux en parois homogènes. Les parois extérieures permettent le contrôle de l'amplitude entre la température interne et externe. C'est grâce à l'inertie thermique du matériau (chaleur spécifique) que la durée du transfert de chaleur est retardée, et elle agit donc sur l'amplitude et le déphasage. L'inertie thermique de la paroi est proportionnelle à l'épaisseur de la paroi et inversement proportionnelle au coefficient de conductibilité

[69] A. LIEBARD A. DE HERDE : « Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques ; Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable » Editions du moniteur- décembre.2005. p 91.

thermique du matériau, figure II.13. Le temps de déphasage est fonction de l'épaisseur ainsi que de la conductivité thermique des matériaux.

M. A. EBEN Saleh, 1989[70] et Ben Habib 1995[71] ont démontré à travers des investigations se rapportant à l'habitat du nord saharien et traitant le comportement thermique de deux maisons l'une traditionnelle, et l'autre contemporaine, l'effet très positif de l'inertie thermique, pendant les saisons froides et chaudes. Où la maison traditionnelle arrive à réduire

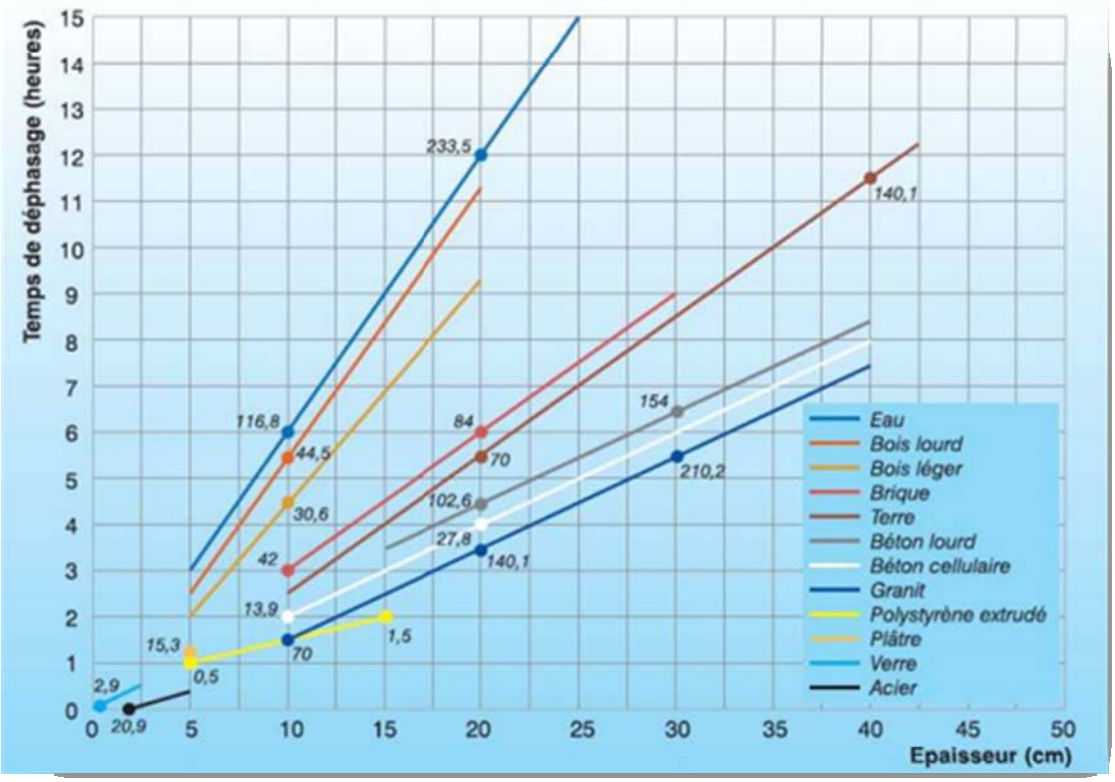


Figure II.13: Temps de déphasage des différents matériaux de construction en fonction des épaisseurs types, (source: A. LIEBARD A. DE HERDE, 2005).

considérablement les besoins de refroidissement et de chauffage.

L'inertie thermique peut aussi avoir un effet positif sur les conditions intérieures en période hivernale[72], Balaras affirme que l'énergie disponible des gains solaires et les gains internes durant le jour, est stockée dans la masse et lentement restituée dans l'environnement

[70] Eben Salah. M.A, Impact of thermal insulation location on building in hot dry climates, Rapport de recherche Saudi Arabia King, Saudi University, Department of Architecture and Building sciences,5juin 1989.

[71] 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.

[72] C.A. Balaras, The role of thermal mass on the coolingload of buildings, An overview of computational methods, Energy and Buildings, 1996, vol 24, P. 1-10.

intérieur plus tard lorsqu'on en a besoin. O. SIDLER[73], a prouvé par sa recherche menée dans la bande méditerranéenne, que l'inertie thermique est incontestablement un atout pour mieux gérer les apports de chaleur. Elle permet, de plus, la bonne gestion de la chaleur en mi-saison.

Les parois minces peuvent avoir des effets désastreux sur le confort thermique. Très fines et non-isolantes, leur échauffement ou leur refroidissement est quasi instantané.

Cependant, une grande inertie thermique permet la récupération de la chaleur du jour afin de la restituer la nuit. Ceci est particulièrement intéressant dans les climats où la différence de température diurne et nocturne est importante. Cheng[74], affirme que la haute masse thermique retarde le maximum de température pendant le jour, ce qui minimise considérablement les systèmes de rafraîchissement.

II.3.3.1 Exemples d'application de l'inertie thermique dans la construction

Les habitations traditionnelles possèdent des qualités architecturales usant de moyens simples mais performants, répondants positivement aux sévérités climatiques. En période caniculaire, la forte inertie des matériaux est capable d'atténuer les variations de température en stockant la chaleur excessive des journées d'été pour la restituer la nuit. L'inertie thermique permet d'éviter les surchauffes le jour, et en créant une circulation naturelle de l'air par les ouvertures, la masse se décharge dans l'air la nuit. En hiver ce véritable piège à soleil permet également d'emmagasiner les précieuses calories pour faire face aux jours et aux nuits froides. En réalité *« la science de la construction traditionnelle correspond à une connaissance exacte et raisonnée, fondée sur l'expérimentation du comportement en œuvre des matériaux de construction…, exclusivement expérimentale et qui s'est développée sans aucune théorisation mathématique. Son caractère scientifique est parfois occulté à nos yeux»*[75].

A travers le monde, les traditions de la construction vernaculaire expriment une adaptation thermique particulièrement sophistiquée. L'architecture troglodytique, massive et l'architecture des igloos font partis des exemples de cette construction traditionnelle savante, utilisant l'inertie thermique pour s'adapter à la rigueur du climat.

---

[73]O. SIDLER, directeur de la Ste ENERTECH, L'inertie thermique en climat méditerranéen, Confort et consommations d'énergie, Colloque du 15-05-2003, Montpellier.

[74] V. CHENG, NG.E & GIVONI. B, Effect of envelope color and thermal mass on indoor temperatures in hot humid climate, Solar Energy 2005, vol78, P. 528-534.

[75]J. COIGNET, Réhabilitation : arts de bâtir traditionnel connaissances et techniques, Aix-en-Provence, Ed. EDISUD, 1987, P. 21.

II.3.3.1.1 L'architecture troglodytique

«La recherche de l'inertie maximale d'une maison conduit à enterrer celle-ci. La masse de terre qui contribue à l'échange thermique devient immense, tend vers une grandeur infinie… Ce type d'architecture souvent très méconnu reste cependant très riche, vivant, et son aire de développement se trouve sous toutes les latitudes, tous les climats quelques soit les conditions de sols »[76]. Constituées en rangée linéaires ou adossées ou autour d'une cour centrale, en cavités naturelles ou artificielles, les constructions enterrées ou semi-enterrées offrent des ambiances intérieures très confortables. Par l'augmentation considérable de l'inertie thermique de l'enveloppe, la variation journalière des températures disparaît, seul le cycle annuel pèse sur l'ambiance intérieure. Des exemples ont fait l'objet d'investigation expérimentale menée par F. Fardheheb en 1989[77], ont prouvé qu'une température intérieure peut être maintenue stable autour de 30° C, alors que la température de surface des parois extérieures dépasse les 40° C. D'autres mesures montrent que près de la surface, la température fluctue journalièrement autour de la température moyenne diurne. Mais avec la profondeur, la période d'intégration de la température moyenne augmente et, à une certaine profondeur, l'amplitude finit par s'exercer autour de la moyenne annuelle de la température extérieure. Enfin au-delà de cette profondeur, ce sont les conditions du régime permanent qui prévalent[78] Figure II.14.

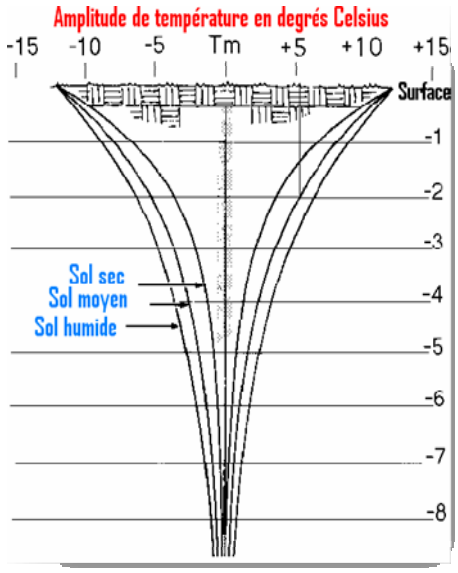


Figure II.14: Courbes d'amplitude des températures dans le sol en fonction de la profondeur et de l'état d'humidité de celui-ci, Tm représente la température moyenne annuelle au niveau du sol. (Source: J.L. Izard).

Dans ce type d'architecture on prend aussi un soin extrême pour l'orientation par rapport aux points cardinaux, au vent et au soleil. Car celui-ci combiné avec l'inertie thermique de la terre peut procurer de l'énergie et l'économie de cette dernière. Pour ces raisons, les anciens constructeurs ont profité pour y installer des villes et des villages entiers sous terre. Les

[76] J. Loubes, Archi troglodyte, France: Ed. Parenthèse, 1984, P. 5.

[77] M.Chaoucha Bencherif, la Micro-urbanisation et la ville-oasis ; une alternative à l'équilibre des zones arides pour une ville saharienne durable cas du Bas-Sahara, Mémoire de doctorat, universsité Mentouri constantine, 2007.

[78] J. L. Izard, Architecture d'été Construire pour le confort d'été, Aix - en Provence : Ed. EDISUD, 1993, P. 71-72.

exemples sont nombreux Matmata en Tunisie, Tripolitanieen Libye, Aputia en Italie, Andalucia en Espagne, la ceinture du loess en chine et les villes de Kaymakli, Derinkyu et Ozkonak en Turquie et les gorges du roufi en Algérie, tous ses exemples sont uniques.

L'exemple de Cliff Palace (littéralement « palais de la falaise ») abrite 220 pièces d'habitations de type troglodytique construites et habitées par les Anasazi (peuple amérindien) au XIII^{ème} siècle av. J.-C Figure II.15. Les indiens Anasazi du sud-ouest des états unis étaient d'une adresse remarquable pour choisir leurs sites, des falaises à l'abri desquelles ils bâtissaient leurs demeures. Ils optaient invariablement pour des lieux protégeaient du rayonnement solaire estivale, sous des surplombs des falaises accueillant le plein soleil des longs hivers. Les habitats étaient abritaient des vents froids et bénéficiaient de l'inertie thermique de la terre et de la falaise qui amortissait les écarts de température.

Un autre exemple celui de Matmata en Tunisie, enterrée de 6 à 8 m par rapport au niveau du sol, son architecture troglodytique permet grâce à l'inertie de la terre d'assurer aux habitants une température confortable malgré les amplitudes du climat aride.

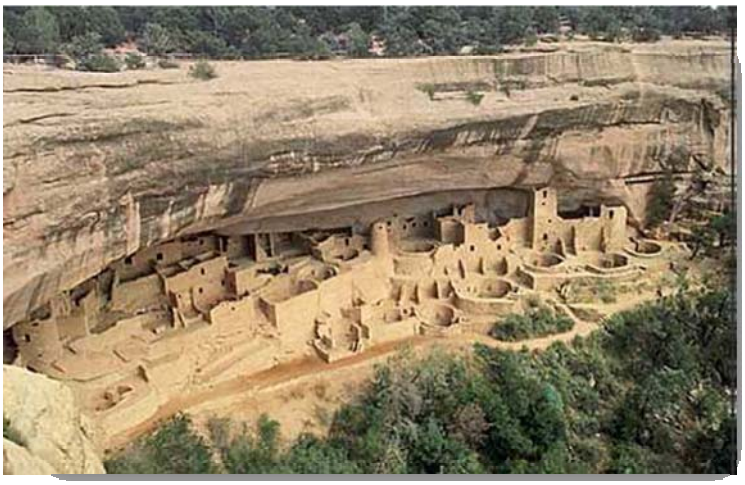


Figure II.15: Cliff palace, Mesa Verde National Park (Etat Unis), (source: Art resource, NY/Werner Forman in collection Microsoft Encarta, 2005).

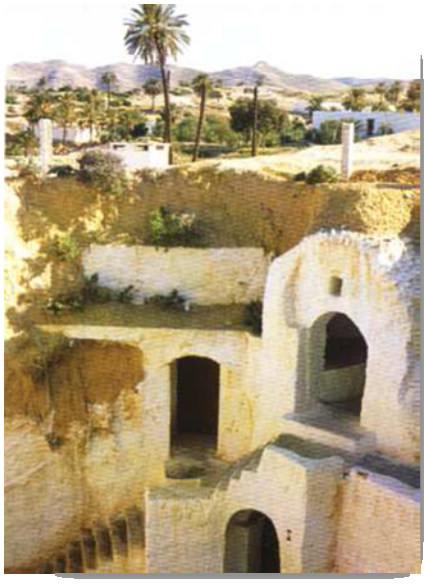


Figure II.16: Architecture troglodyte "Matmata" en Tunisie (source: ARCHIBAT, 2005).

II.3.3.1.2 L'architecture massive

Procurer la stabilité de la température à l'intérieur entre jour-nuit et entre été-hiver est un élément important dans le confort thermique. Ceci est obtenu naturellement par l'utilisation d'éléments de structure lourds. Les maisons anciennes avec leurs murs épais assurent la fraîcheur en été et l'isolation du froid en hiver. La maison iranienne, et celle de Yémen ont y parmi les exemples de cette architecture massive en climat chaud, où l'usage de matériaux locaux comme la pierre et la terre crue figure II.17 et II.18. En climat tempéré à froid

l'architecture massive est aussi présente, la pierre demeure le matériau lourd le plus fréquemment utilisé Figure II.19.

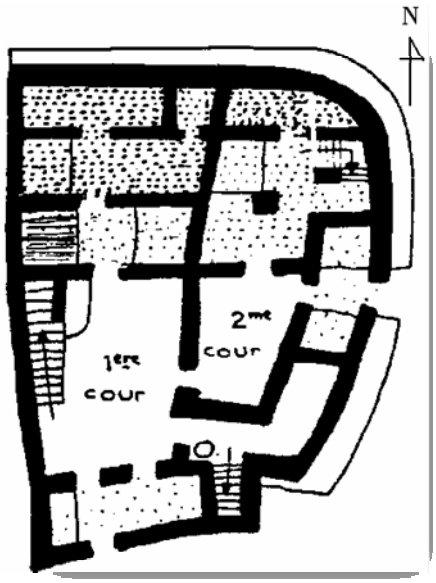


Figure II.18: Architecture Massive exemple de la maison Iranienne (source: G, J.M Alexandroff, 1982)

Figure II.19: Architecture Massive en climat tempéré à froid: Exemple de la France, (source : Microsoft Encarta 2005)

Conclusion

Les exigences constructives favorisent le surdimensionnement des équipements de contrôle et de régulation des ambiances thermiques (systèmes de chauffage, de rafraîchissement et de climatisation).

L'enveloppe est, naturellement, le lieu privilégié des relations entre espaces intérieurs et extérieurs. Il s'agit, alors, de gérer simultanément le rôle que joue la paroi du bâtiment, et celui qu'elle assure comme élément de contrôle des échanges intérieurs/extérieurs. Par conséquent, ce qui est à retenir de ce chapitre, est que beaucoup de facteurs peuvent affecter l'environnement intérieur, tels que les sources de chaleur et d'humidité intérieures et extérieures, la conception thermique de la structure, l'effet d'autres bâtiments, l'élément végétal, etc. dont il faut prendre en considération.

TROISIEME CHAPITRE

LE CONTEXTE DE TIMIMOUNE

Introduction

Timimoune fait partie de la région du Twat-Gourara située dans le sud ouest algérien. Son patrimoine naturel, culturel et paysager, sa richesse historique, son patrimonial en terre, conjugués à son climat saharien en font un cas d'étude intéressant pour une approche bioclimatique sur les performances thermiques des briques de terre crue.

Dans ce chapitre on commencera par une présentation de la situation géographique, historique et sociale de la région de Timimoune ensuite on passera aux typologies architecturales et urbaines des espaces ksourien, en présentant les différent approche typologiques en fonction du profil professionnel des auteurs (militaire, historiens géographe, et architecte,..) sans oublié l'habitation ksourienne, son processus typologique, ses éléments et ses étapes de construction et pour finir on présentera les pathologies et les désordres des maisons ksouriennes.

Le contexte

III.1 Situation historique et géographique

III.1.1 Les caractéristiques physiques et sociales de la région

Timimoune, par 29°15' de latitude N et 0°13' de longitude E, se situe approximativement au centre du triangle formé par la frange méridionale de l'Erg Occidental, la bordure nord-ouest du plateau du Tadmaït et l'Oued Saoura Messaoud, à l'Ouest[79]

III.1.1.1 Le contexte physique

Le Gourara est un vaste plateau de plus de 100 km de large dans lequel s'inscrivent de nombreuses dépressions de type sebkha ou ancien lacs salés, (la Sebkha de Timimoune mesure 80 km) le tout plus ou moins parsemé de massifs dunaires, parfois même totalement recouvert par des ergs, et s'étend sur 86.000 km^2 environ.

Timimoune, à 293 mètres d'altitude, est la ville la plus importante du Gourara. La région comporte près d'une centaine de ksour et d'oasis, accrochés soit aux festons de falaises, au pied du plateau en calcaire de Tadmaït, dans des cuvettes cachées entre les dunes du Grand Erg Occidental.

[79]Encyclopédie interactive Wikipedia.

- **Présentation du climat de la région**

La willaya d'Adrar en général et la ville de Timimoune en particulier sont situées dans la zone **F** suivant la classification de l'ONM et du SCTB. Cette zone se caractérise par des températures très élevées, des taux de pluviométrie très réduits et des degrés d'humidité très faibles voir les tableaux 1 et 2, elle se compose des régions d'Adrar et de Ain-Salah.

