République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Amar Thelidji- Laghouat

Faculté de génie civil et d'architecture

Département de l'architecture

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par :

KHACHEBA Nihad – MEKKI Sana

DOMAINE : Architecture, Urbanisme et Métiers de la ville

FILIERE : Architecture

OPTION : Architecture et patrimoine

Thème

LA REVALORISATION DE LA TECHNIQUE DU PISE DANS LE KSAR D'AIN MADHI PAR LA CONCEPTION D'UN CENTRE DE FORMATION EN ARCHITECTURE DE TERRE

Partie individuelle : Revue bibliographique sur l'aspect de durabilité et de confort thermique du matériau pisé

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	qualité
GHLAMALLAH Souad	M.A.A	Président
MOULAI Redouane	M.A.B	Examinateur1
KEBAILI Noureddine	M.A.A	Examinateur2
CHETTIH Azzedine	M.A.A	Rapporteur
DAMENE Zineb	M.C.B	Co-rapporteur

Promotion : Juillet 2018

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE AMAR TELIDJI – LAGHOUAT
FACULTE DE GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE
DEPARTEMENT D'ARCHITECTURE

RESUME DE MEMOIRE

DOMAINE : Architecture urbanisme et métier de la ville
FILIERE : Architecture
SPECIALITE : Architecture et Patrimoine

PRESENTE PAR :

- MEKKI SANA, KHACHEBA NIHAD

ENCADRER PAR :

- CHETTIH AZZEDDINE, DAMENE ZINEB, BOUSSEDRA AISSA

Résumé :

Le ksar d'Ain Madhi, ce patrimoine architectural présent non seulement un environnement favorable riche de potentialités culturelles, cultuelles, historiques et architecturales, mais aussi un savoir-faire si particulier dans la région, est celui du pisé.

En effet, le pisé de terre, et les constructions en terre en général, constituent une réponse de qualité à des questions très contemporaines. Il est clair maintenant que l'avenir de l'architecture doit répondre à des préoccupations écologiques. Nous n'avons tout simplement pas le choix. Les questions d'empreinte écologique, de matériaux renouvelables et de baisse consommation lors de la construction comme lors de l'utilisation du bâtiment…sont au cœur de la réflexion actuelle.

De là, est venue l'idée de la revalorisation de la technique du pisé au ksar par la création d'un centre de formation en architecture de terre construit en pisé au niveau de la région et précisément au-dessus de la zone d'extension touristique d'Ain Madhi, dans la vision d'un développement du patrimoine locale considéré comme promoteur socio-économique.

Suite à cette contribution qui tentera de mettre en évidence une stratégie d'intervention pour la sauvegarde et la promotion du matériau terre, une revue bibliographique est consacrée à l'approfondissement des aspects du pisé qui sont notamment celle de la durabilité et celui du confort dans le but d'innover les techniques de constructions pour cet éco-matériau et d'un autre coté en réhabilitons l'image du patrimoine bâti en terre crue.

Mots clé : patrimoine architectural, région Ain Madhi, centre de terre, revalorisation, mur en pisé, durabilité des murs en pisé, confort thermique des murs en pisé.

People's Democratic Republic of Algeria

Ministry of Higher Education and Scientific Research
AMAR TELIDJI UNIVERSITY – LAGHOUAT
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE
DEPARTMENT OF ARCHITECTURE

THESIS SUMMARY

DOMAINE: Architectural urban planning and occupation of the city
FILIERE: Architecture
OPTION: Architecture and Heritage

PRESENTED BY

- MS.Mekki Sana, Khacheba Nihad

SUPRVISED BY

- Mr.CHETTIH AZZEDDINE, Mrs. DAMENE ZINEB, BOUSSEDRA AISSA

Abstract **Summary:**

The ksar of Ain Madhi, this architectural heritage presents not only a rich favorable environment with cultural, cultic, historical and architectural potentialities, but also a special know-how in the region; it is that of the rammed earth.

In fact, rammed earth, and earthen constructions in general, constitute a quality response to very contemporary issues. It is clear now that the future of architecture must respond to ecological concerns. We simply do not have a choice. Ecological fingerprint issues, renewable materials and lower consumption during construction ... are at the heart of the current thinking.

In this context, the idea of revaluing the technique of rammed earth came with ksar by the creation of a center of earthen architecture training built with rammed earth at the level of the region and precisely above the tourist extension zone of Ain Madhi, in the vision of developing the local inheritance that is considered as socio-economic promoter.

Following this contribution, which will try to highlight an intervention strategy to safeguard and promote earth material, a bibliographic review is devoted to the deepening of the aspects of rammed earth which are in particular that of the durability and comfort in order to renovate building techniques for this eco-material as well as rehabilitate the image of heritage built in raw earth.

Key words: architectural heritage, Ain Madhi region, land center, revaluation, rammed earth wall, Durability of rammed earth walls, thermal comfort of rammed earth walls.

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة عمار ثليجي بالأغواط

كلية الهندسة المدنية والمعمارية

قسم الهندسة المعمارية

ملخص

الميدان: الهندسة المعمارية التخطيط الحضري والحرفية للمدينة
الشعبة: الهندسة المعمارية
التخصص: الهندسة المعمارية والتراث

تقديم الطالب: مكي سناء، خشبة نهاد
الأستاذ المؤطر: شتيح عز الدين، ضامن زينب، بوسدرة عيسى

قصر عين ماضي، هذا التراث المعماري الحالي ليس فقط بيئة غنية للإمكانات الثقافية، والعبادة، والتاريخ والهندسة المعمارية، ولكن أيضا مهارة خاصة في المنطقة، الا وهي الطين المدكوك.
في الواقع، الطين الترابي المدكوك والمباني الترابية عمومًا إجابة ذات نوعية عالية للأسئلة المعاصرة. من الواضح الآن أن مستقبل العمارة يجب أن يعالج الاهتمامات البيئية. نحن ببساطة ليس لدينا خيار. ان قضايا البصمة البيئية والمواد المتجددة وانخفاض الاستهلاك اثناء البناء وعند استخدام المبنى...هي في صميم التفكير الحالي.
من هنا جاءت فكرة إعادة تقييم تقنية الطين المدكوك في القصر عن طريق إنشاء مركز تدريب في العمارة الترابية المبني بالطين المدكوك على مستوى المنطقة وتحديدا اعلى المنطقة المخصصة للسياحة في عين ماضي ، في رؤية لتطور التراث المحلي الذي يعتبر المروج الاجتماعي الاقتصادي.
وبعد هذه المساهمة، التي تحاول اثبات وجود استراتيجية التدخل لحماية وتعزيز المواد الترابية، واستعراض بحث علمي للتعمق في جوانب الطين المدكوك والتي تشمل الاستدامة والراحة بهدف ابتكار تقنيات بناء لهذه المادة البيئية ، ومن ناحية أخرى، إعادة تأهيل صورة التراث المبني بالتراب الخام.

كلمات مفتاح : التراث المعماري، منطقة عين ماضي، مركز تدريب في العمارة الترابية، اعادة تثمين، جدار من الطين المدكوك، استدامة جدران الطين المدكوك، الراحة الحرارية لجدران الطين المدكوك.

Remerciements

Nous remercions DIEU, qui nous a donné la force et la patience pour mener à bien et achever ce modeste travail.

Nous voudrions saisir cette occasion pour remercier chaleureusement, en leur expriment toute notre gratitude et notre profond respect, notre encadreur monsieur CHETTIH AZZEDINE, maitre-assistant à l'université de Laghouat, notre Co-encadreur madame DAMENE GAOUAL ZINEB, maitre conférence d'avoir accepté de diriger ce mémoire, merci pour votre présence, vos remarques et vos conseils, votre disponibilité et votre bienveillance, vos qualités humaines formidables, ce fut un plaisir de travailler sous votre direction. De plus, Nous tenons à remercier également et fortement notre Co-encadreur monsieur BOUSSEDRA AISSA, pour ses nombreux conseils enrichissants qui ont été très utiles.

Nous adresse aussi nos vifs remerciements aux :

Monsieur KEBAILI NOUREDDINE, pour ses capacités scientifiques et ses compétences étaient nos grand support, sa direction était pour nous un grand honneur et un immense bonheur.

Monsieur BENCHEIKH ABDEREZZAK, pour ses conseils qui ont aidé à surmonter beaucoup de difficultés. Nous le remercie chaleureusement pour sa pédagogique, sa patience, sa disponibilité et son dévouement.

Monsieur TABAI IBRAHIM, pour sa disponibilité et son aide précieuse.

Monsieur MOKDAD BACHIR chef de laboratoire de génie civil, pour sa disponibilité et ses conseils.

Monsieur BADRINA AISSA, pour ses documentations.

Nous tenons aussi à remercier, Monsieur YOUNES KASSOU et toute l'équipe de CAPTERRE pour ses appuis, et ses documentations.

Un spécial remerciement à la famille MEKKI, CHEIKH, KHACHEBA et SEBAA pour leur accueil, générosité et hospitalité.

Nous tenons également à remercier tous les enseignants qui nous ont encadrées tout au long de notre cursus universitaire.

Dédicace

Je dédie ce mémoire à :

À mes très chers parents, ma mère HASSIBA, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude. Mon père BOUBAKER, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutient permanent venu de toi.

À mon frère adorable MOHAMED, les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour toi, mon ange gardien et mon fidèle compagnon dans les moments les plus délicats de cette vie mystérieuse. Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.

À ma sœur MARIA, en témoignage de l'attachement, de l'amour et de l'affection que je porte pour toi, je te souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, te protège et te garde.

À mes amies de toujours : KHADIDJA, SANA, en souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble.

À toute la famille SEBAA et KHACHEBA, grand et petit, pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

KHACHEBA Nihad

Dédicace

Je dédie ce travail à la mémoire de mes grands-pères et ma grand-mère, j'aurais tant aimé que vous soyez présents. Que Dieu ait vos âmes dans sa sainte miséricorde.

À mes très chers parents MOULAT et AHMED. Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être. Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours. Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitterai jamais assez. Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

À mes chères et adorables sœurs, ASSIA, la prunelle de mes yeux, MERYEM, la douce, au cœur si grand, A mon frère adorable ABDESSAMED et à ma petite sœur que je l'adore SIRINE HASSNA. En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.

À mes chers oncles, tantes, leurs époux et épouses et à mes chers cousins et cousines, veuillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.

À mes amies de toujours : KHADIDJA, NIHAD, en souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble.

MEEKI Sana

Introduction générale

Aujourd'hui, face à une prise de conscience en faveur de la protection de l'environnement, on pourrait penser que le matériau terre répond absolument aux nouvelles exigences tout en respectant l'environnement sur tout son cycle de vie. Dans ce contexte, l'architecture de terre recèle plusieurs avantages, sur différents plans ; tant social, économique, environnemental que culturel. La disponibilité du matériau et son faible coût lui promettent un large usage, c'est pour cette raison qu'à dater des années 1980, un regain d'intérêt mondial pour ces architectures impulsé à partir de l'Afrique, et se manifeste sur tous les continents. L'architecture de terre n'est donc pas seulement un vestige du passé mais une composante vivante de la vie contemporaine. Ceci est particulièrement vrai dans notre monde fragile actuel ou les questions de durabilité dans l'environnement et le social prennent de plus en plus d'importance.

Le pisé ; l'une des techniques ancestrales de construction en terre crue, connaît un nouvel essor aujourd'hui dans le monde grâce à sa performance énergétique dans tout le cycle de vie d'un bâtiment. Ce point fort permet de considérer le pisé comme un matériau prometteur du secteur du bâtiment dans le contexte du développement durable. Cependant ce matériau qui constitue une grande partie du patrimoine bâti en terre crue en Algérie est presque disparu dans notre environnement à Laghouat et précisément le ksar d'Ain Madhi qui sera notre cas d'étude.

Ses atouts techniques et formels restent méconnus, au fil des décennies, Il est aujourd'hui menacé par les destructions et une banalisation architecturale qui nie l'héritage de l'histoire local, et par des pratiques inappropriées d'entretien, de restauration ou de réhabilitation d'une part, et d'une dépréciation générale d'une autre part.

C'est dans cette perspective que nous allons présenter dans ce mémoire sous forme d'un travail de recherche qui s'appuie sur une revalorisation de la technique du pisé dans le ksar Ain Madhi par la conception d'un centre de formation en architecture de terre construit en pisé par soucis de réactualiser et de mettre en relief la richesse de notre savoir-faire ancestrale architecturale tout en abordant ses plusieurs facettes et ses connaissances élémentaires.

Problématique générale

Le patrimoine architectural en Algérie est en grande partie réalisé en terre crue : les Ksour du Sahara et un bon nombre d'habitat des Hauts Plateaux et de Kabylie sont réalisés en terre crue. La préservation de ce patrimoine constitue la sauvegarde d'un important patrimoine culturel.

Bien que l'architecture de terre constitue une alternative prometteuse dans le domaine du bâtiment ou s'inscrit le pisé, par ses avantages économiques et environnementaux, sa diversité d'application, et ses caractéristiques techniques et esthétiques, Ce matériau terre connaît un nouvel essor à travers le monde, car, il contribue à faire face aux problèmes liés à l'environnement, et l'épuisement des ressources naturelles. Il continue à être écarté de tout programme de développement en souffrant encore de dépréciation, de destruction ou de manque d'entretien et de conservation ce qui constitue une véritable entrave à la transmission de ce savoir-faire, à sa protection.

C'est dans l'optique de cette problématique que notre travail s'intéresse à l'étude du pisé en apportant quelques pistes de réflexions afin de comprendre comment aujourd'hui, dans une sociètè de plus en plus consciente de l'impact ècologique de la contruction, un materiau tel que le pisè, pourrait-il sortir de sa marginalitè ? Et comment peut-on le sauver de l'oubli ?

Problématique spécifiques

Le vieux ksar d'Ain Madhi situé à 60 km du Nord de Laghouat est notre cas d'étude. C'est l'un des ksour si connues dans la région par son architecture, ses jardins et surtout par un savoir-faire ancestrale si particulier là ou se marque la présence timide du matériau pisé comme un trésor en péril.

Ce matériau est pratiquée par l'homme depuis des millénaires jusqu'à aujourd'hui, il se décline à travers les lieux et les époques dans de nombreux systèmes constructifs. Il s'agit d'un matériau éco-responsable associé à une culture constructive intégrée dans la production architecturale professionnelle, autour de laquelle étaient articulées une économie, des savoirs et des hommes, à ce postulat plusieurs questions s'émergent :

- **Comment peut-on y intervenir sur un lieu de mémoire de telle valeur ?**
- **Comment peut-on mettre en valeur cette richesse patrimoniale et sauver ce précieux savoir-faire ancestral abandonné ?**
- **Comment faire intervenir les habitants du ksar dans un cadre d'une micro dynamique socio-économique au fil du développement durable ?**

Hypothèses

Pour répondre à cette problématique, nous émettons les hypothèses suivantes :

- **Première hypothèse :** la conception d'un projet qui va présenter la région à tout le monde et le mettre en lien avec le potentiel local qui renvoie au patrimoine dans son ensemble régional par une sorte de rapport dialectique entre le ksar et le projet.
- **Deuxième hypothèse :** la revalorisation intégrée de la technique du matériau pisé et parvenir à réhabiliter l'image de l'architecture de terre crue par la prise en conscience de son importance en lui apportant la reconnaissance dont il a besoin. Une partie d'étude bibliographique sera consacrée sur l'aspect de durabilité du pisé et l'autre sera penchée sur ses performances thermiques.
- **Troisième hypothèse :** une conception d'un centre de formation en architecture qui vise à renforcer le rapport bâti- humain dans une vision du développement durable qui se base sur le respect de l'homme, sa culture et son environnement.

Objectifs de la recherche

L'intérêt global est de proposer une étude qui s'articule autour de ces trois paramètres (le ksar- le projet –le matériau pisé) dans une logique de la contribution à une revalorisation durable en se basant sur une recherche appliquée pour ré acquisition, développement et diffusion du savoir-faire.

Nos objectifs se résument comme ci-suit :

- Rendre hommage au patrimoine architectural de la région d'Ain Madhi qui constitue un vaste réservoir culturel et cultuel afin de réaliser des œuvres nouvelles et authentiques.

- La construction en pisé permet de combiner l'utilisation d'une abondante main d'œuvre banale avec l'emploie de personnel semi-qualifié dans le cadre d'un système intégré de formation-développement-production qui pourrait être très attractif pour les habitants.

- C'est un excellent matériau, disponible en quantité, sous nos pieds, à moindre coût. Son utilisation est facile, non dangereuse pour la santé et ne demande pas de processus de transformation complexe consommateur d'énergie. Elle est facilement modulable par tous, mais demande un travail de préparation et de mise en œuvre ceci va nous permettre d'entrainer une forte cohésion humaine, une intensité sociale, et donc une grande convivialité.

- Réaliser un projet à l'échelle de la ville dans le cadre d'une progression économique et socio-culturelle.

Démarche méthodologique

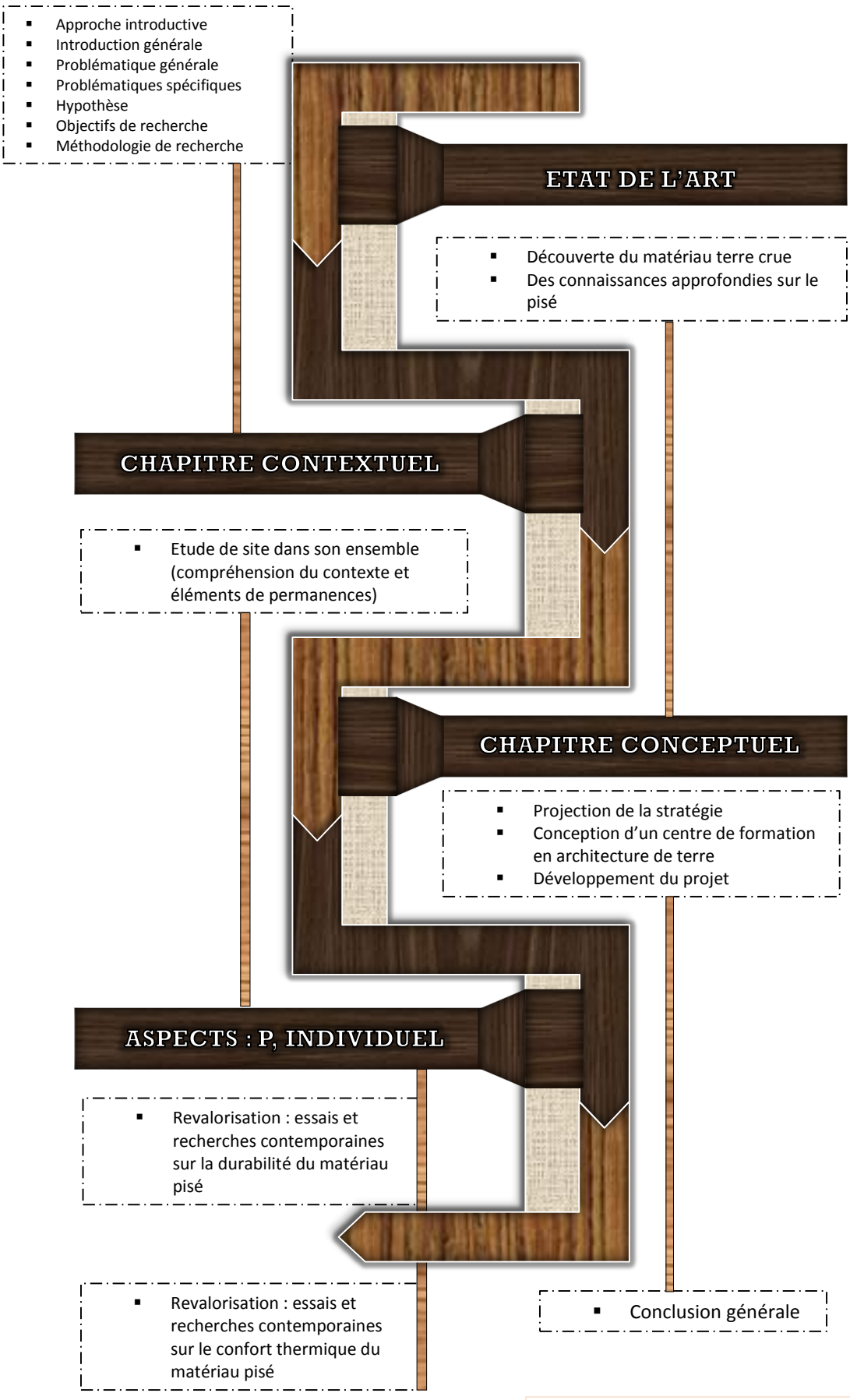
Pour atteindre les objectifs ciblés, la démarche méthodologique est scindée en plusieurs parties :

- La collecte des données sur le thème pour une meilleure compréhension des différentes notions théoriques relatives à la technique du pisé et le site d'Ain Madhi.
- Une étude sur le patrimoine architectural de la région d'Ain Madhi de point de vue typologie architectural : le mode de conception, les éléments architectoniques, les matériaux de constructions et les systèmes constructifs respectivement pour l'ancien ksar, la zaouïa.
- Analyse des différents exemples internationaux ayant une inspiration du patrimoine architecturale locale de la région considéré, qui vont nous permettre de comprendre la méthodologie de conception architecturale, le programme qualitatif et quantitatif, les différentes solutions environnementales et durables à intégrer dans le projet.
- Étude du phénomène de la durabilité et la vulnérabilité du pisé vis à vis de l'eau et ses pathologies humides.
- Étude des performances thermiques du pisé, ses caractéristiques et son comportement vis-à-vis du transfert de chaleur.

Structure du mémoire

Le mémoire est structuré suivant une configuration qui commence en premier lieu par une approche introductive suivie de quatre chapitres distincts dont le contenue de chaque chapitre est comme suit :

- Le premier chapitre est un état de l'art des connaissances approfondies sur tout ce qui est pisé en mettant l'accent sur ses composants, ses caractéristiques, ses avantages et ses inconvenients, sa pratique constructive traditionnelle et moderne de sa mise en œuvre …etc.
- Le deuxieme chapitre est celui de l'étude contextuel qui constitue une étude du site dans son ensemble par une analyse morphologique du ksar d'Ain Madhi et ses paramètres.
- Le troixieme chapitre met en evidence le projet du centre de formation en architecture de terre dans toutes ses dimentions allant de génèse formelle jusqu'au details constructifs.
- Le quatrieme chapitre se presente comme une revue bibliographique qui traite les deux aspects du materiau pisè celle de la durabilitè au fil des recherche contemporaines d'un coté et d'un autre celui du confort thermique de pisé, ses qualités et son comportement partant d'un sens élargie au particulier.



Structure de recherche, Source : Auteurs

Chapitre I : dimensions état de l'art

I.1 Introduction

Dans ce chapitre on va évoquer trois aspects primordiaux dans la structuration de notre travail on cite :

- Le patrimoine.
- L'architecture de terre.
- La technique du pisé.

En première partie, ce chapitre abordera, les diverses définitions des concepts et autres éléments théoriques qui sont en relation avec le patrimoine au premier partie.

En deuxième partie, on va présenter la terre comme matériau, et ses internes dans la construction puis ses techniques.

En troisième partie, on présentera le pisé d'une manière approfondie, ses outils, son mise en œuvre, son système constructif, ses pathologies, ses performances, son organisation au chantier.

Nous allons aborder aussi l'étude de deux exemples internationaux pour pouvoir par la suite tirer les grandes lignes directrices de ces derniers et quelques recommandations pour notre projet.

I.2 Généralité sur le patrimoine

I.2.1 Définition du Patrimoine

Le mot patrimoine vient du latin (patrimonium) qui signifie littéralement l'héritage du père et qui désigne le bien individuel hérité des ascendants et transmis aux descendants, c'est :

A- L'ensemble des biens hérités du père et de la mère (l'ensemble des biens de famille)

B- Un bien commun d'une collectivité, d'un groupe humain considéré comme un héritage transmis par les ancêtres (Le petit Larousse, 2015).

« C'est l'héritage du passé dont nous profitons aujourd'hui et que nous transmettons aux générations à venir. Nos patrimoines culturels et naturels sont deux sources irremplaçables de vie et d'inspiration. » (Unesco2006).

« C'est un concept vaste qui réunit aussi bien l'environnement naturel que culturel. Il englobe les notions de paysage, d'ensembles historiques, de sites naturels et bâtis aussi bien que les notions de biodiversité, de collections, de pratiques culturelles traditionnelles ou présentes, de connaissances et d'expérimentations. Il rappelle et exprime le long cheminement du développement historique qui constitue l'essence des diverses identités nationales, régionales, indigènes et locales, et fait partie intégrante de la vie moderne. C'est un point de référence dynamique et un instrument positif du développement et des échanges » (ICOMOS, 1999).

I.2.2 Types de Patrimoine

Le patrimoine comporte à la fois des éléments matériels et immatériels (voir Figure I- 1)

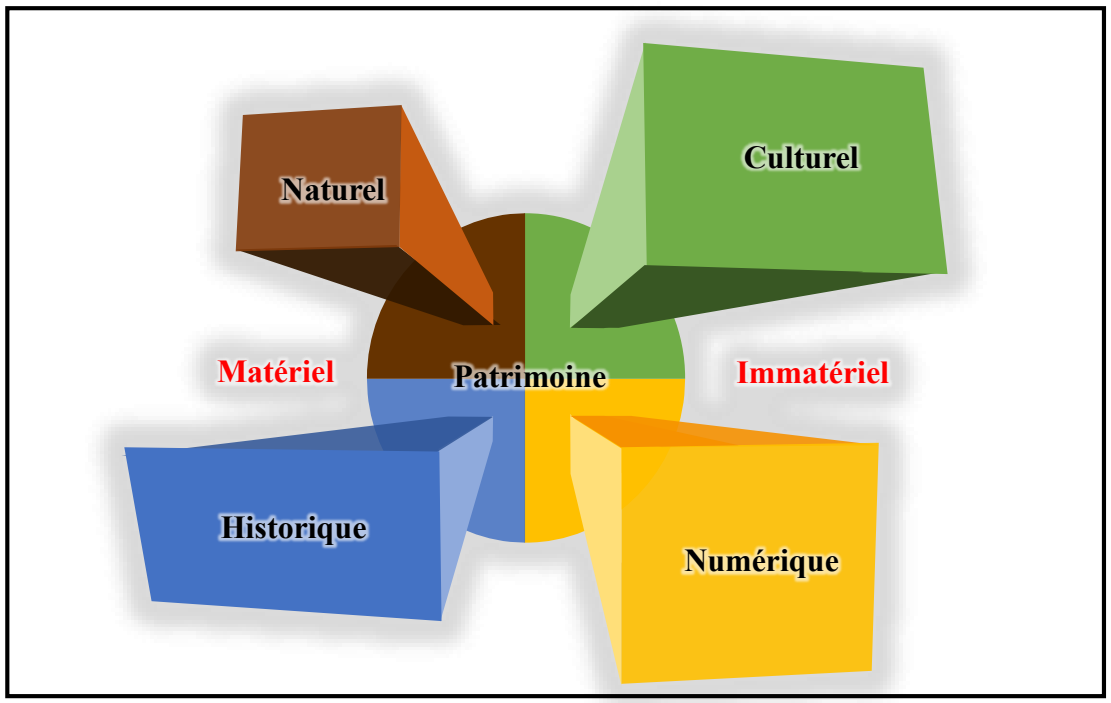


Figure 1 : Les éléments matériels et immatériels du patrimoine, (Source : Auteurs)

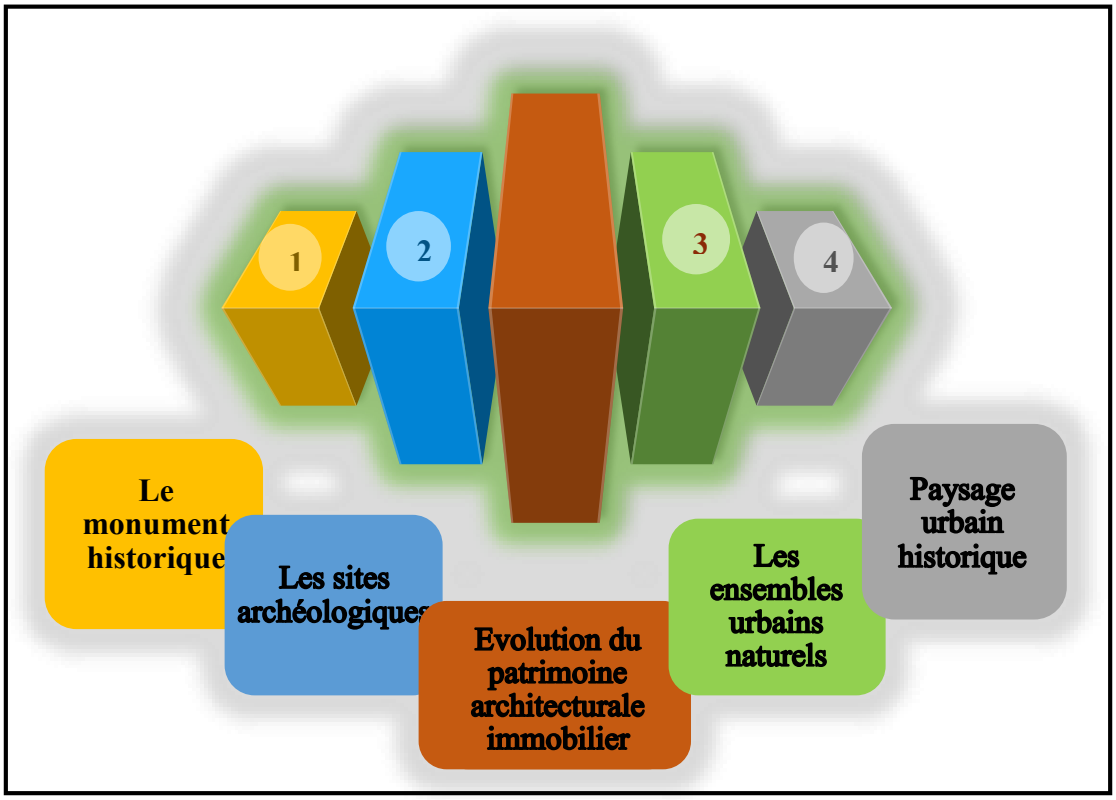


Figure 2: Evolution du patrimoine architecturale immobilier, (Source : Auteurs)

Il s'agit de toute création architecturale, qui concerne aussi bien les grandes œuvres que les plus modestes, qu'elles soient isolées ou groupées, et qui portent témoignage d'une civilisation, d'une évolution significative ou d'un événement historique particulier. [1]

Un site archéologique est un lieu (ou un groupe de sites physiques) ou sont préservées des preuves de l'activité passée (préhistorique ou historique ou contemporaine)
Le site a été, ou peut-être, fouillé grâce à l'archéologie. [1]

Il s'agit de tout un ensemble ou un regroupement de bâtisses de monuments historiques témoin symbolique. [1]

Le paysage urbain historique est le territoire urbain reconnu comme le résultat d'une stratification historique de valeurs et d'attributs culturels et naturels, dépassant les notions de « centre historique » ou « d'ensemble » pour inclure le contexte urbain plus large ainsi que son environnement. [1]

Figure 3: Définition du chaque type de patrimoine, (Source : Auteurs)

Le patrimoine comporte à la fois des éléments matériels et des éléments immatériels. On retrouve, dans le champ du patrimoine matériel, le patrimoine immobilier, mobilier, Archéologique, archivistique et documentaire. Il s'agit donc d'édifices, de monuments, de sites, d'œuvres d'art, d'objets ethnographiques, d'artefacts, d'archives, de livres, brochures ou journaux et d'autres documents imprimés [1].
En somme, le patrimoine matériel rassemble les objets tangibles qui peuvent être conservés, Restaurés et montrés. Ce très vaste champ correspond en grande partie à ce que les musées et Les sociétés d'état acquièrent, conservent, protègent et diffusent [1].
Le patrimoine immatériel, pour sa part, regroupe les savoirs et les savoir-faire qui Caractérisent une collectivité. Cette catégorie concerne : le patrimoine linguistique, la Toponymie, le patrimoine scientifique, le patrimoine audiovisuel, la partie du patrimoine [1]
Artistique qui s'apparente aux savoirs et aux savoir-faire, ainsi que les nombreux éléments du Patrimoine vivant. Ces «objets» immatériels, qu'on désigne sous le terme de « mentefacts », Sa partie intégrante du patrimoine, c'est-à-dire de l'héritage culturel d'une société [1].

I.2.3 Valeurs du Patrimoine

Selon l'historien autrichien Alois Riegl les valeurs du patrimoine sont 2 grandes catégories **:**

I.2.3.1 Les valeurs de remémoration on cite trois valeurs :

- **La valeur d'ancienneté** : que l'on saisit immédiatement par l'aspect « ancien » du monument. la valeur d'ancienneté s'oppose directement à la pratique de restauration, laquelle détruit cette patine du temps et par conséquent le sentiment Romantique [2].
- **La valeur historique :** est présente dans tout monument objet qui marque pour nous un événement clef du développement humain et/ou de la création. La restauration y est ici utilisée avec parcimonie, dans la mesure où elle ne travestit pas le contenu historique du monument [2].