Tableau III. 3: Totaux mensuels des précipitations de 2002 à 2006 en mm.

	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
2002	0	0	0	1	0	0	1	0	0	33	0	0
2003	92	193	0	0	0	0	0	32	0	0	34	0
2004	0	30	14	401	11	0	0	0	0	0	21	14
2005	0	0	84	0	14	7	0	0	0	0	55	1
2006	8	29	0	0	41	0	0	0	0	0	5	0

Tableau III.4: Moyennes mensuelles des températures maximales de 2002 à 2006 (en degrés).

	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
2002	22	25.3	29.7	32.0	38.9	43.5	47.2	45.6	41.5	34.9	26.7	24.7
2003	20.8	22.4	29.8	33.1	39.7	43.8	46.6	43.1	40.9	37.3	26.8	21.7
2004	22.5	26.0	29.6	32.0	34.5	42.8	46.6	45.9	39.5	36.9	24.7	20.5
2005	19.4	21.3	28.6	35.4	41.9	42.7	47.3	45.5	41.2	35.6	28.1	21.2
2006	18.6	23.1	30.9	37.3	39.6	43.2	45.7	45.8	38.4	35.5	38.7	20.6

Le climat de la région est de type désertique caractérisé par une alternance de deux saisons, relativement bien marquées. Un hiver saharien court de novembre à mars, avec des nuits fraîches voir froides et des journées tièdes. L'été dépasse six mois, toutefois la montée thermique est progressive[80], elle atteint parfois 51°C durant les mois de juillet et août, comparativement à cette chaleur difficilement supportable le jour, les

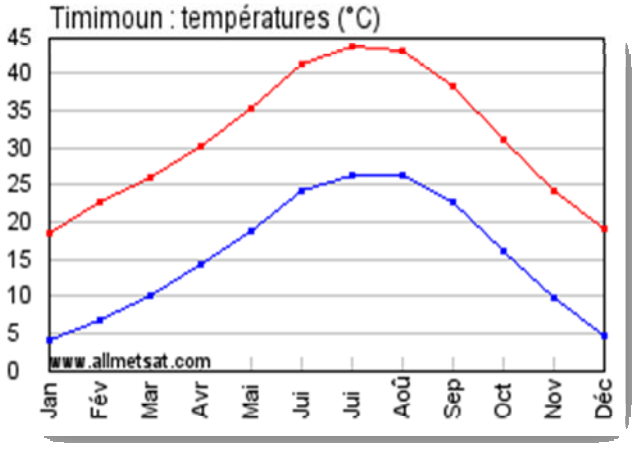


Figure III.1: Ecarts de température entre le jour et la nuit, (Source : auteur)

[80] S. Haoui Bensaada, pour la préservation des architectures ksouriennes en terre crue : cas de Timimoune, Mémoire de Magistaire, EPAU, 2002, P. 34.

nuits semble fraîches puisqu'on enregistre des écarts de 20° C entre températures diurnes et nocturnes. Les précipitations sont extrêmement rares, et caractérisées par des irrégularités interannuelles[81]. Les vents soufflent le plus souvent de l'Est pendant la saison chaude et du Nord-Est pendant la saison tempérée.

III.1.1.2 La société ksourienne

Dans un milieu aussi rude que le désert, l'ordre social constitue une exigence de survie, le système social de Gourara est fortement hiérarchisé. Il est l'expression d'un consensus général mais aussi d'un rapport de forces variable selon les lieux et les époques.

Tableau III.5 Stratification générale de la société dans le Twat-Gourara[82]

Période de la conquête (1900)	Années 1910-1950 Aristocratie	Années 1970-1980 Bourgeoisie agro-commerçantes
Chorfa		
	Propriétaires fonciers	Aristocratie foncière et religieuse
M'rabtin		
Routiers	Exploitants « indépendants »	Agriculteurs « marchands »
		Agriculteurs « domestique »
Haratin (affranchis)	Gherras	Propriétaires fermiers
	Khammès	Métayers
Esclaves		
	« Semi-propriétaires » sans statut	Paysans paupérisés
		Propriétaires ruraux

[81] En 1951, 47 mm de pluie au Gourara, la marre d'eau salée a fait écrouler quelques maisons des ksour. In E. Reboul, le Gourara, étude historique, géographique, et médicale. Archive de l'institut pasteur d'Algérie T 31, 1953.

[82] Y. Guillermou, Survie et ordre social au Sahara : les oasis du Touat Gourara Tidikelt en Algérie, Cahiers des Sciences Humaines, Vol. 29, n° 1, Paris, 1993, P.134.

La société ksourienne était caractérisée jusqu'aux années 80 par un système de castes basé sur des critères socio-ethniques : les « Shurafa » sont des descendants du prophète Mohammed, liés à un ancêtre reconnu par tous comme Wali, les Zénètes berbérophones, hommes libres ou « Hrar », sont des sédentaires fondateurs d'oasis et bâtisseurs des Ksour. Ils constituaient, avec les Shurafa, les couches sociales dominantes et possédaient la presque totalité des droits d'eau et des palmiers et n'avaient quasiment pas d'activité productive.

Le reste de la population était soumise au servage. Les « Harratin » sont les descendants des noirs ramenés du « Bilad Al-Sudan ». Ils ont été longtemps la propriété des maîtres roturiers, Zénètes ou arabes, ou d'agents religieux, Shurafa ou M'rabtin. Aujourd'hui cette hiérarchie tant à se niveler.

III.1.2 L'habitat ksourien

III.1.2.1 Les ksour, architecture et typologies

Les typologies architecturales de l'espace ksourien mises en place à travers l'histoire se caractérisent par l'unicité du critère de typification à travers l'aspect chronologique, formel et fonctionnel[83]. Durant la première moitié du XX^{ème} siècle, cette région essentiellement militaire suscitera l'intérêt de l'institut des recherches sahariennes de l'université d'Alger qui permettra à des chercheurs d'investir cette région reculée. Il faut attendre l'indépendance pour voir se multiplier les études scientifiques relatives au Touat Gourara, toutes disciplines confondues. Ainsi, durant les années 80 et 90 plusieurs études ont été menées par différentes équipes pédagogiques suisses, allemandes et algériennes. Ces études avaient pour but une meilleure connaissance de l'habitat Oasien aux moyens de relevés architecturaux systématiques et rigoureux et d'analyses de photos aériennes. L'ensemble de ces travaux a mis en exergue la richesse de ce patrimoine urbain fragile car menacé de ruine par l'action des hommes (modernisation) et de la nature (avancée du désert).

Voici exposée l'une d'elle, celle de J. Bisson 1957, parce que nous pensons qu'elle est la plus complète. En annexe nous présenterons quelques autres typologies selon les profils professionnels des chercheurs qui les ont mises au point afin de distinguer les spécificités de chacune.

[83] I. Mahrour, Contribution à l'élaboration d'une typologie Umranique des ksour dans la région du Gourara, Mémoire de Magistère, EPAU, 2008, P. 72.

III.1.2.2 Typologie : J. Bisson 1957, géographe

Géographe spécialiste de la région du Sud-est et Sud-ouest algérien, son travail sur la morphologie du territoire du Gourara lui a permis d'établir une typologie de ksour en abordant à la fois les relations des caractéristiques géologiques avec les structures d'Aghem, de ksar et d'habitat.

1. L'habitat[84]

Selon Bisson, les habitations sont construites en briques de terre crue Touba**,** ou en pierres lorsque l'argile est rare. Les pierres sont jointes par de la boue séchée et le tout recouvert d'un enduit d'argile. De forme généralement carrée, sans étage, l'habitation se compose de 3 à 4 pièces groupées autour d'une cour à ciel ouvert. Les fenêtres qui donnent vers la cour sont toujours étroites, pourtant l'aération se fait facilement.

En l'absence de tout mobilier, les pièces n'ont pas d'affectation précise excepté la cuisine qui est souvent une pièce sans toit afin de permettre l'évacuation de la fumée. Sur les khechbates du plafond sont placées des palmes recouvertes de paille et d'argiles et cet ensemble forme la terrasse à laquelle on accède par un escalier situé dans l'angle de la cour. La terrasse se distingue par un haut parapet, de plus de 1.5 m permettant aux femmes d'y séjourner sans être vue. On y trouve également un petit garde-manger qui sert à conserver quelques dattes ou céréales ou une petite pièce servant de grenier à provisions appelé maghzen, mais l'essentiel des dattes et des céréales se trouvent dans la casbah ou dans les makhzens accolés à la maison et donnent sur la cour.

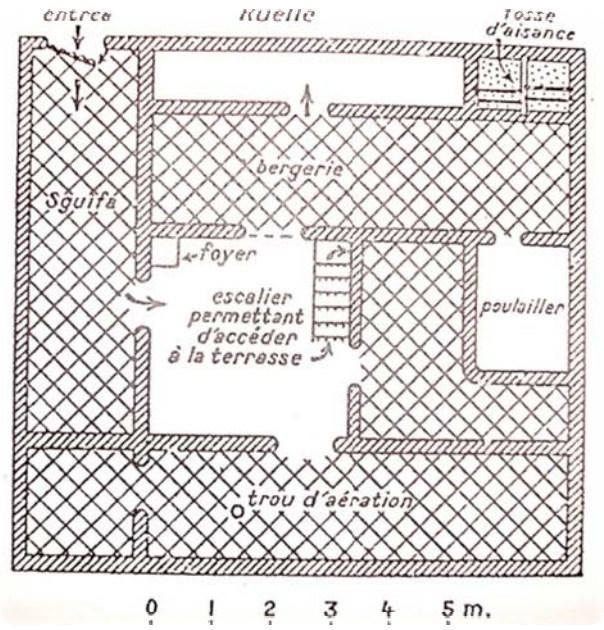


Figure III.2: Habitation dans le ksar de béni Melouk,.
(Source : J. Bisson)

Egalement accolée à la maison, une pièce en partie à ciel ouvert sert d'étable pour les animaux. Enfin la fosse d'aisance remplie de sable est toujours située contre le mur qui donne sur la rue, on peut ainsi la vider très facilement en octobre, au moment de fumer les jardins, en perçant un trou dans le mur.

[84] J. Bisson, Le Gourara étude de géographie humaine, Mémoire de l'IRS n°3, université d'Alger, 1957, P. 155.

2. Le ksar[85]

Bisson définit le ksar comme étant une agglomération de maisons très serrées. Les ruelles y sont étroites, et parfois creusées de quelques dizaines de centimètres dans le grès, notamment sur le bord de la Sebkha et l'Aouguerout. La disposition d'ensemble traduit un souci de défense et les ruelles conduisent souvent aux tours. Partout des passages couverts obscurcissent les ruelles et cachaient autrefois des pièges connus seulement des habitants[86].

Figure III.3: Kasba Zénètes construites sur butte, *(Source : J. Bisson)*

Ainsi pour Bisson, le ksar correspond à un groupe ethnique déterminé. Les ksour sont à quelques dizaines voir centaines de mètres les uns des autres. L'oasis est une agglomération de différents ksour ayant une palmeraie commune : lorsque ses ksour sont juxtaposés on peut les considérer comme des quartiers d'un même ksar mais ils conservent toujours leurs particularités ethniques[87]. Le ksar porte très souvent le nom des habitants qui y demeurent mais dans tous les cas ce nom cache toujours une différenciation ethnique.

3. La « Kasbah » ou Aghem[88]

Les observations de Bisson lui permettent de définir que la Kasbah ou Aghem en Zénète contient les greniers

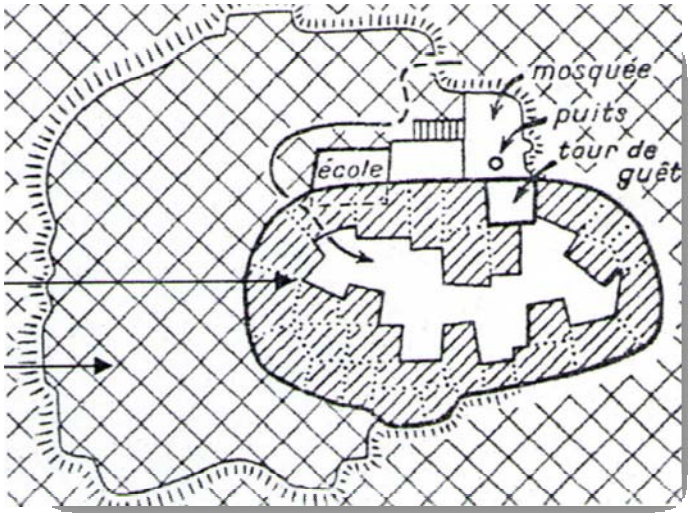


Figure III.4: Kasba Zénètes construites sur butte, *(Source : J. Bisson)*

[85] J. Bisson, P 160.

[86] J. Bisson, « poutres de palmier barrant la ruelle et sous lesquelles il fallait se faufiler ».

[87] J. Bisson, «Charouin est composé de 5 ksour, Ouled Saïd de 12, Timimoun de 15 dont 4 sont nettement distincts des autres. A Charouin existent : un ksar Zénète, dit « arabe », un ksar de chorfa appelé ksar Ouled Moussa, trois ksour Haratin :Kerfal, El Mansour et El Haït.

[88] J. Bisson, P 162.

des habitants qui servaient à entreposer les denrées des familles et de lieux de refuge en cas d'incursion ennemi. L'Aghem a la forme de construction défensive selon la topographie qui la porte. Perché sur une butte, il est de forme circulaire ou ovoïde et quand il est construit sur un plateau, il est de plan rectangulaire.

Plaqués contre les murailles d'étagent les greniers (Makhzen) qui servaient également de réduits défensifs, leurs murs sont percés de meurtrières. On accède à la kasbah par un pont de troncs de palmier, qui enjambe un fossé souvent profond de plusieurs mètres. En cas de siège, on retirerait le pont et l'on s'enfermerait dans la forteresse qui possède un puits.

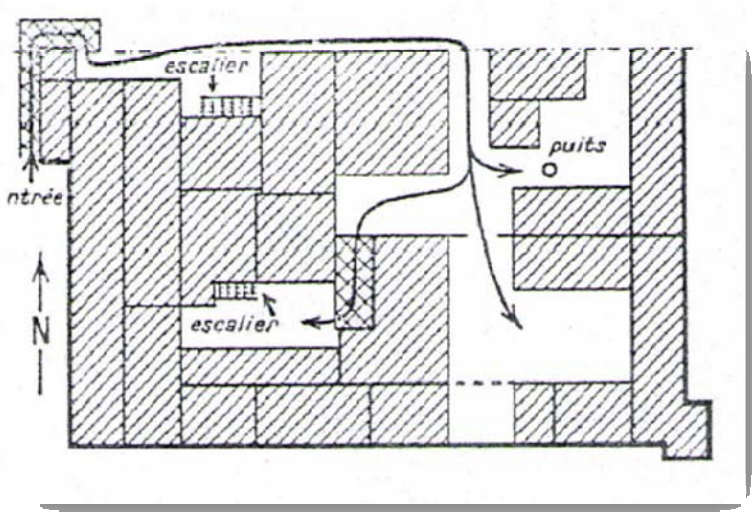


Figure III.5: Demi plan de la Kasba de Béni Mlouk, Types de ksour construits sur une butte et sur un plateau, source (J. Bisson, « le Gourara, étude d'une géographie humaine », P163

Il arrive que les greniers ne soient qu'une petite grotte creusée dans les lentilles d'argile disposées dans la masse de grès du continental inter calcaire[89]. Les Aghem généralement bâtis sur des roches permettent d'entreposer les denrées à l'abri des termites car celles-ci ne peuvent cheminer que dans le bois où l'argile.

Dans l'Erg, l'Aghem fait office de centre commercial car c'est à sa porte que les caravanes déposent leurs marchandises et à l'ombre de ses murailles que les prix sont discutés.

4. Les types de ksour[90]

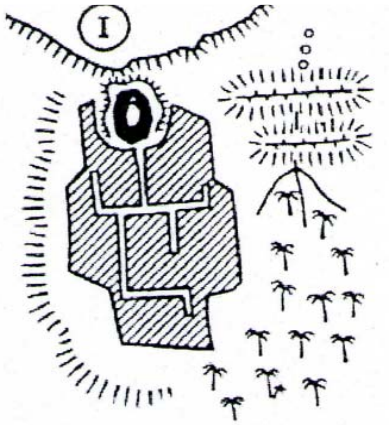
J. Bisson dans son travail a distingué plusieurs typologies des ksour :

- **1er Type : Aghem dominant le ksar** L'ensemble étant situé immédiatement au-dessus ou auprès de la palmeraie. Au-dessus de la palmeraie quand il s'agit des villages de régions au relief assez différencié, bordure Nord de la Sebkha. Auprès de la palmeraie quand il s'agit de village établis sur reg ou dans une Theïra de l'erg (formation dunaire).

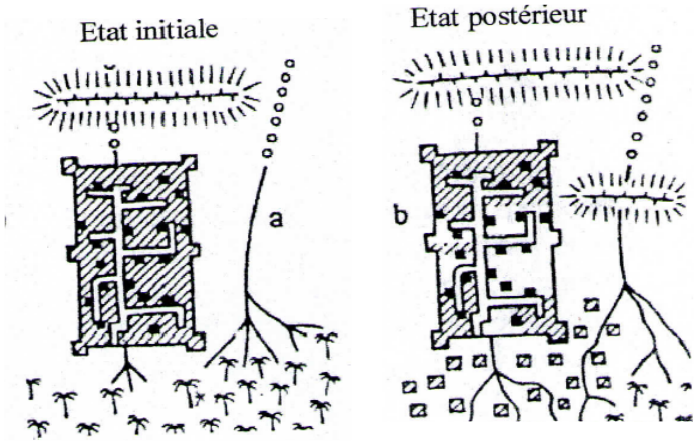
[89] I. Mahrour, Contribution à l'élaboration d'une typologie Umranique des ksour dans la région du Gourara, Mémoire de Magistère, EPAU, 2008, P. 81.

[90] J. Bisson, P. 166.

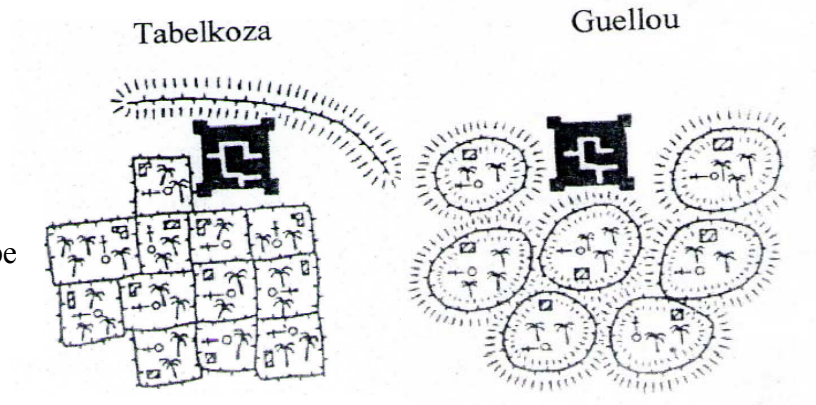
- **2ème Type : Ksar sans Aghem** Ici les greniers sont accolés aux maisons que ce soit sur les bords de Sebkha (Tarouaya et Azzekour…) ou dans l'Erg (Ajdir, OuledAissa).
- **3ème Type : Ksar d'Erg** Du type Guellou, Naama, Tabelkoza, Fatis. Ici n'existe qu'un Aghem voir deux comme à Fatis servant de grenier à provisions et abritant la mosquée et l'école coranique, tandis que les maisons ou les zeribas se dispersent dans les cuvettes de sables situées autour.
- **4ème Type : Le ksar Zaouïa** Les villages de Mrabtin, qui du fait de leur origine



I: ksar et kasba (Beni Mehal, Ighzer…)



II : Ksar sans Kasba (grenier accolés aux maisons) : A : Etat initial, B : Evolution actuelle (OuledAissa,



III : Kasba et maisons dispersés (Erg) : A : Type Tabelkoza, B : Type Gellou.

Figure III.6: Représentation schématique de la typologie Kasba Greniers selon J. Bisson

religieuse n'ont jamais eu à redouter les pillages des nomades ou n'ont pas souffert de querelles entre soff. Ces villages sont sans structures de défense exceptée le mur d'enceinte du ksar (Zaouiat Si El Hadj Belkacem, Badrian).

Ainsi, en tant que géographe, J. Bisson établi une typologie où habitat, économie géographie et religion sont en étroite relation spatiale et permettent d'établir des distinctions et donc une typification.

III.2 L'habitation ksourienne et son processus typologique

L'habitation ksourienne forme l'édifice de base du ksar, son étude nous permettra de connaître les savoir-faire locaux, l'aspect architectural et fonctionnel de cet espace de vie, ainsi que l'aspect technique de l'architecture ksourienne en terre crue, ses qualités et ses pathologies. Cette étude est nécessaire afin de proposer une réponse qui sera en fonction des pratiques spatiales en mutation et du renouvellement technologique. Elle permettra d'offrir des possibilités d'introduire les exigences de la population en assurant l'aptitude à la transformation et le respect du lieu.

III.2.1 L'habitation à organisation centrale (à Rahba)

L'habitation se caractérise par la présence d'un espace organisateur et distributeur (la Rahba), qui domine par ses dimensions, sa position et par les qualités architecturales qu'il offre (lumière, aération,…). On y remarque la forte relation entre les escaliers et la Rahba, elle est entourée d'espaces polyvalents. Chronologiquement, c'est l'organisation le plus ancienne et correspond à la période intra muros du ksar[91], figure III.7. Sur le plan spatial, l'habitation se compose des espaces suivant Figure III.8 :

- **L'accès :** il marque la transition entre le dedans et le dehors, matérialisé par une porte surmontée d'un linteau en bois de palmier. Le seuil, appelé El-Atba, est marqué par une différence de niveau entre l'intérieur et l'extérieur, c'est la limite entre l'espace privé, familial et féminin par excellence, et l'espace public, masculin.
- **L'entrée :** elle est sous forme d'espace en chicane, dont la forme varie selon la position synchronique de l'habitation. Cet espace est composé d'une première pièce, longue, appelée ***Taskift***, appelée Taskifr N'jej, donne accès au cœur de l'habitation : la Rahba.

[91] S. Haoui Bensaada, Pour la présentation des architectures ksouriennes en terre crue : cas de Timimoun, Mémoire de Magistère, EPAU, 2002, P 159.

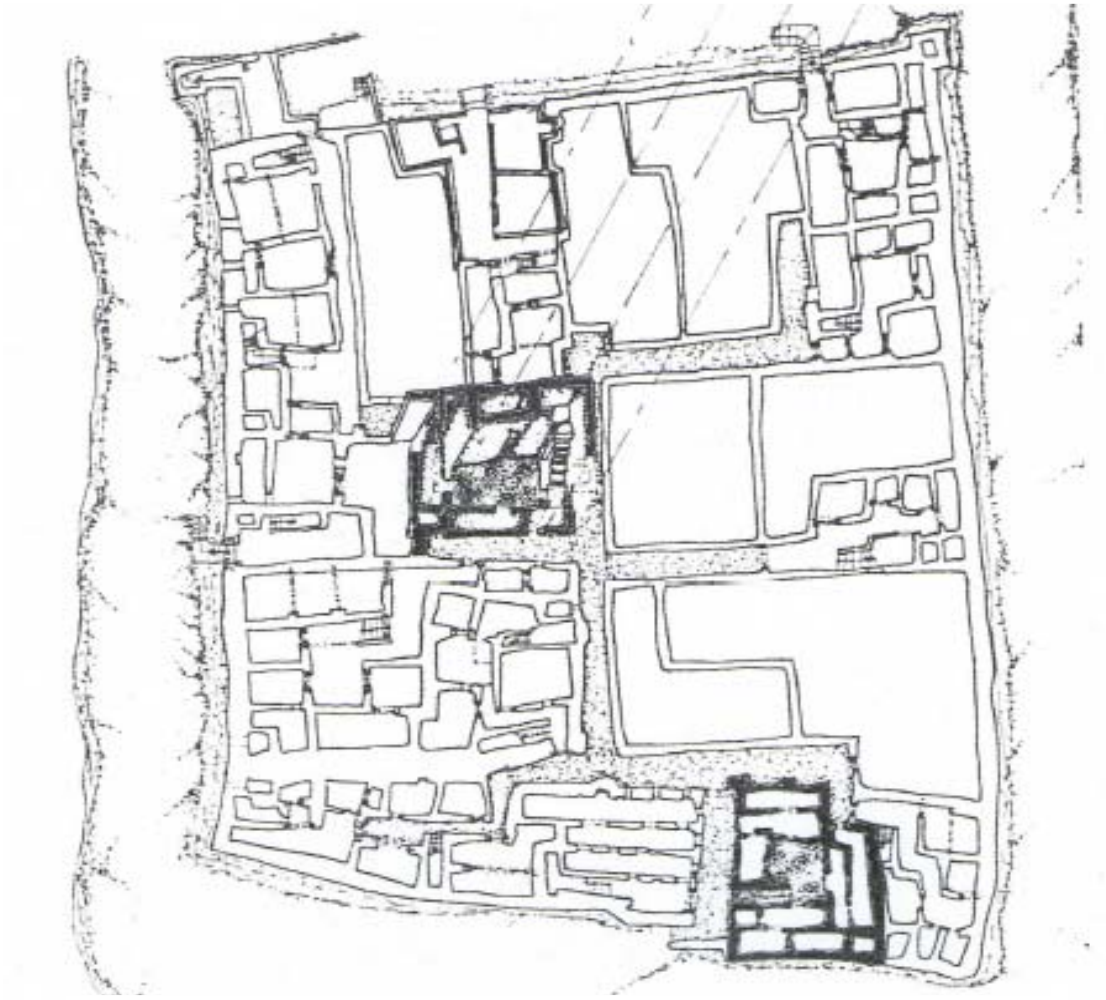


Figure III.7: Habitation à organisation centralisée autour de la Rahba. (Source : S. Haoui Bensaada) (AghemTazeguerth)

En dehors de sa fonction de filtre, elle peut servir au regroupement de la famille ou comme lieu pour la sieste en été.

- **La Rahba :** c'est l'espace central qui organise l'habitation, appelé Amestendeht. Par sa forme et sa position, elle régularise l'organisation de toute l'habitation, ainsi que son fonctionnement. Plusieurs activités s'y déroulent, les activités culinaires sont pratiquées dans un coin appelé Ameken N'thimsi. En plus de ses rôles, elle assure l'aération et l'éclairage de toute l'habitation. Elle est entourée de pièces appelées ***Mkhazen***, ou ***Akhebou***, elles ont le rôle de chambres d'enfants et de parents, ainsi que celui de stockage des vivres.
- **La cuisine :** espace servant aux activités ménagères, c'est la première spécialisation des espaces polyvalents à l'origine. Ses activités se prolonge dans la Rahba et dans la terrasse en été.

- **Mkhazen :** nom désignant les pièces (ou Biouts) servant pour dormir ou au stockage des vivres.
- **Escaliers :** ils sont en relation directe avec la Rahba, ils permettent la relation verticale entre le sol et la terrasse.
- **La terrasse :** désignée par le nom Stah, la terrasse est l'espace se trouvant à l'étage, découvert et entouré de murs plus hauts que la hauteur d'un homme debout.

C'est un espace utilisé la journée en hiver et la nuit, pour dormir en été.

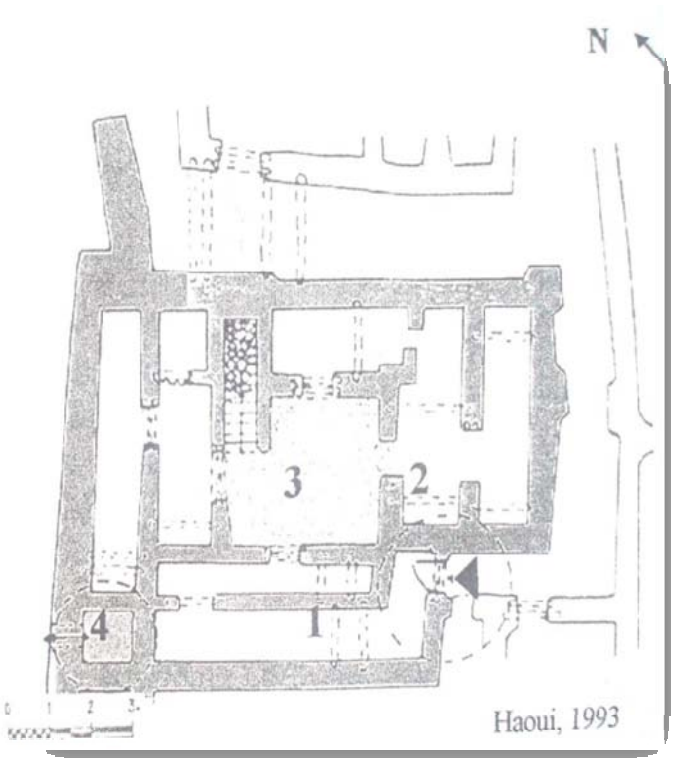


Figure III.8: Organisation d'une habitation à Rahba. (Source : S. Haoui Bensaada)

1. Tiskifine ; 2. Mkhazen ;
3. Rahba 4. Fosse du knif

- **Le knif :** c'est des toilettes fonctionnant à partir de trous réservés dans le plancher et une fosse au rez-de-chaussée. Ce système de rejet à sec permet la récupération des immondices comme engrais naturels pour les cultures.
- **Bit Chiah :** c'est l'espace où l'on garde les animaux, à nombre limité dans la maison. A l'étage ou au sol, cet espace est à proximité du knif, afin de former ensemble l'entité rejet, donnant nécessairement sur l'extérieur.

Dans ce type d'organisation, on remarque que l'habitation est ordonnée par une succession d'espace rectangulaire formant deux couronnes autour de la Rahba, élément central et ordonnateur de toute l'habitation.

III.2.2 L'habitation à organisation linéaire (à Sabat)

Elle se caractérise par un espace linéaire organisateur le Sabat. Cette organisation est bien illustrée dans la parcelle à configuration géométrique rectangulaire profonde.

La Rahba existe mais elle ne monopolise plus le rôle organisateur, elle occupe une position latérale, comme les autres espaces, où elle se trouve au fond de la parcelle donnant accès à une ou deux pièces, figure III.9. On y remarque la forte relation Sabat-escaliers-terrasse. Elle

illustre une variation synchronique de l'habitation. Notons que toutes les règles de hiérarchie à l'entrée et la position de l'espace rejet à la périphérie de la parcelle sont conservées.

III.2.3 L'habitation a organisation centrale et linéaire (Sabat et Rahba)

C'est une variation diachronique du type, dans laquelle l'espace est organisé par le couple « Sabat - Rahba ». Cette organisation s'adapte à la parcelle carrée ainsi qu'à la parcelle profonde. Elle est due à l'apparition d'un espace nouveau : l'espace réservé à l'invité, situé à l'entrée. Désormais, elle contient les espaces suivants :

III.2.3.1 L'entité entrée

Elle est composée d'un accès, d'une chicane, avec ses différentes formes, d'un sabat (couloir), de Bit Eddiaf et enfin d'un escalier se trouvant à l'entrée.

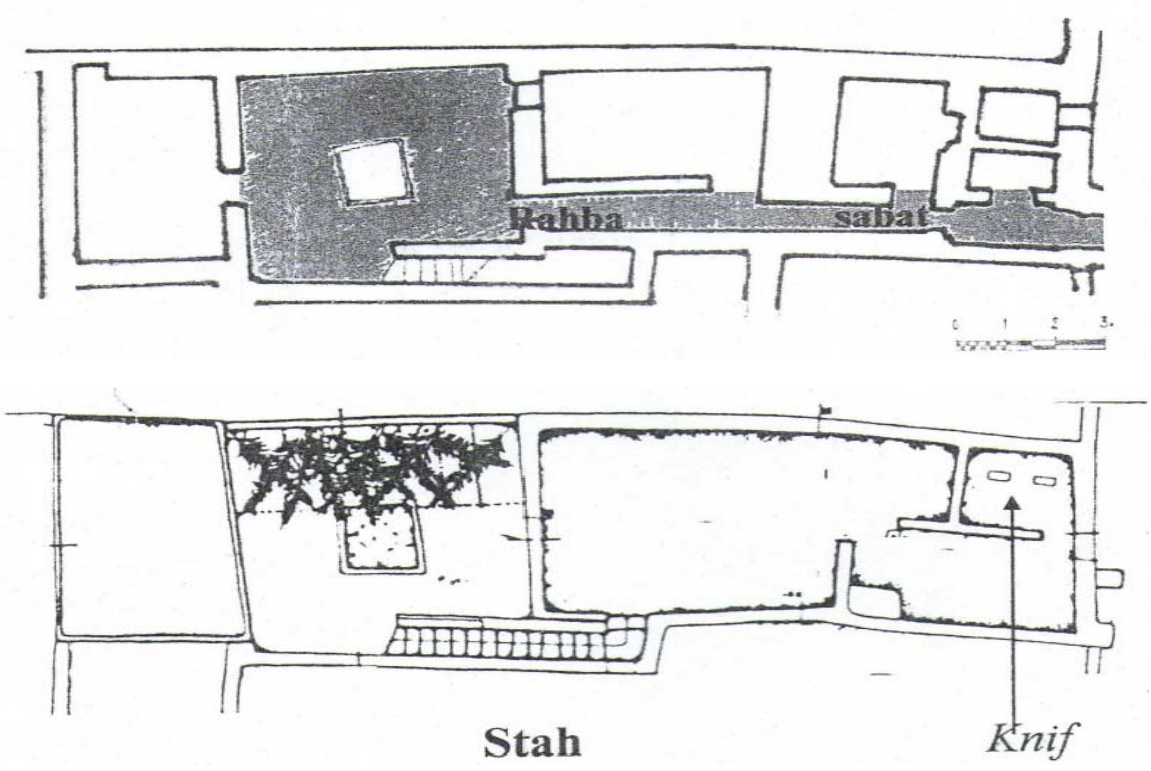


Figure III.9: Organisation linéaire (à sabat), (Source : S. Haoui Bensaada).

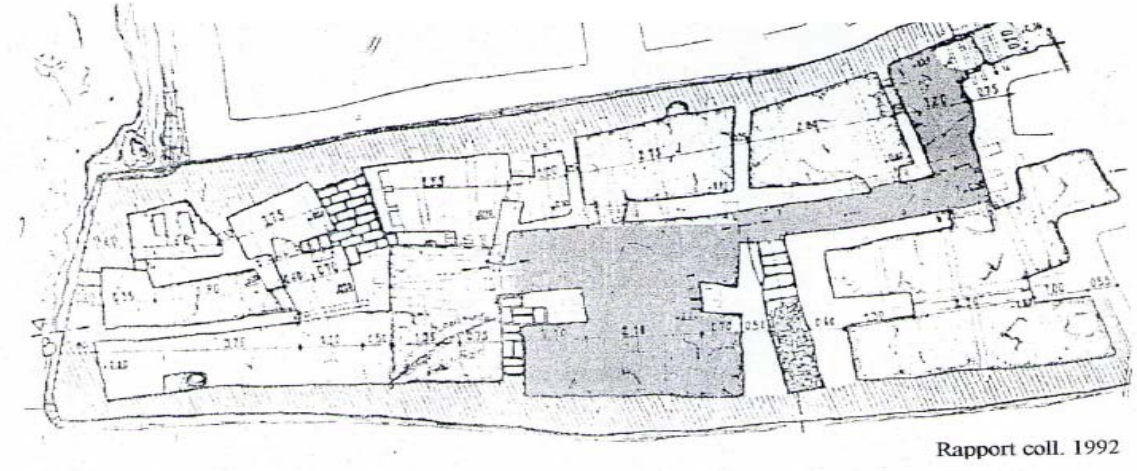


Figure III.10: Organisation spatial dans un espace rectangulaire, (source : Haoui Bensaada).

III.2.3.2 L'entité centre

Elle garde la même organisation avec la dominance de la Rahba autant qu'espace distribuant l'espace famille. Elle donne accès à l'escalier familial donnant sur la partie de la terrasse réservée à la famille et séparée de la partie Diaf par le muret de hauteur d'un homme afin de préserver l'intimité de la vie familiale.

Sa transformation réside dans la réduction de ses dimensions. Elle reste toutefois l'espace centrale de l'habitation et le lieu de concentration de la vie familiale et des pratiques sociale.