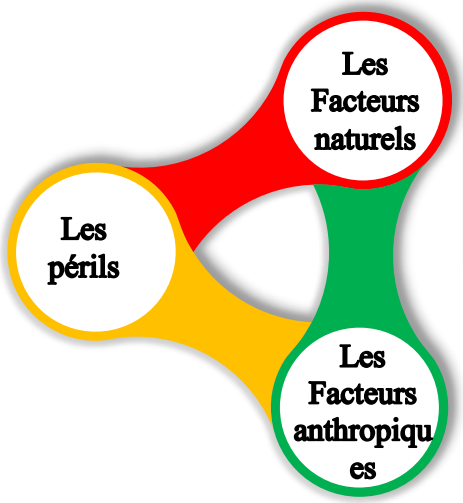
- **La valeur commémorative** : ou valeur de remémoration intentionnelle où le monument est préservé intact dans les siècles et restauré en permanence afin de perpétuer le souvenir ou l'enseignement d'un événement particulier dans les consciences des contemporains [2].

I.2.3.2 Les valeurs de contemporanéité on cite deux valeurs :

- **La valeur d'usage :** où le monument continue d'être utilisé et trouve ainsi une valeur dans le quotidien. L'usage allant souvent de pair avec la valeur historique et, plus rarement, avec la valeur d'ancienneté, il faut veiller à ce que ces valeurs cohabitent sans nuire aux autres [2].
- **La valeur artistique :** Comme du cas de la valeur d'usage et de la valeur historique, la restauration doit ici veiller à ne pas dénaturer l'œuvre originelle, tout en se préoccupant de la rendre « lisible » par le public [2].

I.2.4 Périls aux quels est soumis le patrimoine

Le patrimoine est exposé à plusieurs risques naturels ou bien humains qui peuvent le mettre en danger, causer sa dégradation ou bien carrément sa disparition.



- Les édifices sont exposés aux eaux pluviales effets et l'érosion éolienne [1].
- L'action du temps est un élément principal de la détérioration [1].
- La pollution atmosphérique qui amplifie les phénomènes [1].

- L'action humaine constitue le facteur essentiel de dégradation du patrimoine historique [1].
- Les incendies causés par l'homme [1].
- Les destructions dues aux grands projets d'urbanisme [1].

Figure 4: Les périls du patrimoine, (Source : Auteurs)

I.2.5 Différents concepts de la mise en valeur du patrimoine

❖ **Conservation :**

Action de conservé quelque chose et de le maintenir intact dans le même état.

L'ensemble des mesures et actions ayant pour objectif la sauvegarde du patrimoine culturel matériel, tout en garantissant son accessibilité aux générations présentes et futures On distingue deux types :

✓ **Conservation préventive :** L'ensemble des mesures et actions ayant pour objectif d'éviter et de minimiser les détériorations ou pertes à venir. Elles s'inscrivent dans le contexte ou l'environnement d'un bien culturel, mais plus souvent dans ceux d'un ensemble de biens, quel que soient leur ancienneté et leur état. Ces mesures et actions sont indirectes- elles n'interfèrent pas avec les matériaux et structures des biens. Elles ne modifient pas leur apparence [1].

✓ **Conservation curative :** L'ensemble des actions directement entreprises sur un bien culturel ou un groupe de biens ayant pour objectif d'arrêter un processus actif de détérioration ou de les renforcer structurellement. Ces actions ne sont mises en œuvre que lorsque l'existence même

des biens est menacée, à relativement court terme, par leur extrême fragilité ou la vitesse de leur détérioration. Ces actions modifient parfois l'apparence des biens [1].

❖ **Préservation :** fait de maintenir intact le patrimoine sous toutes ses formes [1].

❖ **Protection :** action de protéger, de défendre quelqu'un contre un danger, un mal, un risque [1].

❖ **Réhabilitation :** la réhabilitation consiste à rendre à un bâtiment ou un ensemble architectural sa valeur d'usage initiale, et son caractère architectural d'origine. Il évoque une démarche consistant à en reproduire avec des moins d'exactitude les caractéristiques d'origine (amélioration d'un bâtiment sans changements de sa fonction principale) [1].

❖ **La restauration :** les courants de restauration en architecture, on distingue trois grandes écoles à travers le mode :

✓ **Courant anglo-saxon :**

Courant des conservateurs. Anti-interventionnistes, fondé sur la notion d'authenticité, qui interdit toute intervention ou restauration, le monument est considéré comme un être humain, il naît, il vit, et il meurt [5].

Appuyé par John Ruskin qui expose dans son livre « Les septes lampes d'architecture » [1].

✓ **Courant français :**

Courant de la restauration stylistique, interventionniste, ils sont allés plus loin que la restauration, ils se permettaient de modifier, les monuments historiques, reconstituaient les parties disparues des édifices, et davantage encore [1].

La typologie stylistique qui, finira par méconnaître le caractère singulier de chaque monument.

« Restaurer un édifice, ce n'est pas l'entretenir, le répara ou le refaire, c'est le rétablir dans un état complet qui peut n'avoir jamais existé à un moment donné» [1].

✓ **Courant Italien :**

Apparu à la fin du 19eme siècle, c'est un courant intermédiaire entre les deux autres, ni trop conservateur ni trop transformateur, restauration permise tout en respectant l'authenticité de l'œuvre et en interdisant toutes modifications. Appuyé par Gustave Giovanni et Camilo Boito.

L'urbanisme de la ville est le reflet du dynamisme d'une société, ses aspirations et ses mœurs par des processus de réorganisation et de remise en fonction [1].

A l'époque de la renaissance, il y a eu reprise de différents éléments architectoniques et celle des grands monuments de l'entité Gréco-romaine [1].

Par la suite, au début du XIX siècle, le fondement de la sauvegarde des monuments a été établi par le concept Restauré et celui de la recomposition [1].

❖ **Valorisation :** donne une plus grande valeur à augmenter la valeur [1].

❖ **Reconversion :** est un changement d'affectation à un bâtiment. C'est un mode de développement urbain qui a pour référence l'histoire afin de promouvoir le dynamisme social et l'adaptation de l'ancien par rapport au perpétuel développement des structures de la ville [1].

❖ **Revitalisation : s**'appliquent surtout aux éléments architecturaux et urbains abandonnés, dépourvus d'âme, de vie ou d'activité. Il s'agit-là plutôt d'une volonté qui se traduit par des opérations d'intégration Apportant aussi de nouveaux éléments pour de nouvelles activités [1].

I.3 Généralité sur l'architecture de terre

I.3.1 A propos de l'architecture de terre

Depuis plusieurs millions d'années, l'homme utilisait la terre comme matériau pour construire son abri. Plus de 15% des œuvres architecturales du patrimoine mondiale de l'UNESCO ont été construits en terre crue [2].

Cependant, ce matériau est en déperdition au profit de matériau moderne malgré les avantages en termes écologique et économique qu'il présente, la construction en terre a prouvé sa durabilité et sa bonne intégration dans le paysage. L'exploitation du matériau préserve les ressources et limite l'atteinte à l'environnement. De son extraction et sa mise en œuvre, il ne subit aucune transformation polluante. En cas de destruction, il peut être réutilisé pour ériger d'autres murs ou rendu à la terre sans qu'aucune décontamination ne soit nécessaire. Il est recyclable à l'infini. La résurgence de la terre dans les filières de construction, portée par des entrepreneurs talentueux montre toute la pertinence de ce matériau pour la région. Construire en pisé dans le Parc aujourd'hui, c'est repenser l'emploi des ressources naturelles et sociales, et préparer un avenir véritablement écoresponsable.

Dans notre pays, cette technique constructive existe le plus souvent dans le sud ou des ksour en terre sont bâtis. Nous la retrouvons également dans la région de Kabylie, sous forme de pisé mais dans une proportion moins importante [2].

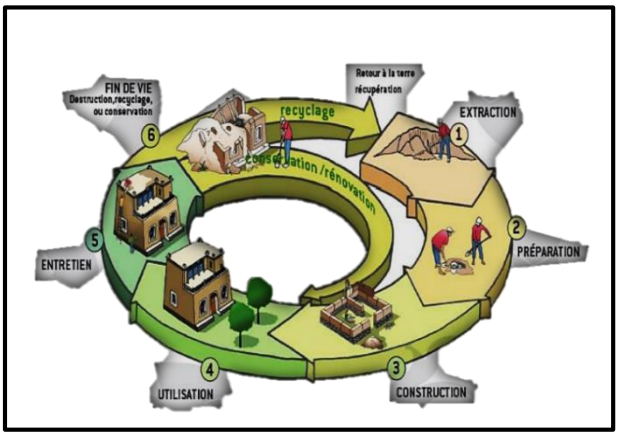


Figure 5: Le cycle écologique vertueux de l'architecture de terre, cas d'une ancienne bâtisse, (Source : http://wpise-livradoisforez.org/spip.php?page=expo1)

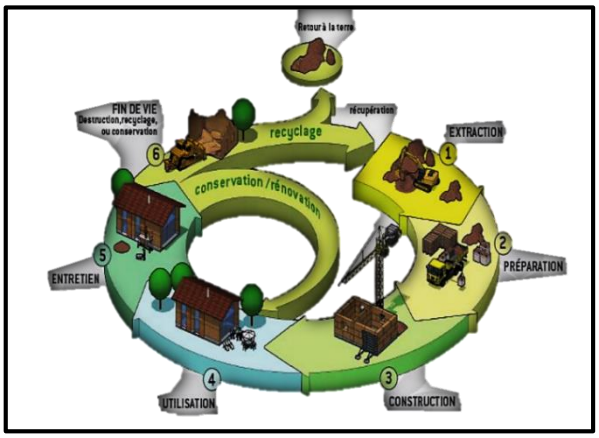


Figure 6: Le cycle écologique vertueux de l'architecture de terre, cas d'une nouvelle bâtisse, (Source : http://www.pise-livradois-forez.org/spip.php?page=expo1)

I.3.1.1 Internes de l'architecture de terre

La terre à de nombreux avantages, prête à être utilisée ou ayant un besoin minimal de préparation, souvent disponible localement, elle favorise la créativité et l'expression de l'identité des travailleurs.

Matériau sauvegardé de l'oubli, dans ce contexte, la construction en terre présente de nombreux points d'intérêt [3].

10 points d'intérêt du matériau terre réunis autour de 4 grandes thématiques : culturel, économique, social et environnemental [3].

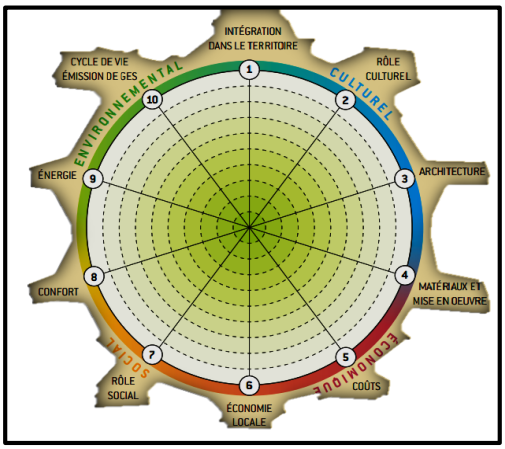


Figure 7: Schéma hypothétique sur les intérêts de l'architecture en terre, (Source : 8421 construire_et_revover_en_pisè_PNR_LF.pdf, p.1)

A_ Intégration dans le territoire : le matériau terre est un élément remarquable de l'identité du territoire. Le garder présent en réhabilitation ou en construction neuve permet de maintenir cet enracinement de l'architecture dans son environnement [3].

B_ Rôle culturel : les constructions en pisé traduisent la subtilité d'un savoir-faire longuement mûri qui mérite d'être préservé. Des techniques de rénovation permettent de maintenir viable et vivant ce patrimoine souvent délaissé [3].

C_ Architecture : l'architecture en pisé, ancienne ou contemporaine, est remarquable. Elle témoigne du bon sens, de l'audace et des capacités d'innovation de ses concepteurs [3].

D_ Matériau et mise en œuvre : ressource disponible en abondance localement, la terre demande peu de transformation et peu d'équipements pour sa mise en œuvre [3].

E_ Cout/Finance : les techniques de construction en terre sont propices à l'auto construction ou l'auto finition permettant une réduction des coûts [3].

F_ Économie locale : la filière terre soutient le développement d'entreprises locales spécialisées et génère du travail dans la rénovation et l'écoconstruction. La plus grande partie du coût d'un mur en pisé est composée de la main d'œuvre donc de salaires reversés localement [3].

G_ Rôle social : le matériau terre est propice à des actions sociales. Il s'adapte bien à des chantiers de formation, d'insertion et à des entraides conviviales [3].

H_ Bien-être : les murs en terre apportent un confort hygrothermique aux habitants, tant dans les bâtiments anciens que dans les constructions neuves et contribuent à un intérieur sain [3].

I_ Énergie : la forte inertie du matériau et ses propriétés hygrothermiques permettent de réguler la température et évitent les gaspillages d'énergie été comme hiver. La filière de construction en pisé consomme très peu d'énergie grise [3].

J_ Cycle de vie et gaz effet de serre : l'analyse du cycle de vie montre que la terre est le matériau le moins émetteur de gaz à effet de serre. La construction en terre ne contient pas de matières dangereuses, et ne dégage pas de gaz toxiques, même en cas d'incendie [3].

I.3.2 Terre à bâtir

Les terres utilisées pour la construction se composent de cinq éléments : cailloux, graviers, sables, silts (ou limons) et argiles. Mais quelles en sont les proportions exactes Chaque terre est unique, et sa composition doit être analysée avant le chantier afin de déterminer la technique de construction la mieux adaptée à la ressource du lieu.

La terre contient :

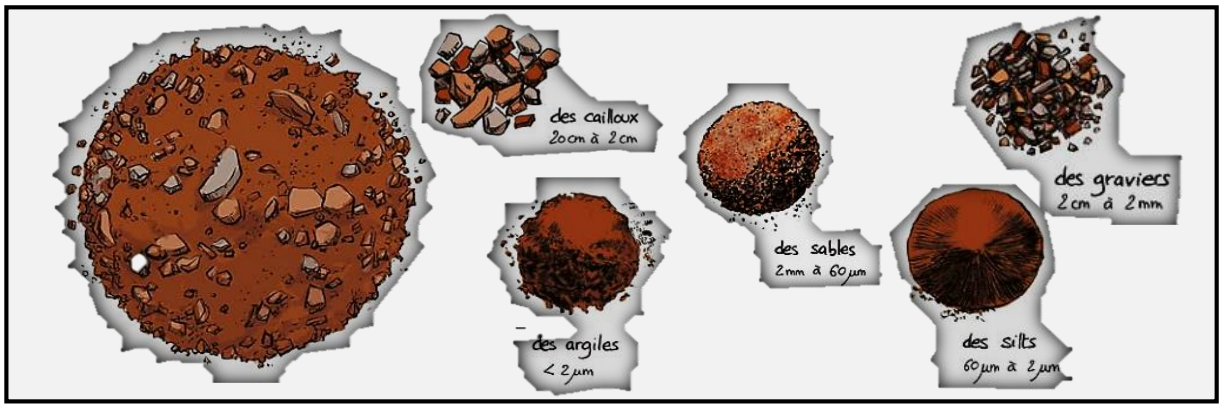


Figure 8: Les grains composants la terre à construire, (Source : 16331_BD_Terra_Award.pdf, p.9)

La partie du sol utilisée pour la construction n'est pas la terre de surface, riche en matériaux organiques, qui est réservée à l'agriculture. Le sol est un empilement de plusieurs couches superposées, appelées horizons. C'est l'horizon B, presque exclusivement minéral, qui est utilisé pour la construction.

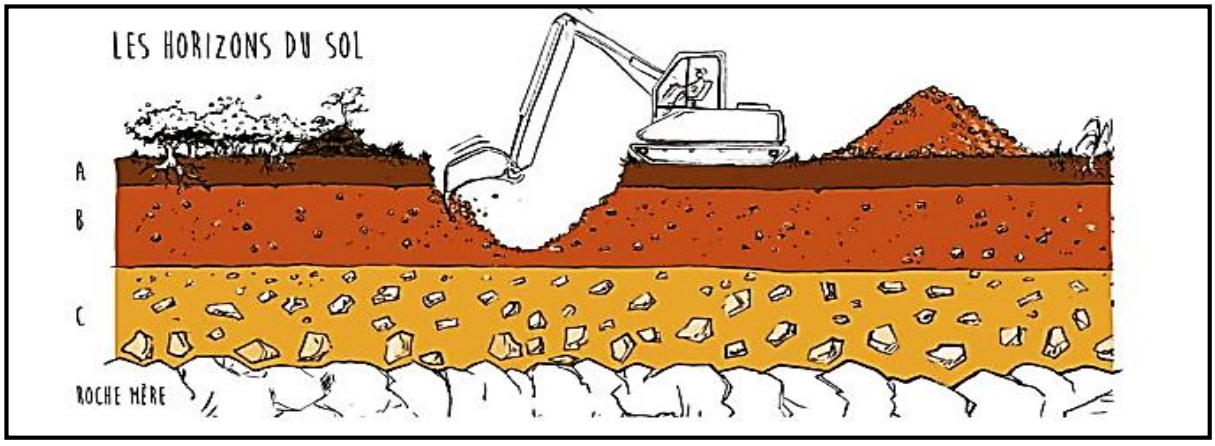


Figure 9 : Les horizons du sol, (Source : 16331_BD_Terra_Award.pdf, p.9)

I.3.2.1 Techniques de la terre

Le schéma dans la Figure I- 10 ci-dessous représente la roue des techniques de la terre à bâtir :

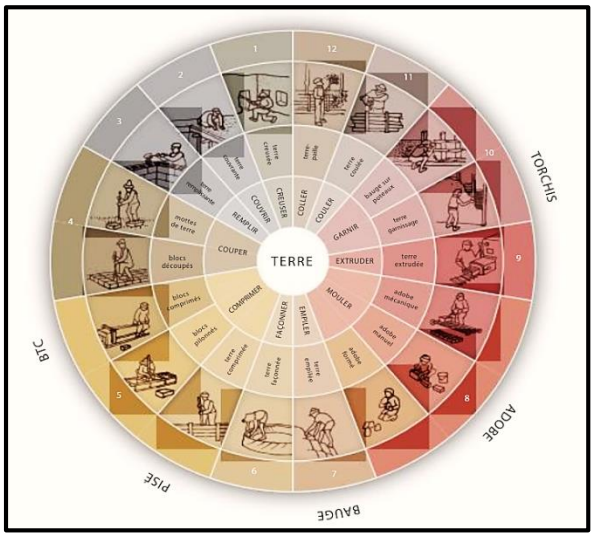


Figure 11 : Roue des techniques de terre, (Source : https://issuu.com/quentinchansavang/docs/une_approche_prospective_du_pis__r_duit, p.14)

I.4 Généralité sur le pisé

I.4.1 Origine du mot

Le nom de pisé provient du latin pinsare qui signifie « broyer ». En vieux français, le verbe piser se traduit par « battre la terre » [4].

I.4.2 Historique

À cause de la technicité liée à l'usage du coffrage le pisé est plus récent que l'adobe ou le torchis. De très anciens vestiges (9^{e} siècle avant J.-C.) ont été repérés en Tunisie, et de nombreux sites inscrits au patrimoine mondial de l'UNESCO en témoignent : tronçons de la Grande Muraille de Chine palais du Potala au Tibet et de l'Alhambra à Grenade, ksar Aït Ben-Haddou au Maroc. En France, le pisé est traditionnel en Auvergne et surtout en Rhône-Alpes : 40 % de l'architecture vernaculaire et plusieurs immeubles du vieux Lyon. Sa renaissance doit beaucoup aux livres de l'architecte-entrepreneur François Cointeraux (1740-1830) [4].

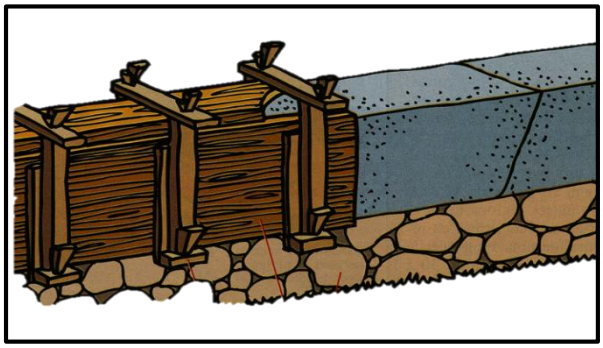
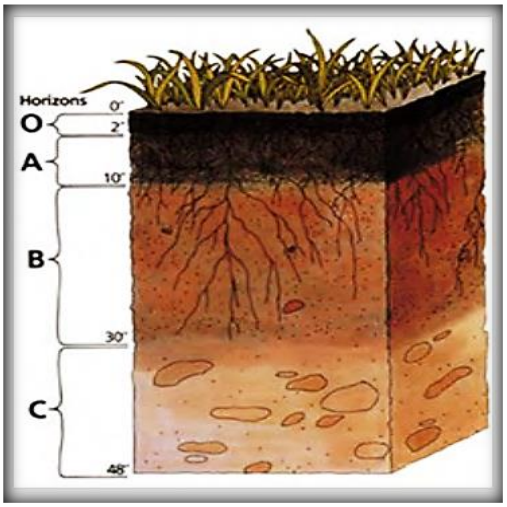


Figure 10: Mur en pisé à l'ancienne, (Source : http : //www.batirama.com/article/169-terre-crue-4-techniques-a-redecouvrir.html)

I.5 Terre à pisé

C'est une terre argileuse prélevée juste en dessous de la terre végétale. Les terres à pisé sont des mélanges très hétérogènes de grains, qui vont du caillou de quelques centimètres à des particules d'argile de quelques millièmes de millimètres. Les plus gros grains sont donc 100 000 fois plus gros que les plus petits, et cet ensemble se combine en un matériau dense et solide permettant de construire des murs [5].



Les différents horizons d'un profil de sol

O : Litière

A : Humus, ou terre végétale

B : Terre utilisée pour le pisé

Figure 12: Les horizons d'un profil de sol, (Source : dossier-pise-pays-voironnais-v.pdf, p.10)

La photo ci-contre, prise au microscope électronique à balayage illustre bien le fait que l'argile est le liant de la terre. On aperçoit deux grains de sable recouverts par un film d'argile et liés entre eux par un pont argileux. L'argile « colle » les différents grains entre eux. Cependant, une observation de ce pont argileux montre que celui-ci est constitué d'un ensemble de particules, les argiles, sortes de grains plats microscopiques, liées entre elles par des ponts d'eau. Finalement, le véritable liant de la terre, c'est l'eau [5].

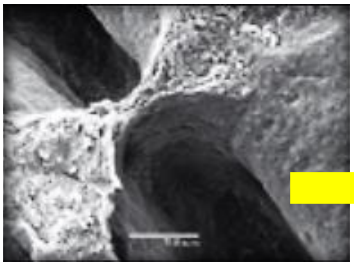


Figure 13 : Prise microscopique d'un pont d'argile liant de grains de sable, (Source : publicationPiseH2O.pdf, p.17

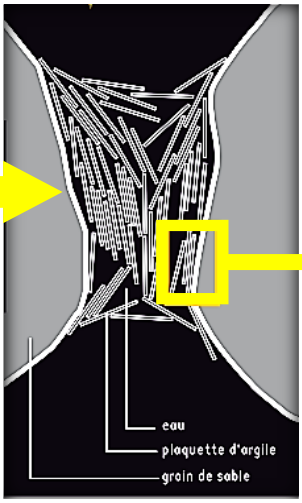


Figure 14: Schéma du pont argileux liant des grains de sable, (Source : publicationPiseH2O.pdf, p.17

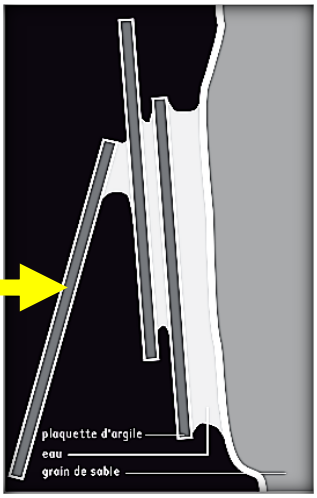


Figure 15 : Agrandissement du pont d'eau liant les plaquettes d'argiles, (Source : publicationPiseH2O.pdf,

I.5.1 Caractéristiques de la terre à pisé

Les caractéristiques d'une terre à pisé sont particulières, les meilleurs terres doivent se composer de:

- Gravier 0 à 20%
- Sable 40 à 50 %
- Limon 35 à 20%
- Argile 15 à 25%¨

NB : Si la terre est trop argileuse, elle ne se compacte pas mais se déplace. Si elle est trop humide, elle va onduler.

La terre est stockée en tas et bâchée pour éviter l'humidité en cas de pluies, ou encore le dessèchement en cas de vent. La terre est extraite par mottes, cassées, elle est ensuite emportée sur le lieu de chantier. Il faut « fraser » le terre, c'est-à-dire la répartir en fines particules 'aération et oxygénation de l'argile, expansion et homogénéisation).En principe on utilise la terre à pisé sans ajouts, mais on peut la mouiller à l'arrosoir avec comme risque de la voir craqueler au séchage. Si la terre est trop argileuse ou trop mouillée on peut lui ajouter un peu de chaux. Ce rajout doit être fait avec prudence, le pisé risquant par réaction chimique de se fendiller. La terre propice à une bonne construction en pisé ne peut être prélevée que de mai à fin août. Exceptionnellement jusqu'à fin octobre. On parle alors de «terre en sève », de terre qui « travaille » ou encore de terre « ressuyée ».Pour estimer la qualité de la terre on peut effectuer le test de la poignée : on serre la terre dans sa main pour vérifier son degré d'humidité. La main ouverte doit laisser une boule qui se tienne et qui porte l'empreinte des doigts sans coller à la main ni être émiettée [5].

I.6 Techniques du pisé

I.6.1 Outils

I.6.1.1 Cas d'un coffrage en bois

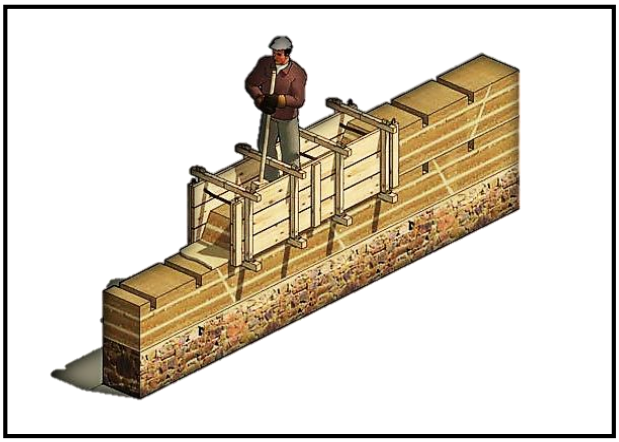


Figure16 : Technique de la banchée auvergnate, (Source : 8421 construire_et_revover_en_pisè_PNR_LF.pdf, p.4)

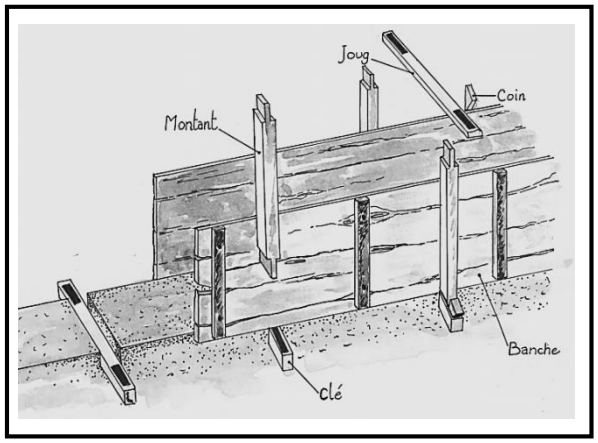


Figure 17 : Coffrage en bois, (Source : dossier-pise-pays-voironnais-v.pdf, p.12)

Les banches **:** sont réalisées avec 3 à 4 planches droites en bois sec [6].

Coffrages : l = 40 cm, L = 180, h = 80 , afin d'obtenir un parement lisse à l'intérieur et d'empêcher les motte de terre d'adhérer aux planches, celle-ci rabotées. Les planches sont assemblées par rainures et languettes. Des poignées de fer, « manettes », permettent de transporter les banches. Le coffrage est fermé par des fonds de planches, appelés encore « closoir» ou « tête de moule » [6].

Les clés : les banches reposent perpendiculairement sur des clés ou lassoniers [6].
Aux deux extrémités des clés, dans les trous, vont venir s'insérer les aiguilles de deux poteaux parallèles aux banches que l'on nomme les montants [6].
Les jougs : sont fixés sur la partie supérieure des montants et assurent la cohésion de l'ensemble. On peut aussi utiliser le serre-joint [6].
Les coins : sont enfoncés dans les clés et les jougs, ils servent à serrer les montants et les banches sur l'assise du mur déjà faite. Leur rôle est important, c'est eux qui donnent la solidité à l'ensemble [6].
Les renvois : sont des morceaux de bois fixés à l'intérieur de la banche qui servent à corriger leur verticalité. Pour vérifier cette dernière ont utilisé un fil à plomb fixé au joug. Le renvoi donne de la rigidité au rectangle formé par la clé, les deux montants et le joug [6].
La pelle : elle sert à repartir la terre par petite couche dans les banches [6].
Le pisoir : Le pisoir pour damer/tasser la terre est assez "pointu" de manière à ce que la pression d'impact soit suffisamment importante [6].
Les paniers d'osier: La terre propice à la construction est « portée à la corbeille », le panier est directement posé sur la nuque protégée d'un coussin de paille [6].

Figure18 : La pelle, (Source : dossier-pise-pays-voironnais-v.pdf, p.14)

Figure 19 : Le pisoir, (Source : dossier-pise-pays-voironnais-v.pdf, p.14)

Figure 20 : Les paniers d'osier, (Sourcedossier-pise-pays-voironnais-v.pdf, p.14)

I.6.1.2 Cas d'un coffrage métallique

La terre est compactée avec un fouloir pneumatique relié à un compresseur.

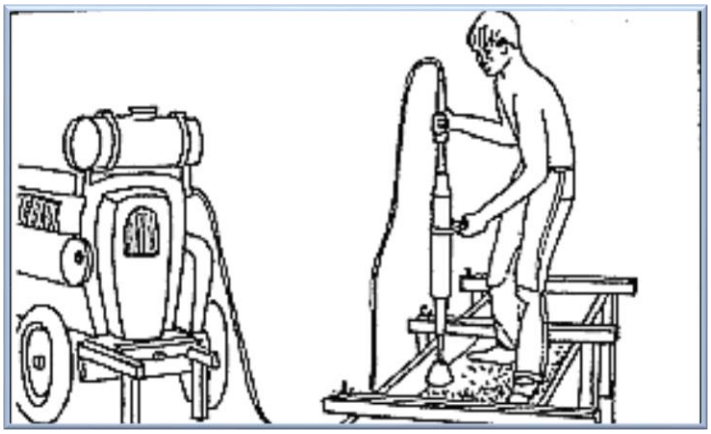


Figure 21 : Le damage avec un fouloir pneumatique, (Source : construction en terre.pdf, p.26

Figure 22 : Un fouloir pneumatique, (Source : construction en terre.pdf, p.26)

Figure. I- 23 : Composantes d'un fouloir pneumatique, (Source : construction en terre.pdf, p.26)

Figure. I25 : Coffrage en métal de type béton etgodetmalaxeur,(Source:8421construire_et_ revover en pisè PNR LF.pdf, p.6)

Figure I.27 : Une pilonneuse, (Source : construction en terre .PDF, p.27)

Figure. I- 29 : Une plaque vibrante, (Source : construction en terre, p.4)

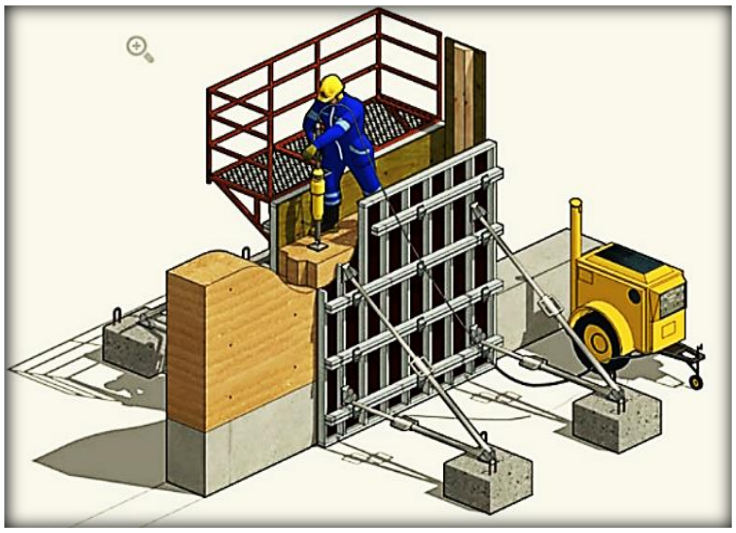


Figure. I- 24 : Un coffrage métal a progression linéaire, (Source : 8421construire_et_revover_en_pisè_PNR_LF.pdf, p.6)

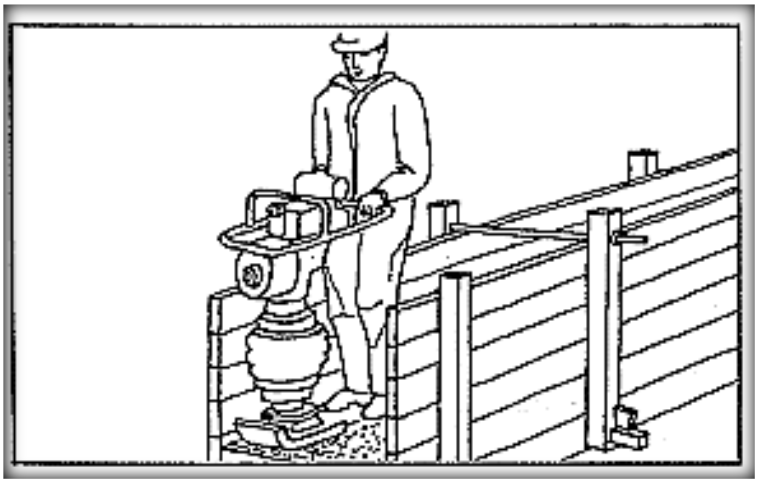


Figure. I- 26 : Le damage avec une pilonneuse, (Source : construction en terre.pdf, p.27)

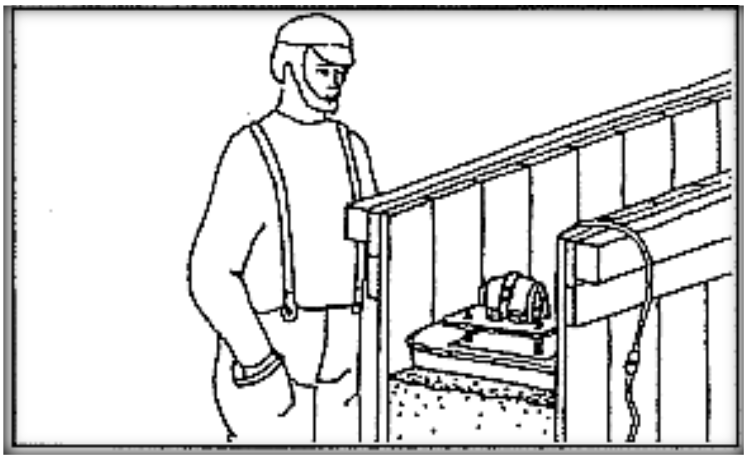


Figure. I- 28 : Technique de la plaque vibrante, (Source : construction en terre.pdf, p.4)

I.6.2 Mise en œuvre

La mise en œuvre du pisé en fonction du contexte géographique, culturel et historique.