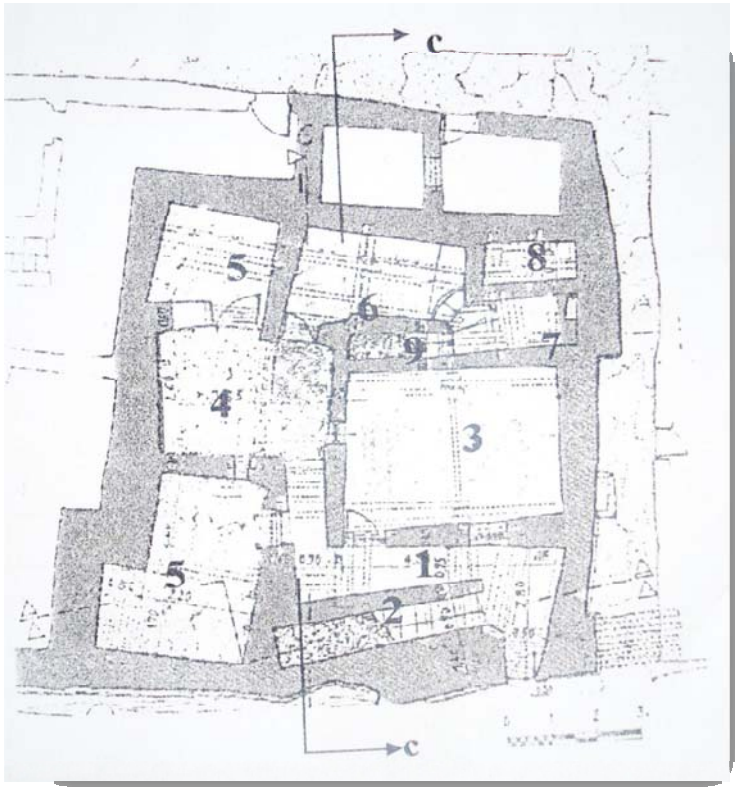


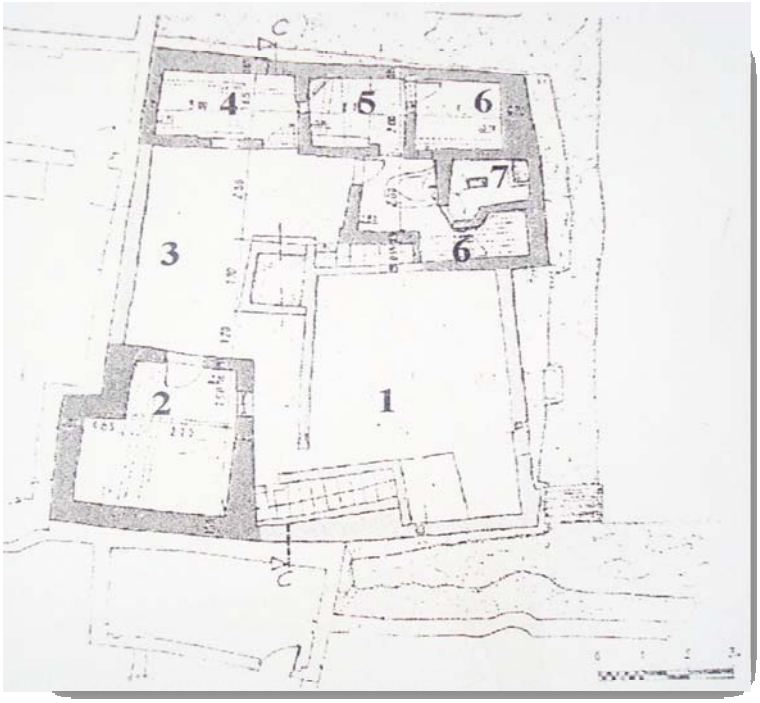
Figure III.11: Habitations à organisation composite. (Source : S. Haoui Bensaada)
Apparition de spécialisation d'espace.

Entité entrée :	***Entité centre :***	***Entité Rejet :***
1. Sabat	4. Rahba	7. Maghsel
2. Escaliers	5. Bit	8. Fosse du knif
3. Bit Eddiafs	6. Couzina	9. Escaliers familiales

On remarque l'introduction d'autres espaces se spécialisant par rapport aux activités ménagères :

- **La cuisine** : espace important nécessitant un rejet des eaux ménagères à l'extérieur, surtout avec l'introduction de l'eau courante.
- **El Maghsel :** coin réservé à la lessive et à la douche, se trouvant généralement à proximité de la cuisine et nécessitant le même mode d'élimination des eaux ménagères qui se fait par l'adduction de l'eau à l'extérieur.

Cette organisation tend à se stabiliser et à être celle qui s'adapte le plus aux dernières tendances de l'habitation : le Sabat desservant la partie réservée aux invités : Bit Eddiaf, escaliers et terrasse. Il mène aussi à la Rahba, au fond de la parcelle, qui organise et distribue l'espace familiale. Figure III.11 et III.12.



I. Espace Dif :
   1. Terrasse Dif
   2. Chambre

II. Espace famille
   3. Terrasse famille
   4. Makhzen
   5. Coin four

III. Espace Rejet :
   6. Douche
   7. Knif.

Figure III.12: Organisation spatial a l'étage (Source : S. Haoui Bensaada)

III.3 Les éléments et étapes de la construction d'une maison ksourienne

III.3.1 Les techniques de construction en terre crue dans la région

La région de Timimoune recèle une variété de pratiques constructives en terre crue. Nous rencontrons le procédé de la terre creusée[92] dans l'habitat troglodytique creusé horizontalement sur les parois des flancs rocheux surplombant les oasis. Ce type d'habitat est très ancien et est abandonné actuellement sauf pour certaines cavités qui sont utilisées pendant

Figure III.13: Habitations troglodyte au ksar de Taguelzi (Source : PNUD Alger 2007)

[92] Construction en terre, l'architecture traditionnelle de charouine et de Timimoune, PNUD, Alger, 2007

les saisons chaudes. Nous pouvant aussi rencontrer le procédé de la terre empilée[93] au niveau des ksour fortifiés.

Ce procédé est moins utilisé, il consiste à empiler des boule de terre afin de constituer les murs, les rangés de terre sont intercalées par des rangé de pierre de taille moyenne.

Les murs sont réalisés par tranche d'environ 1 mètre de haut à chaque fois avec un intervalle de quelques jours entre chaque tranche.

Figure III.14: Mur réalisé selon le procédé de mur empillée, (Source : PNUD Alger 2007).

Le procédé de terre moulée est le plus rencontré de nos jours. La pratique ancienne moulait la terre à la mains, actuellement on utilise des moule métalliques ou en bois qui donnent aux blocs de thob une forme plus régulière.

Figure III.15: Couverture en terre en cours de réalisation. (Source : PNUD Alger 2007).

Le procédé de la terre couvrante est utilisé pour la réalisation des toitures. La couche de terre repose sur un tapis de paille posé sur des feuilles de palmier, l'ensemble repose sur des demi-troncs de palmiers appuyés aux murs latéraux. Les couvertures pesantes sont reprises par des murs épais ou des piliers massifs en terre.

III.3.2 La préparation du Thob

Contrairement à d'autres traditions, il n'y a pas de maîtres maçons qui concentrent le savoir-faire et à qui les habitants font appel pour leurs travaux. Dans le ksar, la tradition de ***« Touiza »***, même si elle est en recul, veut que chaque propriétaire puisse avoir l'aide nécessaire pour la réalisation de sa maison. La touiza permet donc de diffuser les pratiques constructives qui deviennent un savoir-faire collectif.

[93] Ibid.

La solidarité se manifeste aussi dans l'emprunt des outils de construction, notamment les moules à thob. Aussi, il n'est pas rare de voir un modèle confectionné arbitrairement par une personne imposer le format des blocs de thob dans tout le ksar.

Pour le choix du gisement de terre, les habitants de chaque ksar ont leur propre site qui se trouve généralement dans les lits d'oued. Il arrive aussi que les habitants recyclent la terre d'une maison abandonnée.

L'eau est rajoutée a la terre sans aucun autre aditif, la patte obtenue et ferme et assez malléable pour le façonnage des briques de thob.

Pour le stockage des blocs de thob : le matériau est préparé, laisser sécher et stocké sur le lieu du chantier. Avant le démarrage des travaux la quantité suffisante doit être prête.

Le moule métallique de 15cm x 30cm x 17cm sans fond est muni d'anses pour faciliter la manipulation.

La préparation se fait sur le sol sableux du ksar. Aucun autre outillage n'est utilisé.

Les morceaux de pierre sont rajoutés après une première couche de terre pour limiter le retrait.

La couche de finition du bloc de thobe est battue à la main.

Le moule est retiré selon la technique de la goutte d'eau. Le métal facilite la production car il ne colle pas à la terre contrairement au bois.

Le bloc de thoub est laissé sécher au soleil sur le sol sableux. Les minéraux dans le sol donnent cette couleur rougeâtre aux blocs.

Figure III.16: Vue d'une maison en chantier. (Source : PNUD Alger 2007).
Nous pouvant voir sur un côté la terre ramenée pour la réalisation des travaux.

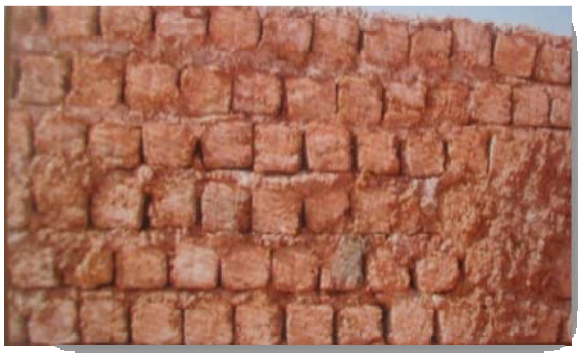


Figure III.17: Mur réalisé en blocs de thob de forme régulière, (source : PNUD 2007)

Figure III.18: Mur réalisé en blocs de thob moulé à la main, (source : PNUD 2007)

III.3.3 Les murs

Ils sont en briques d'adobe, d'épaisseur variable de 30 à 50 cm. On trouve aussi des murs en pisé d'épaisseur moyenne de 50 cm.

L'utilisation de pierres permet de stabiliser la terre et limiter son retrait. Les murs réalisés selon ce procédé sont plus durable.

L'enduit de ce type de murs consomme autant de terre que la quantité qui a servi à sa réalisation[94].

Les murs réalisés en blocs de thob moulés à la main demandent beaucoup d'attention lors de la mise en œuvre car les vides entre les blocs de thob facilitent la prolifération des termites. Ce type de mur pose le problème de chaînage au niveau des angles car il laisse beaucoup de vides.

[94]Construction en terre, l'architecture traditionnelle de charouine et de Timimoune, PNUD, Alger, 2007.

La forme cubique des blocs de thob a permis de résoudre le problème de chaînage au niveau des angles. L'appareillage des blocs est facilement maîtrisable.

III.3.4 Les soubassements

Les murs sont généralement construits sur des soubassements en pierres, qui peuvent atteindre 1 m de hauteur, pour qu'ils soient protégés des remontées capillaires et des eaux de pluie, même si ces dernières se font rares. Le soubassement est souvent une continuité du mur de fondations.

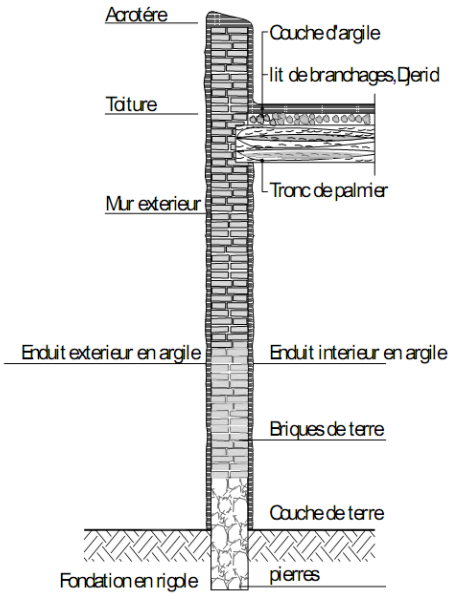


Figure III.19: Système constructif des habitations ksourienne, (Source : PNUD Alger 2007).

III.3.5 Les piliers

Les murs sont parfois raidis par des piliers carrés en briques de terre, de 55 à 75 cm de côté, ils sont placés soit au milieu des pièces, soit adossés aux murs. Ils sont munis de corbeaux à leurs sommets.

III.3.6 Les linteaux

Ce sont des planches en bois de section rectangulaire avec des ancrages de 30 à 50 cm.

III.3.7 Les Fondations

Elles sont généralement filantes de 30 à 50 cm de profondeur et de 50 à 70 cm de largeur, elles sont en pierres liées avec un mortier de terre crue.

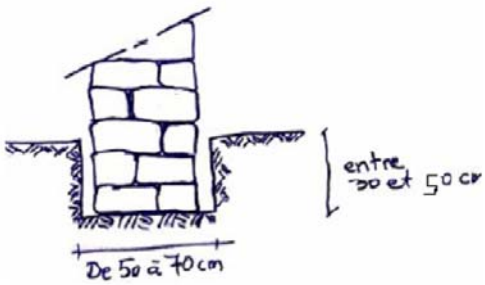


Figure III.20: Dimensions des tranchés de fondations

III.3.8 Les planchers

Ils sont constitués de troncs de palmier posés sur les corbeaux qui se trouve à la tête des murs ou des piliers, des branchages de palmier sont posés par la suite et recouverts d'une couche de terre de 25 à 30 cm et étalée sur toute la surface. La couche de finition est constituée de mortier de chaux.

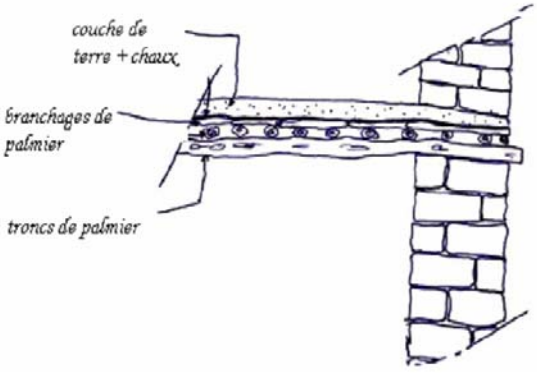


Figure III.21: Eléments constituant le plancher

Les planchers sont réalisés après séchage des murs. La terre est de même composition que pour les blocs de thob à laquelle on rajoute de la paille. La peinture à la chaux permet d'étanchéifier la surface, sur les terrasses accessibles, le sable tapisse aussi les surfaces.

III.3.9 Les escaliers

Les escaliers sont réalisés à l'aide d'une paillasse en bois de palmier au-dessus de laquelle sont façonnées les marches en terre.

Figure III.22: Escalier en terre, (Source : personnelle)

III.3.10 Traitement de surfaces

Pour la couche de finition d'enduit spécifique à la région de Timimoune, les boules de terre sont projetées sur le mur après une couche de préparation qui colmate les interstices entre les blocs de thob. Cette couche de finition est appliquée de haut en bas sur le mur. On peu aussi avoir des finitions d'enduit en carreaux comme à l'entrée de ce passage couvert figure III.24.

Ce traitement de surface figure III.25 est réalisé avec un enduit en ciment. Les boules d'enduit plus effilées sont jetées à la spatule.

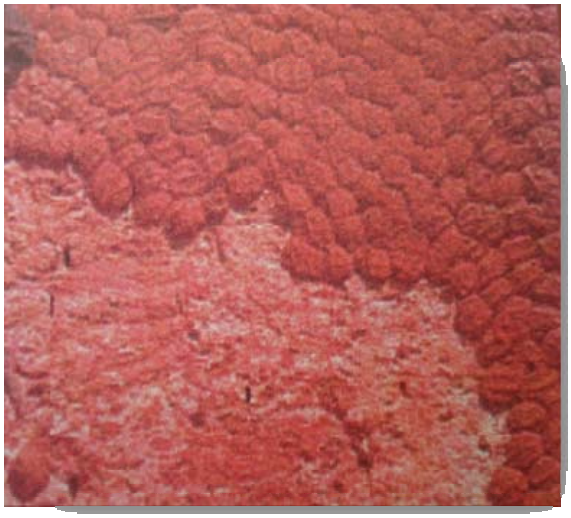


Figure III.23: Enduit spécifique à la région de Timimoune, (source : N. Baloul)

Figure III.24: Finition d'enduit
(source: PNUD 2007)

Figure III.25: Traitement de surface
(source: PNUD 2007)

III.3.11 Les ouvertures et les décorations

Les ouvertures sont limitées, de dimensions réduites et donnent généralement sur les cours. Les dimensions des fenêtres varient de 40 x 50 cm à 50 x 60 cm. Pour les portes, la largeur est de 70 à 80 cm et la hauteur de 170 à 180 cm.

La porte principale d'accès à la maison ksourienne est réalisée avec du bois de palmier et se ferme grâce à une serrure accessible de l'extérieur depuis un trou à mi-hauteur dans le mur.

Il est à noter que de l'extérieur, les habitations ne renseignent en rien sur le statut social de la famille. L'habitation ksourienne traditionnelle n'est pas une architecture de façade, seule parfois les portes d'accès sont décorées. Certaines portes sont à tableaux décorés tandis que d'autre se résument à de simple percements sur les murs de façades.

Les autres rares décorations se voient sur les hauts des murs de façades. Ces traitements particuliers se distinguent du reste des murs grenelés par leurs couleurs ou leurs textures lisses. Sur les terrasses des maisons les décorations permettent aux femmes de jeter un regard à l'extérieur sans être vues. Nous pouvons distinguer plusieurs types.

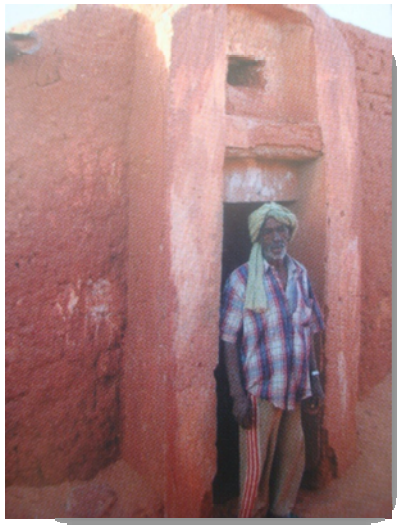


Figure III.26: Traitement d'une porte dans la région de Taguelzi. (Source : PNUD Alger 2007).

Figure III.27: Traitement du tableau de la porte dans la région de Timimoune

Figure III.28: Décoration en dents de scie sur le haut du mur de clôture d'une oasis, (Source : PNUD 2007)

Figure III.29: Décoration en bande ajourée en forme de double pointe de flèche vers le haut et vers le bas, sur une terrasse, (source : PNUD 2007)

III.4 Pathologies et désordres des constructions Ksouriennes

Par pathologie, on entend l'ensemble des états et de signes par lesquels se manifestent les désordres sur les constructions. Une étude pathologique comprend généralement les étapes suivantes :

- l'observation et l'analyse des symptômes et de leur processus de formation, des conditions d'environnement et des conditions de mise en œuvre ;
- l'établissement d'un diagnostic sur les causes probables et sur les risques d'évolution des désordres ;
- la recherche des remèdes et traitements curatifs à envisager.

Les pathologies dont souffrent les constructions ksourienne, sont généralement celles des constructions en terre crue. Ces pathologies peuvent être classées en deux catégories à savoir : les pathologies humides et les pathologies structurelles.

III.4.1 Pathologies humides

Elles sont dues essentiellement à l'action de l'eau et/ou de l'humidité et elles se manifestent comme suit :

−érosion des murs ;

−présence de coloration foncée de terre mouillée sur les murs ;

−présence d'eau en bas des murs (remontées capillaires) ;

−gonflement et décollement des enduits ;

−pourrissement des bois ;

−remontée du niveau du sol extérieur.

III.4.2 Pathologies structurelles

Les pathologies structurelles peuvent présenter des aspects inquiétants et elles peuvent aussi être les conséquences des pathologies humides. Les désordres avec lesquels elles se manifestent sont :

−écartement des murs ;

−fléchissement des murs (formation des creux et ventres) ;

−déchaussement des briques ;

−écroulement des murs ;

−présence de fissures aux liaisons et sur la hauteur des murs ;

−fléchissement des linteaux ;

−fléchissement et dégradation des bois des planchers.

Figure III.30: Trace d'humidité dans les soubassements

Figure III.31: Erosion d'un mur en adobe

Figure III.32: Pourrissement des bois

Figure III.33: Décollement des enduits et fissuration des murs

Figure III.34: Fissures sur les murs

Figure III.35: Décollement des enduits

Figure III.36: Effondrement total des maisons ksourienne

Figure III.37: Déchaussement des briques

Figure III.38: Fléchissement d'un mur

Figure III.39: Fléchissement des poutres en bois des planchers

CONCLUTION

L'architecture traditionnelle en terre crue dans la région de Timimoune montre une grande richesse dans les procédés de production et dans les formes architecturales. Ce patrimoine, qui illustre la diversité formelle de l'architecture algérienne et ses fondements culturels devrait inspirer les réponses en faveur d'une diversification des paysages

architecturaux et urbains des villes algériennes aujourd'hui menacées par une monotonie formelle insouciante des particularités régionales.

Seule une bonne compréhension des attributs de cette architecture, sa diffusion et surtout l'implication et l'engagement des professionnels du bâtiment conscients de ses qualités, pourront assurer son renouveau. Les actions de sauvegarde seules ne suffiront probablement pas et risqueront de confiner cette tradition architecturale au statut de musée. Aussi faudra-il développer et valoriser les savoir-faire locaux au service de projets contemporains.

Et pour cela une connaissance accrue du matériau terre est nécessaire, sa résistance, sa durabilité, ses performance thermique. Et c'est à cette dernière particulièrement que nous allons nous intéresser dans le chapitre qui suit.

QUATRIEME CHAPITRE

PERFORMANCES THERMIQUES DES BRIQUES DE TERRE

Introduction

Contrairement aux matériaux de construction industrialisés, les matériaux naturels sont très peu consommateur d'énergie lors de leur fabrication et transformation, la fabrication d'un mètre cube de béton requiert 400 à 800 kWh[95], alors que la terre requiert 5 à 10 kWh. L'estimation des propriétés thermo-physiques de ces matériaux est primordiale pour la création d'une ambiance saine et un climat de confort à l'intérieur d'une habitation.

Notre choix s'est porté sur la terre qui connaît actuellement un regain d'intérêt suite à la crise énergétique et du logement. Dans la plupart des pays en voie de développement, le revenu d'une majore partie d'habitants ne leur permet guerre de construire ou d'acquérir un logement. La terre crue matériau naturel, disponible en abondance reste une alternative, il n'implique souvent ni achat, ni transport, ni transformation importante, de plus elle est facilement recyclable après usage et surtout, associée à une conception architecturale bioclimatique, procure un certains confort thermique aux occupants.

Pour argumenter le choix de la terre crue, nous avons basé notre étude sur un inventaire des caractéristiques thermo-physiques de ce matériau à savoir la conductivité, la diffusivité, et l'effusivité thermiques ainsi que la chaleur spécifique. Une métrologie de ces différentes caractéristiques sera développée, puis un choix sera porté et justifié. Sur la base des essais au laboratoire deux caractéristiques thermo-physiques seront déterminées, puis le reste est une affaire de calcul mathématique à travers des relations définies par différents auteurs comme P. Meukam, Jannot et A. Degiovani.

La métrologie thermo-physique sera suivie d'un projet architectural qui s'inscrit dans le sens de la durabilité c.à.d. un habitat écologique à base de matériaux locaux et une conception architecturale qui non seulement prend en charge le critère climatique mais s'inspire grandement de toutes les notions architecturales bioclimatiques comme la compacité architecturale, l'orientation par rapport au soleil, les dimensions des ouvertures, la ventilation naturelle, pour ne citer que cela.

Cette modeste expérience vient justifier les qualités, tant thermiques qu'environnementales du matériau terre crue, un matériau aujourd'hui délaissé, abandonné, méprisé, marginalisé. Elle justifie ces qualités par une méthode scientifique expérimentale basée sur des essais au laboratoire et une conception architecturale harmonieuse et soucieuse de la problématique du confort thermique dans un climat chaud et aride.

[95] P. Meukam, valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiments, Yaoundé, décembre 2004

III.1 Les grandeurs thermo-physiques

III.1.1 La conductivité thermique

La conductivité thermique est le flux de chaleur, traversant un matériau d'un mètre d'épaisseur pour une différence de température de 1 degré entre les deux faces. Elle s'exprime en watts par mètre et par degré Celsius (**W/m.°C**). Cette valeur permet de quantifier le pouvoir isolant de chaque matériau. Plus elle est faible, plus le matériau sera isolant[96].

La conductivité thermique est l'une des propriétés thermo-physiques la plus recherchée, elle mesure donc la faculté qu'a la chaleur de traverser plus ou moins aisément un corps en régime permanent. Elle dépend de la nature du corps, de la quantité et de la qualité des pores, du degré d'humidité et de la température.

III.1.2 Diffusivité thermique

La diffusivité thermique exprime la capacité d'un matériau à transmettre (rapidement) une variation de température. C'est la vitesse à laquelle la chaleur se propage par conduction dans un corps. Elle s'exprime en m²/heure. Plus la valeur de diffusivité thermique est faible, plus le front de chaleur mettra du temps à traverser l'épaisseur du matériau, et donc, plus le temps entre le moment où la chaleur parvient sur une face d'un mur et le moment où elle atteindra l'autre face est important. On parle également de déphasage. (Un déphasage de 10 à 12 h permet d'atténuer les différences de température entre le jour et la nuit).

La diffusivité thermique est le rapport de la conductivité d'un corps à sa capacité thermique[97]:

$$a = \frac{\lambda}{\rho . Cp}$$

Où :

a : diffusivité thermique en m²/s ;

λ : conductivité thermique en W/m °C ;

ρ : masse volumique en kg/m^3 ;

Cp : chaleur spécifique en kJ/kg °C.

[96] A. Merzeg, la réhabilitation thermique de l'habitat contemporain en Algérie, mémoire de magistère, UMMTO, octobre 2010, P. 57

[97] A. Degiovani. « Diffusivité et méthode flash ». In revue générale de thermique n° 185. France 1977.

III.1.3 La chaleur spécifique

La chaleur massique Cp d'un corps correspond à la quantité de chaleur dont il a besoin pour que la température d'une unité de masse s'élève d'un degré. Ceci met en évidence l'importance de la chaleur massique pour tous les calculs de stockage de chaleur ou de transport de chaleur. D'autre part, la chaleur massique intervenant dans la diffusivité thermique, sa mesure est souvent nécessaire.

$$Cp = \frac{Q}{m.\Delta t}$$

Où : Q- quantité de chaleur J ;

m- masse du corps ;

Δt- différence de température °C.

III.1.4 L'effusivité thermique

L'effusivité thermique des matériaux, parfois dénommée « chaleur subjective », représente la rapidité avec laquelle la température superficielle d'un matériau se réchauffe. Plus le coefficient d'effusivité thermique est bas, plus le matériau se réchauffe vite.

L'effusivité caractérise la capacité des matériaux à réagir plus ou moins rapidement à un apport de chaleur intérieur au logement, que cet apport soit le fait d'une source interne ou du rayonnement solaire. Plus l'effusivité est grande, plus la chaleur interne à la pièce sera absorbée rapidement par le mur, et donc, plus l'élévation de température dans le local sera limité. On privilégiera les matériaux ayant une grande effusivité. Elle est donnée par la formule suivante et s'exprime en W.s0,5/m².°C[98]:

$$E = \sqrt{\lambda.\rho.Cp}$$

Cette capacité ne signifie pas que la température du mur s'élève rapidement, puisqu'une grande effusivité implique une valeur élevée de la capacité thermique, ce qui garantit de faibles variations de température de paroi et une grosse quantité d'énergie stockée.

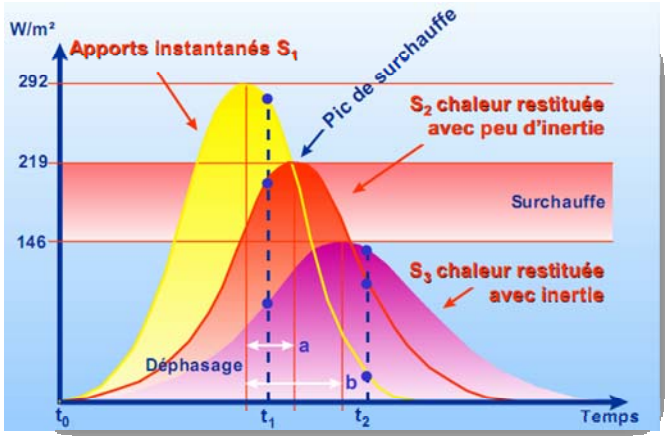


Figure IV.1: Réaction d'un local à inertie forte et d'un local à inértie faible en présence d'apports solaires, (source : A. De Herde & al (2005)

[98] J. L. Izard. Architecture d'été – construire pour le confort d'été. Ed. Edisud. Paris 1993. P. 68

III.1.5 L'inertie thermique des matériaux

C'est la propriété d'un matériau lui permettant de stocker l'énergie dans la masse du bâtiment et d'amortir les variations de température[99]. Elle est caractérisée par la capacité thermique. Ce comportement des matériaux est un principe fondamental pour la conception bioclimatique des bâtiments. Elle contribue au confort thermique de l'habitation en atténuant les variations de pointes de températures. En hiver, une forte inertie thermique permet d'emmagasiner la chaleur de la journée due aux apports solaires puis de la restituer plus tard dans la journée lorsque la température extérieure commence à chuter. En été, une forte inertie thermique liée à une ventilation nocturne permet d'atténuer les surchauffes durant la journée.

Associée à l'isolation thermique des bâtiments, l'inertie thermique est un critère majeur du confort hygrométrique, car, à eux deux, elles favorisent à la fois le bien-être des personnes et les économies d'énergie grâce aux matériaux qui emmagasinent et restituent petit à petit chaleur ou fraîcheur, permettant un réchauffement ou un refroidissement progressif.

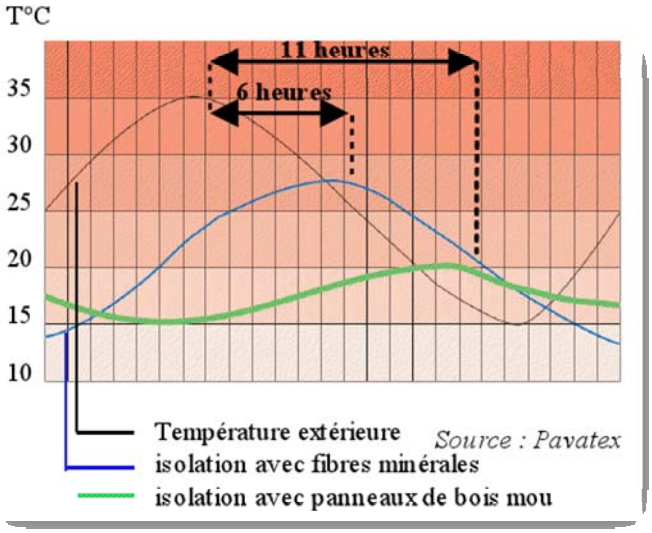


Figure IV.2: Evolution des températures sous toiture pour des structures isolantes différentes, (Source: Encyclopédie interactive Wikipédia)

III.1.6 La capacité thermique

La capacité thermique d'un matériau est le produit de sa masse volumique par sa chaleur spécifique, cette dernière étant la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de masse de 1° C. La capacité thermique est donc la quantité de chaleur mise en réserve lorsque sa température augmente de 1° C.

Plus la capacité thermique est élevée, plus la quantité d'énergie que peut stocker le matériau pour que sa température s'élève d'un degré est grande. Les variations de températures des parois et de l'air seront d'autant plus faibles que la capacité thermique des matériaux sera plus forte.

[99] T. Salomon et S. Bedel, La maison des [mega] watts, Le guide malin de l'énergie chez soi. Ed. Terre vivante. Mens 2004. P.16.

III.2 Les principales méthodes de mesure des propriétés thermo-physiques

La conductivité thermique λ, la chaleur spécifique Cp, l'effusivité thermique E et la diffusivité thermique a sont des paramètres thermo-physiques importants dans l'étude des transferts de chaleur dans les matériaux, c'est ainsi qu'ils sont essentiels au niveau des procédés de séchage, de chauffage, de refroidissement et en thermique du bâtiment.

Ces paramètres peuvent être mesurés par diverses méthodes, mais la connaissance de deux quelconques d'entre elles entraîne la détermination des autres[100] à l'aide des relations :

$$a = \frac{\lambda}{\rho Cp}. \qquad \text{et} \qquad E = \sqrt{\rho Cp \lambda}$$

La mesure de la conductivité thermique est d'une grande importance quand on désire étudier les échanges de chaleur dans un système. Un grand nombre de méthodes ont été déjà utilisées pour déterminer la conductivité thermique de différents matériaux. Quelques-unes d'entre elles développent des théories basées sur les équations de conduction de la chaleur.

Les méthodes de mesure de la conductivité thermique peuvent être classées en deux grandes catégories : les méthodes à état stable et les méthodes à état transitoires.

III.2.1 Les méthodes en régime permanent

Ces méthodes nécessitent un long temps de manipulation et la variation de l'humidité au cours du temps entraîne ainsi des résultats entachés d'erreurs. Cependant parmi celles-ci, la méthode de Lee (Avery et Ingran, 1976) donne des résultats satisfaisants, mais elle exige plus de temps surtout pour des matériaux à faible conductivité thermique. Les mesures statiques supposent l'utilisation des équations de Fourier dans l'état stationnaire. Il est nécessaire de déterminer la densité de flux de chaleur et le gradient de température le long de la normale à l'échantillon. Le régime permanent permet d'obtenir des mesures d'une grande précision mais le temps qu'il faut pour atteindre l'équilibre peut constituer un long processus si la conductivité est très faible.

III.2.1.1 Méthode de la plaque chaude gardée

Le principe du montage expérimental consiste à maintenir une différence de température ΔT entre deux plaques, A et B, planes, parallèles et portées respectivement aux températures constantes T_A et T_B. Un échantillon du matériau à étudier est placé entre les deux plaques

[100] P. Meukam, valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiments, Yaoundé, décembre 2004, P.26.

(figure IV.3). La méthode de la plaque chaude gardée a été développée pour la mesure de faibles conductivités thermiques[101] (Gustafsson et al 1981 ; Paradhan et al 1991).

Soit e l'épaisseur de l'échantillon et ϕ le flux thermique en régime stationnaire par unité de surface, transféré d'une plaque à l'autre. La conductivité thermique λ du matériau est donnée par : $\lambda = \frac{\varphi e}{\Delta T}$

Avec : $\Delta T = T_A - T_B$.

La résistance thermique est d'autant plus élevée que la conductivité λ est petite.

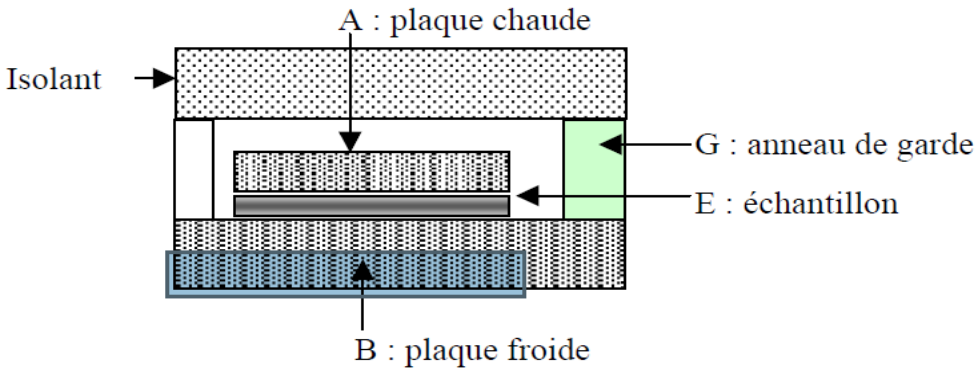


Figure IV.3 : Schéma de principe de la mesure de la conductivité thermique par la méthode de la plaque chaude gardée, (Sources P. Meukam)

III.2.1.2 Méthode des boîtes

Le principe de cette méthode, mise au point par le laboratoire d'Etudes Thermiques et Solaires de l'Université Claude Bernard de Lyon, est schématisé sur la figure IV.4

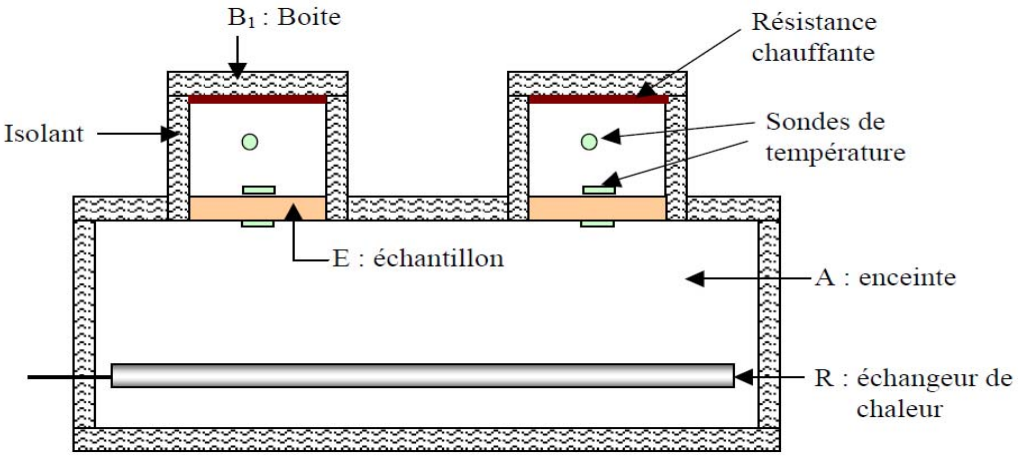


Figure IV.4: coupe du dispositif « des boîtes », (Sources P. Meukam)

[101] S. E. Gustafsson, E. Karawaski, and N. N. Khan, Determination of the thermal conductivity tensor and the heat capacity of insulating solids with the transient hot-strip method, 1981, P. 2596- 2600

- Le volume A est maintenu à une température plus basse que les deux boîtes grâce à un échangeur basse température R relié à un cryostat. Les plaques chauffantes C situées dans les boîtes créent un gradient de température à travers l'échantillon E ;
- En régime permanent, les mesures du flux de chaleur émis par C et des températures sur les faces supérieure et inférieure de E permettent de calculer les caractéristiques thermiques de l'échantillon.