I.6.2.1 Soubassement du mur

Avant de monter les murs de terre il est indispensable d'élever un soubassement. Son rôle est déterminant pour la construction, il protège l'habitat des remontées d'humidité du sol et des rejets de l'eau de pluie et doit être suffisamment important dans les écuries ou les haut pour protéger le mur de pisé d'une inondation. Ce mur de galet est également étables, pour éviter que les animaux n'usent le mur en pisé en se frottant contre. Dans la région du lac de Paladru, les soubassements des murs en pisé sont réalisés avec des galets de moraine glaciaire. Les galets sont soigneusement appareillés en épis, apportant un côté esthétique à la construction.

Les soubassements des bâtiments agricoles sont beaucoup plus grossiers Les galets sont liés entre eux par un mortier fait d'argile et de chaux [6].

Des « réserves » sont laissées dans la partie haute du soubassement tous les 80 cm environs. Elles sont destinées à recevoir les lassoniers qui soutiennent les banches et les aiguilles qui maintiennent l'écartement. Les banches sont ensuite montées [6].

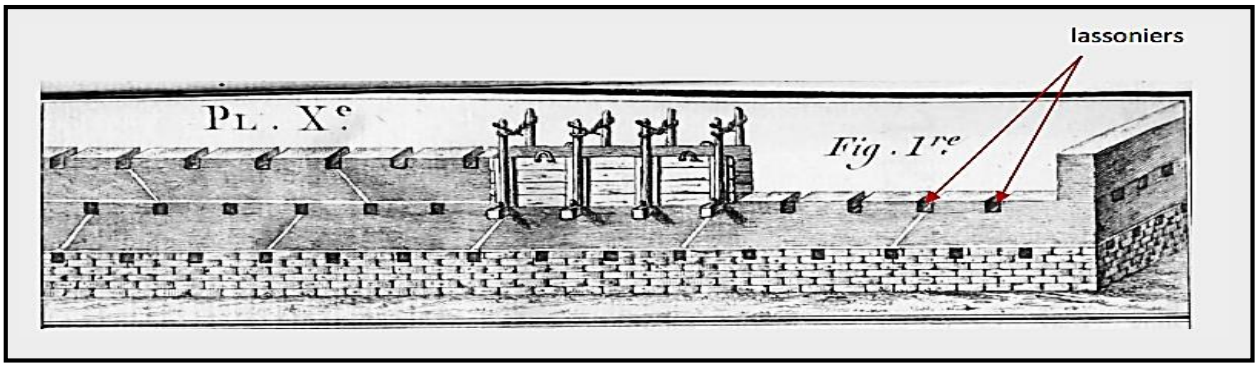


Figure. I- 30 : Un soubassement d'un mur en pisé y compris les lassoniers, (Source : dossier-pise-pays-voironnais-v.pdf,

I.6.2.2 Mise en place de la terre

Avant de mettre la terre, il faut étendre un glacis de mortier uniquement sur le pourtour du coffrage, et couvrir de quelques pierres minces les tranchées où sont les clefs. Ce glacis empêche la première terre, jetée dans la banche, de couler et améliore la finition. La terre est épandue sur 15 à 20 cm. Ces couches de terre « foisonnée » sont ensuite compactées à l'aide du pisoir et ramenées à moitié d'épaisseur. On frappe d'abord en travers, perpendiculairement à la banche, ensuite les coups de pisoir sont donnés tout au long de la banche pour « faire la fleur », ou l'affleurement, et pour durcir les deux côtés du futur mur. Les couches couchent se succèdent jusqu'à ce que la banche

soit remplie, ce volume de terre comprise entre les banches s'appelle une banchée. Pour faire une plaine banchée, soit 80 cm, il faut une dizaine de couche de terre compactée [6].

Figure. I- 31 : La mise en place de la terre, (Source : dossier-pise-pays-voironnais-v.pdf, p.16)

I.6.2.3 Débanchage

Figure. I- 32 : Le décoffrage, (Source : dossier-pise-pays-voironnais-v.pdf, p.16.

Une fois les banches remplies, il faut débancher (ou enlever les banchés), pour enlever les coins et les lassoniers (pris dans la terre) on donne un coup de maillet, on mailloche [10].

Après débanchage l'ensemble est placé sur la partie voisine du mur. Entre les deux banches on met une trainée de mortier qui va former le liant des deux masses de terre. Le mortier est réalisé avec une chaux grasse. Pour assurer la solidité du mur, les banches sont montées en retrait d'un centimètre l'une sur l'autre. Ainsi la base du mur est légèrement plus large que le sommet (on donne un « fruit » au mur). Les banches sont entrecroisées sur les façades et placées en chicanes dans les chainages d'angles [6].

I.6.2.4 Joints entre les banches

On remarque sur les bâtiments en pisé deux variantes de joints entre les banches d'une même assise. Les joints verticaux et les joints obliques, en général à 45°. Ces joints caractérisent les façades en pisé.

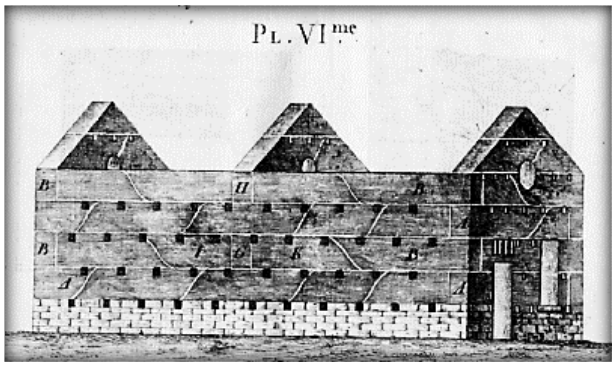


Figure. I- 33 : Les joints oblique d'une façade en pisé, (Source : dossier-pise-pays-voironnais-v.pdf, p.16)

Figure. I- 34 : Les joints verticaux d'une façade en pisé, (Source : dossier-pise-pays-voironnais-v.pdf, p.16)

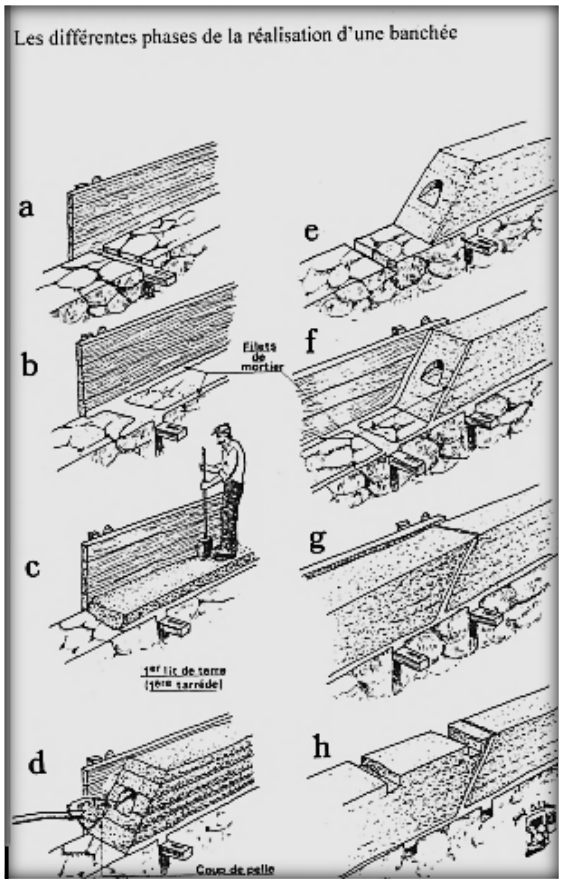


Figure. I- 35 : Les différentes phases de la réalisation d'une banchée, (Source : dossier-pise-pays-voironnais-v.pdf, p.16)

I.6.2.5 Angles

La réalisation des angles ne nécessite pas de banches spéciales et l'on se contente de croiser alternativement les banches en bout de mur à chaque assise. Le traitement de l'angle à toujours posé quelques problèmes, ce dernier est en effet plus exposé à l'érosion. Plusieurs techniques permettent de le renforcer :

- En plaçant dans l'angle extérieur un linteau triangulaire pour éviter l'angle droit trop fragile [6].
- En déposant un filet de chaux de part et d'autre d'angle chaque fois que l'on terminé de damer une couche de 10cm d'épaisseur [6].
- En renforçant l'angle par une maçonnerie de galets de briques ou de pierres [6].

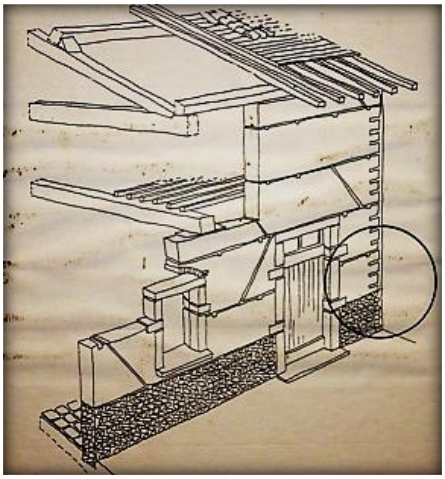


Figure. I- 36 : La réalisation des angles pour un mur en pisé, (Source : dossier-pise-pays-voironnais-v.pdf, p.19)

Les matériaux utilisés pour les chainages d'angles: La qualité des ouvrages diffère également selon l'époque de la construction, la vocation du bâtiment et les moyens financiers des habitants. En règle générale :

La partie basse du chaînage (égale à la hauteur d'appareillage des galets) :

L'emploi des matériaux plus denses, et non poreux comme des biques de terres cuites ou des bétons préfabriqués (artisanalement) permettent de diminuer l'action des eaux de pluies et de renforcer l'angle [6].

La partie supérieure à hauteur identique des banches de pisé : le chaînage d'angle présente systématiquement une alternance de petites strates en pisé et mortier de chaux.

Ces strates font entre 0.20 et 0.30 d'épaisseur selon les cas, et ont une largeur identique à l'épaisseur des murs sont environ 0.40 cm [6].

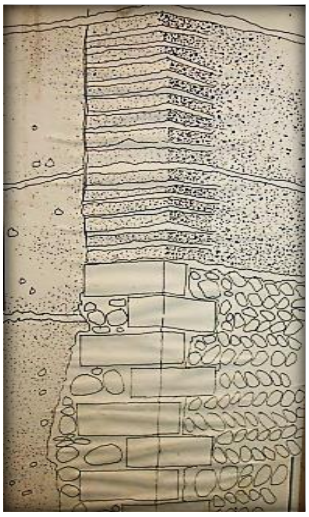


Figure. I- 37 : Les deux parties du chainage d'angles, (Source : dossier-pise-pays-voironnais-v.pdf, p.19).

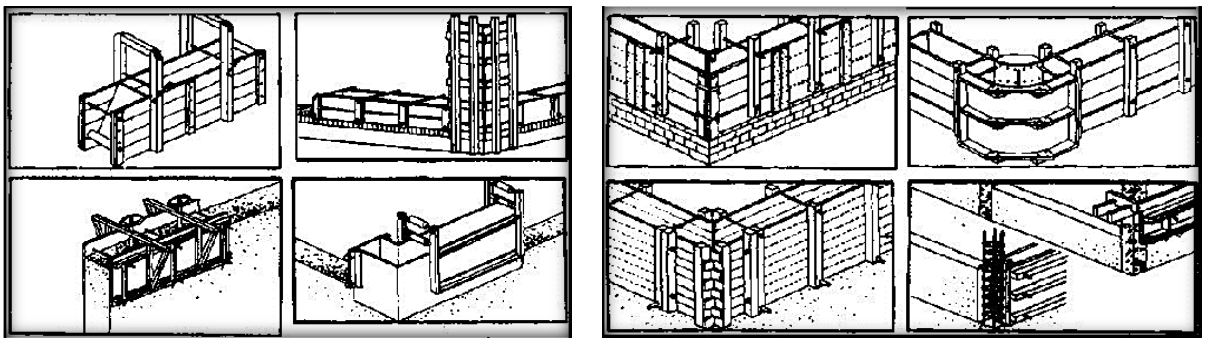


Figure. I- 38 : Les différents types du chainage d'angles, (Source, https : //issuu.com/rhythma/docs/rammed_earth)

I.6.2.6 Ouvertures

Figure. I- 39 : L'encadrement d'une fenêtre, (Source : dossier-pise-pays-voironnais-v.pdf,

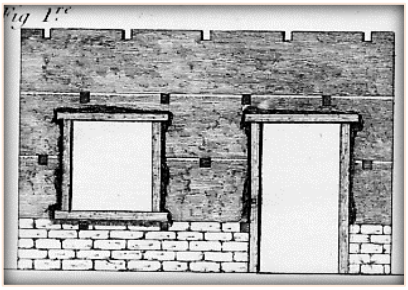


Figure. I- 40 : L'emplacement d'une porte et une fenêtre dans un mur en pisé, (Source : dossier-pise-pays-voironnais-v.pdf)

Il faut tout au long de la construction prévoir l'emplacement des portes et des fenêtres. Chaque fois que l'on a une ouverture à pratiquer on pose dans la banche deux fonds de banche. On les évase vers l'extérieur pour faciliter les ouvertures. Les encadrements se font souvent en maçonnerie, en brique ou en bois. Des cadres placés dans la banche, solidement étayés tiennent parfois lieu de châssis. Les petits éléments de la façade (loquets, gonds de porte…) doivent être profondément implantés dans le mur à l'aide de scellements importants. Cela explique l'utilisation fréquente de la brique pour l'encadrement des fenêtres ou portes [6].

I.6.2.7 Plancher en pisé

Figure. I- 41 : Un ancien plancher en pisé, (Source : dossier-pise-pays-voironnais-v.pdf, p.23)

Le plancher en pisé est un élément qui a malheureusement tendance à disparaître, c'est en effet l'un des éléments les plus « sensibles » et fragiles de la construction en terre. Les planchers en terre avaient cependant des rôles essentiels pour la construction. On retrouve ces planchers sous les combles et non dans les planchers dit « courants» des étages [4].

On peut donner trois explications essentielles quant à l'existence de ces planchers :

- Les planchers en terre permettaient de protéger le bâtiment (et la charpente) de la propagation des incendies [4].
- La terre, toujours peu chère et disponible est utilisée au maximum. De plus, elle est un bon isolant thermique, permettant de réguler la température à l'intérieur de la maison [4].
- La terre est également un bon matériau permettant de réguler l'hygrométrie à l'intérieur de la maison. Les planchers de terre associés aux mus en pisé assurent une ambiance toujours appréciée de nos jours [4].

I.6.2.8 Aspect final du mur en pisé

Le mur en pisé sèche lentement, il faut qu'il «évapore » pendant un à deux ans. Pour que l'évaporation de l'humidité soit possible la face intérieur est enduite en premier, l'extérieur restant vierge. Dans ce processus de séchage, les bandes de mortiers entre les banches jouent un rôle important ; elles tirent l'humidité vers l'extérieur tout en permettant un meilleur accrochage des enduits sur la façade [3].

Si la qualité de la construction dépend du choix de la terre, l'aspect final du mur dépend de la qualité du travail des ouvriers. Ainsi, si plusieurs ouvriers ont travaillé dans la même banche, leur travail doit être homogène, donc la terre tassée également [3].

- Une terre mal tassée ou encore de mauvaise qualité laisse apparaître des « nids d'abeilles » ou « ratières », il reste des trous à la surface du mur [3].

- Si la terre est trop mouillée elle va se fendre, on dit que le mur fait le « coup de sabre » [3].
- Une terre ayant été tassée trop humide et dont une face est exposée au soleil durant le séchage, « arque » ou « fait deux fer », elle se fend dans son épaisseur et sa longueur [3].
- Une bonne terre se fendille toujours à l'extérieur, elle fait «faïence » alors que l'intérieur reste intact [3].
- L'aspect du mur peut également se dégrader au fil du temps sous l'action de l'eau. L'eau reste l'élément contre lequel il faut se protéger [3].

« De bonnes bottes et un bon chapeau »

La toiture : Si la couverture n'assure pas une étanchéité parfaite, l'eau de pluie s'infiltre, le haut des murs est lessivé et l'ensemble n'a plus de cohésion [3].

La façade : avec les projections d'eau de pluie, les enduits de chaux se décollent, tombent et des fissures apparaissent également [3].

Les soubassements : l'humidité du sol peut remonter par capillarité à travers les murs occasionnant des remontées de salpêtre qui lessivent la base des murs [3].

Figure. I- 42 : L'infiltration des eaux pluviales, (Source : dossier-pise-pays-voironnais-v.pdf, p.25)

Figure. I- 43 : La fissuration du mur, (Source : dossier-pise-pays-voironnais-v.pdf, p.25)

Figure. I- 44 : Le décollement d'enduit à chaux, (Source : dossier-pise-pays-voironnais-v.pdf, p.25)

Figure. I- 45 : La remonté capillaire, (Source : dossier-pise-pays-voironnais-v.pdf, p.25)

I.7 Evolution du système constructif

La construction en pisé a su s'adapter à toutes les époques et à tous les usages (grange agricole, habitation, salle polyvalente...). Plusieurs architectes, dans le Livradois-Forez comme dans le reste du monde, ont su transcender les systèmes constructifs séculaires pour produire une architecture contemporaine exemplaire et innovante, qui n'a rien perdu des vertus du matériau terre. Avec le temps, les systèmes monolithiques traditionnels ont laissé la place à des architectures plus ouvertes sur l'extérieur, laissant entrer la lumière et les apports solaires en hiver [7].

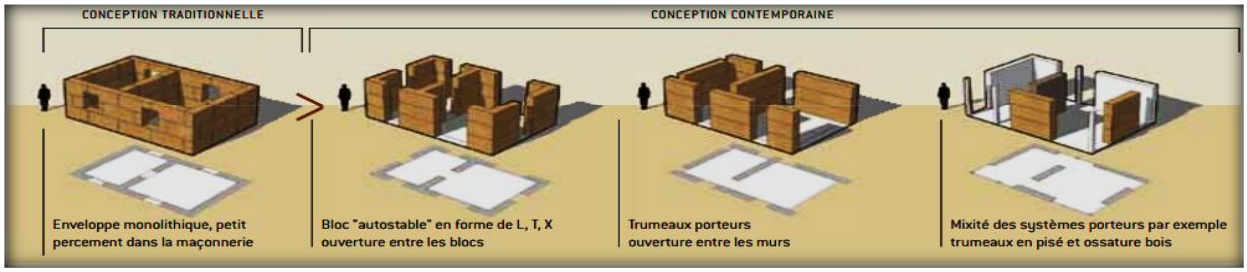


Figure. I- 46 : L'évolution du système constructif, (Source : 8421 construire_et_revover_en_pisè_PNR_LF.pdf, p.9)

I.7.1 Conception traditionnelle

Dans les maisons traditionnelles, l'espace est entièrement clos par les murs en pisé, longs et continus, qui forment une enveloppe monolithique percée par les baies le plus souvent de petites dimensions. C'est une architecture au volume simple, qui renferme généralement dans un même volume plusieurs fonctions. Tout autant que les modes de vie, usages et exigences de confort d'alors, c'est la recherche de simplicité dans les techniques de mise en œuvre, les matériaux disponibles et les connaissances techniques qui ont créé cette architecture (mise en œuvre linéaire, petit coffrage facilement manipulable, portée courte des linteaux, murs très épais) [7].

Construction traditionnelle : Elle regroupe souvent plusieurs fonctions, les espaces d'habitations sont très cloisonnés et les percements y sont limités pour un meilleur confort en hiver.

Figure. I- 47 : Une construction traditionnelle en pisé, (Source : 8421 construire_et_revover_en_pisè_PNR_LF.pdf,

I.7.2 Conception contemporaine

Les projets contemporains font varier les systèmes constructifs. Par exemple, le principe des trumeaux de pisé, entre lesquels les ouvertures prennent place, offre une grande liberté au concepteur. Cette alternance entre pisé et grandes ouvertures crée des espaces fluides, favorisant le lien avec l'environnement du bâtiment. La longueur réduite des murs, généralement d'une banchée, évite les fissurations de retrait, et permette même de préfabriqué des éléments de pisé en atelier. La stabilité de ces ouvrages nécessite l'intervention de bureaux d'études technique [7].

Construction contemporaine : Elle est entièrement dédiée à l'habitation et au confort, ouverte sur l'extérieur et le paysage pour la lumière et les vues, peu cloisonnée à l'intérieur pour une plus grande fluidité des circulations.

Figure. I- 48 : Une construction contemporaine en pisé, (Source : 8421 construire_et_revover_en_pisè_PNR_LF.pdf,

I.7.3 Détails constructifs

I.7.3.1 Exemple traditionnel

Les matériaux traditionnels (bois, terre, pierre maçonnée...) sont par nature perméables à la vapeur d'eau. Ils peuvent absorber de l'humidité mais également la rendre par évaporation. Les systèmes constructifs développés laissent "respirer" les murs pour éviter les accumulations d'eau dangereuses pour la structure notamment dû aux remontés capillaires [7].

Au niveau de la toiture ou des planchers, les charges sont appliquées sur des pièces ponctuelles de répartition (pierres plates ou bois). Les chaînages et tirants sont rares et les petites fissures sont acceptées. Le bâtiment compose avec son terrain : il bouge, respire, mais garde sa stabilité [7].

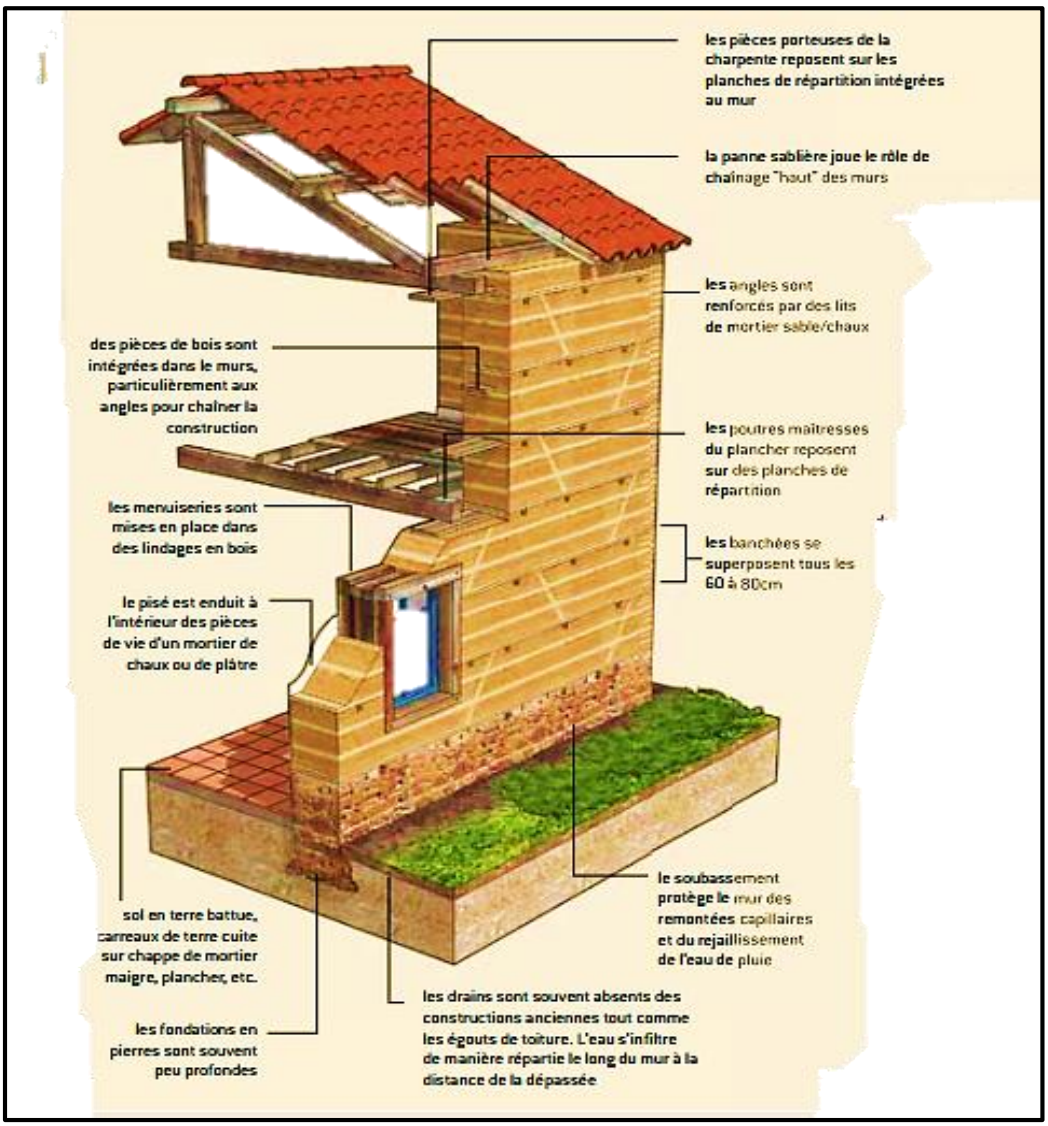


Figure. I- 49 : Un exemple d'une construction traditionnelle en pisé, (Source : 8421 construire_et_revover_en_pisè_PNR_LF.pdf, p.10)

I.7.3.2 Exemple contemporain

Les projets contemporains cherchent à mieux protéger le pisé des transferts d'humidité avec le sol en le posant sur une plateforme étanche. Les remontées capillaires dans les fondations et dans le soubassement sont évitées. La base, généralement en béton armé ou en pierres avec barrière capillaire, est un bouclier qui bloque les échanges avec le terrain. Le pisé reste perspirant pour laisser passer l'humidité générée par l'intérieur de la maison (humidité du sol, habitants, pièces humides...). Les murs sont liés entre eux par les planchers et la charpente qui peut faire office de chaînage [7].

Ici une structure mixte, rez-de-chaussée en pisé et étage en ossature bois.

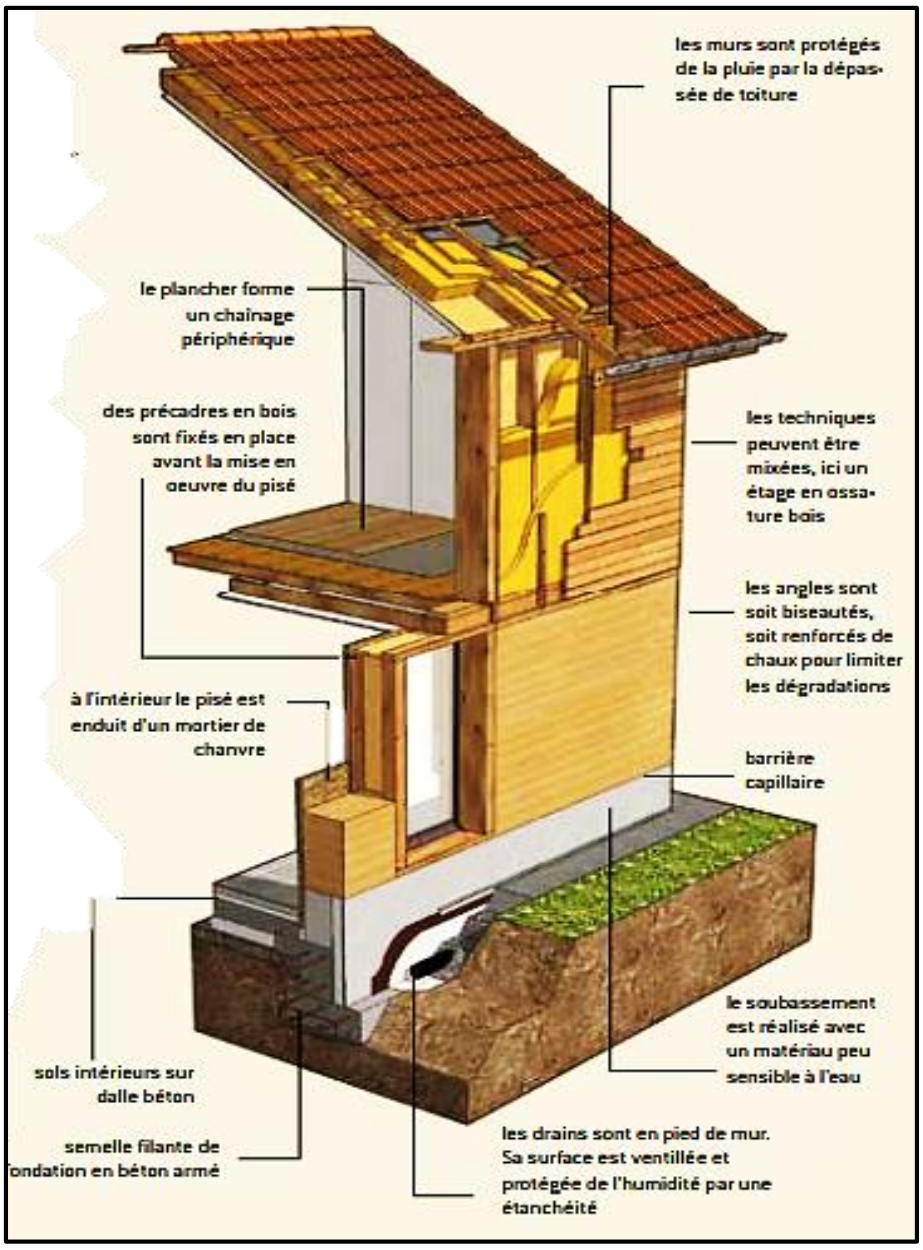


Figure. I- 50 : Un exemple d'une construction moderne en pisé, (Source : 8421 construire_et_revover_en_pisè_PNR_LF.pdf, p.10)

I.8 Pathologies du pisé

Le pisé vit avec son environnement, les bâtiments en pisé entretiennent une relation sensible avec l'environnement qui les accueille. Leur implantation topographique, leur orientation par rapport aux pluies, au soleil et au vent, la hauteur du soubassement ou encore la forme de la toiture sont autant de facteurs dictés par l'expérience et le bon sens qui contribuent à la longévité des structures. Il est pourtant facile de perturber cet équilibre et d'engendrer d'importants dégâts. **L'eau et les mauvaises pratiques,** principaux ennemis du pisé Les désordres constatés sur le pisé sont principalement liés à des accumulations accidentelles d'humidité, suite par exemple à une fuite dans une toiture ou une stagnation d'eau à la base d'un mur. Ces accidents sont le fruit de mauvaises pratiques ou du manque d'entretien de l'environnement des bâtiments [7].

1 **EROSION DIRECTE :** par la pluie L'érosion par la pluie est très lente, et advient lors des premières années suivant la construction. Le lavage des fines particules de surface expose alors les sables qui protègent le mur et réduisent la vitesse d'érosion.

2 **RAVINE :** perte de matière sur un mur liée à un écoulement accidentel d'eau.

3 **SILLON DESTRUCTEUR :** bande érodée de la partie basse du mur en pisé, à l'endroit où les remontées capillaires s'évaporent. L'apparition de ces sillons peut être accélérée en hiver, quand le pisé humide gèle.

4 **SALPÊTRE :** l'efflorescence de nitrates en surface de mur, appelée salpêtre, détruit la cohésion du matériau et accélère la formation des sillons destructeurs. Le salpêtre est courant dans les lieux ayant abrité des engrais (nitrates) ou dans les anciennes étables (sels des urines).

5 **DÉCOLLEMENT DE L'ENDUIT :** les enduits étanches se décollent par plaques, en commençant par le bas, là où le mur est le plus humide.