III.2.2 Les méthodes en régime transitoire

Ces méthodes sont le plus souvent utilisées pour des matériaux biologiques qui sont généralement hétérogènes et ont un taux d'humidité élevé. La méthode du Fil Chaud est l'une des méthodes à état transitoire la plus utilisée. La méthode transitoire suppose l'équation différentielle complète de l'écoulement de chaleur[102]. La méthode dynamique ne donne pas en général une grande précision.

Nous présentons ci-dessous quelques méthodes de mesure de la conductivité thermique dont nous exposons rapidement les principes.

Nous allons, en nous appuyant sur les travaux de Jannot (2003) et de Meukam (2004), présenter les différentes méthodes de mesure des propriétés thermo-physiques par le fil chaud et le plan chaud.

III.2.2.1 Méthode de la plaque chaude avec excitation sinusoïdale

Cette méthode est basée sur le système à plaque chaude encore appelée plan chaud. La figure 5 représente le schéma de principe de la méthode qui consiste à générer un signal thermique périodique sur la face inférieure de la paire d'échantillons, tout en maintenant constante la température de la face supérieure, à l'aide d'un dispositif de refroidissement à plaque d'eau froide. Ce signal est produit par un flux de chaleur intermittent à l'intérieur de la plaque chaude. Lorsque le régime périodique est établi, les signaux de température et de flux de chaleur peuvent être décomposés en série de Fourier, donnant ainsi des signaux sinusoïdaux de même que celle du générateur électrique. Ces termes sinusoïdaux nous donnent la diffusivité et l'effusivité thermique. Il est à noter que le choix de la période du signal dépend de l'épaisseur et de la nature du matériau à étudier. En général, ce choix s'opère de façon à ce que l'hypothèse de température constante de face supérieure de la paire

[102] S. H. Carslaw, et J .C. Jaeger, conduction of heat in solids, Oxford, University press, 1959.

d'échantillons soit vérifiée, tout en évitant d'avoir une amplitude du signal négligeable. Pour un matériau donné, la période du signal croît avec l'épaisseur.

Ce qui va ensuite nous permettre de calculer la diffusivité thermique **a** et l'effusivité thermique **E**.

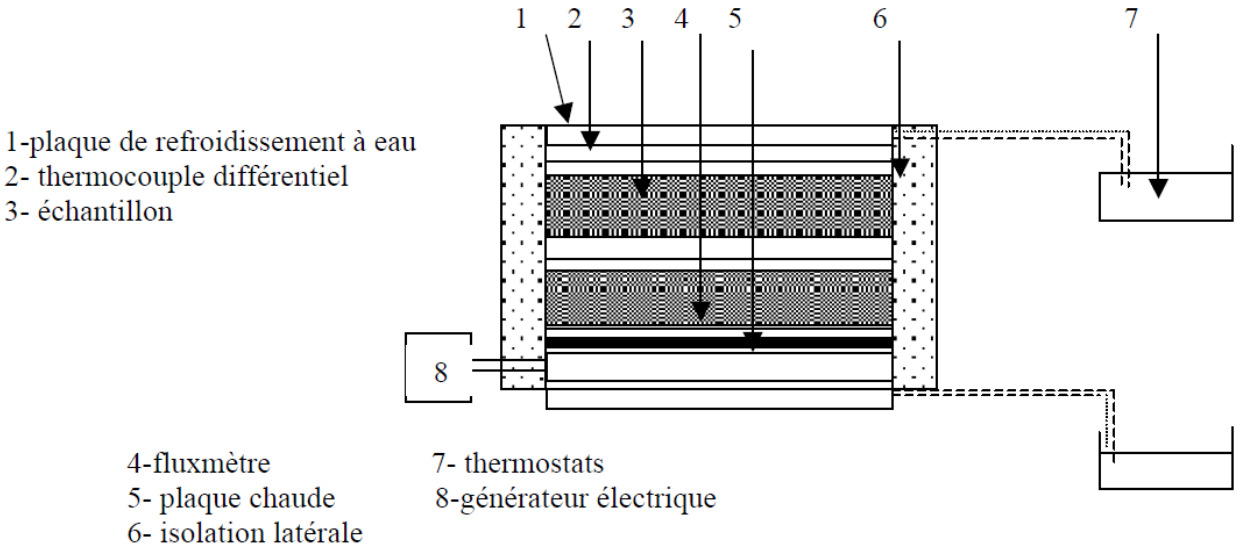


Figure IV.5: dispositif de mesure de la conductivité thermique par la méthode des signaux, (Sources P. Meukam)

III.2.2.2 Mesure de la conductivité thermique par la méthode du fil chaud

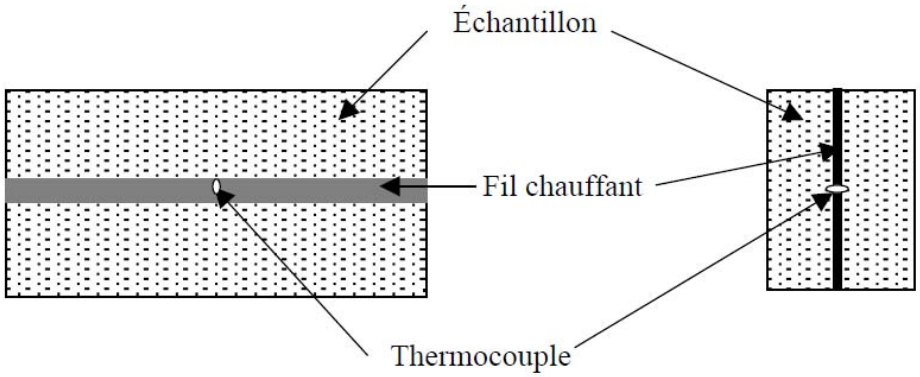


Figure IV.6: schéma de principe de la mesure de la conductivité thermique par la méthode du fil chaud, (Sources P. Meukam)

- ***Principe de la méthode***

Un flux de chaleur constant est appliqué au fil chauffant. Un thermocouple nous permet de relever l'évolution au cours du temps de la température $T_0(t)$ de ce fil. Pendant le temps où la perturbation n'a pas atteint les autres faces c'est-à- dire lorsque l'hypothèse du milieu infini est valide, on peut supposer que le transfert dans l'échantillon autour du fil est radial. La

modélisation de ce transfert de chaleur permet de calculer l'évolution de la température au centre de l'échantillon. Une méthode d'estimation judicieusement choisie de façon à minimiser l'écart entre les courbes théoriques et expérimentales nous permet d'évaluer la conductivité thermique λ.

- ***Modélisation du fil chaud***

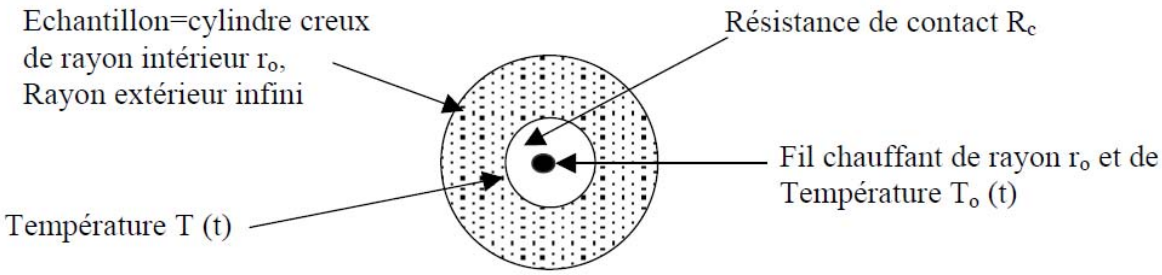


Figure IV.7: Une vue en coupe du fil chaud et de l'échantillon (Sources P. Meukam)

III.2.2.3 Mesure de l'effusivité thermique par la méthode du plan chaud

- ***Principe de la méthode***

Un flux de chaleur constant est appliqué à la résistance chauffante. Et on relève l'évolution de la température $T_0(t)$ au centre de cette même résistance dans ou sur laquelle est placé un thermocouple. Nous supposerons le transfert au centre de l'échantillon unidirectionnel lorsque la perturbation n'a pas encore atteint les autres faces. Une méthode d'estimation des paramètres judicieusement choisie permet d'évaluer l'effusivité thermique.

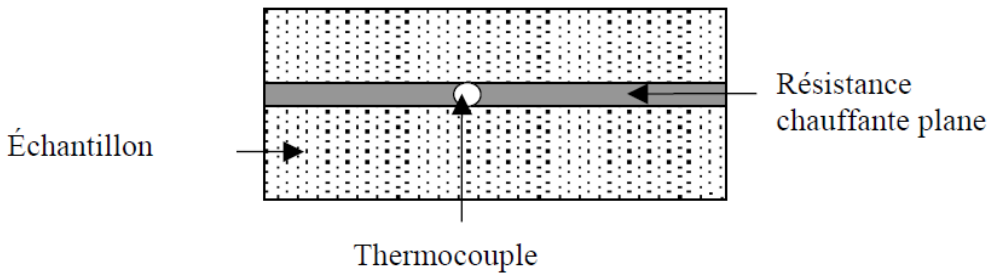


Figure IV.8: schéma du principe de la mesure de la conductivité thermique par la méthode du plan chaud, (Sources P. Meukam)

III.2.2.4 Méthode de mesure de la chaleur spécifique

Pour la mesure de la chaleur spécifique des matériaux dont des propriétés thermo-physiques sont déterminées, Jannot et Meukam ont utilisé la méthode calorimétrique.

- ***Principe de la méthode***

On plonge dans un calorimètre contenant de l'eau froide un solide préalablement chauffé pendant au moins 24 heures dans une étuve dont la température est fixée à 100° C. On relève la température maximale atteinte par l'eau du calorimètre.

Le bilan thermique entre l'instant initial t = 0 (introduction du solide dans le calorimètre) et l'instant t (température maximale atteinte par l'eau du calorimètre) s'écrit :

$$m_s\ c_s\ (T_{s0} - T_{s1}) = m_e\ c_e\ (T_e - T_{e0}) + \int_0^t U\ S\ (T_{em} - T_a)dt$$

Avec :

T_{s1} : température moyenne du solide à l'instant t,

T_{s0} : température initiale du solide (échantillon),

T_e : température maximale de l'eau,

T_{e0} : température initiale de l'eau,

T_{em} : température moyenne de l'eau,

T_a : température de la salle d'expérience.

On déduit la chaleur spécifique du solide $\mathbf{C_s}$ en J/Kg. °C :

$$C_s = \frac{m_e\ T_e - T_{e0}}{m_s\ T_{s0} - T_e}\ C_e \int_0^t \frac{U\ S\ T_m - T_a}{m_s\ T_{s0} - T_e}\ dt$$

Dans cette relation donnant C_s, m_e représente la masse de l'eau et la valeur en eau du calorimètre et ses accessoires. U désigne le coefficient global de pertes thermique.

Conclusion

L'objectif à atteindre lorsqu'on veut réaliser une mesure expérimentale est la précision et la fiabilité des résultats. Le choix d'une méthode de mesure va dépendre de plusieurs facteurs dont les plus importants sont :

- La fiabilité des résultats et la durée de mesure,
- Le coût d'acquisition et d'entretien du matériel ainsi que sa robustesse,
- La disponibilité du matériel.

Les mesures des propriétés thermo-physiques dont il est question dans ce travail ont été le réalisé avec le CT-Mètre au CNERIB.

III.3 Caractérisation thermo-physique

III.3.1 Fabrication des éprouvettes

La terre utilisée pour la réalisation des briques de terre a été prélevé d'une carrière locale déjà exploitée. Cette terre est de couleur rougeâtre avec une composition granulométrique proche de l'intervalle des proportions proposées par CRATerre, à savoir :

- 62% de sable ;
- 14% de limon ;
- 18% d'argile ;
- 6%de gravillon.

Figure IV.9: Presse hydraulique disponible au CNERIB source (auteur)

III.3.1.1 Le choix du stabilisant

Pour le processus de stabilisation du matériau terre et afin d'améliorer les performances mécaniques, notre choix s'est porté sur les matériaux locaux susceptibles de répondre à la demande de stabilisation. Le matériau le plus approprié est le liant minéral : la chaux aérienne.

III.3.1.2 Quantité de stabilisant

Pour des raisons purement économiques, nous avons opté pour un pourcentage moyen de stabilisation, à savoir 5%. Ce pourcentage permettra d'un côté d'améliorer les performances mécaniques de la brique de terre et d'un autre la compétitivité du matériau terre stabilisé par rapport aux différents éléments en béton.

III.3.1.3 Dispositif expérimental de fabrication

Le dispositif expérimental de fabrication des éprouvettes comprend le moule métallique avec ses accessoires et la presse hydraulique.

La presse hydraulique, utilisée pour le compactage, présentée sur la figure IV.9, est la presse se trouvant au CNERIB lieu où ont été effectuées les expérimentations.

III.3.1.4 Préparation des mélange à compacter

III.3.1.4.1 Le tamisage

Permet de ne retenir qu'une granulométrie de diamètre compris inferieur à 12.5 mm.

III.3.1.4.2 Teneur en eau

Pour réaliser le compactage, de l'eau est ajoutée au matériau préalablement séchés jusqu'à la consistance désirée, à savoir jusqu'à ce que le mélange soit aisément malléable. La quantité d'eau nécessaire pour obtenir cette consistance varie entre 18% et 25% de la masse totale.

La teneur en eau représente le pourcentage d'eau contenu dans un échantillon. Elle s'exprime en pourcentage et est calculée de la manière suivante :

$$\omega = \frac{m_h - m_s}{m_s}$$

Avec m_h et m_s représentant respectivement les masses humide et sèche de l'échantillon. Avant de procéder au compactage d'une éprouvette, on prélève une quantité dont on fait l'extrait sec afin de déterminer la teneur en eau du mélange. La masse de chaque éprouvette après séchage est également mesurée juste après la mesure de sa conductivité thermique. On procède ensuite à l'extrait sec en vue de déterminer la teneur en eau de l'éprouvette.

III.3.1.4.3 Séchage des éprouvettes

Le séchage des éprouvettes a été effectué dans une étuve, à une température de 105 °C, jusqu'à une masse constante.

III.3.2 Mesure de la conductivité thermique et de la chaleur spécifique

III.3.2.1 Description du dispositif de mesure

Le dispositif utilisé pour déterminer les valeurs du coefficient de conductivité thermique et de la chaleur spécifique de nos éprouvettes est la méthode du fil chaud. L'appareillage utilisé est le CT-mètre développé par le SCTB, conforme à la norme NF EN 993-15[103].

La méthode du fil chaud permet d'estimer la conductivité thermique d'un matériau et de la chaleur spécifique à partir de l'évolution de la température mesurée par un thermocouple placé à proximité d'un fil résistif.

La sonde, constituée du fil résistif et du thermocouple dans un support isolant en kapton, est positionnée entre deux

Figure IV.10: Réalisation des essais avec le CT-mètre au CNERIB, (Source : auteur)

[103] M. Dahli, N. Baloul. Amélioration des performances du matériau terre crue. XXVIII Rencontres Universitaires de Génie Civil – La Bourboule du 2 au 4 juin 2010.

échantillons du matériau à caractériser. Le CT-mètre, développé au CSTB, utilise cette méthode avec les critères suivants :

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

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

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

Les résultats des valeurs du coefficient de conductivité thermique et de la résistance thermique des éprouvettes sont portés au tableau 1.

III.3.2.2 Résultat de mesure des conductivités thermiques

Tableau IV.6: Résultats expérimentaux de la conductivité thermique du matériau utilisé

Eprouvette	λ (w. m-¹ °C-¹)	E (m)	$R = \frac{e}{\lambda}$ (m^2 °C/w)
Brique de terre comprimée	0.9	0.5	0,555

III.3.2.3 Résultat de la mesure de la chaleur spécifique

Les résultats des valeurs de la chaleur spécifique des éprouvettes, à l'état sec et humide, sont portés au tableau 2.

Les quatre propriétés thermo-physiques, à savoir la conductivité thermique, la diffusivité thermique la chaleur spécifique et l'effusivité thermique sont liées par les relations suivantes :

$$a = \frac{\lambda}{\rho\, Cp} \qquad \text{Et} \qquad E = \sqrt{\lambda . \rho . Cp}$$

Chacune des grandeurs peut être calculée si on connaît les valeurs expérimentales des deux autres grandeurs. Ce qui nous permet de calculer la valeur de l'effusivité thermique ($\boldsymbol{\alpha}$).et de la diffusivité thermique ($\boldsymbol{E}$)

Ce qui nous donne :

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho\, Cp} = \frac{0.9}{2500.1426} = 0{,}00000025\ m^2/s$$

$$E = \sqrt{\lambda.\rho.Cp} = \sqrt{0.9}.2500.1426 = 1791\ J/m^2.\ °C.\ S^{0.5}$$

$$C = \rho.C\rho = 3565\ kJ/m3\ °C$$

Tableau IV.7: Résultats de mesure de la chaleur spécifique des éprouvettes

Eprouvette	Masse Volumique (kg/m³)	Chaleurs spécifiques (kJ/kg. °C)
Brique de terre comprimée	2500	1426

III.3.2.4 Interprétation des résultats

- Plus la diffusivité thermique est petite plus la chaleur se propage moins rapidement dans le matériau. La valeur de $\boldsymbol{\alpha = 2{,}5.10^{-7}}$m²/s ce qui est un très bon résultat en comparaison à d'autre matériaux voir tableau 3.
- La valeur de la chaleur spécifique est intéressante du moment qu'elle avoisine les 1426 J/kg °C, un matériau capable de procurer une certaine inertie thermique synonyme de confort thermique.
- Pour la valeur de la conductivité thermique, elle ne peut en aucun cas refléter les valeurs des matériaux dits isolants thermique, elle est de λ =0.9 w /m C°. Par contre en termes de résistance thermique des parois en terre crue de 50 cm d'épaisseur le résultat est très intéressant puisqu'il avoisine la valeur de 0.555 m^2 °C/w.

Tableau IV. 3: Performances thermiques de certains matériaux

Matériaux	Conductivité thermique (W/m.K)	Diffusivité thermique (m^2/s)	Effusivité thermique ($J/m^2.K.s^{1/2}$)	Masse volumique (kg/m^3)	Chaleur spécifique (J/kg.K)
Air	0.025	1.94E-05	5.7	1.29	1004
Polystyrène	0.033	7.65E-07	38	38	1130
Téflon (PTFE)	0.250	1.15E-07	740	2170	1004
Polyéthylène	0.420	1.93E-07	944	2301	935
Verre	1.05	5.43E-07	1419	2300	837
Porcelaine	5.86	2.56E-06	3658	3900	586
Acier inoxydable	13.4	3.42E-06	7241	7800	502
Plomb	34.3	2.33E-05	7107	11350	130
Aluminium	226	9.10E-05	23688	2690	921
Cuivre	398	1.16E-04	36983	8940	385

III.4 Essai d'un projet durable en brique de terre crue

Après une lecture de l'habitat ksourien, de son aspect architectural et technique, du savoir faire local, ainsi que des performances thermiques du matériau terre ; on est maintenant en mesure de présenter dans ce chapitre une tentative de réponse au problème de confort thermique posé ultérieurement avec un projet d'habitation durable qui respecte les exigences de l'architecture bioclimatique.

III.4.1 Les pratiques de l'architecture bioclimatique

III.4.1.1 Les protections contre le rayonnement solaire

L'élément le plus important à respecter dans un climat comme celui du Timimoune est la protection du rayonnement solaire direct. Les solutions traditionnellement utilisées étaient la toiture terrasse et les murs épais, toutes deux offrant une épaisseur suffisante pour obtenir le décalage nécessaire entre les températures diurnes et nocturnes.

Les matériaux comme le béton et la brique cuite n'offrant pas cette inertie thermique, la température des pièces s'élève très vite. Deux alternatives combinables, sont possibles.

On peut associer un second élément à une toiture plate, élément surélevé et dissocié au maximum de

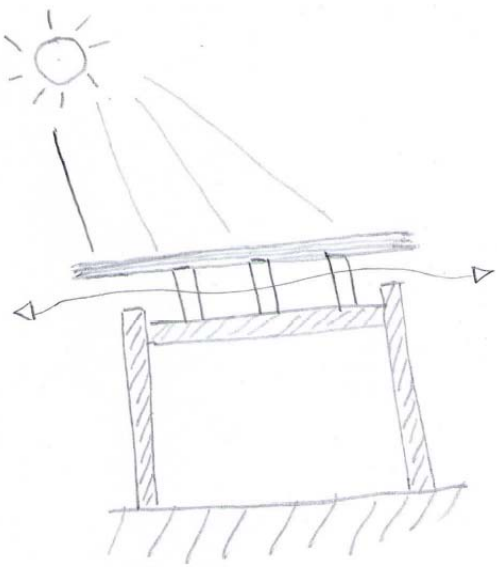


Figure IV.11: Principe de réalisation de la toiture, « associé un second élément a la toiture », (source : auteur)

cette dernière, et destiné à former un écran au rayonnement solaire direct (principe du " store " extérieur appliqué à la toiture). Ce système offre l'avantage d'une double couche en toiture ; la première pouvant être réalisée en matériaux locaux à faibles coûts, tels que la paille ou les branches de palmier, et constituant une couche de protection pour la " seconde " toiture, en terre battue.

Le deuxième principe, basé sur une amélioration de la situation existante, consiste à dissocier la toiture des murs porteurs afin de bénéficier au maximum d'une aération en toiture évacuant ainsi l'air surchauffé par le soleil.

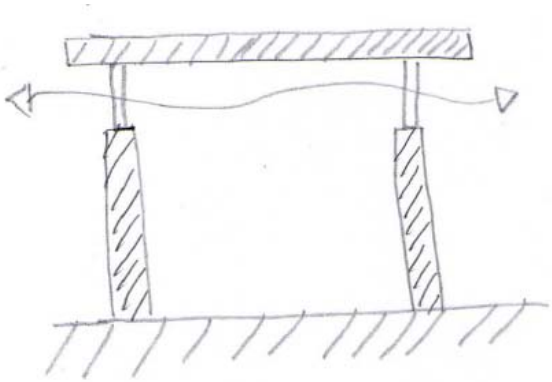


Figure IV.12: principe de réalisation de la toiture "disocié la toiture des murs porteurs, (source auteur)

On peut également adjoindre à cette toiture des éléments d'aspiration fonctionnant sur le principe de Venturi (augmentation de la vitesse de l'air et création d'une dépression, donc mouvement d'air naturel). Les accessoires nécessaires pourraient être fabriques de la même manière que d'autres accessoires courants c'est-à-dire à partir de terre ou de matériaux de récupération.

III.4.1.2 La ventilation naturelle

La ventilation, en plus de renouveler l'air vicié par de l'air frais et sain, permet le refroidissement de la masse interne des bâtiments, et participe au confort thermique du corps en lui prélevant de la chaleur par convection et évaporation de sueur.

Ce refroidissement est intéressant dans les climats à forte amplitude journalière comme le Sahara où, seule, une ventilation nocturne, durant les heures fraîches, peut participer au confort thermique, par le refroidissement des structures internes des bâtiments. Ce type de ventilation est associé à une très forte inertie pour les climats chauds et secs. Une condition reste à satisfaire cependant ; les ouvertures doivent se faire face de sorte que

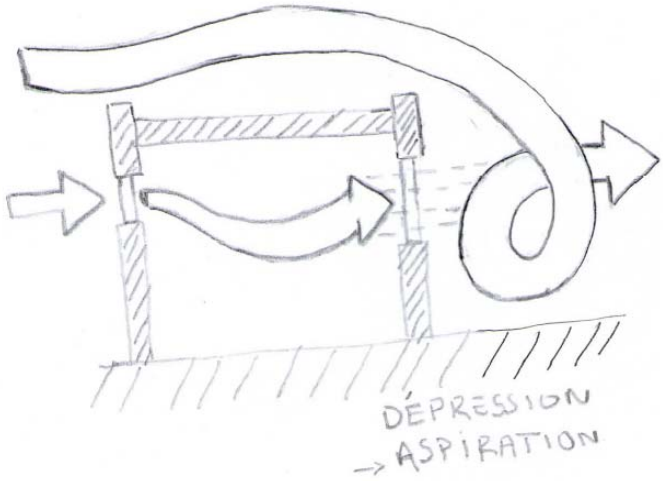


Figure IV.13: Disposition des ouvertures en vu d'une ventilation naturelle, (source: auteur)

d'air qui circule ne soit pas gêné dans sa progression[104] (J. L. Izard, 1993). L'air chaud repoussé en haut des pièces s'échappe alors par des ouvertures situées dans la partie haute. Des variantes de ce circuit existent avec le concours de capteurs ou de tours à vent.

On peu aussi utilisé la dépression pour créer une ventilation naturelle en plaçant de petites ouvertures sur la façade recevant les vents dominants et de grandes fenêtres sur la face opposée. L'implantation des bâtiments doit aussi être réfléchie afin de favoriser l'aération des rues et des places d'un quartier.

III.4.1.3 La compacité du volume

En habitat individuel, les formes compactes adossées à un relief ou remblais contre les murs (contact maximal avec le sol) sont profitables. Toutes les saillies, redans, décrochements qui augmentent les surfaces de contact avec l'air sont à éviter.

III.4.2 Du point de vue constructif et architectural

Pour répondre aux désordres structurels déjà cités (effondrement, fissurations,…) des renforcements sont nécessaires, Les plus recommandés sont :

- Protection contre la pluie, c'est évidemment ici que les plus grands efforts doivent être réalisés. Selon un proverbe anglais, une maison en terre peut résister des siècles durant si " elle a de bonnes bottes et un bon chapeau " (Traité de construction en terre / Houben H., Guillaud H.). Actuellement on couvre la construction mais les débordements de toiture sont inexistants, les évacuations d'eau ne sont pas prévues et l'eau de ruissellement est laisser libre, s'infiltrant donc à la base des murs. Les jonctions entre les différentes parties des bâtiments sont mal réalisées, l'eau pouvant ainsi s'écouler entre deux murs mitoyens et les ronger de l'intérieur.

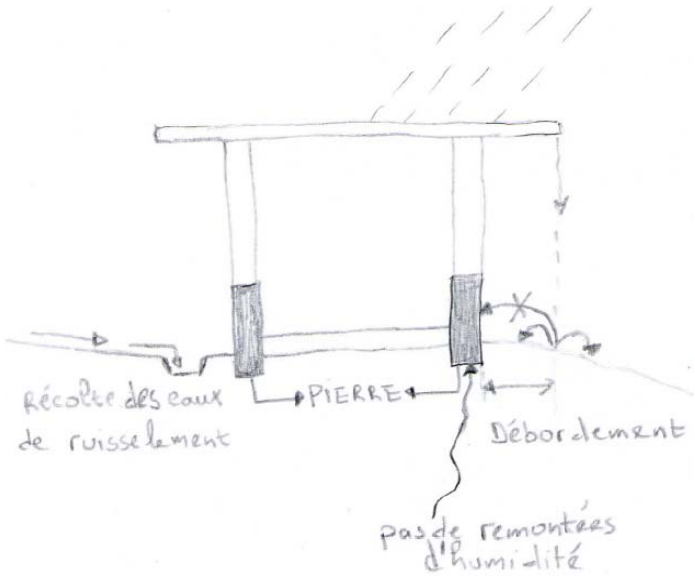


Figure IV.14: dispositifs de protection contre la pluie, (source: auteur)

[104] J. L. Izard, Architecture d'été, Construire pour le confort d'été, Aix - en Provence : Ed. EDISUD, 1993.

Quelques modifications permettraient d'améliorer la situation :

- Tout d'abord, **augmenter le débordement de toiture** afin d'écarter au maximum les eaux de pluie ;
- Ensuite, une **bonne orientation** pour diminuer les surfaces exposées aux pluies battantes, voire même en y appliquant un revêtement résistant à la pluie ;
- Enfin, **des soubassements** peuvent être réalises en matériaux résistant à l'eau, comme la pierre ou le béton, comme base d'appuie et de protection contre l'action de l'eau telles que les remontées capillaires, les érosions accidentelles ou volontaires et contre l'action des vents et des chocs de projectiles[105] ; ainsi que **des rigoles** pour récolter les eaux de ruissellement et les empêcher d'atteindre la base des murs.

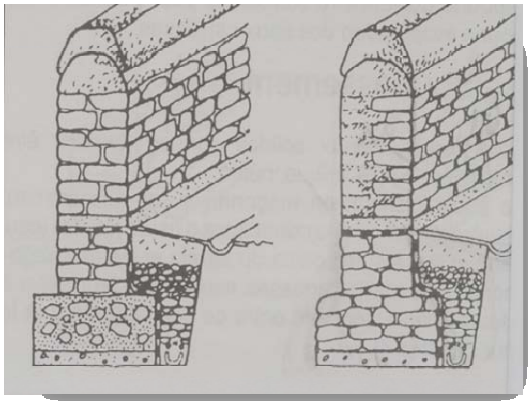


Figure IV.15: Soubassement en pierres avec un drainage pour que les eaux de pluie ne stagnent pas au bas du mur, (source : CRAT erre)

- La réalisation d'un parfait calpinage dans la maçonnerie des murs;
- Le Chaînage des murs pour renforcer les constructions et les stabiliser afin d'éviter leur désolidarisation (à cause des tassements différentiels et de la surcharge de la toiture). Il sera réalisé avec du bois de palmier posé sur un lit de mortier ou bien ancrés par des colliers en acier après avoir été séché et traité. On les utilisera au niveau des angles, des hauts des murs, des planchers et des rives de toiture ;
- Le renforcement des éléments porteurs de la toiture, vu le poids important de la couche

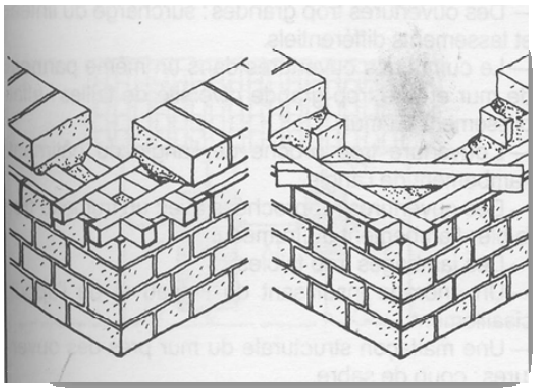


Figure IV.16 : chainage des murs au niveau des angles, (source : CRATerre)

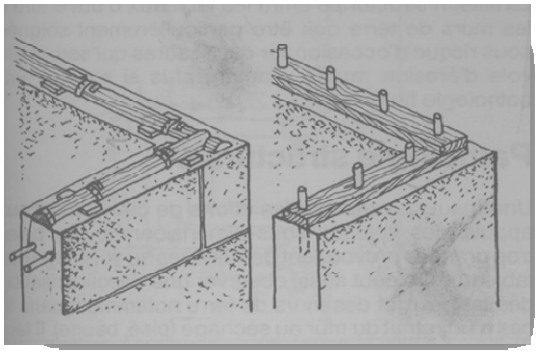


Figure IV.17: Chaînage des murs au niveau supérieur (ancrage de la toiture), (source : CRATerre

[105] Traité de construction en terre Op.Cit, p 252.

de terre qui s'alourdie quand elle prend de l'eau ;

- Toiture légèrement pentue pour dirigé les eaux pluviales vers une gargouille de bonne section et dépassant le mur d'environ 50 cm ;
- Traitement des éléments porteurs en bois de palmier par imprégnation par des huiles de la région afin d'améliorer leur résistances aux différents insectes et à l'eau ;
- Diminuer le poids de la couche en terre en utilisant des roches ou des matériaux légers de la région ; par exemple de la pouzzolane naturelle ou bien les noyaux de dates broyées.

III.4.3 Les plans d'architecture

Dans notre recherche, nous avons remarqué que l'habitation ksourienne a connu plusieurs transformations dans sa structure, son organisation, et ses pratiques spatiales, aboutissant a une organisation dont on c'est inspirer pour l'élaboration de notre projet bioclimatique et dont les points essentiels se résume comme suit :

III.4.3.1 Division de l'habitation en deux parties : Partie « invités » et Partie « Famille »

- **La partie « invités »**
  Se situe généralement devant l'entrée, et selon la situation de la maison par rapport aux voisinages, elle peu avoir sa propre entrée.
- **La partie « famille »**
  C'est la partie intime de l'habitation, organisée autour d'un espace central : ***la Rahba.***
  Le Sabat lui, assure la transition du seuil à la Rahba dont la centralité est plus visuelle et fonctionnelle que géométrique.

III.4.3.2 Autonomie et spécialisation des espaces

Apparition de nouveaux espaces par rapport à l'habitation ancienne : couloir, cuisine, douche, ceci entraîne une autonomie relative et une spécialisation de l'espace après sa polyvalence.

III.4.3.3 Le « dedans » et le « dehors »

La création des espaces de transition protégeant la vie privée des occupants en éloignant l'espace public des lieux privé de l'habitation : espace de réception, entrée en chicane, etc.

III.4.3.4 La tendance aux grands espaces

Nous remarquons que les espaces deviennent plus spacieux, les portée plus grande. Ceci s'explique par la disponibilité de matériaux nouveaux permettant de plus grands franchissement d'espace (IPN, et poutrelles en béton au lieu de poutrelles en tronc de palmier qui ne permettaient que 2.50 m de profondeur)

Ce changement a permis l'introduction d'une nouvelle technologie de construction, et de nouveaux éléments architectoniques.

III.4.4 Le projet

Comme réponse aux exigences de l'architecture bioclimatique ainsi qu'a celle des performances thermo-physiques du matériau terre, et dans le souci du respect des traditions locales on a essayé de produire des plans en accord avec ses principes ; cela ce traduit comme suit :

Figure IV.18: plan masse

Les pièces sont disposées en groupe compacts autour de la Rahba, l'objectif étant ici de minimiser les surfaces exposées au soleil.

Les écarts de températures étant important entre le jour et la nuit, on a privilégié des murs massifs (50cm) afin d'assurer l'inertie thermique

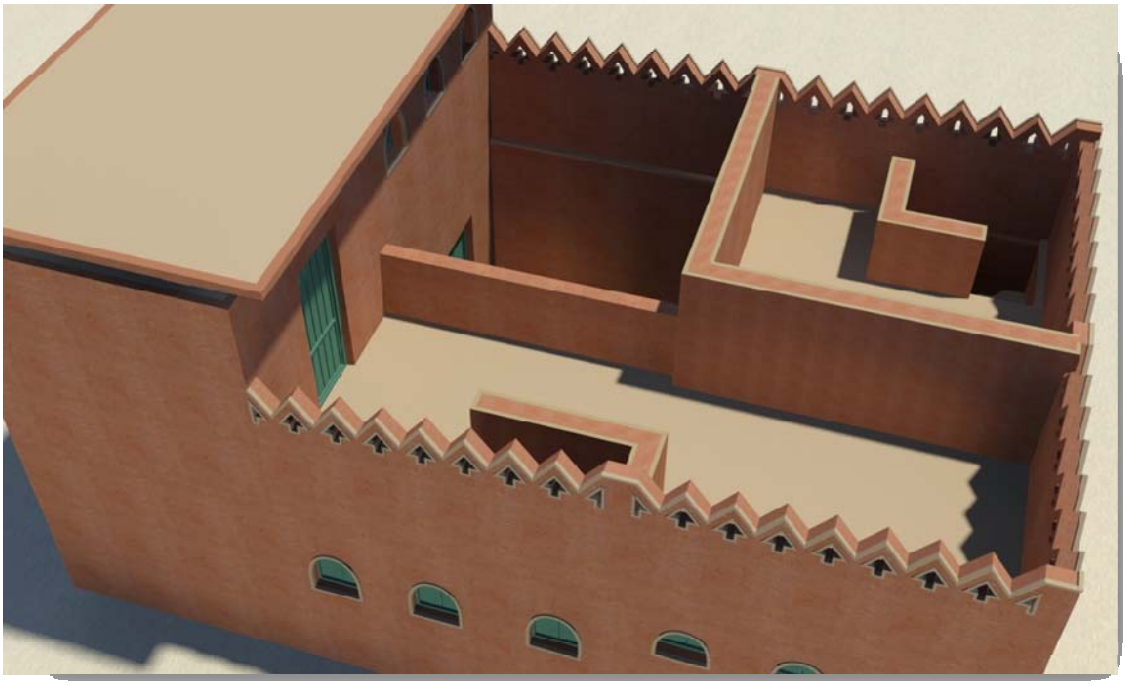


Figure IV.19 Une partie de la Façade Nord

On a fait le choix délibéré d'avoir la façade Sud aveugle, choix dicté par le climat de la région : (façade très ensoleillé).

Figure IV.20: Façade Sud

Sur cette vue, on distingue un deuxième élément de toiture ce qui va nous assurer la ventilation naturelle et éviter le rayonnement direct sur le premier toit.