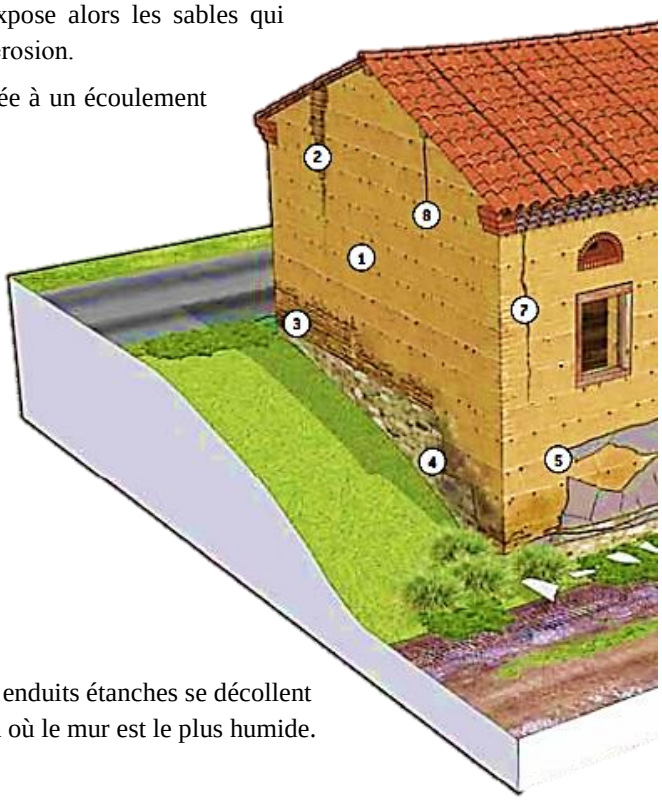
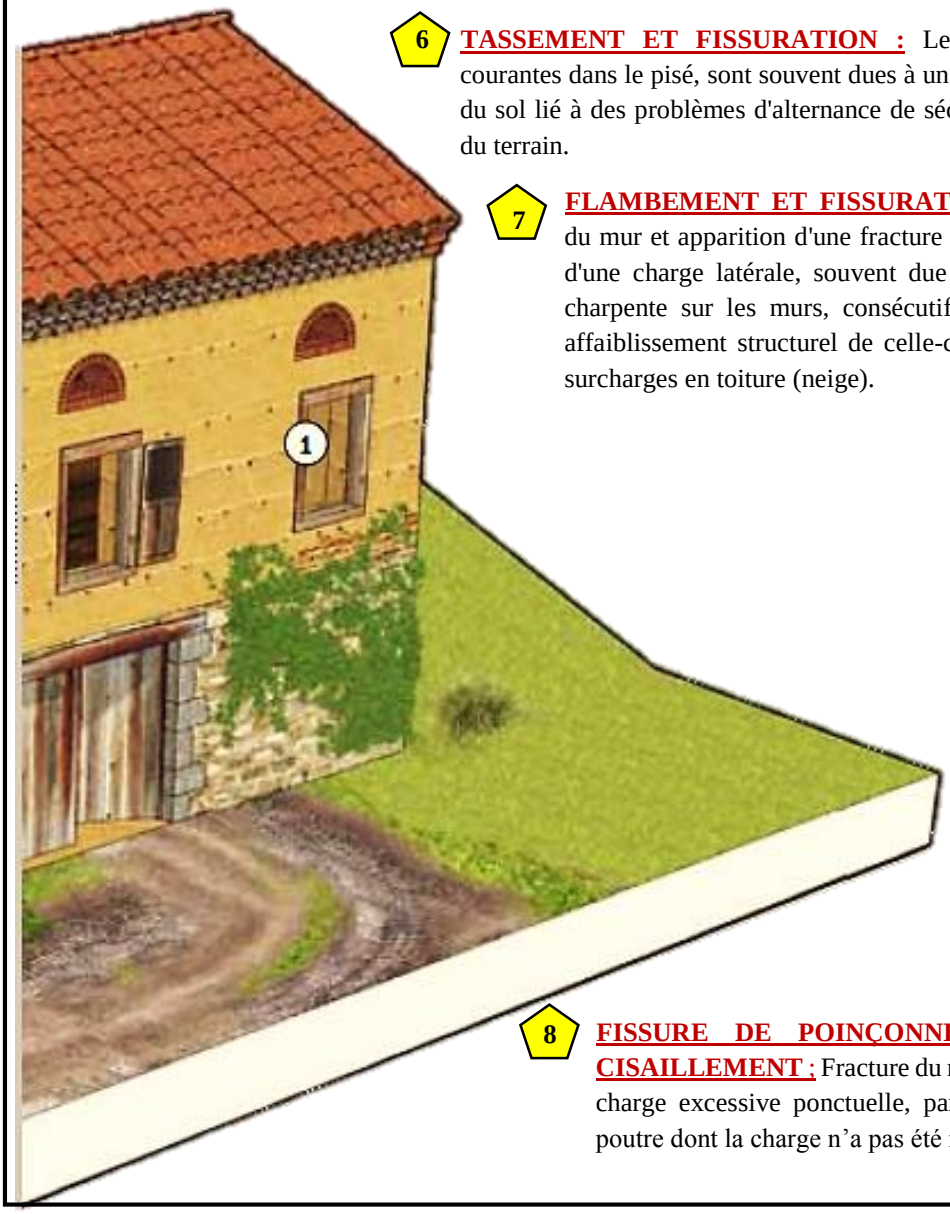


Figure. I- 51 : Les pathologies du pisé, (Source : 8421 construire_et_revover_en_pisè_PNR_LF.pdf, p.12)

NB : Diagnostiquer un bâtiment

Avant d'intervenir sur une structure en pisé, il est important d'établir un diagnostic précis de son état. Il faut pour cela commencer par comprendre comment le bâtiment a évolué dans son environnement car les causes de dégradation sont souvent éloignées du mur. Cela nécessite une double analyse : celle du bâtiment et des pathologies qu'il présente, et celle du site large.



6 **TASSEMENT ET FISSURATION :** Les fissures verticales, courantes dans le pisé, sont souvent dues à un tassement différentiel du sol lié à des problèmes d'alternance de sécheresse et d'humidité du terrain.

7 **FLAMBEMENT ET FISSURATION ;** Flambement du mur et apparition d'une fracture verticale sous l'effet d'une charge latérale, souvent due à la poussée de la charpente sur les murs, consécutif par exemple à un affaiblissement structurel de celle-ci ou la présence de surcharges en toiture (neige).

8 **FISSURE DE POINÇONNEMENT OU DE CISAILLEMENT ;** Fracture du mur en terre sous une charge excessive ponctuelle, par exemple sous une poutre dont la charge n'a pas été répartie

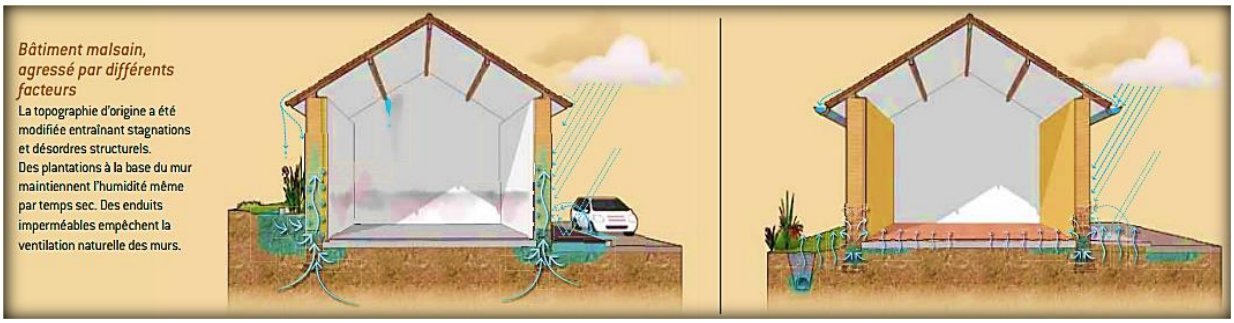


Figure. I- 53 : Stagnation et désordre structurel, (Source : 8421 construire_et_revover_en_pisè_PNR_LF.pdf, p.13)

En hiver, l'humidité en suspension dans la maison traverse très lentement le mur en direction de l'extérieur, le chaud se déplaçant toujours vers le froid. Au contact des zones plus froides, l'humidité se condense en dégageant de la chaleur. Le mur se réchauffe pendant que l'eau de cette condensation est stockée dans les pores du pisé. En été, la chaleur des rayonnements solaires se dirige très lentement vers l'intérieur de la maison. Au passage, elle fait s'évaporer l'humidité stockée dans le mur. Cette évaporation consomme de la chaleur, et le mur dégage dans la maison fraicheur et humidité [7].

Le pisé n'est pas un matériau isolant. Sa forte masse volumique lui confère une forte inertie, qui par le déphasage apporté participe à la régulation de température. Les propriétés hygroscopiques du pisé contribuent également à la régulation de l'humidité. Ces deux propriétés associées, contribuent à des économies d'énergie, et à un grand confort d'usage [7].

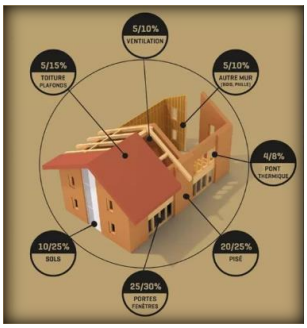


Figure. I- 57 : Les pertes d'énergies, (Source : http://www.tera-terre.org/intelligence-constructive-2/)

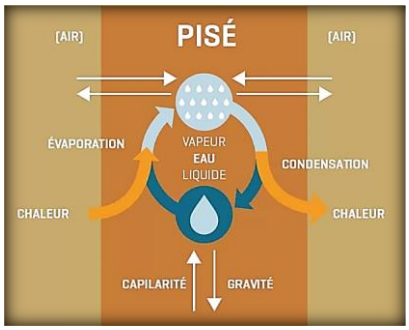


Figure. I- 58 : La performance thermique du pisé, (Source : http://www.tera terre.org/intelligence-constructive-2/)

I.10 Isolation d'un mur en pisé

Pour isoler un mur en pisé de nombreuses solutions existent, l'isolation pourra être soit : collée directement au mur, par exemple sous la forme d'un enduit épais fibré, constituée d'une structure rapportée, maçonnerie de blocs isolants ou structure bois portant l'isolant (en vrac, en laine ou en panneau), ou intégrée dans un mur double en pisé. Dans tous les cas, les isolants doivent être plaqués contre le mur en pisé, et offrir les mêmes qualités perspirantes que le mur pour ne pas perturber les échanges d'humidité et éviter les phénomènes de points de rosée [7].

Quelques principes d'isolation sur un mur en pisé en extérieur ou intérieur (de la correction thermique à l'isolation performante) [7].

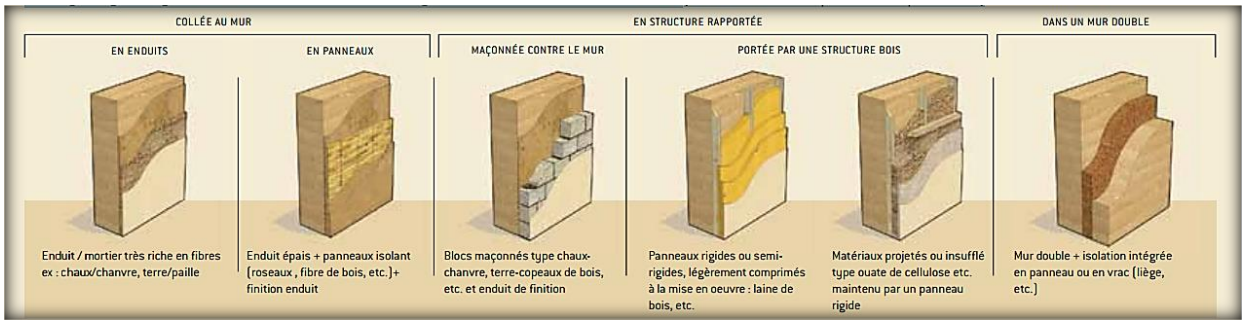


Figure. I- 59 : Les principes d'isolation du pisé, (Source : http://www.tera-terre.org/intelligence-constructive-2/)

I.10.1 Avantages et inconvénients des différentes solutions d'isolation

	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
ISOLATION INTÉRIEURE	• facilité de mise en œuvre, car l'isolant repose sur le sol existant • préserve la beauté du pisé en façade • la ventilation des murs extérieurs est optimale • permet l'installation de réseaux sans avoir à tailler les murs	• ne neutralise pas tous les ponts thermiques • ôte les bénéfices de l'inertie thermique des murs périphériques • peut bloquer la respiration du mur ou entraîner des problèmes d'humidité cachée si des techniques ou matériaux mal adaptés sont employés.
ISOLATION EXTÉRIEURE	• isolation "complète " • élimine les ponts thermiques • préserve les qualités d'inertie des murs en pisé	• cache le pisé • plus rarement pratiquée • nécessite souvent la mise en œuvre d'un support de fixation (structure ou fondation) • requiert un échafaudage • peut bloquer la respiration du mur ou entraîner des problèmes d'humidité cachée si des techniques ou matériaux mal adaptés sont employés.
MURS DOUBLES ISOLATION INTERCALÉE	• préserve la beauté du pisé en façade et en intérieur • préserve les qualité d'inertie des murs en pisé	• uniquement destiné à la construction neuve • technique complexe rarement pratiquée donc onéreuse • peut bloquer la respiration du mur ou entraîner des problèmes d'humidité cachée si des techniques mal adaptées sont employées.

Tableau. I- 1 : Les avantages et les inconvénients des différents solutions d'isolation, (Source : http://www.tera-terre.org/intelligence-constructive-2/)

I.11 Organisation du chantier

Savoir-faire et entreprises il est déconseillé de se lancer dans un chantier pisé sans aucune expérience. Plusieurs professionnels maîtrisent les techniques du pisé, certains se sont même spécialisés dans la construction en terre [5].

Coût, rendement et temps de travail le coût des murs est principalement lié au temps de mise en œuvre du m² de mur et du nombre d'ouvriers. Ce rendement varie en fonction de la complexité de l'ouvrage à construire, de la disponibilité des terres, de l'organisation du chantier, de l'expérience et de l'équipement de l'entreprise. Sur un chantier à faible rendement (rotation importante d'un petit coffrage, faible mécanisation, mur épais et petite surface à construire, par exemple 15 m² de pisé en 60 cm) le rendement est d'environ 0,75 m² de mur par jour par personne. Sur un chantier à bon rendement, type préfabrication, (production de banchée préfabriquée identique de 2,2 x 1 x 0,5 m) le rendement est d'environ 1,3 m² de mur par jour par personne. Les coûts d'un m² de mur peuvent varier de 1 à 3 suivant le contexte. Les temps ci-dessus intègrent l'ensemble de la main d'œuvre, la préparation du chantier et le nettoyage. Une fois que tout est en place, un piseur expérimenté peut compacter 1 m² de mur en moins d'une heure [5].

Main d'œuvre la mise en œuvre du pisé nécessite la présence d'au moins trois personnes sur le chantier, un travaillant dans la banche au compactage, et les deux autres préparant et convoyant la terre jusqu'à la banche [5].

Préfabrication la préfabrication en atelier de banchées de pisé permet de travailler en toute saison, mais nécessite une très grande préparation : organisation, conception des détails, transport. Elle demande également beaucoup plus d'énergie du fait des transports successifs de terre [5].

Auto-construction l'aide à l'auto-construction, mise en place sur plusieurs chantiers sur le territoire du Parc, montre que les professionnels sont ouverts à des modes d'organisation alternatifs et qu'ils sont prêts à partager leur savoir [5].

Sécurité comme tout chantier, travailler sur un bâtiment en pisé n'est pas sans risque et des accidents peuvent survenir. Pour toute intervention sur la structure, il est indispensable de faire

appel à des professionnels connaissant bien le pisé, architectes et entrepreneurs, pour le diagnostic, la conception du projet et la mise en œuvre des ouvrages [5].

Assurances les chantiers de construction et de rénovation en pisé réalisés par les professionnels du bâtiment sont couverts par leur assurance à condition d'être conforme aux matériaux et modes de construction traditionnels et mis en œuvre dans le respect des règles de l'art. En second œuvre, le caractère non inflammable de la terre, lui donne une place de choix dans les matériaux de décoration [5].

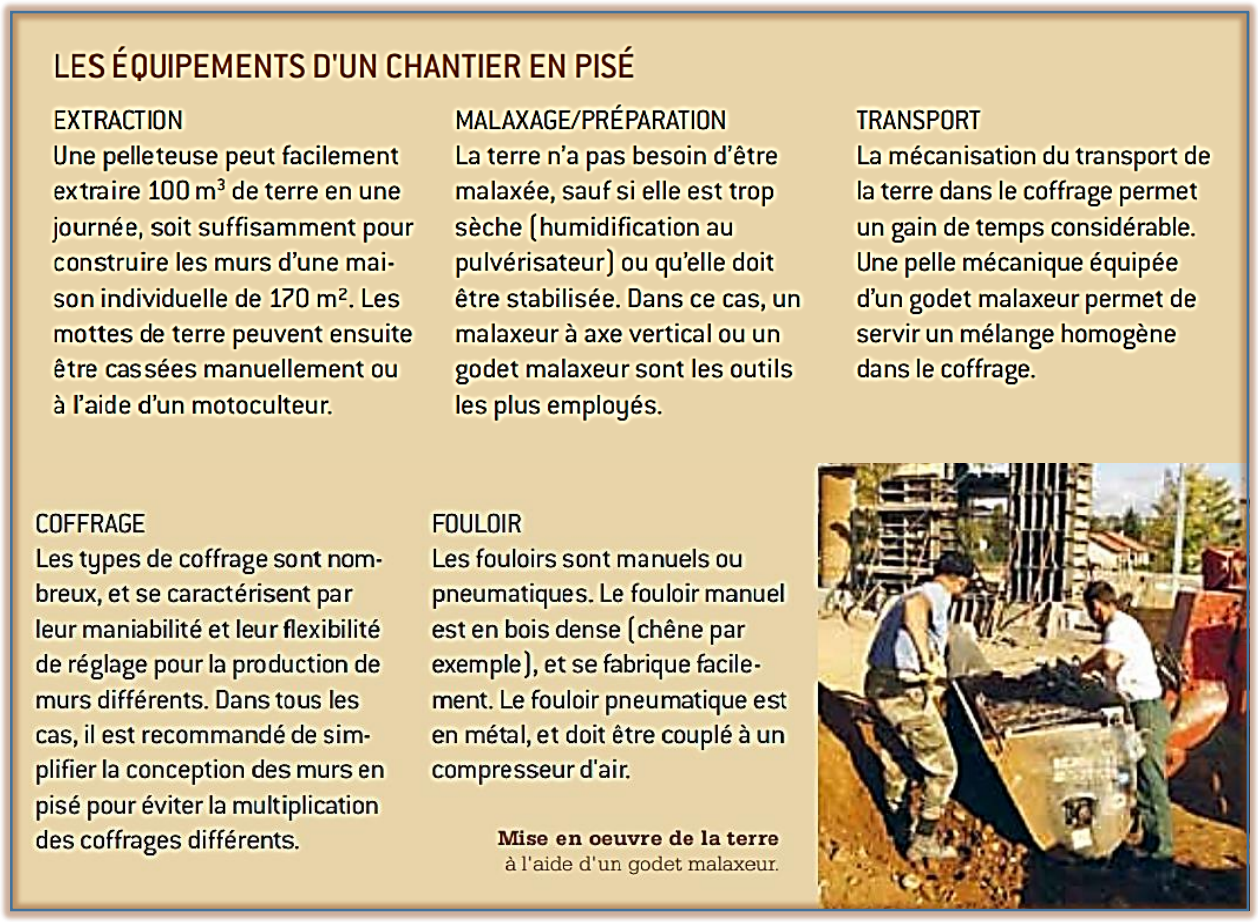


Figure. I- 60 : la mise en œuvre de la terre en chantier, (Source : http://www.tera-terre.org/intelligence-constructive-2/.

I.12 Analyse des exemples

Motivation du choix

Afin de mieux cerner et avoir une idée sur la technique et le projet aussi, il est nécessaire de procéder à l'étude des projets et des techniques similaires existants. Le choix des exemples à analyser s'appuie sur deux critères importants : le premier est la technique du pisé et le deuxième est le programme.

I.12.1 Premier exemple : Centre de formation à la construction durable

I.12.1.2 Présentation du projet

Le bâtiment est un centre de formation pour la construction durable a pour but d'apprendre une formation professionnelle essentielle pour éviter le chômage. Alors le projet offre aux jeunes de la banlieue de Marrakech l'opportunité d'apprendre une profession tournée vers l'avenir. Le projet dirigé par une équipe d'architectes d'Autriche, d'Allemagne et du Maroc a reçu le prix Holcim Bronze en 2012 [8]. Le projet à Marrakech a été félicité pour s'être concentré sur l'utilisation des ressources proches, y compris la main-d'œuvre locale et la terre comme principal matériau de construction [9].

I.12.1.3 Fiche technique

Location : Chwiter, Marrakech, Maroc.
Architecte : Anna Heringer.
Equipe de travail : Elmar Nagele, Salima Naji, Martin Rauch, Ernst Waibel.
Début de construction : Janvier 2012.
Surface : 6300m2.
Contexte du projet : Un projet d'investissement [8].

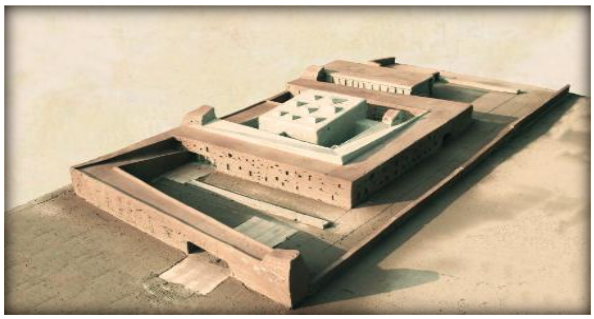


Figure. I- 61 : Vue générale du projet, (Source : http://www.lehmtonerde.at/de/projekte/projekt.php?pID=67)

I.12.1.4 Situation

Situé à l'entrée de la ville de Chwitter, sur la RN9 reliant le site à Marrakech, il a un statut urbain quasi institutionnel qui le distingue des constructions environnantes.

Figure. I- 62 : Plan de situation du centre de formation par rapport la ville de Marrakech, (Source : http://www.lehmtonerde.at/de/projekte/projekt.php?pID=67))

I.12.1.5 Plan de masse

Le bâtiment est implanté au côté Est du terrain et entouré par la RN9 au Nord et par des espaces verts à l'Ouest, et par Rue au Sud et à l'Est.

Figure. I- 63 : Plan de masse du centre de formation, (Source : http://www.lehmtonerde.at/de/projekte/projekt.php?pID=67, Google earth)

A - l'accessibilité

L'équipement possède trois axes :

- Un axe principal (RN9)
- Un axe secondaire
- Un axe tertiaire

Et deux accès :

- Accès public
- Accès de service personnel

I.12.1.6 Volume

Le bâtiment est compact sous forme de base un cube. Le bâtiment surélevé pour libérer l'espace au sol et créer de la transparence et de la profondeur de champ sur le site.

I.12.1.7 Façades

Le centre est caractérisé par des façades avec un rapport plein fort et vide faible traité avec des ouvertures et des éléments installés horizontalement sur la façade. Pour les murs de façade sont construites en pisé.

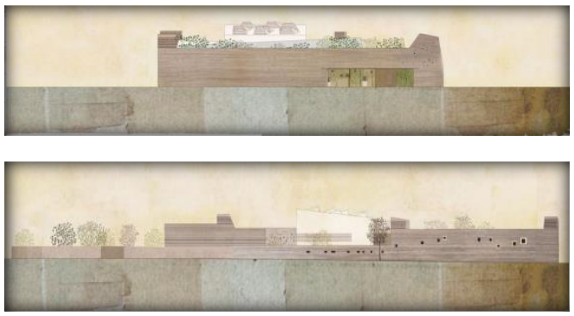


Figure. I- 64 : Les façades du centre, (Source : http://www.lehmtonerde.at/de/projekte/projekt.php?pID=67)

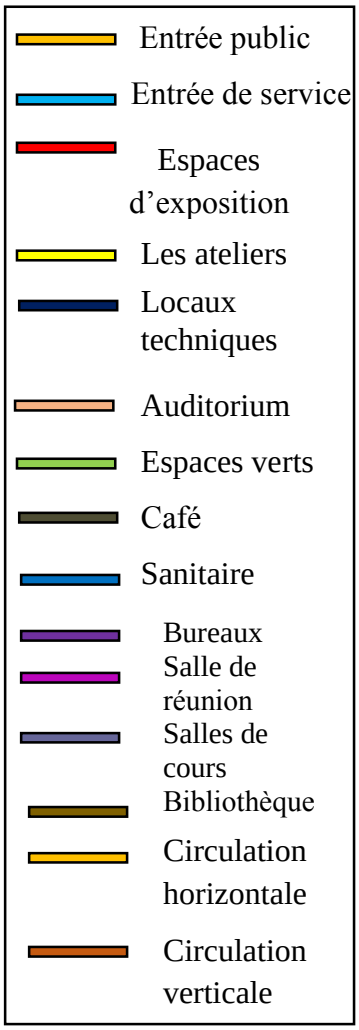
Figure. I- 65 : Les éléments horizontales, (Source : www.lafargeholcim-foundation.org)

- Le design s'inspire de deux archétypes marocains : le ksar rural, lieu compact de la vie communautaire et la medersa urbaine consacrée à la formation des étudiants. Une sculpture architecturale dynamique qui abandonne patios et jardins, qui jouent avec le soleil et les ombres, avec la massivité statique et la rythmique, avec des surfaces rugueuses et des rendus brillants raffinés [8].
- Le secteur est entré par un mur de la terre massif qui embrasse un jardin spacieux. Le bâtiment s'ouvre sur des patios, entourés de niches intimes pour la contemplation ou l'échange communicatif. Il y a des zones extérieures pour le travail pratique et un jardin de nourriture organique où les étudiants cultiveraient des légumes [10].

La zone du projet manque de lieux de rencontre publics. Le centre offre une variété de lieux : un jardin spacieux, une salle d'exposition, un café, une bibliothèque et un auditorium qui peut être

utilisé aussi pour le public. Les visiteurs découvriront la qualité atmosphérique, esthétique et technologique des constructions et des systèmes de refroidissement naturels [11].

I.12.1.8 Lecture des plans



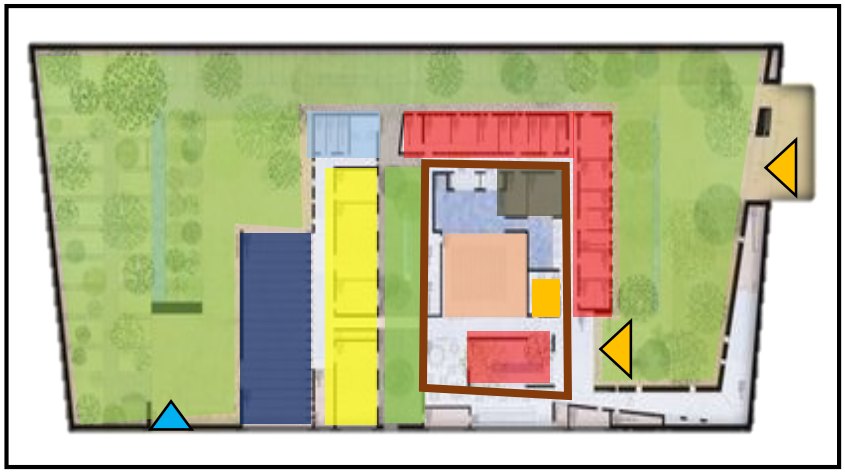


Figure. I- 66 : Plan RDC du Centre, (Source : www.archdaily.com)

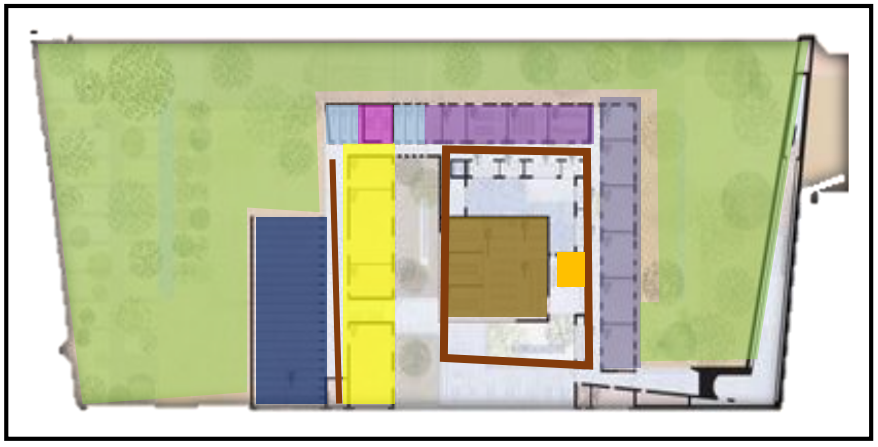


Figure. I- 67 : Plan étage du Centre, (Source : www.archdaily.com)

I.12.1.9 Le programme quantitatif

Les entités	Espaces	Surfaces	Quantité
Pédagogique	Les ateliers Les salles de cours Bibliothèque	De 100 à 211m2 De 50 à 80 m2 De 100 à 150 m2	De 3 à 4 6 1
D'exposition	Espaces d'exposition Auditorium	De 100 à 211 m2 De 100 à 300 m2	De 4 à 8 1
Restauration	Cafétéria	De 80 à 100 m2	1
Administrative	Les bureaux Salle de réunions	De 16 à 32 m2 De 50 à 60 m2	De 4 à 5 1
Technique	Locaux techniques	De 100 à 120 m2	De 1 à 2

Tableau. I- 2 : Programme quantitatif du projet, (Source : www.lafargeholcim-foundation.org)

I.12.1.10 Techniques de construction

L'utilisation de la terre principale est planifiée selon différentes techniques et échelles technologiques :

A La structure la structure porteuse en béton remplie par des blocs préfabriqués [11].

B Les murs mur de clôture en pisé préfabriqués avec coffrage amélioré et éperonné à la main traditionnel, incluant le support technique pour tempérer les bureaux et les salles de classe.

Blocs de terre-paille préfabriqués avec un support en béton, et un enduit de tadelakt (un enduit de chaux à l'eau, brillant et imperméable pour l'auditorium [8].

Figure. I- 68 : Pisé préfabriqué (Source : Google images)

Figure. I- 69 : Terre paille préfabriqué, (Source : Google images)

Figure. I- 70 : Enduit tadelakt, (Source : www.youtube.com)

C Les éléments de façades l'ombrage nécessaire des murs sera fait avec un élément traditionnel transformé des structures en terre : des couches horizontales de carreaux de céramique produits localement [utilisés comme protection contre l'érosion hydrique] avec une perforation graphique ajoutée, protégeront le mur de la lumière directe du soleil avec un ornement agile des ombres qui changent constamment une contrepartie poétique aux murs de terre crus et statiques [11].

Figure. I- 71 : les carreaux céramiques horizontales, (Source : www.lafargeholcimfoundation.org)

D D'autres systèmes le schéma dans la Figure I- 72 ci-dessous, l'air d'alimentation est pré conditionné dans l'échangeur de chaleur au sol (fondations).De là, il sera distribué à travers le préfabriqué, la terre du noyau creux éléments [11].

Le schéma ci-dessous dans la Figure I- 73 représente les capteurs de vent entourés en rouge et les panneaux solaire en marron :

Les capteurs de vent en transportent l'air refroidi à l'eau dans les cours et les passerelles affiliées. L'eau de pluie sera être collectée sur toutes les toitures et les cours [11].

En plus les panneaux de soleil installés au niveau d'auditorium et la bibliothèque [11].

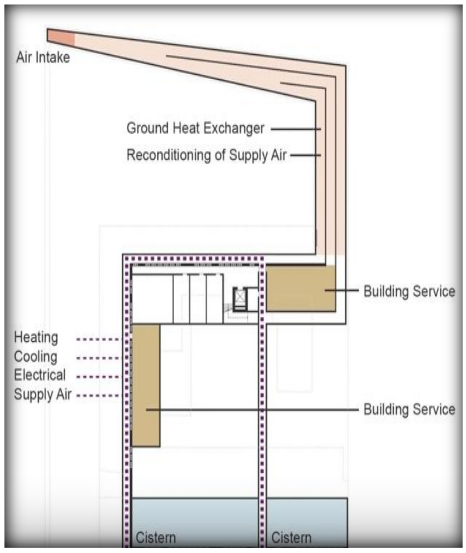


Figure. I- 72 : système l'échangeur de chaleur (Source : www.youtube.com)

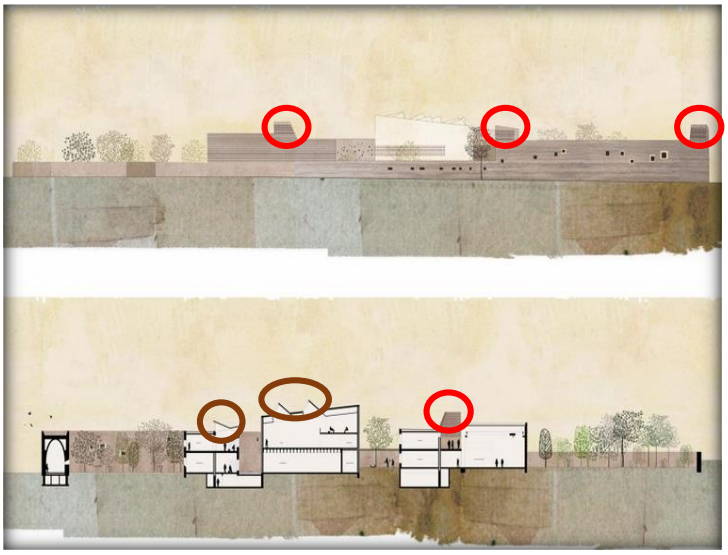


Figure. I- 73 : les tours de vent et les panneaux de soleil (Source : www.lafargeholcimfoundation.org)

I.12.2 Deuxième exemple : Pavillon Marocain Milan Expo 2015

I.12.2.1 Présentation du projet (Morocco, a journey of flavours)

"Nourrir la planète, énergie pour la vie" comme thème, le pavillon du Royaume du Maroc est un reflet d'un modèle architectural berbère, caractéristique du sud du pays, parfaitement adapté à son environnement, au mode de vie de ses communautés et aux menaces d'agressions des époques anciennes [16].