On remarque aussi, le positionnement de petites fenêtres en haut du mur.

Figure IV.21: Vue sur ta toiture

La terrasse familiale déborde sur la Rahba pour permettre d'avoir une partie de la cour ombragée la journée.

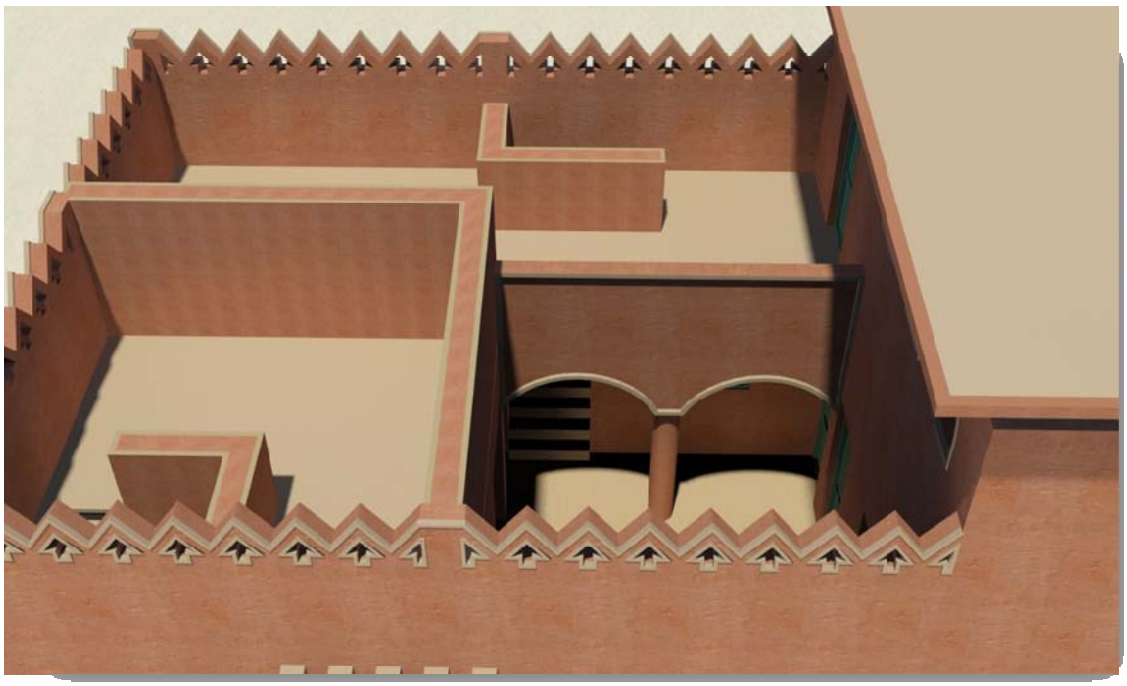


Figure IV.22: Vue sur terrasse et Rahba**.**

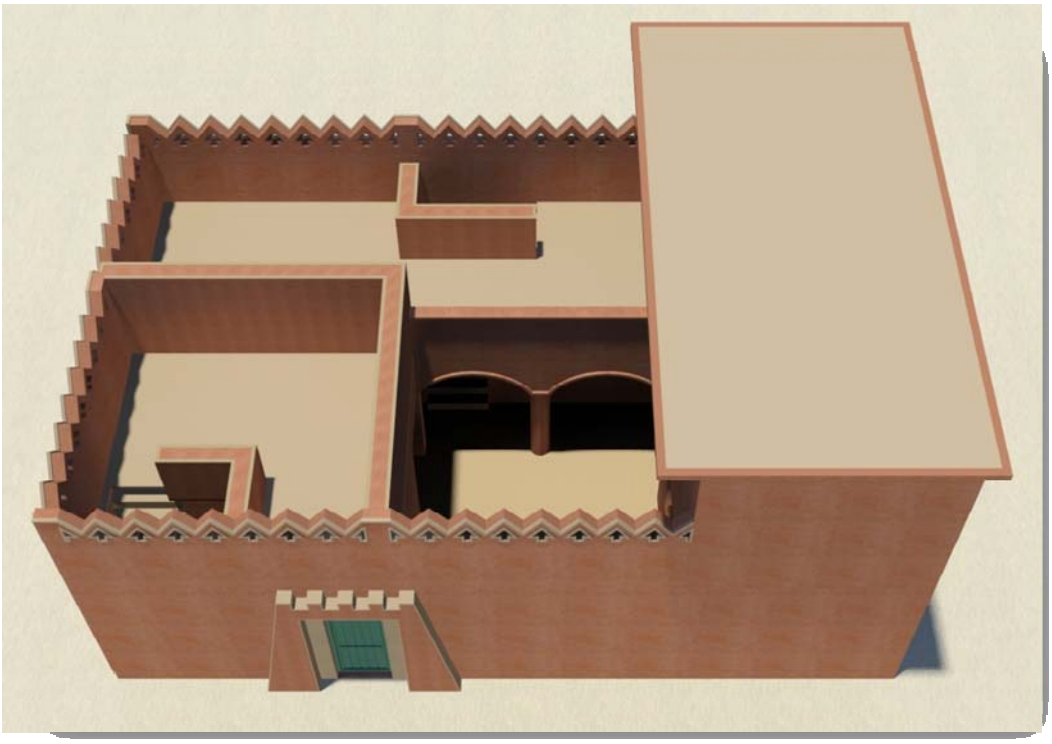


Figure IV.23: Vue plongeante sur la Rahba

Sur cette vue on distingue les deux accès séparés de la terrasse familiale et la terrasse Dif.

Conclusion

L'étude expérimentale portant sur les propriétés thermo-physique des briques de terre crue nous donne des indications pour le choix du matériau en vu de son utilisation dans la construction. Cela nous a conduits à choisir une méthode de mesure « CT-mètre » pour déterminer la conductivité thermique et de la chaleur spécifique et par la suite calculer la diffusivité et l'effusivité thermique.

Nous somme arriver à des résultats satisfaisant, la valeur de $\alpha = 2{,}5.10^{-7}$ *m²/s ce qui est un très bon résultat, cela veux dire que la chaleur se propage assez lentement dans ce matériau. La chaleur spécifique avoisine les 1426 J/kg °C, ce qui nous fait dire que c'est un matériau capable de procurer une certaine inertie thermique synonyme de confort thermique. Pour la conductivité thermique,* λ *=0.9 w /m C°, le résultat ne peut pas refléter les valeurs des matériaux isolants. Par contre, la résistance thermique des parois en terre crue de 50 cm d'épaisseur est très intéressante puisqu'elle avoisine la valeur de 0.555* m^2 *°C/w. Par conséquent, ces performances additionnées à des épaisseurs de mur importantes nous permettent d'avoir une ambiance intérieure assez confortable.*

Ce qui nous pousse à dire que ses résultats justifie pleinement l'emplois de la terre crue dans le domaine de la construction.

Bien sur, ses critères ne sont pas les seuls à prendre en compte, les paramètres de l'architecture bioclimatique (orientation, compacité, ventilation naturelles„…) et les possibilités offertes par le matériau terre nous laisse plusieurs possibilités d'intégration à un site au climat aride ainsi qu'a des critères social qui font la singularité de cette architecture ksourienne.

Par ce projet, nous pensons avoir réussi à répondre à notre objectif principal qui est celui de projeter un habitat durable par une prise en charge de la conception architecturale bioclimatique, de la valorisation des performances thermiques de la terre crue et des potentialités d'un savoir-faire local riche en enseignements. Et à travers cet habitat durable, assurer un confort thermique aux habitants.

CONCLUSION GENERALE

Les briques de terre crue sont utilisées pour la construction de l'enveloppe des bâtiments, des tests au laboratoire sont plus que nécessaire pour déterminer un ensemble de propriétés thermophysique (conductivité thermique, chaleur spécifique, effusivité et diffusivité thermique) relative à leurs utilisations dans le bâtiment.

L'architecture bioclimatique recherche une synthèse harmonieuse entre la destination du bâtiment, le confort de l'occupant et le respect de l'environnement, en faisant largement appel aux principes de l'architecture (compacité du bâti, orientation, protection solaire…) pour permettre la réduction des besoins énergétiques et crée un climat de bien être.

On trouve dans l'architecture vernaculaire des pays d'Afrique du Nord et du Moyen-Orient des techniques de construction ancestrales basées sur les énergies naturelles qui permettent aux bâtiments de répondre aux conditions climatiques. Les populations vivant sous climat aride ont appris à maîtriser ces conditions et à bâtir en fonction du climat, ils jouissent de conditions de vie confortable, grâce à la compréhension de leur milieu et à leur adaptation aux conditions de leur environnement. Bien que le climat soit le même, les formes architecturales sont diverses, selon les pays, au sud tunisien, c'est l'habitat troglodyte, à Ispahan, à Ghardaïa, la maison à patio représente la forme architecturale typique, au Sahara et Yémen, les "ksour" constituent le type d'habitat le plus répondu.

L'architecture de terre se propose comme l'une des solutions les plus prometteuses du fait qu'elle ne génère pas d'émission de CO_2 lors de sa production, de plus, le matériau est biodégradable et réutilisable à l'infini.

Hormis l'intérêt pour l'environnement, l'avantage économique constitue probablement l'aspect le plus important que représente la revalorisation de l'architecture de terre. Les faibles coûts des réalisations en terre peuvent agir comme un levier social pour améliorer considérablement les conditions de vie des habitants. La variété des procédés de production, fait que leurs revalorisation ouvre de nouvelles issues pour absorber le chômage, elle assimile aussi bien une main d'œuvre peu qualifié, que des cadres de haut niveau de formation. L'expérience de Mayotte montre les opportunités crée par ce marché pour l'emploi, aujourd'hui avec 19 briqueteries villageoises installées sur cette île, quelque dix mille personnes vivent de cette filière terre[106] (1/7ème de la population totale), cette revalorisation de l'architecture en terre a donc pour effet indirect la stabilisation des

[106] http://www.craterre.archi.fr/.

populations rurales en équilibrant les migrations vers les villes et redynamiser l'économie sans grands investissements au préalable.

La nécessité de connaitre les propriétés thermo-physique de ces matériaux nous a conduits à choisir une méthode de mesure de la conductivité thermique et de la chaleur spécifique d'une part et avec ses données de calculer la diffusivité et l'effusivité thermique. Cela a nécessité l'utilisation du CT-Mètre et nous a permis d'arriver à des résultats qui nous font dire que même si le matériau terre n'a pas de propriétés isolante, ce dernier possède n'est au moins des propriétés qui peuvent justifier son utilisation dans la construction.

Ainsi les briques de terre crue peuvent être considérées comme le compromis idéal entre trois exigences : un cout raisonnable, un faible impact sur l'environnement et des caractéristiques thermiques avantageuses.

Les dommages subits par les maisons en terre ont pour principales origines des processus de vieillissement et de dégradation dus a l'humidité. Nous avons démontres dans ce travail que même ce problème peu être résolu grâce à des procédés ingénieux (débordement de toiture, soubassement) et a une architecture bioclimatique soucieuse de la durabilité des constructions.

La dernière étape de notre travail a consisté à appliquer toute les orientations réunis dans les chapitres précédant dans une tentative de projet durable en zone aride. Nous pouvons répondre, à travers cette recherche, qu'allier une architecture bioclimatique à un matériau possédant des propriétés thermo-physiques comme les briques de terre ainsi qu'une architecture soucieuse des coutumes locales nous permet d'assurer un certain confort thermique aux occupants.

Références

1. Aguarwal, bâtir en terre, Ed. Earscan, Londres 1981.
2. A. Bonhomme, Isolation thermique des bâtiments. 4e édition mise à jour et augmentée. Ed. Le Moniteur, Paris.
3. A. Degiovani. « Diffusivité et méthode flash ». In revue générale de thermique n° 185. France 1977.
4. A. Liébard A. De Herde : Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique, concevoir, édifier et aménager avec le développement durable, Ed. Le Moniteur, Paris 2005.
5. A. Liebard et A. De Herde**,** Guide de l'architecture bioclimatique ; Tome4 ; Cours fondamental : Construire avec le développement durable, 2002.
6. A. Merzeg, la réhabilitation thermique de l'habitat contemporain en Algérie, mémoire de magistère, UMMTO, octobre 2010.
7. 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.
8. Bruno Pignal, Terre crue : Techniques de construction et de restauration, Ed. EYROLLES, 2005.
9. C. Delbecque, Approche contemporaine de la construction en terre, « Histoire de la construction en terre » 21 octobre 2011.
10. C. Langlais et S. Klarsfeld, Isolation thermique à température ambiante, Techniques de l'ingénieur, Document n° C 3 371. France.
11. C.A. Balaras, The role of thermal mass on the coolingload of buildings, An overview of computational methods, Energy and Buildings, 1996, vol 24.
12. CNERIB, Conception de logements économiques à base de produits localement disponible, CNERIB, Alger, 2000.
13. Construction en terre, l'architecture traditionnelle de charouine et de Timimoune, PNUD, Alger, 2007.
14. CRATerre, Marrakech 87, habitat en terre, Grenoble, 1987.
15. CRATerre, Traité de construction en terre, Ed. PARENTHESES, 1995.
16. D. Medjelekh, Impact de l'inertie thermique sur le confort hygrothermique et la consommation énergétique du bâtiment, Cas de l'habitation de l'époque coloniale à Guelma, Mémoire de magistère, université de Constantine, 2006.

17. E. Reboul, le Gourara, étude historique, géographique, et médicale. Archive de l'institut pasteur d'Algérie T 31, 1953.
18. Eben Salah. M.A, Impact of thermal insulation location on building in hot dry climates, Rapport de recherche Saudi Arabia King, Saudi University, Department of Architecture and Building sciences,5juin 1989.
19. Encyclopédie du bâtiment, V3.
20. F. Jadoul, La Terre est notre maison, Construire, rénover, habiter en respectant l'Homme et l'environnement, Ed. Luc Pire, Bruxelles 2002.
21. G. Alexandroff et J .M, Architecture et climat soleil et énergies naturelles dans l'habitat; édition architectures Berger-Levrault, Paris1982.
22. H. Benouali**,** Proposition pour la relance des constructions en terre en Algérie, CNERIB, décembre 2004.
23. H. Guillaud T.Joffroy P. Odul, CRATerre, Compressed earth blocks manual of design and construction, Ed. Eschborn, 1995.
24. H. Houben et H. Guillaut, traité de construction en terre, Ed. Parenthèse, Marseille, 2006. V6.
25. I. Hurpy, la climatisation de l'habitat par cheminée solaire et le système du « Melkaf » solaire, cahier AFADES, énergies nouvelles, Ed. n°5.
26. I. Mahrour, Contribution à l'élaboration d'une typologie Umranique des ksour dans la région du Gourara, Mémoire de Magistère, EPAU, 2008.
27. ISO 10551 (International Standard Organization) : Evaluation de l'influence des ambiances thermiques à l'aide d'échelle de jugements subjectifs.
28. ISO 7730: Ambiances thermiques modérées- Détermination des indices PMV et PPD et spécification des conditions de confort thermique.
29. J. Bisson, Le Gourara étude de géographie humaine, Mémoire de l'IRS n°3, université d'Alger, 1957.
30. J. COIGNET, Réhabilitation : arts de bâtir traditionnel connaissances et techniques, Aix-en-Provence, Ed. EDISUD, 1987.
31. J. Dethier, Des architectures de terre ou l'avenir d'une tradition millénaire, Ed. CGP, paris, 1982.
32. J. L. Izard, Architecture d'été, Construire pour le confort d'été, Aix - en Provence : Ed. EDISUD, 1993.
33. J. Loubes, Archi troglodyte, France: Ed. Parenthèse.

34. Karima. Benhalilou **:** Impact de la végétation grimpante sur le confort hygrothermique estival du bâtiment cas du climat semi-aride, mémoire pour l'obtention du diplôme de magistère option bioclimatique, 2008.
35. Koenigsberger et al, Climatic design, London, New York: Ed LONGMAN 1974.
36. Kur F, l'habitat écologique : quels matériaux choisir, Edit. Terre vivante, France, juillet 2001.
37. M. Chaoucha Bencherif, la Micro-urbanisation et la ville-oasis ; une alternative à l'équilibre des zones arides pour une ville saharienne durable cas du Bas-Sahara, Mémoire de doctorat, universsité Mentouri constantine, 2007.
38. M. Dahli, N. Baloul. Amélioration des performances du matériau terre crue. XXVIII^{ème} Rencontres Universitaires de Génie Civil – La Bourboule du 2 au 4 juin 2010.
39. N. Baloul, Conservation et valorisation du patrimoine architectural en terre de la région du Twat-Gourara : cas du ksar de Tmassekht, mémoire de magister 2007.
40. Noureddine Kebaili, l'architecture de terre contemporaine en Algérie ; évaluation post-occupation d'habitations rurales dans la région centre des hauts plateaux ; mémoire de magistère 2006.
41. O. SIDLER, directeur de la Ste ENERTECH, L'inertie thermique en climat méditerranéen, Confort et consommations d'énergie, Colloque du 15-05-2003, Montpellier.
42. P. G. Bellin. L'habitat bio-économique. Ed. Eyrolles. Pris 2008.
43. P. Lavigne, Architecture climatique une contribution au développement durable Tome1 : bases physiques, EDISUD 1994.
44. P. Meukam, valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiments, Yaoundé, décembre 2004
45. P. Odul, Des architectures de terre en Algérie, projet earth construction technologies appropriate to developing countries, Belgique, 1983.
46. S. E. Gustafsson, E. Karawaski, and N. N. Khan, Determination of the thermal conductivity tensor and the heat capacity of insulating solids with the transient hot-strip method, 1981.
47. S. H. Carslaw, et J .C. Jaeger, conduction of heat in solids, Oxford, University press, 1959.
48. S. Haoui Bensaada, Pour la présentation des architectures ksouriennes en terre crue : cas de Timimoun, Mémoire de Magistère, EPAU, 2002.

49. Saliha Benmessaoud, 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
50. T. Salomon et S. Bedel, La maison des [mega] watts, Le guide malin de l'énergie chez soi. Ed. Terre vivante. Mens 2004.
51. Thelier. F et al, Les outils d'évaluation du confort thermique, Journée SFT/ CSTB, 04/02/2003, Nantes.
52. V. Cheng, NG.E & Givoni. B, Effect of envelope color and thermal mass on indoor temperatures in hot humid climate, Solar Energy 2005.
53. Y. Guillermou, Survie et ordre social au Sahara : les oasis du Touat Gourara Tidikelt en Algérie, Cahiers des Sciences Humaines, Vol. 29, n° 1, Paris, 1993.
54. Z. Derradj, Etude des conditions techniques optimales du mélange « terre paille » en vue de la construction de logements à Ronquières en Belgique, mémoire de Magistère à l'université catholique de Louvain, 1987.