Ce pavillon marocain figure dans le Top 5 des plus visités de l'Exposition Universelle de Milan 2015. Quelques 2, 55 Millions de visiteurs s'y sont rendus, chiffre enregistré à 15 jours avant la clôture de l'Expo [16].

I.12.2.2 Fiche technique

Type de projet : Construction Neuve.
Type de bâtiment : Musée.
Location : Padiglione Marocco - Expo 2015, Via Belgioioso Cristina, 70, 20157 Milano, Italie
Architectes : OUALALOU Tarik + CHOI Linna.
Année de construction : 2015.
Surface : 1300 m2.
Zone climatique : sec semi-aride (Steppe).
Coût de construction : 7 200 000 €.
Nombre d'unités fonctionnelles : 2 550 000 Visiteur.
Coût/m² : 5 538 €/m2.
Coût/Visiteur : 3 €/Visiteur [12] [15].

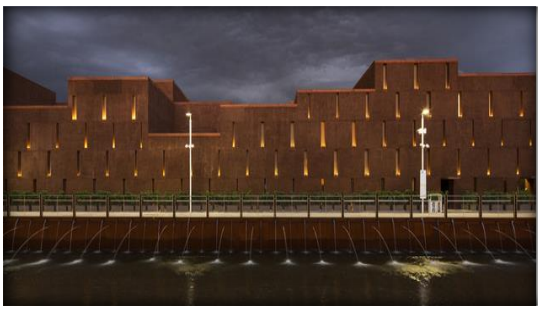


Figure. I- 74 : Vue principale du pavillon du Maroc, (Source : Google image)

I.12.2.3 Situation

Le projet situe au Nord-Est de la ville de Milan, Italie dans un contexte urbain contient plusieurs bâtiments d'exposition avec une surface de 2900m2.

Figure. I- 75 : Plan de situation du Pavillon du Maroc à Milan Italie, (Source : Google maps)

A - Accessibilité

L'équipement possède trois types d'axes :

- Axe principal (Viale 28)
- Axe secondaire (Viale 29)
- Axe tertiaire

Et deux types d'accès :

- Accès principal à la côte Nord
- Accès service personnel au côté Ouest

Le projet possède un accès principal à la côte Nord et deux accès de service personnels au niveau de la façade Ouest.

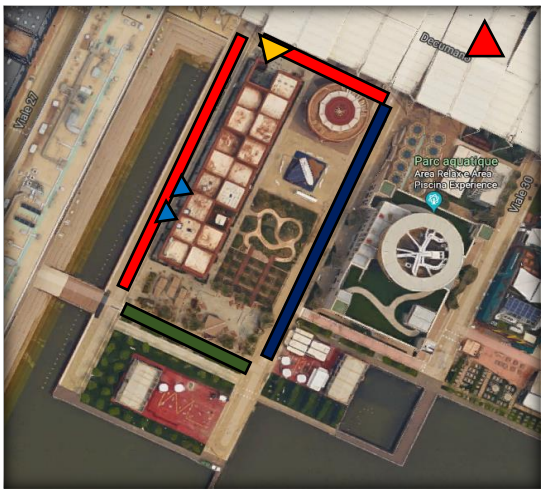


Figure. I- 76 : Plan de masse du Pavillon du Maroc à Milan Italie, (Source : Google maps)

I.12.2.4 Plan de masse

Le bâtiment est implanté au côté Ouest du terrain et entouré par un bassin d'eau et par des espaces verts. Le bâtiment prend une forme compacte mais avec des différents gabarits d'un RDC avec une superficie 1300m2 bâti et 1600m2 de non bâti.

I.12.2.5 Volume

Le bâtiment prend une forme d'un Parallélépipède tout en long de la rue d'une base cubique répétitive ce qui créer un jeu de volume avec des différents gabarits de 6m à 12m en RDC.

I.12.2.6 Façades

Le projet est caractérisé par des façades fermées percés avec des ouvertures étroites en bois donc on a un rapport plein fort et vide faible. En plus, le Skyline est brisée.

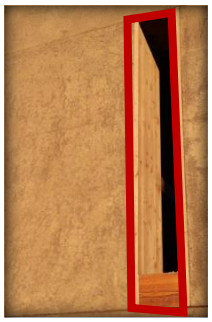


Figure. I- 77 : Le type des ouvertures du pavillon réalisé en bois, (Source : www.architecture-design-corse.com)

Figure. I- 78 : Les façades du Pavillon, (Source : www.archdaily.com)

I.12.2.7 Lecture des plans

- Plan de forme rectangle et 50cm comme d'épaisseur des murs.
- Le pavillon conduit le visiteur dans un voyage métaphorique à travers le passage par cinq espaces qui sont traversés par cinq portes métaphoriques ou matérielles qui transportent du nord au sud et chaque galerie d'exposition représente les traditions, l'agriculture, l'alimentation, la culture…etc. des cinq régions de la Méditerranée, du Centre, de l'Atlas, de l'Atlantique et du grand Sud, jusqu'à l'extérieur qui surplombe sur un passage en bois conduise aux espaces verts au Sud-Est du projet. Et à l'Ouest surplombe sur un bassin d'eau qui donne une vue incroyable et reflète l'interface du projet [14].

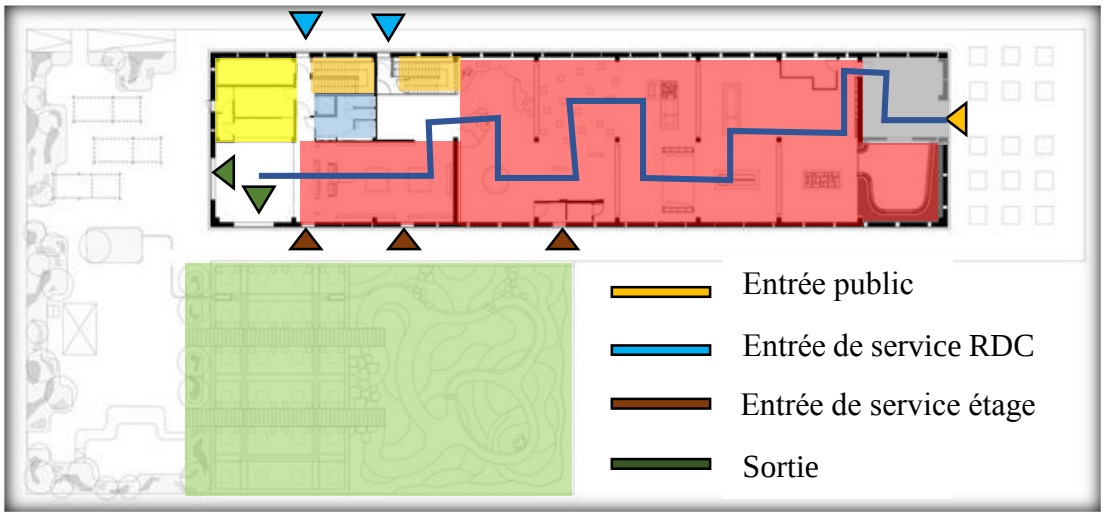


Figure. I- 79 : Plan RDC du Pavillon, (Source : www.archdaily.com)

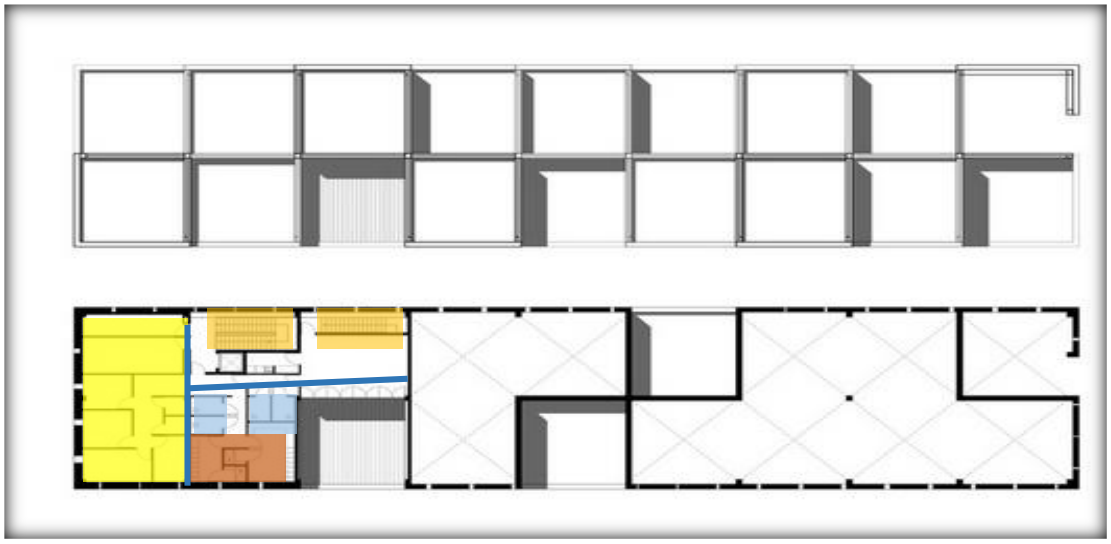
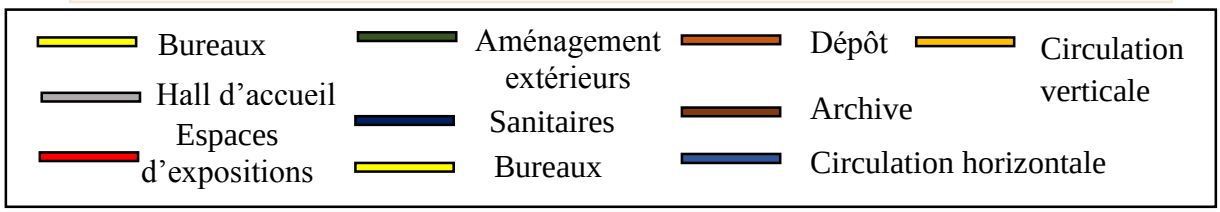


Figure. I- 80 : Plan d'Etage du Pavillon, (Source : www.archdaily.com)



I.12.2.8 Techniques de construction

Pour la réalisation du Pavillon du Maroc pour Expo 2015, OUALALOU+CHOI a choisi d'utiliser le matériel naturel de la terre crue ; cela pour la construction d'un pavillon situé en Italie, où les conditions climatiques ne sont pas les plus favorables à ce type de construction durable [14].

A La structure le bâtiment où la terre crue a été coulée dans une structure en bois ne nécessite pas d'être climatisé, avec poutre voute en bois aussi [15].

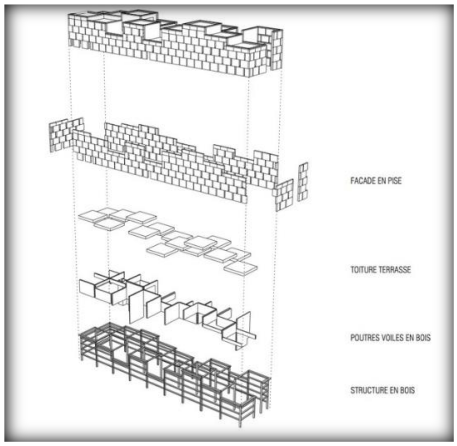


Figure. I- 81 : Schéma représente détail constructif du Pavillon, (Source : www.archdaily.com)

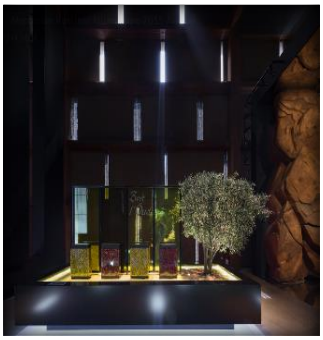


Figure. I- 82 : Le système d'ouvertures en façades (Source : www.archdaily.com)

B Les murs pour la première fois, le pavillon marocain d'une exposition universelle est réalisé à partir des techniques « revisitées » du Sud marocain, il présente une réinterprétation contemporaine des structures en terre traditionnelles. Pisé est placé dans d'énormes panneaux de bois préfabriqués de 2m x 2,5m qui sont ensuite montés sur un cadre en acier ou empilés comme des lego. Cette méthode adapte l'utilisation des matériaux traditionnels aux méthodes de construction industrialisées. À la fin de l'Expo Milan, les panneaux seront démontés et réutilisés. Ils ont réussi à donner de la majesté à l'édifice avec des hauteurs de 6 à 12m. Sans béton ni métal, le pavillon marocain à Milan tient la dragée haute à toutes les avancées techniques [15]. Le système d'ouvertures en façade permet ainsi de créer des flux d'air qui refroidissent l'espace intérieur quand les températures externes sont élevées et vice-versa. En plus la distance entre ouverture et l'autre c'est 2m (un mur de pisé) [16].

*« La conception permet de créer une **climatisation naturelle** en jouant sur l'isolation naturelle représentée par le pisé (les murs font 50 cm d'épaisseur) et des ouvertures qui permettent une circulation intelligente de l'air. « Notre pavillon pourra assurer aux visiteurs une température inférieure de 10° C par rapport à l'extérieur, ce qui sera très appréciable en cas de forte chaleur »* souligne M. Oualalou [15].

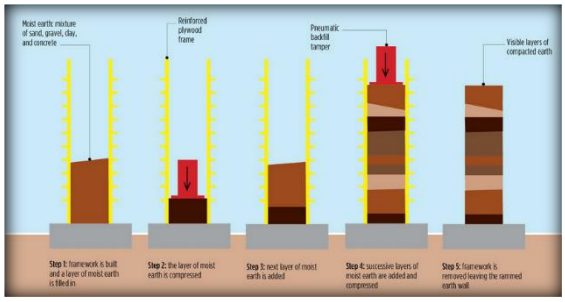
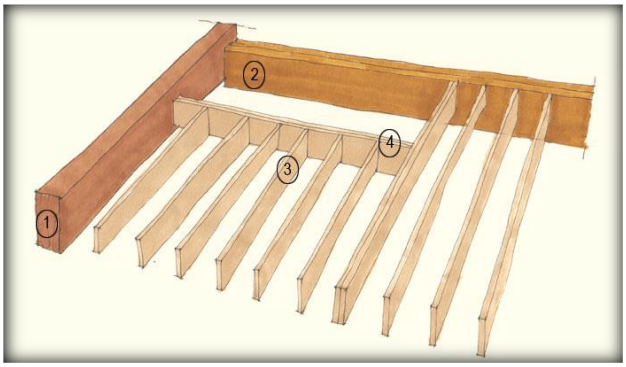
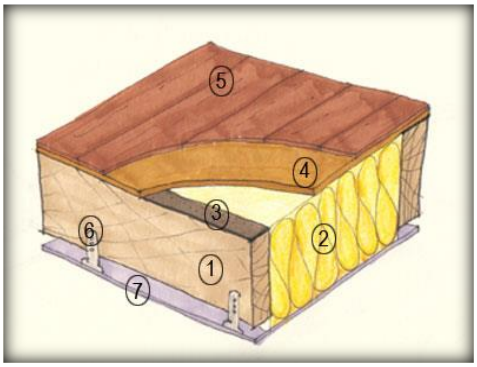


Figure. I- 83 : Technique du pisé, (Source : 8421 construire et revoyer en pisè PNR_LF.pdf, p.4)

Figure. I- 84 : La technique du pisé abordé au projet, (Source : ameditions.net)

C Le plancher le plancher du projet est en bois, les deux schémas au-dessous représentent le détail de structure d'un plancher en bois et sa composition :





1. Lamellé collé
2. Poutre en bois massif
3. Solive en bois du Nord
4. Chevêtre

1. Solive en bois du Nord
2. Isolation
3. Isolation acoustique
4. Panneaux de particules bruts

5. Lames de parquet
6. Suspentes métalliques
7. Plaques de plâtre

Figure. I- 85 : Détail de structure d'un plancher bois, (Source :http://www.amnios.fr/maison_bois/plancher_bois.php

Figure. I- 86 : Composition d'un plancher bois, (Source :http://www.amnios.fr/maison_bois/plancher_bois.php

Lamellé collé : C'est un procédé de fabrication qui consiste à coller des lamelles de bois dans le même sens que les fibres du bois. L'intérêt est d'une part la fabrication d'une pièce de grande dimension et/ou de formes particulières qui n'auraient pu être obtenues sans transformation, et d'autre part l'amélioration de la résistance mécanique par rapport à une pièce de bois massif.

D D'autres systèmes dans le projet y'a aucun système de chauffage, et aucun système de climatisation ça parmi les avantages du pisé, et un échangeur thermique avec double flux pour la ventilation [12].

E Les concepts du projet le pavillon a su mettre en avant une architecture durable et novatrice. Les architectes nous livrent ici les 5 clefs de leur concept :

Rupture : le Maroc a toujours participé aux expositions universelles depuis 1878, en réalisant des pavillons qui célébraient la dimension historique et traditionnelle de la culture, la civilisation et l'architecture marocaine. Ce pavillon, qui inscrit le Maroc dans un débat contemporain, est donc une véritable rupture [16].

Ruralité : pour répondre au thème de l'exposition universelle « Nourrir la Terre, » nous avons considéré que la contribution du Maroc portait sur la notion de ruralité. Au Maroc, la ruralité est

l'équilibre entre la ressource, les territoires et les terroirs. La ruralité est aussi un rapport au sol et à la matière. Le projet du pavillon a été de s'inscrire dans l'ensemble de ses rituels [16].

Terre : le pavillon est construit entièrement en terre crue. Ces méthodes de construction ancestrales au Maroc renvoient évidemment à la civilisation rurale. Nous avons dû acclimater et réinventer ces méthodes pour permettre la réalisation de cet ouvrage dans des conditions climatiques radicalement différentes. Un dialogue s'est alors instauré avec les cultures constructives en terre du nord de l'Italie pour imaginer cet ouvrage [16].

Ouvert aux vents : nous avons voulu que l'expérience du pavillon du Maroc soit la plus juste et la plus réelle possible, la moins déconnectée ou aseptisée. Le bâtiment n'est pas conditionné ; sans être ouvert aux éléments, il est complètement poreux et seule l'inertie de la terre atténue le climat [17].

Une traversée : installé sur la façade nord du Decumanus, le pavillon se déploie sur toute la profondeur de la parcelle du nord vers le sud. Le bâtiment devient la géographie et organise une traversée du territoire marocain depuis le détroit et la méditerranée jusqu'au grand désert du sud [18].

I.13 Synthèse

Selon l'analyse des exemples, nous avons établi le tableau suivant :

Situation et accessibilité	➢ Le projet doit posséder une accessibilité facile avec des voies importante à l'échelle de la ville. ➢ Le projet doit posséder plusieurs axes. ➢ Le projet doit aussi posséder un accès public et d'autres accès de service.
Plan de masse	➢ Le projet occupe une partie du terrain et implanté au côté d'une voie importante. L'espace non bâti étant réservé à l'aire de stationnement et aux espaces verts. ➢ La présence des plans d'eau et la végétation (des lacs, des canaux…etc.) pour animer le projet.
Volume et façades	➢ Une forme compacte avec un RDC ou R+1 de différents gabarits de 6 m à 12 m. ➢ L'inspiration de la typologie architecturale de la ville locale. ➢ Les Façades avec des murs amovibles en pisé percés par des ouvertures étroites de 50cm d'épaisseur. ➢ La distance entre fenêtre et l'autre doit être 2m (longueur d'un mur en pisé).
Technique de construction	➢ La structure du projet en bois avec poutre voile en bois. ➢ Plancher en bois.

I.14 Conclusion

Dans ce chapitre, il a été soulevé les différentes théories du patrimoine en premier partie.
Dans la deuxième partie, nous avons évoqué l'architecture de terre et sa relation avec le patrimoine. Nous avons aussi rappelé les grandes caractéristiques des techniques de constructions en terre crue et spécialement le pisé, en ce sens il faut avoir à l'esprit que ce patrimoine bâti, témoignage de l'activité humaine au cours des siècles derniers, capable de répondre à tous type de programmes et des échelles de bâtiment allant de petit annexe agricole à la maison forte ou le château, ce « matériau primaire » tiré de son environnement immédiat semble être paradoxalement menacé par les progrès des techniques constructives et les matériaux modernes.
A cet effet, il s'agira pour nous d'apporter, un tant soit peu, une contribution à un domaine resté jusque-là très peu abordé en Algérie. Nous espérons également mettre en relief, à travers cette recherche, quelques axes et tendances actuelles sur ce qui se fait à l'échelle internationale dans le domaine du développement durable et de l'architecture en pisé. Alors le patrimoine nous est légué, à nous d'avoir l'intelligence de le maintenir en vie.
Dans la troisième partie, nous avons terminé par l'analyse de deux exemples ayant relation avec notre cas d'étude.

CHAPITRE II : Dimensions contextuelles

II.1 Introduction

« Le contexte est un ensemble d'informations. Cet ensemble est structuré, il est partagé, il évolue et sert l'interprétation » Winogradsky.

Ce chapitre traite les dimensions contextuelles du ksar dans le but de faire une exploration qui va nous permettre d'établir les repères conceptuels de l'idée du projet.

Les informations récoltées lors de cette démarche, sont comme ci-suit : analyse typo morphologique de ksar Ain Madhi, présentation de la zaouïa, la situation du site, le climat, l'état et la morphologie, le cadre bâti et paysage… etc., serviront à adapter diverses facettes du projet, elles sont exploitées tout au long de la phase conceptuelle du projet ainsi que sa réalisation.

II.2 Présentation de la wilaya de Laghouat

La wilaya de LAGHOUAT est située au centre de l'Algérie à 400 km au Sud d'Alger, elle s'étale sur une superficie de 25052 km², elle est chef-lieu de wilaya et l'une des composantes de la région programme hauts plateaux centre [19].

Elle est limitée :

- Au nord par la wilaya de Tiaret.
- Au sud par la wilaya de Ghardaïa
- A l'est par la wilaya de Djelfa
- A l'ouest par la wilaya d'El Bayadh

Figure. II- 1 : délimitation de la wilaya de Laghouat, Source : Google-image.com

II.3 Présentation de la commune d'Ain Madhi

La commune d'Ain Madhi est située à 75 Km au Sud-Ouest de Laghouat dans la zone comprise entre le piémont de l'Atlas saharien et le désert.

Elle est limitée par :

- Au nord- est par la commune de Tadjmout
- Au nord-ouest par la commune d'El Ghicha
- Au nord par la commune d'Oued Mzi
- A l'ouest par la commune de Tadjrouna
- A l'est par la commune d'El Houaita
- Au sud-est par la commune d'El Khnegue et Hassi Rmel
- Au sud-ouest par la wilaya d'El Bayadh
- Au sud par la wilaya de Ghardaia

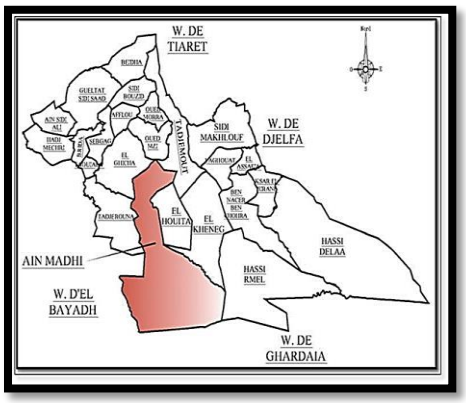


Figure. II- 2: Situation de la commune d'Ain Madhi, Source : Google-image.com

II.4 Caractéristiques climatiques de la région d'Ain Madhi

On distingue quatre zones climatiques sur le territoire algérien, Ain Madhi est situé dans la zone D appelée zone pré Sahara et Sahara.

Figure. II- 3: Les zones climatiques d'Algérie, Source : Atelier de cartographie des sciences

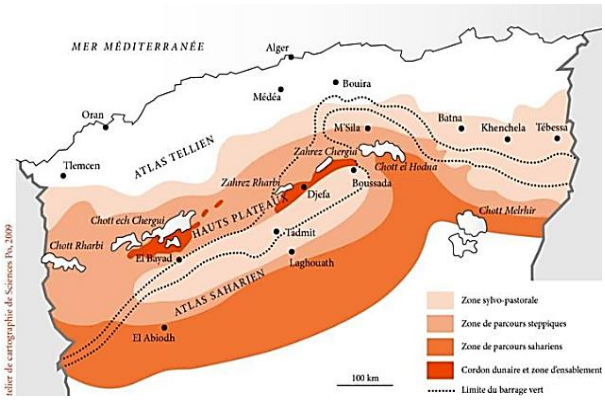
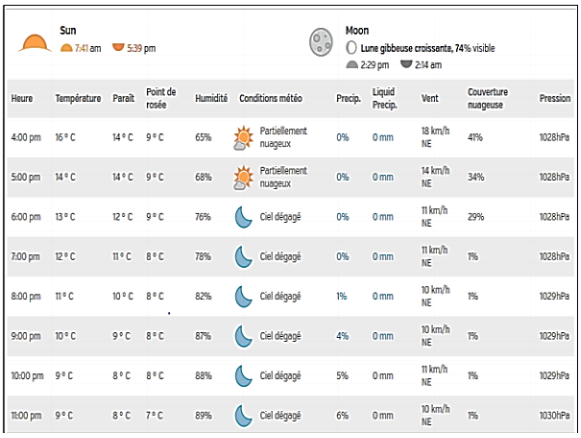


Figure. II- 4 : les 4 zones d'Algérie, Source : Atelier de cartographie des sciences

II.4.1 Type de ciel

La zone se caractérise par un ciel clair régnant pendant presque toute l'année. Cependant les jours nuageux sont rares, fournit une vue claire sur la portion de chaque condition du ciel. Le soleil dominant a un impact majeur sur le climat surtout, avec ses aspects thermique, énergétiques et lumineux. Selon les données, la portion des jours nuageux est d'environ 5.91% de l'année entière et les jours ensoleillés constituent une portion d'environ 76.91%. [19]



Heure	Température	Paralt	Point de rosée	Humidité	Conditions météo	Precip.	Liquid Precip.	Vent	Couverture nuageuse	Pression
4:00 pm	16 °C	14 °C	9 °C	65%	Partiellement nuageux	0%	0 mm	18 km/h NE	41%	1028hPa
5:00 pm	14 °C	14 °C	9 °C	68%	Partiellement nuageux	0%	0 mm	14 km/h NE	34%	1028hPa
6:00 pm	13 °C	12 °C	9 °C	76%	Ciel dégagé	0%	0 mm	11 km/h NE	29%	1028hPa
7:00 pm	12 °C	11 °C	8 °C	78%	Ciel dégagé	0%	0 mm	11 km/h NE	1%	1028hPa
8:00 pm	11 °C	10 °C	8 °C	82%	Ciel dégagé	1%	0 mm	10 km/h NE	1%	1029hPa
9:00 pm	10 °C	9 °C	8 °C	87%	Ciel dégagé	4%	0 mm	10 km/h NE	1%	1029hPa
10:00 pm	9 °C	8 °C	8 °C	88%	Ciel dégagé	5%	0 mm	11 km/h NE	1%	1029hPa
11:00 pm	9 °C	8 °C	7 °C	89%	Ciel dégagé	6%	0 mm	10 km/h NE	1%	1030hPa

Figure. II- 5 : type de ciel, Source : weatherspark.com

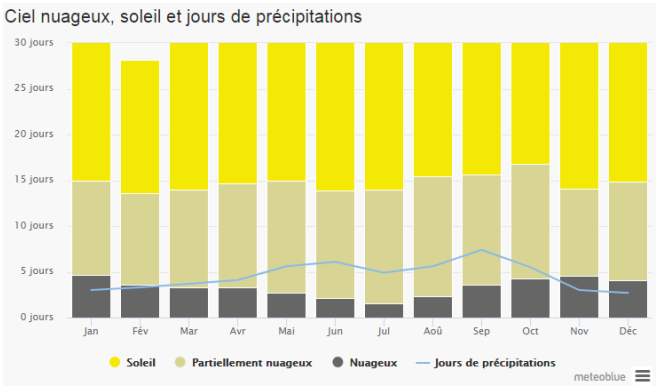


Figure. II- 6 : les barres d'ensoleillement annuel, Source : www.m-eteoblue.com

II.4.2 Tempèrature et prècipitations

La moyenne mensuelle de la température maximale est de 40.6 °C, enregistrée au mois de juillet, La moyenne mensuelle de la température minimale est de -1 °C, enregistrée au mois de février [19]

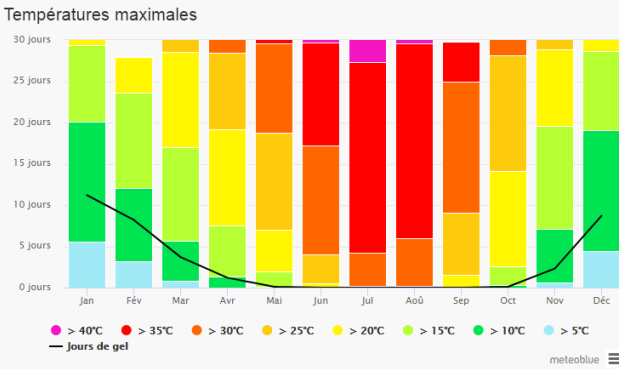


Figure. II- 7 : Le diagramme des températures maximales, Source : meteoblue.com

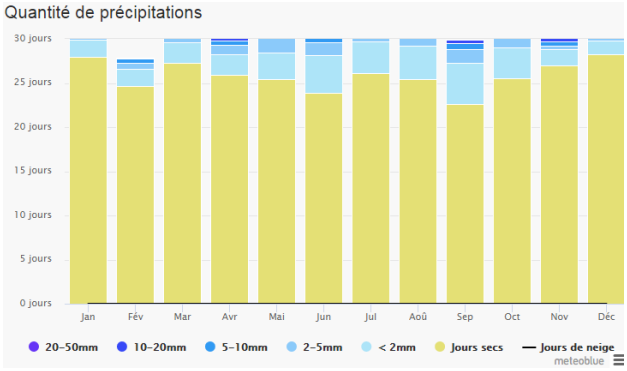


Figure. II- 8 : Le diagramme des précipitations, Source : meteoblue.com

II.4.3 Humiditè

On note le plus haut taux d'humidité (73%) pendant le mois de novembre et le plus bas (25%) pendant les mois de juillet et aout [19]

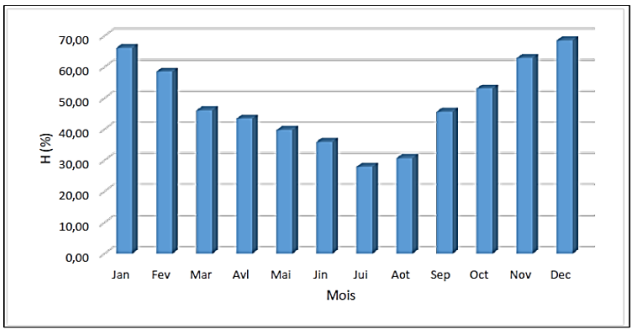


Figure. II- 9 : Histogramme de l'humiditè annuelle, Source : meteoblue.com

II.4.4 Vents

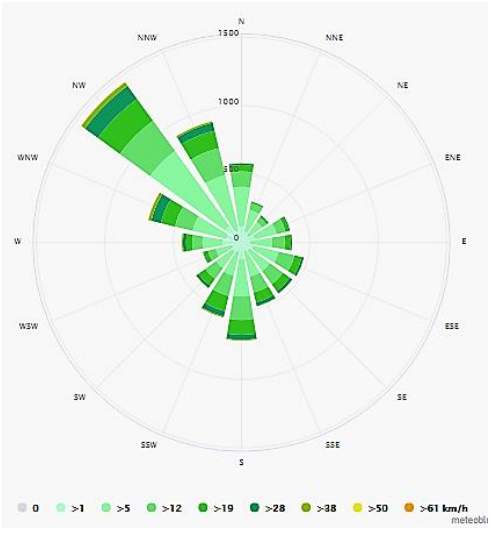


Figure. II- 10 : La rose des vents, Source : meteoblue.com

Les vents dominants à Laghouat soufflent de l'ouest, mais aux changements de saisons la fréquence du vent est tout aussi importante du sud-ouest. Il y a très peu de vent d'orientation nord-ouest et presque nul au sud-est. Le siroco souffle 65-70jours par an à partir du mois de mai, il est fréquent du côté nord et ouest, Les vents chauds venant du sud, souvent violent et sa vitesse varie de 15 à 30M/S. et de direction sud-ouest fréquence 687heures/mois [19].

Le diagramme de ’Aïn Mahdi montre les jours par mois, pendant lesquels le vent atteint une certaine vitesse [19]

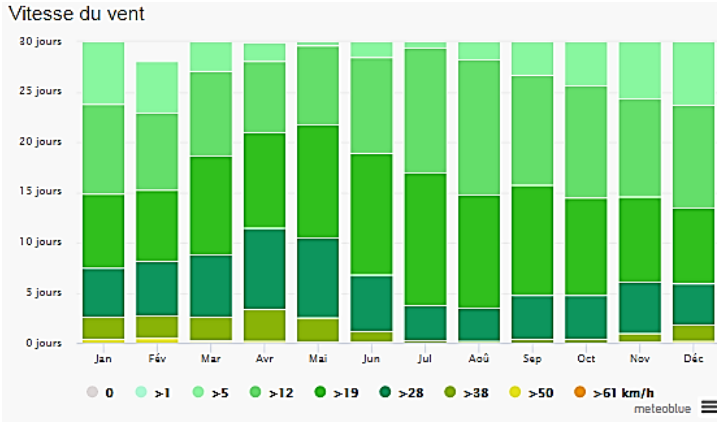


Figure. II- 11 : Le diagramme de la vitesse des vents, Source : meteoblue.com

II.5 Patrimoine architecturale de la région d’Ain Madhi

La région d’Ain Madhi Représente trois sites à caractère patrimoine et culturel et à savoir la zaouïa de sidi ben amer, le palais de kourdane et l’ancien ksar qui participent au développement du tourisme de la région.

II.5.1 Ancien ksar d’Ain Madhi

II.5.1.1 Situation

Situé à la commune d’Ain Madhi de la wilaya de Laghouat. Elle est le siège du califat de la confrérie tidjaniya, Le ksar a été implantée sur une colline au centre des jardins et à la proximité de Oued r'mel [20].

Figure. II- 12 : Vue aérienne sur le ksar d'Ain Madhi, Source : Google-maps.com

II.5.1.2 Evolution de ksar Ain Madhi

Le Tissu urbain du l’ancien ksar d’Ain Madhi est caractérisé par un tissu compact et organique.
L'ancien ksar d'Ain Madhi a été passé par quatre phases d'évolution urbaine comme ci-suit [20].

- **Phase 01 :** le premier édifice qui a ètè construit c’est la maison de l'Imam et l'ancienne mosquée (Masdjid el Atik) du côté Ouest et après une double rangé de maisons de l'ouest.
- **Phase 02 :** L'extension des côtés Nord et Sud et ainsi la structure du ksar se compose de trois rues urbaines principales est : sud- est – nord.

- **Phase 03 :** La population a augmenté, donc les parcelles qui sont située au nord du ksar ont été construites

- **Phase 4 :** Sur le côté sud, le ksar a été élargi et la preuve de changement, c'est la grande porte du lieu à côté de la maison Tidjani à son emplacement actuel à côté de la mosquée de zaouïa Tidjania.

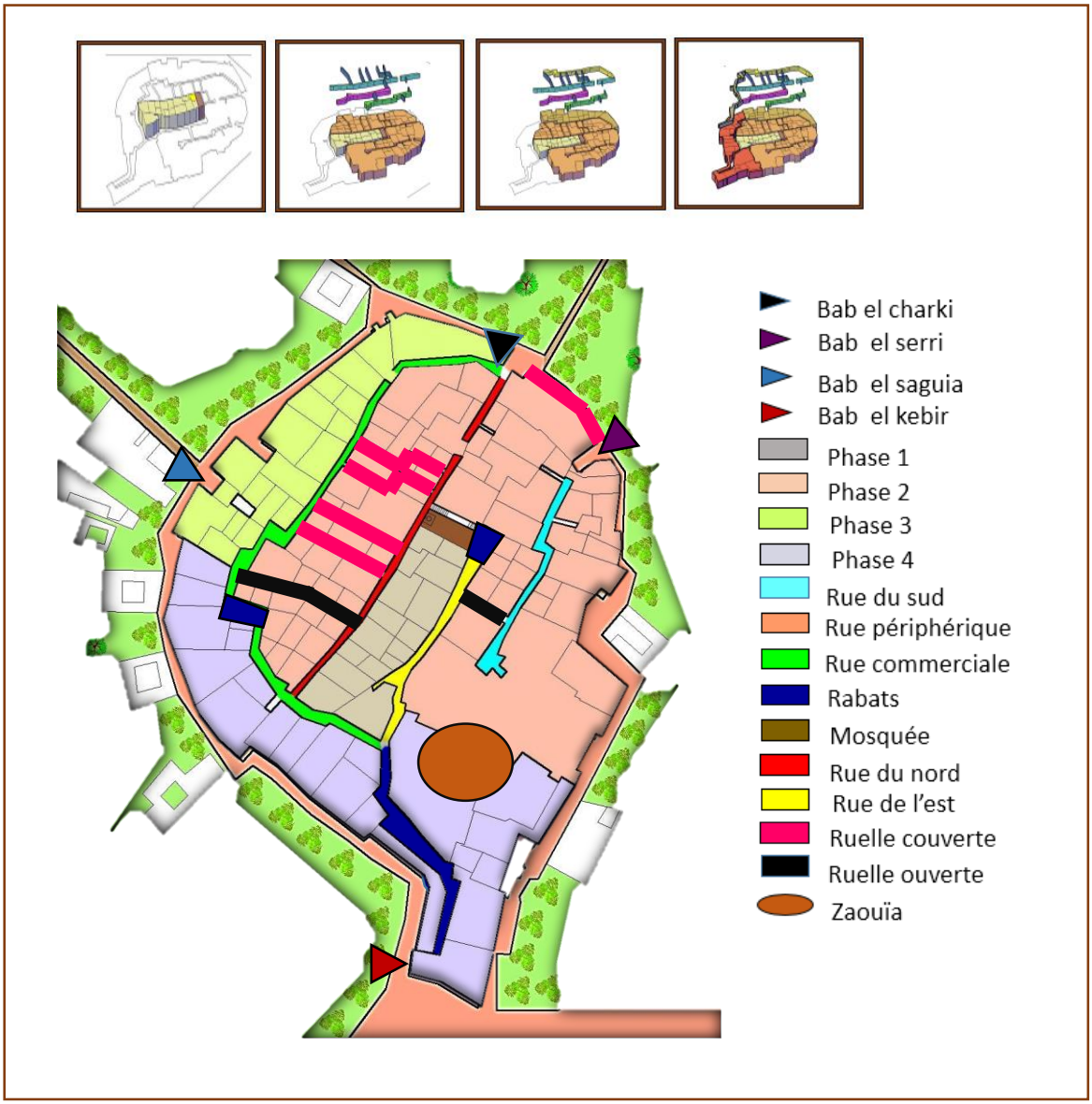


Figure II.13 : l'évolution urbaine de ksar Ain Madhi, Source : Mémoire Mme HABBOUL et reproduite par KHACHEBA et MEKKI

II.5.1.3 L'architecture de ksar

Le vieux ksar d'Ain Madhi se compose de [24]:

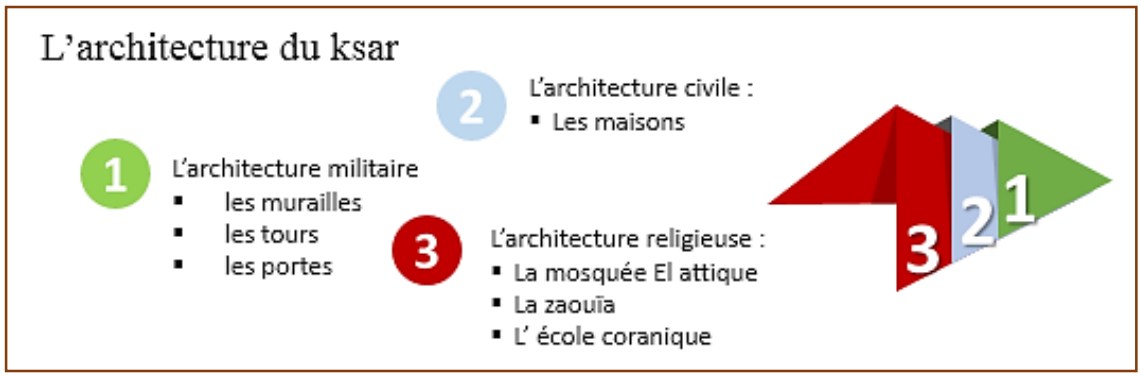


Figure II.14 : l'architecture de ksar Ain Madhi, Source : Auteurs

II.5.1.4 Analyse morphologique de ksar

A- Système viaire

- **Les rues :** le ksar se compose de quatre rues principales largeur moyenne environ de 3 m, se caractérise par : l'absence des angles droits, sinuosité et étroite.
- **Les ruelles :** un endroit spécial pour les résidentes qui ouvrant leurs portes de maison sur la ruelle et il est divisé en deux types (impasse-passable). Il existe 2 types : couverte et non couverte [21].

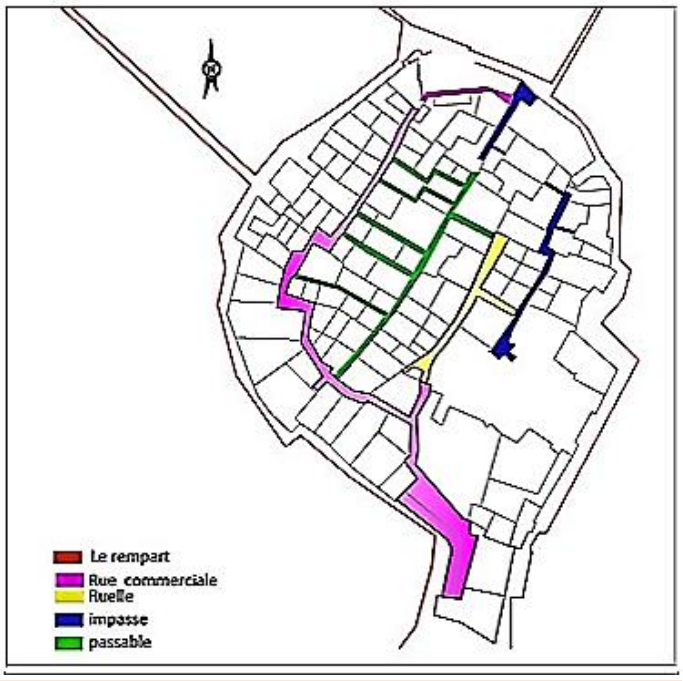


Figure II.15 : Le système viaire de ksar Ain Madhi
Source : Mémoire de TOUIL

a- Type des voies

Il existe 4 types des voies : rue, ruelle, impasse (couvert – non couvert), Sabbat.

b- Organisations des parcoures

La hiérarchisation (public, semi public, semi privé, privé)

Figure II.16 : Rue de ksar Ain Madhi
Source : Auteurs

Figure II.17 : Ruelle de ksar Ain Madhi
Source : Auteurs

Figure II.18 : Sabat de ksar Ain Madhi
Source : Auteurs

Figure II.19 : Impasse de ksar Ain Madhi
Source : Auteurs

Aspect topologique	Aspect géométrique	Aspect dimensionnel	Causes
Système en boucle hiérarchise	Système Un boucle continue	**Rue :** 3.25 ,4 ,6 **Ruelle :** 1.40 ,3.67 **Impasse :** 1.37 ,2.34 **Passable :** 1.10, 1.30	Élever le degré d'intimité. Répondre mieux aux données climatiques. Cree l'ombre. casser la direction et la vitesse de vent.
Système linaire hiérarchise arborescent	La rencontre est orthogonale La hiérarchisation des rues n'est pas modifiée la continuité a frontale de l'espace l'emporte sur le côté latéral		
Système linaire hiérarchisé en cul de sac			

Tableau II.1 : système viaire de ksar Ain Madhi, Source : Auteurs

B- Système parcellaires

On a six types des parcellaires sont :

Aspect topologique	Aspect géométrique	Aspect dimensionnel
la direction de parcellaire n'est pas hiérarchisée Assemblés en range La direction des parcellaire sont peu hiérarchisé Assemblés en rangé et parallèle à sa direction principale. la direction des parcellaires est peut hiérarchisés les parcellaires sont Rangés progressivement et parallèle à sa direction principale.	la direction fondamentale des parcellaires sont liés par la pente de terrain. quand on trouve l'implantation des parcellaire sont parallèle aux courbes des niveaux (implanté sur une colline) trouve un mixte des types de parcelle : rectangle. Trapèze biseauté, triangulaire et des parcelles en forme de « L » et « T ».	**Triangulaire :** 290m² **biseauté :** (165 ,225.304 m²) **Rectangle :** (86, 180,236 m²) **Trapèze :** 55m² **Forme L :** (111,207.355) m² **Forme T :** 2451

Tableau II.2 : système parcellaire de ksar Ain Madhi, Source : Auteurs

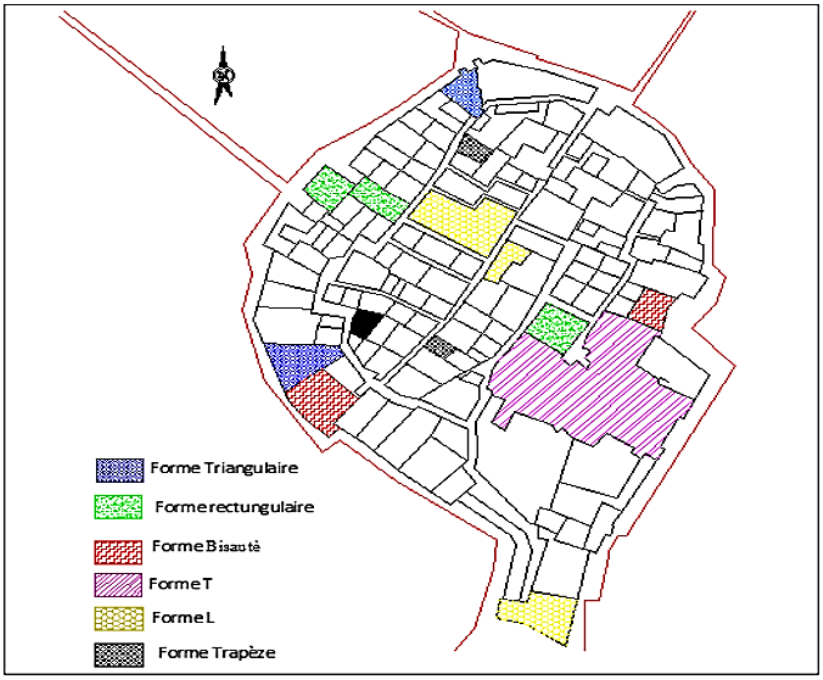


Figure II.20 : Le système parcellaire de ksar Ain Madhi, Source : Auteurs

C- Système libre

Le type des espaces libres :

- **Espace libre public :** les voies et les places.
- **Espace libre prive :** le patio.
- **Espace libre semi prive :** les impasses.

Dans le ksar, il existe 3 places : Considéré comme une grande rue, mais il est plus large que les rues 5-6 m.

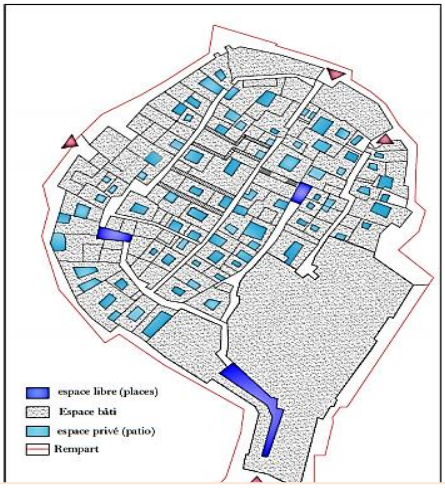


Figure II.21 : Le système bâti et espace libre de ksar Ain Madhi, Source : Auteurs

D- Système bâti

D-a Analyse les éléments singuliers

Aspect typologique	Aspect géométrique	Aspect dimensionnel
la topologie de bâti est planaire perforé : les bâtiments accolés les uns aux autres de tous les côtés de manière à former une masse continue (la continuité du bâti sur plusieurs directions Perception le bâti hiérarchisée et progressive. le bâti est planaire non ramifié.	La disposition de Bâti est liée par deux orientations : des bâtis disposés au parallèle et se réfèrent à une ligne curviligne des bâtis qui se divergent par apport à l'orientation principale	on peut remarquer que la densité de bâti peut élever entre le rapport de vide et le plein. Surface : entre **47 et 76m²**

Tableau II.3 : système bâti de ksar Ain Madhi, Source : Auteurs

b- Echelle de maison

élément	position typologique	Géométrie	dimension
Zaouïa tidjania Mosquée Atik Zaouïa de sidi ben amer	la position topologique de ces éléments c'est l'inclusion : les monuments se trouvent enserré de tout part de tissu (ksar).	les monuments sont intégrés facilement dans la masse et dans ces directions principales.	la dimension est un facteur important pour déterminé les monuments (les éléments singulier du bâti).

Tableau II.4 : les éléments singuliers de ksar Ain Madhi, Source : Auteurs

On distingue trois principaux types de logements dans le cadre bâti [22] :

i. Type 01 : habitat traditionnel

1. La forme

Elle présente une forme simple inspirée de certaines valeurs culturelles.

2. Mode d'organisation intérieur

- Le passage de l'extérieur vers l'intérieur se fait par une impasse pour des raisons d'intimité
- La disposition des pièces composant l'habitation est érigée autour d'un espace central.
- La hiérarchie des espaces internes.

3. Aspect Extérieur

- L'habitat traditionnel se caractérise par le type "**introversion**" sans aucune fenêtre.
- De l'extérieur faisant de la maison un lieu clos présentant des murs aveugles.

ii. Type 02

1. La forme

La typologie de ce type de logement se caractérise par la taille importante des lots.

2. Mode d'organisation interne :

L'organisation se matérialise par une extraversion interne, les fenêtres donnent directement sur la cour et l'espace polyfonctionnel "haouche" est remplacé par le "hall" en tant qu'espace couvert.

3. Aspect intérieur

- La Hiérarchie des espaces internes.
- L'utilisation de l'organisation centrale.
- L'impasse était pour atténuer les effets des rayons solaires.
- L'utilité du patio pour refroidir en été (créer les courants d'air) et réchauffer en hiver (capter les rayons solaires).
- Les murs aveugles pour isoler au maximum les espaces intérieurs.

4. Aspect extérieur

Il Présente des murs aveugles puisque l'extraversion est vers la cours.

iii. Type 03

1. La forme

Ce type de logement est réalisé suivant un plan type agencé pour donner une seule unité de 04 logements.

2. Mode d'organisation interne :

- Les pièces du logement sont desservies généralement par un couloir.
- Il se caractérise aussi par une emprise au sol réduite ou l'espace non bâti reste réduit.
- La perte de l'identité architecturale locale.

3. Aspect extérieur

Il se caractérise par le type extraverti avec des fenêtres donnant directement sur l'extérieur.
Changement des principes de l'introversion par le type extroversion (les espaces intérieurs exposés vers l'extérieur) avec un changement des patios par des couloirs réduits.

II.5.1.5 Matériaux de constructions

Le ksar est Construit avec des matériaux locaux qui étaient à leur disposition par leur environnement, qui sont **:**

A- Murs

Figure II.22 : Mur en adobe, Source : Auteurs

Figure II.23 : Mur en pierre, Source : Auteurs

Figure II.24 : Mur en pisé, Source : Auteurs

Figure II.25 : Mur en pisé, Source : Auteurs

B- Toiture

Figure II.26 : Plancher traditionnel en peuplier, Source : Auteurs

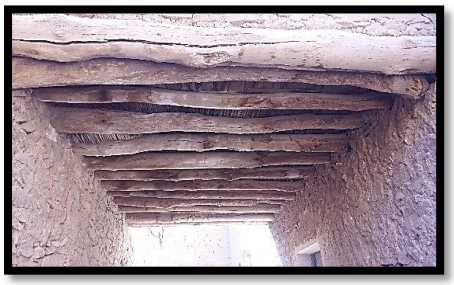


Figure II.27 : Plancher traditionnel en genévrier, Source : Auteurs

C- Fondations

Figure II.28 : Soubassement d'un mur d'adobe en pierre, Source : Auteurs

Figure II.29 : Soubassement d'un mur de pisé en pierre, Source : Auteurs

II.5.1.6 Techniques de construction

A- Murs

a- Murs en pierre

Une structure solide, souvent faite de pierre ou d'adobe, qui sépare ou délimite les espaces de maison, l'épaisseur de paroi du fond 40 à 80 cm.

Ils sont composés par des éléments plus au moins gros qui forment une maçonnerie irrégulière, très rationnel à ce propos on distingue de types d'appareillage : en épis de blé ou mixte.

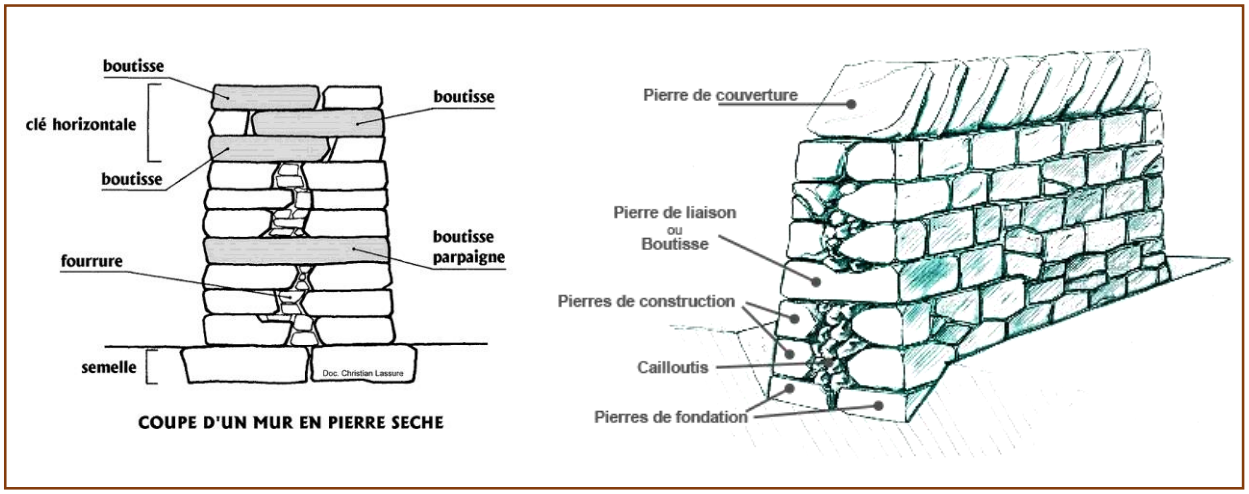


Figure II.30 : Mur en pierre sèche, Source : www.Google-image.com

- **Méthode « en épis de blé »**

C'est le positionnement des pierres ou bien des bloc d'adobe en formes d'épis de blé pour former un angle de 45°, cette méthode est utilisé dans les murs des façades comme un ornement et une décoration.

Figure II.31 : La pierre sèche en épis de blé, Source : Auteurs

Figure II.32 : Illustration de la technique, Source : Auteurs

- **Méthode « mixte »**

C'est l'assemblage entre la première méthode et le positionnement aléatoire des pierres mais en essayant d'être homogène en matière du dimensionnement généralement, avec l'utilisation d'adoube ou la pierre.

Figure II.33 : L'assemblage mixte de la pierre, Source : Auteurs

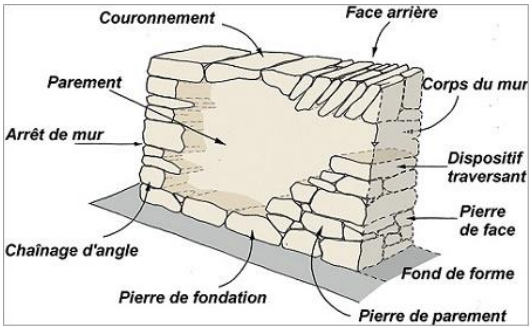


Figure II.34 : Schémas illustrant l'assemblage mixte de la pierre, Source : www.construir-en-pierre.com

b- Murs en adobe

Les murs d'adobes sont bien présent dans le ksar ceci est justifier par la simplicité de sa mise en œuvre et la disponibilité de la terre crue par rapport à d'autres matériaux.

Il existe différentes méthodes de placer les blocs de construction en fonction de leur taille et de leur épaisseur. Il y a des murs avec épaisseur de 15.30.40 cm tous fondés sur le principe général qui est l'interconnexion des blocs entre eux avec l'infraction des blocs de construction d'une rangée à l'autre.

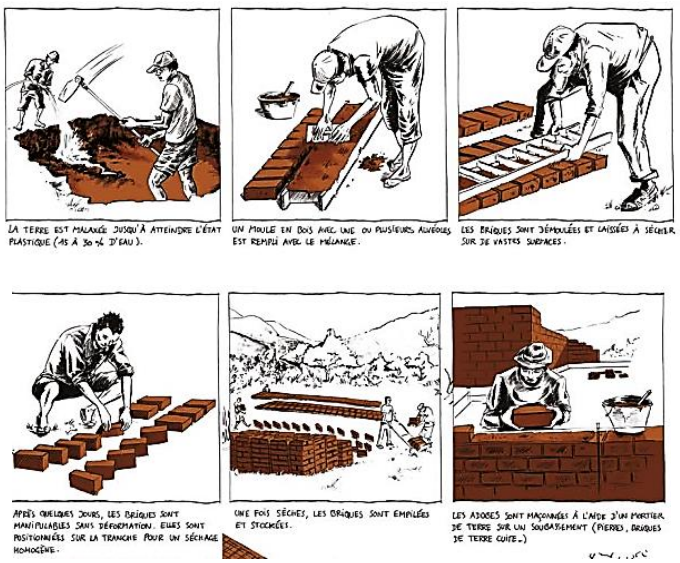


Figure II.37 : technique de construction d'adobe, Source : www.terra- award.com

Figure II.35 : Mur en adobe, Source : Auteurs

Figure II.36 : blocs d'adobe, Source : https://fr.dreamstime.com

c- Murs en pisé

Le pisé dans le ksar est pratiquement construit suivant la méthode traditionnelle, ça consiste à installer un coffrage en bois (banche) sur un soubassement en pierre.

La terre a pisé est coulée dans la banche, elle est ensuite damée avec un pisoir en bois pour former une banchée (contenue du coffrage), les couche répétées constituent la hauteur des murs, après chaque banchée on déplace le coffrage horizontalement pour progresser

Figure II.38 : Mur en pisé , Source : Auteurs

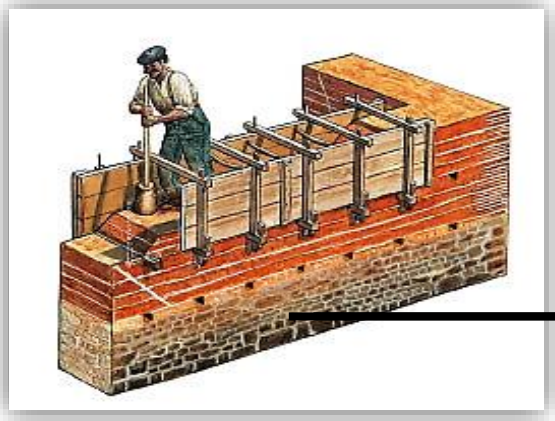


Figure III.40 : Construction d'un mur en pisé, Source : http://gmit.pagesperso-orange.fr/parc_livradois_forez.htm

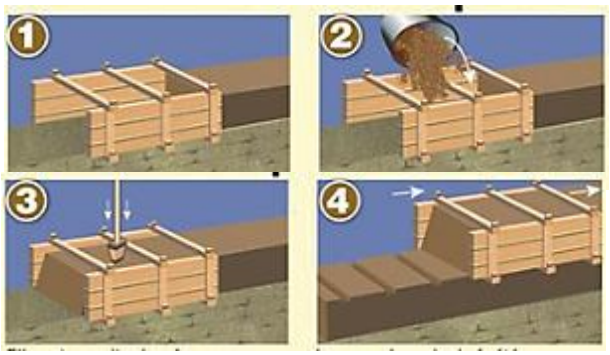


Figure II.39 : La mise on ouvre du pisé, Source : Pinterest.com

Les banchées laissent apparaître les trous de passage des bois de coffrage après décoffrage.

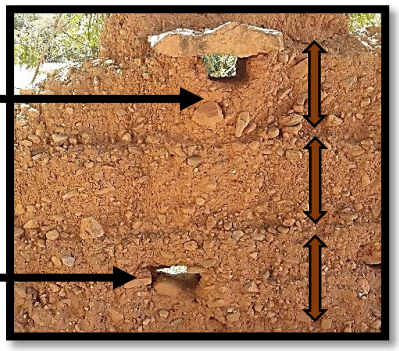


Figure II.41 : Mur en pisé de ksar ain Madhi , Source : Auteurs

Les strates (couches du sol pour un mur en pisé) se superposent l'une sur l'autre, leurs épaisseur varient de 30à 40 cm

B- Fondations

Ce sont des pierres solides et de grande taille qui sont appuyées directement sur le sol, sont destinées à supporter le poids du mur, la largeur de la base du mur doit être au moins égale au tiers de la hauteur. La fondation assure la stabilité de l'ouvrage et transmet au sol des contraintes représentées par le poids du mur et de la poussée des terres [19].

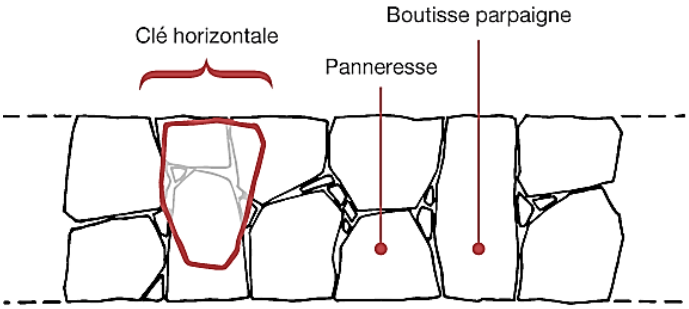


Figure II.42 : Assise d'un mur en pierre (soubassement), Source : https://espritdepays.com/patrimoines

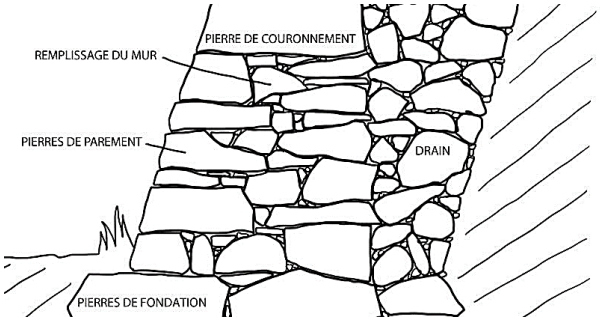


Figure II.43 : Principe de fondation d'un mur en pierre, Source : http://espritdepays.com/patrimoines

C- Toiture (plancher traditionnel)

La structure de plancher traditionnel est formée de troncs de genévrier enlignés sur une rongée de pierres ou les roseaux sont posés perpendiculairement sur les poutres en troncs de genévrier. L'Halfa est étalée sur les roseaux. Le mortier (argile sableuse) + mortier à chaux.

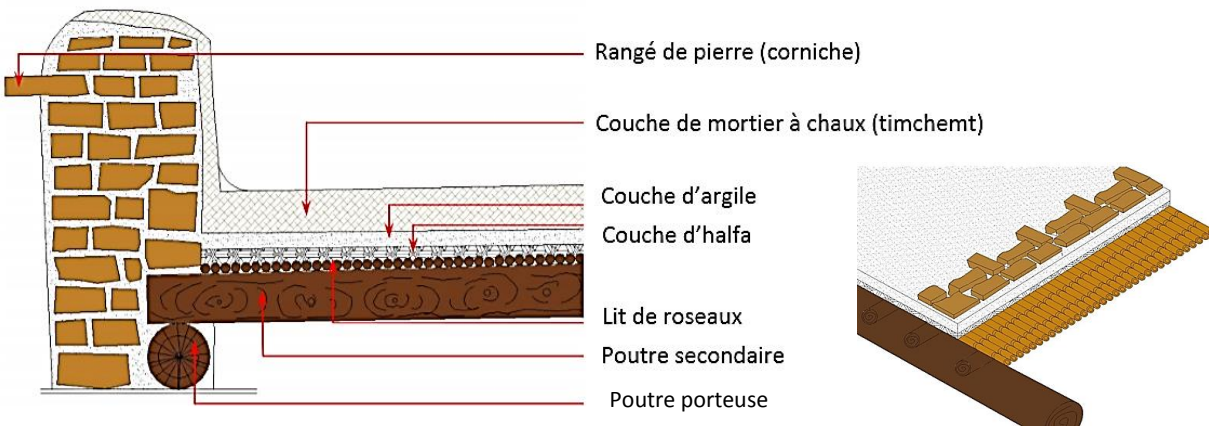


Figure II.44 : Plancher traditionnel, Source : Mémoire de Mme HABBOUL

D- Système d'irrigation des jardins

Ce système constitue une galerie souterraine légèrement inclinée, venant de l'aine, et qui draine l'eau de l'aquifère en amont vers les terrains les plus secs situés en aval en direction de la palmeraie et les jardins.
Le partage de l'eau s'effectue par le procédé horaire appelé *nouba*, c'est-à-dire tour à tour. Il est défini comme la durée de temps suffisante pour irriguer complètement le jardin.

Chaque groupes de paysans a le droit d'un tour, le tour est de 24h (12h nuit/12 h jour) ces calculs sont basées sur une formule qui combine le temps, le surface et la distance. Chaque paysan a une part de ce tour, cette part est déterminée par heure et minute en fonction de sa surface [22].

Figure II.45 : Galerie souterraine, Source : Auteurs

Figure II.46 : Les canalisations de drainage, Source : Auteurs

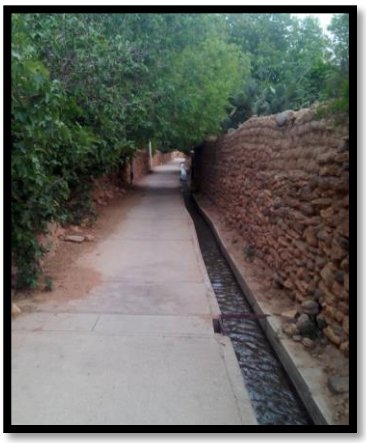


Figure II.47 : La seguia, Source : Auteurs

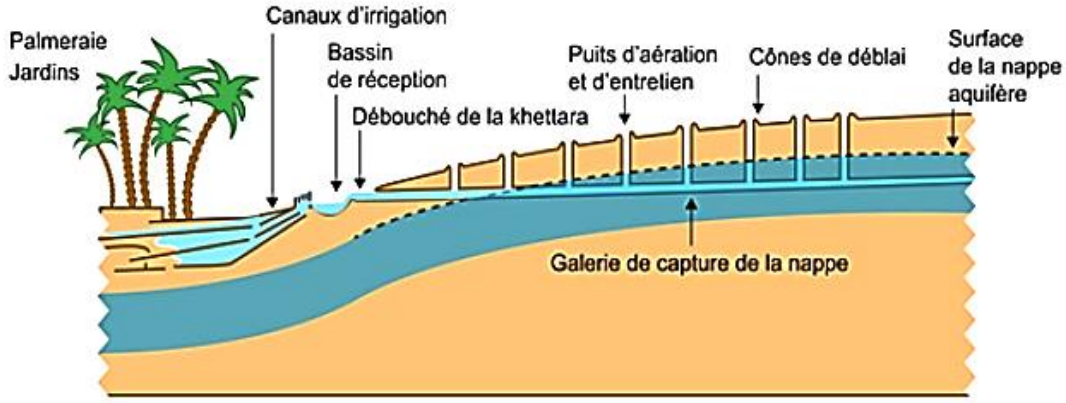


Figure II.48 : Le fonctionnement de système d'irrigation, Source : http://www.agrimaroc.ma

II.5.2 Zaouïa de sidi ben Ammar

II.5.2.1 Aperçu historique

Au début Zaouïa Tidjania, était une mosquée à la proximité de la maison de Sheikh, Avec le temps tarika Tidjania devenu très connu, et ce facteur exigé l'extension de zaouïa jusqu'à qu'elle est devenue dans sa forme actuelle [19].

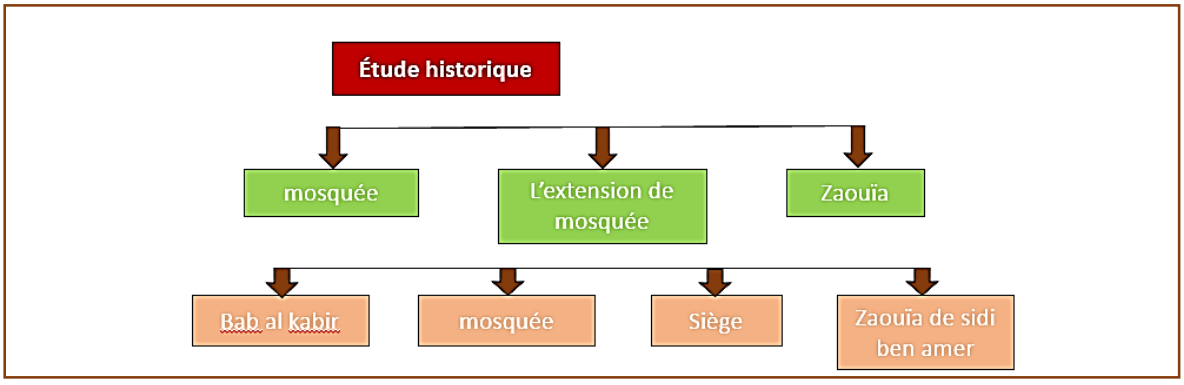


Figure II.49 : la révolution historique de la zaouïa de Sidi Ben Amer, Source : auteurs

II.5.2.2 Situation

Zaouïa de sidi ben Amer l'une des équipements de la zaouïa Tidjania qui se situe au sud-est de l'ancien ksar de Ain Madhi [19].

La zaouïa est marquée par sa monumentalité ou elle prend un aspect défensif pour des raisons sécuritaires

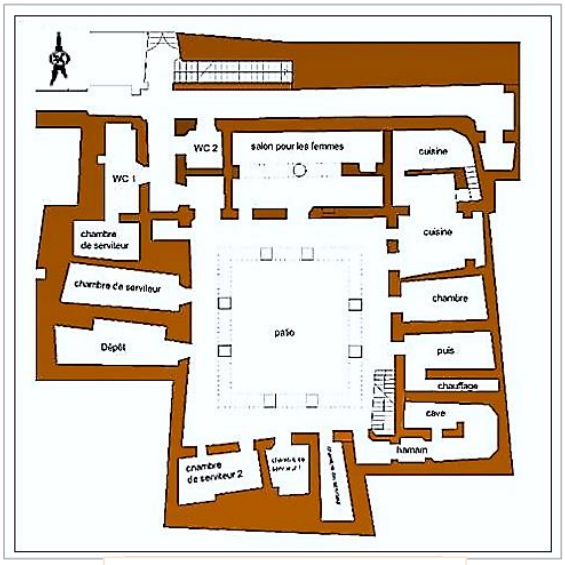
Figure II.50 : plan de situation de la zaouïa, Source : Google earth

II.5.2.3 Mode d'organisation

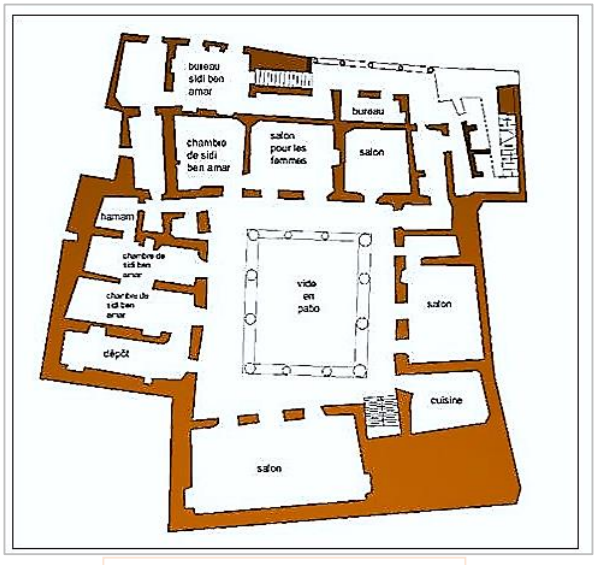
L'organisation intérieure de zaouïa caractérisée par une organisation centrale avec des espaces exposés sur un patio ouvert entouré par galerie [19].

Figure II.51 : Patio entouré par galerie, Source : Mémoire TOUIL

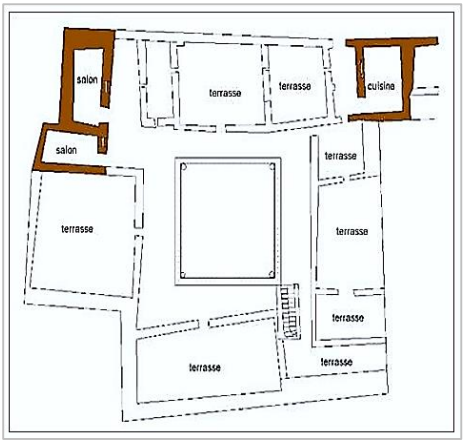
Figure II.52 : Vue extérieure sur la zaouia, Source : Mémoire TOUIL



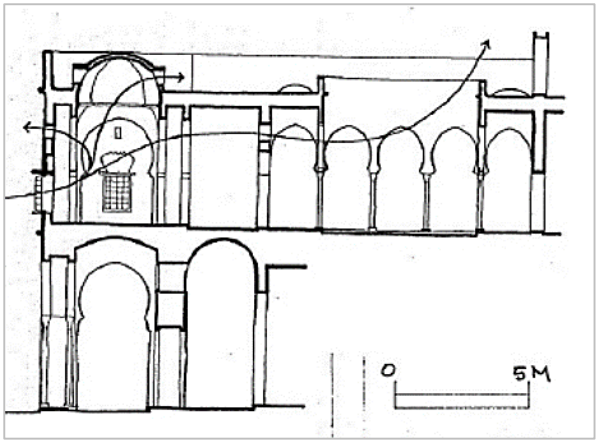
Plan d'étage de la zaouïa, Source : Mémoire TOUIL



Plan RDC de la zaouïa , Source : Mémoire TOUIL



Plan de terrasse de la zaouïa, Source : Mémoire TOUIL



Coupe schématique montre la maitrise du climat, Source :

II.5.2.4 Analyse des façades

Des façades aveugles se caractérisent par le type "INTROVERSION" avec des petits puits de lumière de présence timide.

Figure II.53 : Façade aveugle, Source : Mémoire TOUIL

Figure II.54 : Façade d'une maison, Source : Mémoire TOUIL

II.5.2.5 Eléments architectoniques

A-Entrées

Figure II.55 : L'entrée principale de ksar, Source : Mémoire TOUIL

Figure II.56 : L'entrée d'une maison, Source : Auteurs

Figure II.57 : L'entrée d'une maison, Source : Auteurs

B-Arcades

Constituées de colonnes de[19]: Base carrée (30/30) un fut torsadé de diamètre 20 cm, ces colonnes sont surmontées d'arcs en ogive caractérisés par :

- Une base de 10 cm, un fut de 1.70 m. Un chapiteau de 24 cm l'arc fait 1.40 m.
- L'Ouverture atteint 8.60 m de longueur et 3.60 m de hauteur.

Figure II.58 : Les arcades de la zaouïa, Source : Auteurs

Figure II.59 : Façade de la zaouïa, Source : Auteurs

C- Galeries

Des espaces couverts qui entourent les bâtis sont pour [19]

- Protéger contre les rayons solaires directs.
- Créer un passage couvert.

Figure II.60 : Vue d'intérieur de la zaouïa, Source : Auteurs

D- Couronnement et ornementation

Le mur est couronné par une disposition des "mokarnassates" qui est une ornementation islamique, Elle est inspirée par la végétation et les formes géométriques qui Insérer des zones ombragées dans les murs, elle se présente sous la forme d'un denticule.

Figure II.61 : Façade d'un mausolée, Source : Auteurs

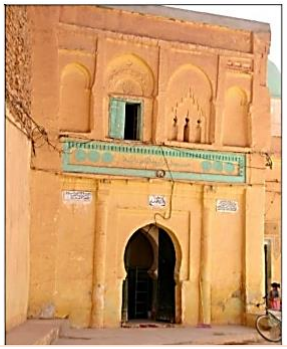


Figure II.62 : Façade de la mosquée, Source : Auteurs

E- Ouvertures

Les fenêtres et les petites ouvertures pour l'éclairage et la ventilation (Mazaghel).

Figure II.63 : présence des puits de lumière dans les encorbellements. Source : Auteurs

Figure II.64 : Type de fenêtres de ksar. Source : Auteurs

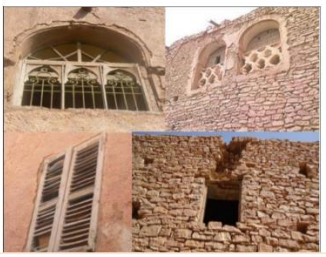


Figure II.65 : Autres type de fenêtres de ksar. Source : Auteurs

F- Éléments symboliques

C’est des motifs géométriques inspirés par les végétales et animales (fourmi et la cigale) comme un symbole de persévérance dans la période coloniale.

Figure II.67 : La fourmi et la cigale, Source : Auteurs

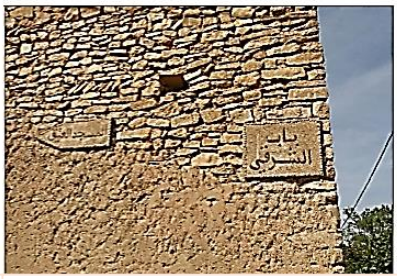


Figure II.68 : Plaque d’orientation, Source : Auteurs

G- Patio

Figure II.69 : Patio de la zaouïa, Source : Auteurs

Un espace important dans les maisons pour la création d'un micro climat et stockée l'air frais en été et l'air chaud en hiver, il permet d'éviter les ouvertes « fenêtres » dans les rues et aussi comme un espace social pour la famille [19].

II.6 Conclusion

Le ksar est confrontés à des problèmes de dégradation, mais les techniques de construction locales sont encore conservées il faut donc les préserver. Elles peuvent même servir de modèle à l’échelon universel. La politique et les actions de restauration , réhabilitation et de revalorisation doivent prendre en considération la vitalité de la ville ancienne, d’aujourd’hui et de future. Ce qui peut générer diverses activités à effectuer.

Dans La première partie de ces études, on a commencé par une analyse morphologique des différents composants de ksar ce qui nous permet de ressortir les éléments permanents qui ont été à l’origine de sa formation et authenticité.

Cette première partie est considérés comme une plate-forme qui va nous permettre la compréhension des éléments qui guident les interventions sur le ksar, à savoir la compréhension des paramètres considérés comme éléments de référence et principes qu’on doit prendre en compte lors des interventions à l’échelle de ksar.

L’étude contextuelle du patrimoine de la région de ksar Ain Madhi nous a permis de faire une prise de conscience et de connaissance approfondie du caractère spécifique de la région, à travers une évaluation continue du rapport bâti-humain , dans le but de promouvoir une mise en valeur de l’identité et du cachet architecturale locale.

Chapitre III : dimensions conceptuelles et conceptionnelles

Introduction

Dans ce chapitre on va évoquer trois aspects primordiaux dans la structuration de notre travail on cite :

- Analyse du site.
- Analyse programmatique.
- Analyse architecturale.
- Détails constructifs.

Ce chapitre abordera, le choix du site et ses caractéristiques, le programme quantitatif et qualitatif, l'idée du projet et sa genèse, le détail technique.

III.1 Analyse de site

On propose que cette zone qui se situe près du Ksar sera projetée comme un centre de formation en architecture de terre et pour cela, il faut faire une lecture analytique pour une action de reconnaissance du site.

III.1.1 Motivation du choix du site

On a choisi ce site pour des raisons suivantes :

1- Près d'un mur en pisé c'est à dire près des traces du pisé à Ain Madhi.
2- Entourer par six éléments permanents tels que : le Ksar, les jardins, la Zaouïa, la seguia, les montagnes, l'Oued.
3- Pré par une voie importante vers Ghaicha.

III.1.2 Présentation du site d'intervention

III.1.2.1 Situation

Le site d'intervention situé à la ville de Laghouat spécifiquement à Ain Madhi délimité et dégagé en pleine nature, d'une forme presque rectangulaire.

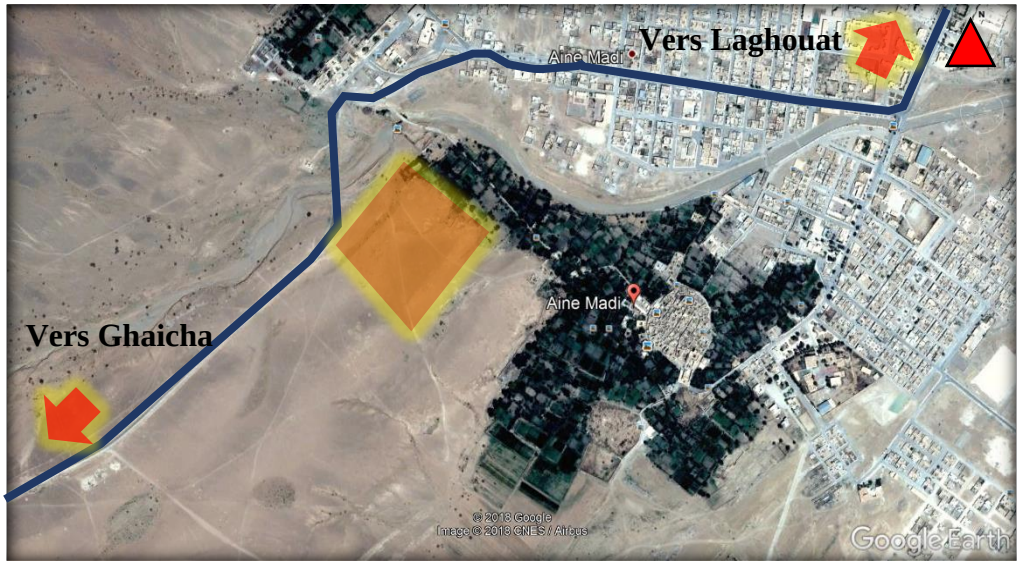


Figure. III- 1 : La situation du site, (Source : Google earth)

III.1.2.2 Environnement immédiat

Le site est limitée par : Nord : la Zaouïa + la Seguia, Est : le Ksar ; Ouest : les montagnes ; Sud : l'extension future

Le schéma ci-dessous représente le site entouré par son environnement immédiat :

Figure. III- 3 : Le site, (Source : Auteurs)

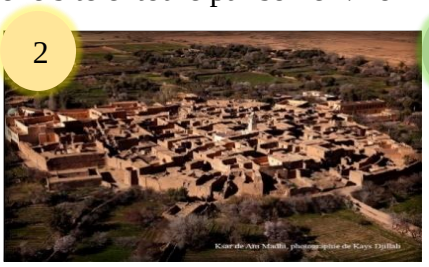


Figure. III- 4 : Le ksar, (Source : Google images)

Figure. III- 5 : La zaouïa, (Source : mémoire de Touil Hamida et Kerdamouche Sabrina)

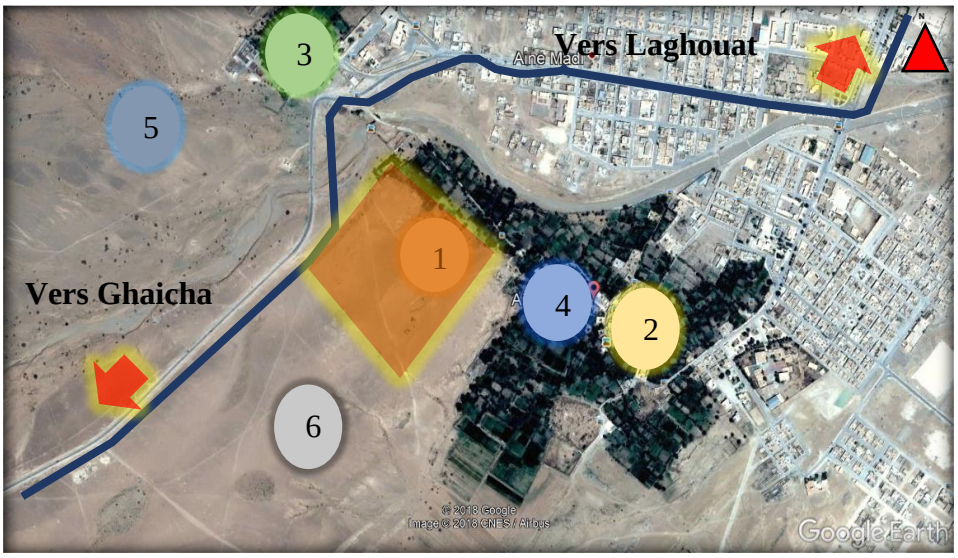


Figure III.2 : L'environnement immédiat du site, (Source : Google earth)

Figure. III- 6 : La seguia, (Source : Auteurs)

Figure. III- 7 : Les montagnes, (Source : Auteurs)

Figure. III- 8 : L'extension future, (Source : Auteurs)

Donc le site est entouré par des éléments permanents importants.

III.1.2.3 Accessibilité

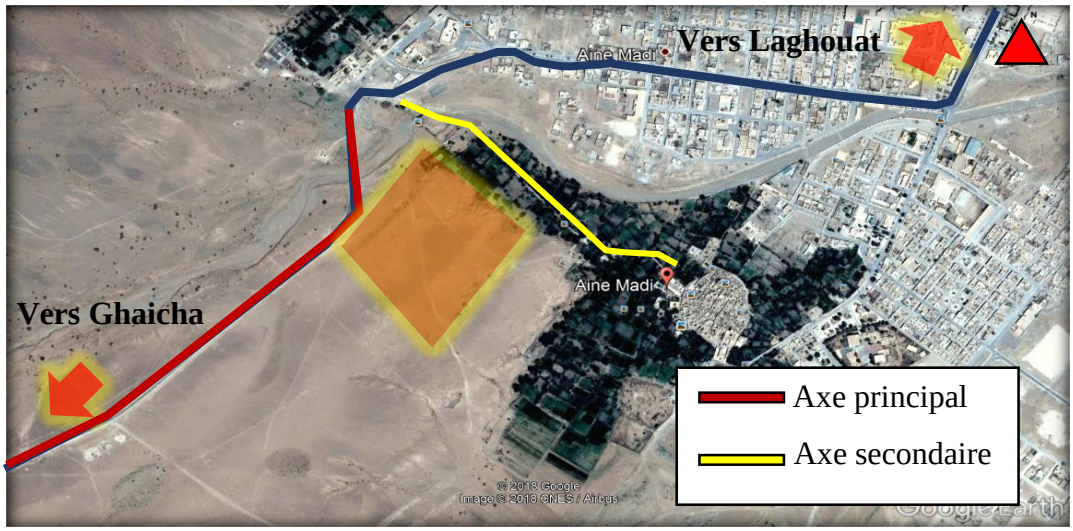


Figure. III- 9 : L'accessibilité du site, (Source : Google earth)

Le site est principalement desservie par :
Un axe principal vers Ghaicha et un axe secondaire entre les jardins.
Le site est traversé par un axe de communication lui permettant la relation avec la commune de Ghaicha et la ville de Laghouat on passe par la commune d'Ain Madhi.

III.1.2.4 Caractéristiques du site

A Forme : le terrain occupe une parcelle d'une forme presque rectangulaire.
B Surface : le terrain occupe une superficie égale presque 4 hectares.
C Dimensions : le terrain d'un longueur max 314 m et d'une largeur max 293 m.

Figure. III- 10 : Les caractéristiques du site, (Source : Google earth)

III.1.2.5 Topographie

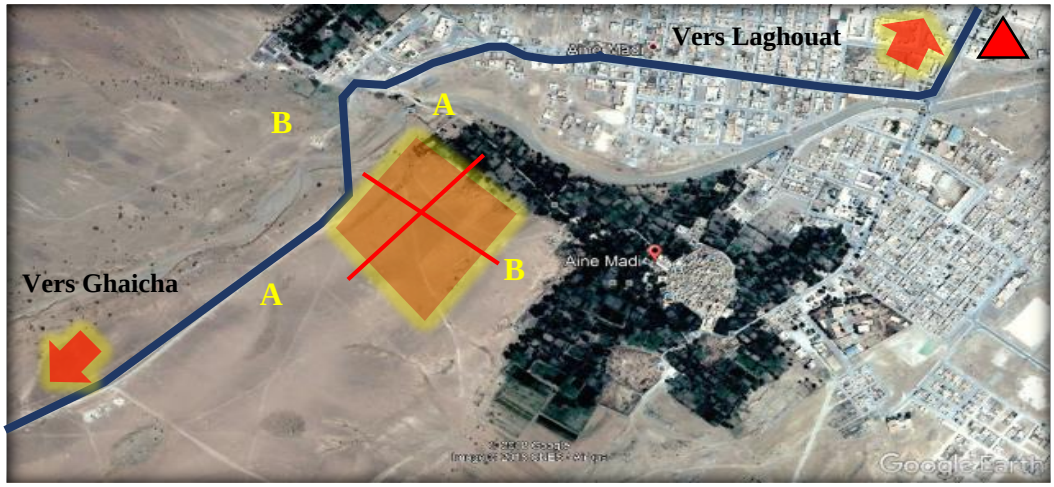


Figure. III- 11 : La topographie du site, (Source : Google earth)

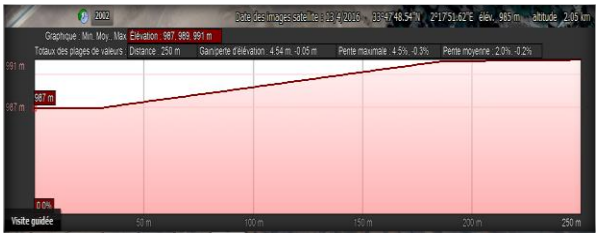


Figure. III- 12 : Coupe A-A, (Source : Google earth réaliser par auteurs)

Figure. III- 13 : Coupe B-B, (Source : Google earth réaliser par auteurs)

On constate que le terrain est presque plat à l'exception d'une pente de moyenne 1.6% et maximale 4,5%. Latitude varie entre 987et 991m.

III.1.2.6 Données climatiques du site

A Orientation le terrain est orienté de Nord-Ouest vers Sud-Est.

B Vents Les vents dominants sont de direction Sud-Ouest, les vents froids sont de direction Nord-Ouest, et les vents d'été viennent du Sud-Est.

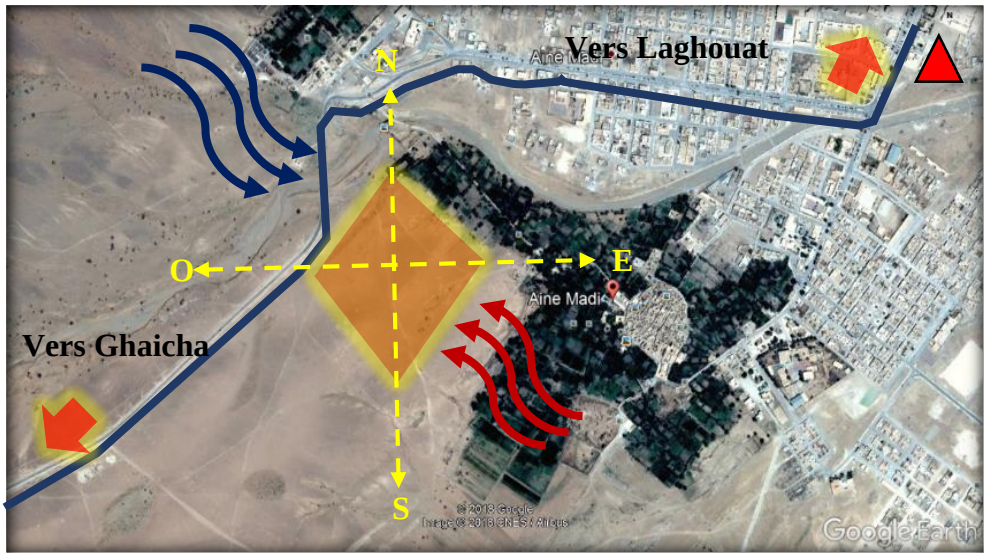


Figure. III- 14 : Les vents du site, (Source : Google earth)

C Ensoleillement

La Figure III.15 représente l'ensoleillement du site.

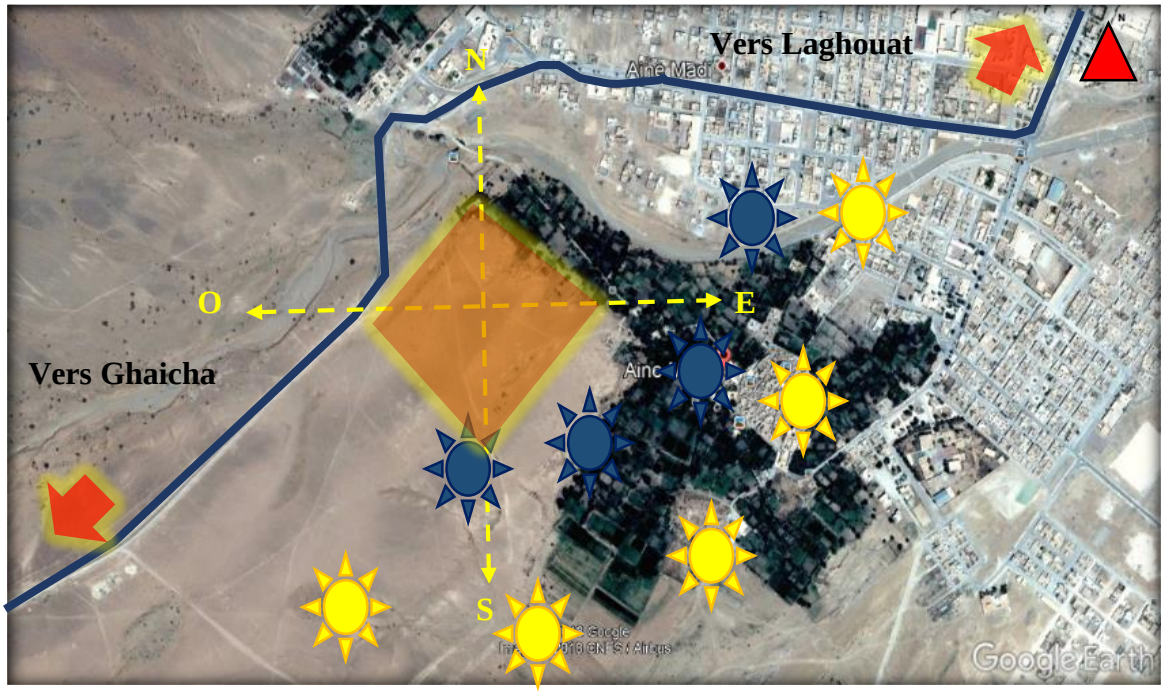


Figure. III- 15 : L'ensoleillement du site, (Source : Google earth)

Le schéma dans la Figure III.16 représente les angles du soleil du site en trois saisons l'hiver, l'été, le printemps. En plus, les heures d'ensoleillement.

L'hiver : 21 Décembre 2018
Angle de soleil est 32,73°.
Heure d'ensoleillement est 10h.

L'été : 21 Juin 2018
Angle de soleil est 79,52°.
Heure d'ensoleillement est 14h.

Le printemps : 21 Mars 2018
Angle de soleil est 57,03°.
Heure d'ensoleillement est 12h.

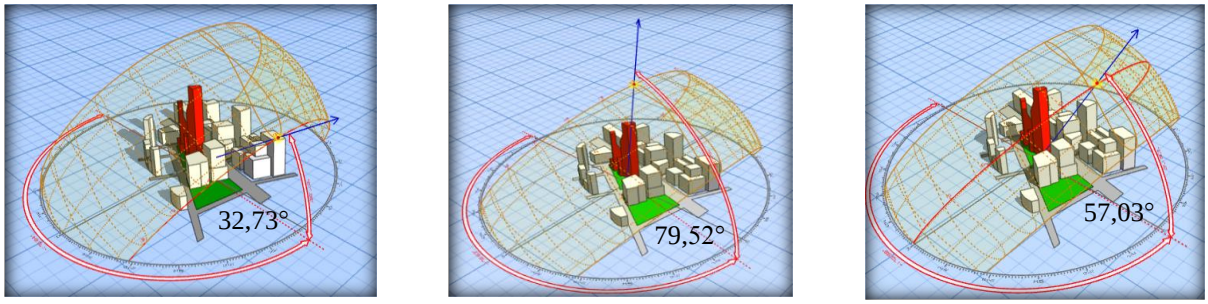


Figure. III- 16 : Les angles et les heures d'ensoleillement du site, (Source : 3D Sun-path par auteurs)

Synthèse

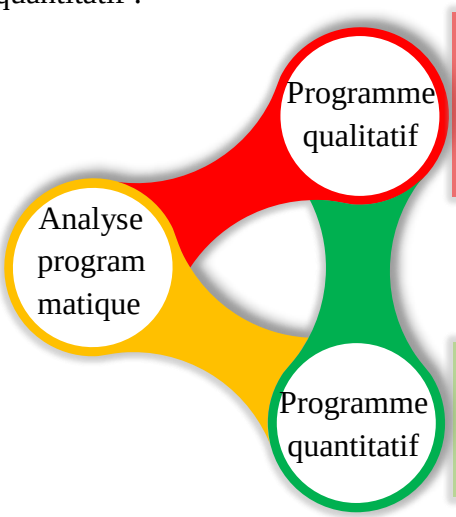
D'après l'étude de la ville et l'analyse du site, nous avons extrait quelques éléments conceptuels liés au contexte :

Situation	- Se trouve à proximité du Ksar. - Se trouve à proximité des jardins. - Se trouve près des traces du pisé. - Le terrain se trouve dans une zone très importante par son entourage : le Ksar, les jardins, la Zaouïa, la Seguia, les montagnes. - La parcelle de terrain du projet et presque rectangulaire.
L'accessibilité	- Le terrain se trouve à côté d'un axe important Vers Ghaicha.
Aspects climatiques de site	L'ensoleillement : - Utilisation des décrochements et des jeux des volumes pour créer l'ombre. - Utilisation la couleur brute du pisé pour absorber la chaleur. Vent : - Création d'une forme qui atténuer, diminuer et distribuer la vitesse des vents.
Plan de masse	- Le projet doit contenir un espace bâti et non bâti pour assurer une continuité spatiale et fonctionnelle. - L'inspiration de la typologie du Ksar et la ville d'Ain Madhi. - Utilisation des points d'eaux et de végétation pour créer un micro climat. - L'utilisation des formes compactes qui permet de diminuer les déperditions thermiques et l'exposition aux conditions climatiques.

III.2 Analyse programmatique

« Le programme est un moment en amont du projet, c'est une information obligatoire à travers laquelle l'architecture va pouvoir exister, c'est un point de départ mais aussi une phase préparatoire » (Pierre Von Meiss, de la forme eu lieu). Alors programmer, c'est qualifier plutôt que quantifier.

Le schéma ci-dessous représente les types du programme tels que le programme qualitatif et quantitatif :



Est une description des espaces pour mieux orienter le concepteur lors de la conception des plans (à savoir la nature des espaces, leurs emplacements et leurs exigences) [24].

Est une détermination des différentes entités d'un centre de conférence avec leurs services et les espaces propres pour chaque service (surface et nombre) [24].

Figure. III- 17 : Les types du programme, (Source : Auteurs)

III.2.1 Objectif

Les objectifs du programme se traduisent par :

- L'harmonisation des fonctions et des proportions surfaciques et spatiales entre les différentes activités de l'équipement [25].
- L'élaboration d'un programme caractérisé par la souplesse des rapports entre les espaces qu'il identifié [25].
- L'offre des espaces diversifié et évolutif [25].

III.2.2 Centre de formation

Lieu de former des cadres et des techniciens, et de développer et évoluer des nouvelles connaissances liées à la direction de formation professionnel [26].

III.2.2.1 Définition d'un centre de formation en architecture de terre

Est un centre a pour objectifs la promotion et la valorisation du patrimoine bâti en terre. A cet effet, plusieurs missions lui sont assignées. Parmi elles, l'identification et l'inventaire du patrimoine bâti en terre et des savoir-faire traditionnels liés à sa production ; l'élaboration et la diffusion des procédés techniques en matière de conservation, de restauration et d'entretien [27].
Le centre de formation en architecture de terre a des visées scientifiques et pédagogiques. Il est en effet habilité à entreprendre les études et les recherches se rapportant au patrimoine bâti en terre. Il aura également la charge d'organiser des ateliers pédagogiques et didactiques de formation, de participer aux différentes manifestations culturelles et scientifiques, nationales ou internationales ou d'en être l'organisateur, de constituer un fonds documentaire et de créer enfin une base de données numériques [27].

III.2.3 Types d'usagers

Les apprenants et les chercheurs	Le personnel administratif et technique	Les visiteurs
Les étudiants, les enseignants, les stagiaires, les chercheurs permanents ou temporaires, les ingénieurs.	Administrateur. Technicien. Personnels de service et sécurité.	Etudiants. Public.
Chargé de la mission de la formation en architecture de terre, l'expérimentation et l'enseignement.	Chargé de la mission de contrôle, maintenance, gestion.	Pour la découverte.

Tableau. III- 1 : Types d'usagers, (Source : Auteurs)

III.2.4 Programme qualitatif et quantitatif

Le programme quantitatif et qualitatif du ministère de la formation et de l'enseignement professionnels d'un centre de formation représente dans la Figure ci-dessous :

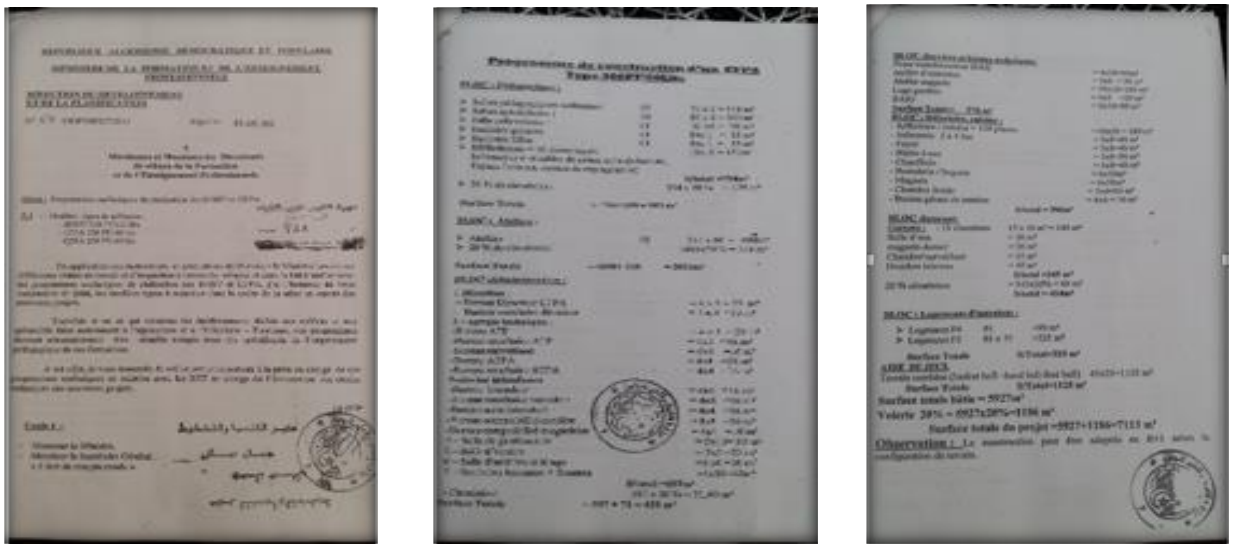


Figure. III- 18 : Le programme qualitatif et quantitatif d'un centre de formation, (Source : La direction de formation Professionnel de la wilaya de LAGHOUAT)

D'après l'analyse des exemples et le programme ci-dessus, le programme de base contient cinq entités composant un centre de formation qui représentent dans la Figure ci-dessous :

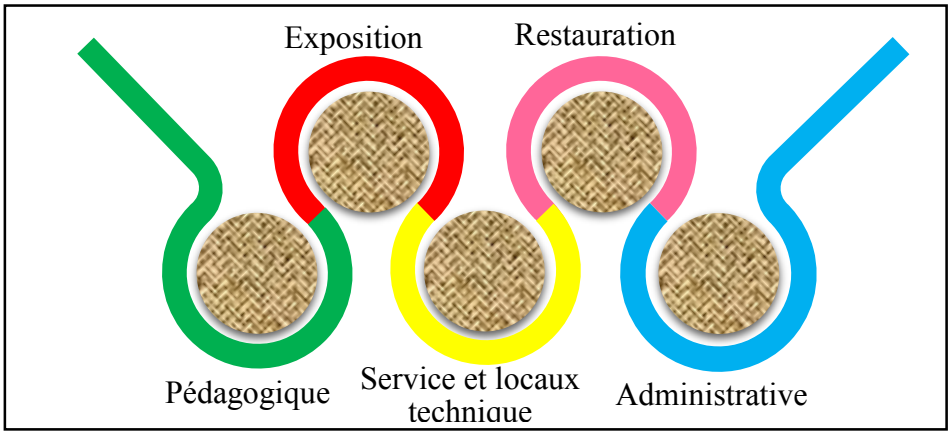


Figure. III- 19 : Les cinq entités composant un centre de formation en architecture de terre, (Source : Auteurs)

III.2.4.1 Structure du programme

D'après l'analyse des exemples et les Figures représentant ci-dessus, on peut extraire le programme qualitatif et quantitatif de notre projet par la structure du programme représentant dans la Figure ci-dessous :

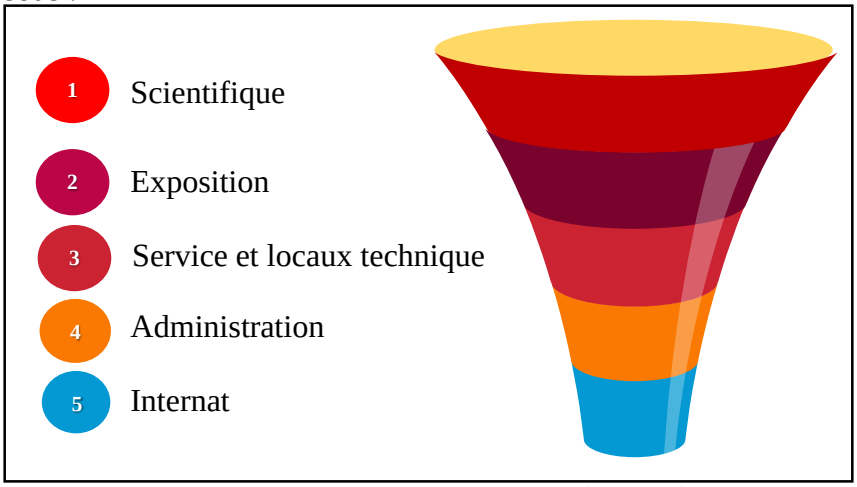


Figure. III- 20 : Les cinq entités composant notre projet, (Source : Auteurs)

III.2.4.2 Programme qualitatif

Accueil et réception

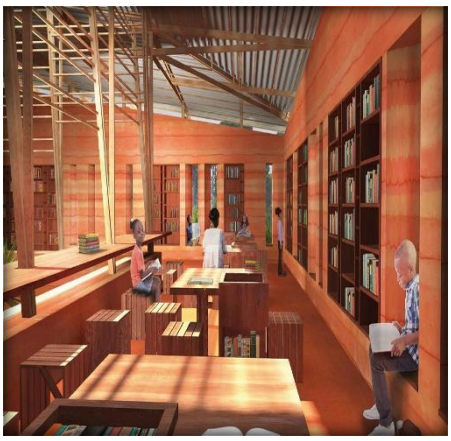
Espace	Accueil
Sous espace	Entrée, hall d'entrée, réception, détente.
Activité	Accéder, accueillir et recevoir, information et orientation, détente.
Exigence qualitatif	-Une entrée attirante pour marquer l'accès. -Eclairage naturel ou artificiel. -Un espace ouvert placé avec l'espace bruyant. -Eclairements nominaux : 250 lux.
Illustration	 Figure. III- 21 : Accueil et réception, (Source : www.printerest.co.uk)

Entité scientifique

Espace	Atelier
Activité	C'est un espace de réglage, de restauration et de mise en forme des œuvres. Il sera spacieux afin d'accueillir le plus grand nombre d'activités. Spatialement, les ateliers seront caractérisés par des espaces flexibles et libres afin de permettre le maximum de contact et d'échange.
Exigence qualitatif	-Espace calme. -Eclairage naturel et artificiel. -Une bonne aération.
Equipement	Les tables, les chaises, les outils des matériaux, les moules, les moyens de la mise en œuvre.
Illustration	Figure. III- 22 : Atelier, (Source : www.google images.com)
Espace	Labo
Activité	C'est un espace expérimental ou la mise en œuvre des échantillons des matériaux en terre et leur développement.
Exigence qualitatif	-Espace calme. -Eclairage naturel et artificiel. -Une bonne aération. -Renouvellement d'air important. -Chaque laboratoire a un confort d'ambiance spécial selon le type des essais à faire.
Equipement	Les tables, les chaises, four de séchage, les moules, les moyens utilisés aux essais, les appareils qu'identifier les différents caractéristiques des matériaux.

Illustration	 Figure. III- 23 : Laboratoire, (Source : www.printerest.co.uk)
Espace	Salle de projection ou salle de cours
Activité	Cet espace permet aux chercheurs de donner des cours, exercer leurs travaux dirigés, et compléter les assimilations théoriques et pratiques.
Exigence qualitatif	-Nécessité d'un éclairage naturel et artificiel. -Eclairements nominaux : 250 lux.
Equipement	Les tables, les chaises, tableau, tableau de projection, bureau d'enseignent.
Espace	Salle d'informatique
Activité	Se documenter informatiquement.
Exigence qualitatif	-Espace fermé. -Eclairage artificiel perpendiculaire à l'ordinateur. -Eclairements nominaux : 500 lux.
Equipement	Les tables, les chaises, les ordinateurs.
Illustration	 Figure. III- 24 : Salle d'informatique, (Source : www.printerest.co.uk)

Espace	Salle des profs
Activité	Cet espace permet aux enseignent de prêter, de rencontrer et de consulter entre eux.
Exigence qualitatif	Eclairage naturel et artificiel.
Equipement	Table, les chaises, des placards pour les livres ou les choses personnels.
Illustration	Figure. III- 25 : Salle des profs, (Source : www.google image.com)

Espace	Bibliothèque
Activité	Rassemble des ouvrages concernant l'enseignement et la recherche, pour emprunt ou consultation sur place, destinés aux étudiants ou autres personnes intéressées. Le rapport entre les fonds d'emprunt et les fonds de consultation sur place dépend du type d'organisation de la bibliothèque.
Exigence qualitatif	-Un espace vaste. -Eclairage naturel et artificiel. -Un espace calme. -Une bonne aération. -Eclairement nominaux : 500 lux
Equipement	Bureau de bibliothèque, chaises, tables, comptoir de prêt, rayonnage.
Illustration	 Figure. III- 26 : Bibliothèque en pisé à Ghana, (Source : www.archicree.com)

Espace	Vestiaire
Activité	Abeiller.
Exigence qualitatif	-Espace fermé. -Eclairements nominaux : 200 lux
Equipement	les chaises, des placards.
Illustration	 Figure. III- 27 : Vestiaire, (Source : www.google images.com)

Entité d'exposition

Espace	Auditorium
Sous espace	Les gradins, la scène, salle de technique, salon.
Activité	Asses, déployer, entretenir, accueillir.
Exigence qualitatif	-Espace fermé et bruyant nécessite le calme. - Un hauteur important pour assurer le confort acoustique. - Un éclairage artificiel pour bien contrôler - Eclairements nominaux contrôlé.
Illustration	 Figure. III- 28 : Auditorium en terre crue, (Source : www.google images.com)
Espace	Hall d'exposition
Sous espace	Salle d'exposition permanente, salle d'exposition temporaire.
Activité	Une salle d'exposition est un lieu où sont souvent exposé des œuvres, peintures et autres objets. C'est un espace assez vaste pouvant accueillir à un instant donné un grand nombre de personnes (50 au minimum) venant admirer les œuvres. On distingue deux types des salles d'exposition :

	Salle d'exposition permanente : un espace présentatif aux publics témoigne d'un contexte et d'une culture. Un Contact direct entre la collection et le visiteur et un lieu de conservation des objets. Salle d'exposition temporaire : un espace d'exposition de l'une des unités d'une façon temporaire et le but c'est d'informer le public aux objets du centre.
Exigence qualitatif	-Un éclairage artificiel beaucoup plus que naturelle. -Une grande surface de circulation. -Un espace bruyant doit isoler et oriente vers l'espace bruyant. -Espace vaste. -Espace de circulation aberrante. -Eclairements nominaux : 300 lux
Equipement	Les œuvres exposées proviennent généralement des arts plastiques, elles sont accrochées : peintures, dessins, photographies, ou posées au sol : sculptures. Mais on peut également trouver des œuvres de toutes natures, comme du mobilier ancien : les outils ou les moules du pisé ou d'autres matériaux terre ou contemporain.
Illustration	Figure. III- 29 : Salle d'exposition de la terre à pisé terra award, (Source : www.google images.com)

Entité Service et locaux technique

Espace	Locaux de stockage
Activité	De stocker, des fichiers, des dossiers, d'aménagement ou menuisiers.
Exigence qualitatif	- Un éclairage artificiel. - Espace vaste. - Espace dominant une entrée à l'extérieur.
Espace	Dépôt ou l'archive
Activité	De déposer, de charger par l'alimentation pour restaurant et cafétéria.
Exigence qualitatif	-Un éclairage artificiel. -Espace vaste. -Espace dominant une entrée à l'extérieur.

Illustration	 Figure. III- 30 : Locaux de stockage et archive, (Source : www.google images.com)
Espace	Restaurant et cafétéria
Activité	De manger, de soulager, de discuter, de relax.
Exigence qualitatif	Pour tous projets de telle vocation il est nécessaire d'injecter la fonction de restauration, qui est un espace d'ambiance et d'échange. Ils marqueront un moment de repos pour les usagers dans le parcours de travail.
Illustration	 Figure. III- 31 : Restaurant et cafétéria, (Source : www.printerest.co.uk)

Entité administrative

Espace	Bureau de directeur
Activité	Gérée administration.
Exigence qualitatif	- Espace fermé, doit bénéfice de calme, éclairage naturelle ou artificielle. - Eclairements nominaux : 200 lux.
Equipement	Bureau, les chaises.
Espace	Secrétariat
Activité	la réception des visiteurs.
Exigence qualitatif	- Espace fermé, doit bénéfice de calme, éclairage naturelle ou artificielle. - Eclairements nominaux : 200 lux.
Equipement	Bureau, les chaises.
Espace	Bureau de service, bureau de surveillance
Activité	De servir : un lieu de détente et de travail pour l'équipe des travailleurs, surveillé.
Exigence qualitatif	-Espace fermé doit bénéfice le calme éclairage naturel artificiel. -Eclairements nominaux : 200 lux.
Equipement	Bureau avec chaises, des caméras.
Illustration	Figure. III- 32 : Les bureaux, (Source : www.printerest.co.uk)

Entité internat

Espace	WC et bain
Activité	Utiliser WC, se laver les mains
Exigence qualitatif	-Espace simple humide, intime, espace fermé. -Circulation d'air important (ventilation naturel). -Eclairage naturelle ou artificielle. -Eclairements Nominaux : 200 lux.
Equipement	Des lavabos, des douchettes, des sièges.

Espace	Chambres
Activité	De dormir, de relax, le confort.
Exigence qualitatif	- Espace fermé, doit bénéfice de calme, éclairage naturelle ou artificielle. - Eclairements nominaux : 200 lux.
Equipement	Des lits, des tables de nuit, bureau avec une chaise.
Illustration	 Figure. III- 35 : Chambre à kasbah Tebi Ait Ben Haddou, (Source : www.google images.com)
Espace	Chambre d'urgence, bureau de médecin
Activité	De traiter.
Exigence qualitatif	- Espace fermé, doit bénéfice de calme, éclairage naturelle ou artificielle. - Eclairements nominaux : 200 lux.
Equipement	Des lits, des matériels pour le traitement, bureau avec une chaise.
Illustration	 Figure. III- 36 : Chambre d'urgence, (Source : www.google images.com)

Tableau. III- 2 : Le programme qualitatif du projet, (Source : Auteurs)

III.2.4.3 Programme quantitatif

Le bâti : la surface du bâti est 5373 m2.

Entité	Espaces	Surface	Nombre	Surface totale
Accueil et réception	Hall d'accueil et réception	350 m2	1	350 m2
Scientifique	Atelier	100 m2	4	1355 m2
	Labo	100 m2	3	
	Salle de projection	100 m2	3	
	Salle de cours	40 m2	2	
	Salle d'informatique	100 m2	1	
	Salle des profs	25 m2	1	
	Bibliothèque	100 m2	1	
	Bureau du responsable	15 m2	2	
	Vestiaire	10 m2	1	
	Sanitaire	10 m2	1	
Exposition	Auditorium	255 m2	1	815 m2
	Salle d'exposition permanente	130 m2	4	
	Bureau de service	15 m2	2	
	Sanitaire	10 m2	1	
Service	Locaux de stockage	100 m2	1	451 m2
	Dépôt ou archive	100 m2	1	
	Bureau technique	15 m2	1	
	Restaurant	126 m2	1	
	Cafétéria	100 m2	1	
	Sanitaire	10 m2	1	
Administration	Bureau de directeur	25 m2	1	149 m2
	Bureau de secrétariat	12 m2	1	
	Bureau de service	20 m2	1	
	Bureau de surveillance	12 m2	1	
	Salle de réunion	25 m2	1	
	Salle de conférence	25 m2	1	
	Salle de tirage	15 m2	1	
	Archive	15 m2	1	
Internat	Chambre	12 m2	20	420 m2
	Chambre d'urgence	15 m2	2	
	Bureau du médecin	15 m2	2	
	Bureau du service	15 m2	2	
	Bureau de surveillance	15 m2	2	
	Douche	20 m2	2	
	Sanitaire	10 m2	2	

Tableau. III-3 : Le programme quantitatif du bâti du projet, (Source : Auteurs)

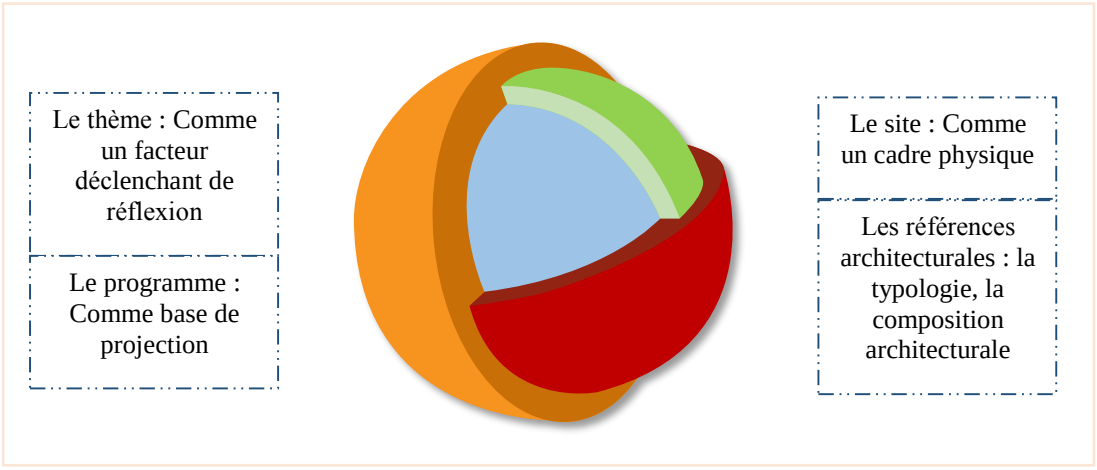
III.3 Analyse architecturale

III.3.1 Genèse de projet

III.3.1.1 Démarche conceptuelle

« Un projet avant d'être un dessin est, un processus c'est-à-dire, un travail de réflexion basé sur la recherche des réponses d'un ensemble de contraintes liées à l'urbanisme, au site, au programme, et au thème, ce qui veut dire qu'il est difficile de dissocier le processus de création future et la phase de programmation car l'ensemble constitue l'acte de créer » (Richard Meier) [28].

La projection architecturale est une opération évolution ou on compose le projet a partir références théoriques et tente a créé l'harmonie entre l'enveloppe formelle, l'espace, l'aspect environnemental et le paysage, afin de produite une unité intégrante.



III.3.1.2 Concepts et principes du projet

La centralité : On peut définir l'aspect de la centralité comme un élément articulateur et organisateur (le patio), qui assure les différentes liaisons fonctionnelles et spatiales. Où cet espace central a pour but : [28]

- La liberté du mouvement.
- Le dégagement visuel.
- L'identification des espaces.
- La lecture rapide de l'espace.

L'orientation: c'est le regroupement des éléments qui prennent relation avec une rue, une place, ou un bâtiment.

- Action de donnée une direction déterminée orientation de regard du parcours...
- Action de disposer par rapport à un paramètre déterminé par rapport au soleil, au vent, aux vues.
- Détermination des points cardinaux (nord, sud, est, ouest) d'un lieu, d'un plan.
- Ce concept permet d'offrir une orientation vers les points de repères ciblés (le noyau centrale, la montagne, la zaouïa, l'oued) pour les marquer et intégrer le projet dans son ensemble [28].

- **L'articulation :** permet de parler de la construction, de la fonction et de la relation au lieu de cette façon, l'édifice devient plus explicite, nous parle lui-même.

Les parcours : Les parcours influent sur l'individu et dévoilent les caractéristiques géométriques spatiales et formelles du milieu dans lequel nous évoluons .Dans un parcours, les images peuvent se distinguer d'après la qualité de leur structure, la façon dont leurs parties sont disposées et liées [28].

La notion de seuil : C'est un moment de passage entre l'espace urbain et l'espace semi-urbain (intérieur de l'équipement). « Les seuils et les espace de transitions sont des lieux où le monde se renverse : marches, bavant toits, portails, balcons, fenêtres. Tous sont des régulateurs de ce renversement ».

Fluidité et lisibilité : La qualité visuelle, la clarté apparente ou lisibilité se conjuguent pour créer une structure globale du projet qui lui permet d'être lisible à l'intérieur et se laisse découvrir à l'aide d'une fluidité et lisibilité de circulation.

Le champ visuel :Les qualités qui augmentent la portée et la pénétration de la vision, de manière réelle ou symbolique comprennent les transparences comme les vitrages et cela apparaît fortement dans notre projet [28].

La perméabilité : Elle assure la relation de l'équipement avec son environnement à travers ces différents accès (piéton et mécaniques) et les relations fonctionnelles entre les différentes entités internes. Elle peut se traduire aussi à travers les relations visuelles internes et externes de l'équipement [28].

III.3.1.3 Développement du projet

A- Etat de lieu de site

Le terrain est délimité par des voiries (Voie principale, et des voies secondaires). Le terrain bénéficie d'une bonne accessibilité et flux important. Donc il possède une véritable vocation pour accueillir un centre de formation de terre.

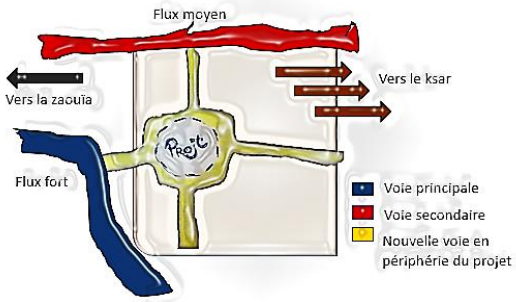


Figure III.37 : Délimitation du projet, Source : Auteurs

B- Mode d'occupation et choix des accès

Le choix des accès est diète par l'importance des voix. Le projet prendra naissance au centre du traine supporte par l'axe de développement.

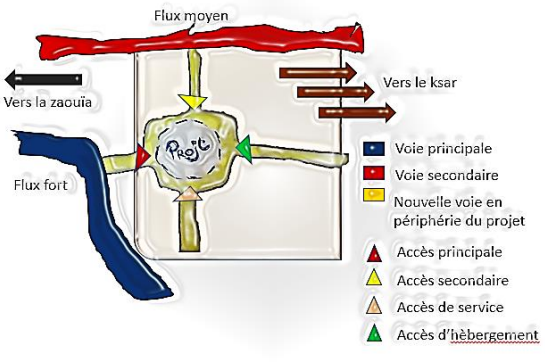


Figure III.38 : Choix des accès, Source : Auteurs

C- Concrétisation des axes structurants

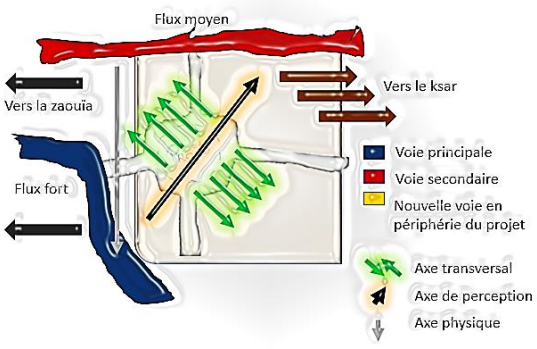


Figure III.39 : Concrétisation des axes, Source : Auteurs

D- Zoning

Le projet s'articule suivant un principe de zoning qui se base principalement sur :

Le principe d'une trame de repère qui sert à orienter chaque entité a un des éléments de permanence de site. Les entités s'organisent autour d'un patio central pour faire rappeler la notion de la (maison à patio) avec une mise en évidence de l'introversion qui se marque par la convergence des entités vers le patio.

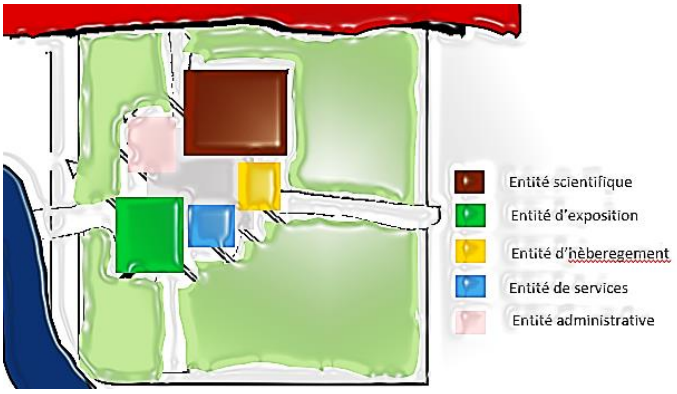


Figure III.40 : Zoning, Source : Auteurs

Le principe de rassemblement des entités met en valeur la notion de la compacité à travers un rapport dialectique entre la morphologie du ksar et la composition du projet.

Les entités qui constituent le projet sont comme suit :

- Entité scientifique : orientée Nord-est vers le noyau centrale du ksar (la mosquée), dont on trouve les ateliers, les labos, les salles de projections, la bibliothèque, la salle d'informatique.
- L'entité d'exposition : orientée Sud-ouest vers la montagne, elle contient des salles d'expositions permanentes et provisoires, et un auditorium.
- L'entité de service : orientée Sud, dont on trouve les locaux de stockage, le restaurant, la cafeteria.
- L'hébergement : orienté Sud-est vers les jardins.
- L'entité administrative : orientée Nord-ouest vers la zaouïa.

E- Idée du projet

Le projet s'inscrit dans l'idée d'une maitrise des paradoxes dans la vision de faire une réconciliation entre l'ancien et le moderne.

Le principe de conception s'organise sur une vision tridimensionnelle à trois échelles :

- Celle de l'homme, son environnement et sa culture.
- Celle de l'espace dans toutes ses dimensions ; conçu, perçu et vécu.
- Et celle du matériau dans son processus ; découverte, expérimentation et production.

Le projet donc sera en évolution qui renforce le rapport bâti-humain et faire inscrire le projet dans une micro-dynamique au fil du développement durable.

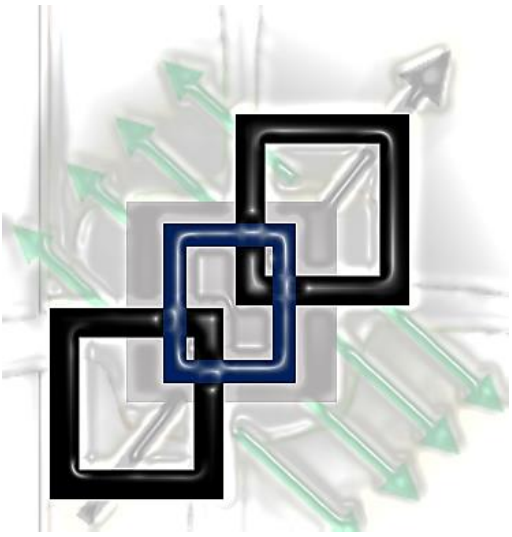


Figure III.41 : projection de l'idée, Source : Auteurs

III.3.1.4 Description du projet

Figure III.42 : Plan de masse, Source : Auteurs

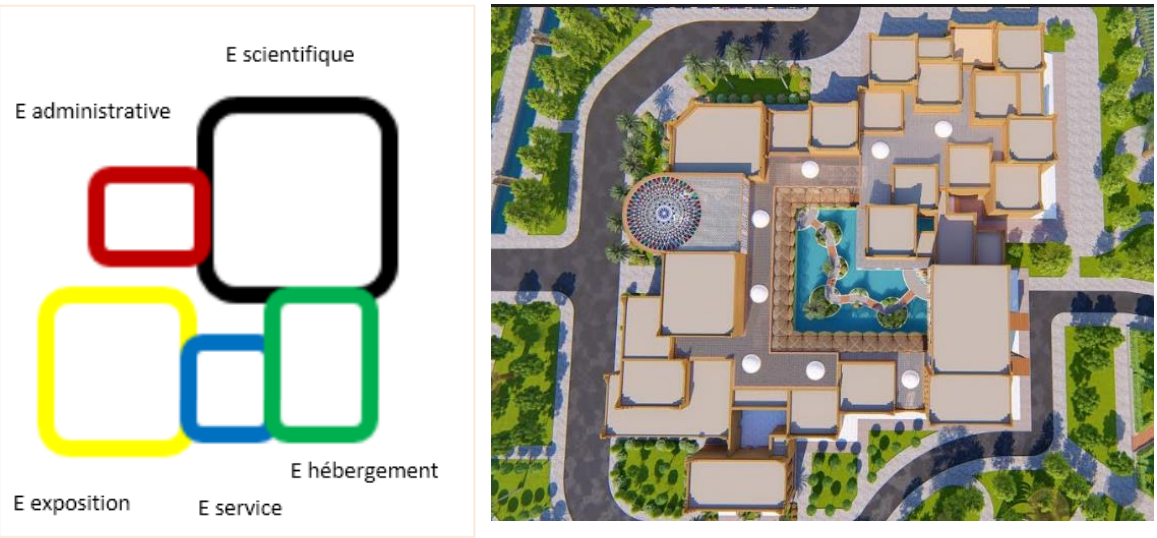


Figure III.43 : Plan de masse, Source : Auteurs

Figure III.44 : Vue sur l'hébergement, Source : Auteurs

Figure III.45 : Vue sur l'entité scientifique, Source : Auteurs

Figure III.46 : Vue sur l'entité scientifique, Source : Auteurs

Figure III.47 : Vue sur l'entité scientifique, Source : Auteurs

Figure III.48 : Vue sur l'entité d'exposition, Source :

Figure III.49 : Vue sur l'entité d'exposition, Source :

Figure III.47 : Vue sur l'entité scientifique, Source : Auteurs

Figure III.48 : Vue sur l'entité d'exposition, Source :

Figure III.49 : Vue sur l'entité d'exposition, Source :

Les parcours : le principe des parcours vise essentiellement au promeneur de le faire plonger dans le paysage tout en conservant le recul par rapport le projet.

L'organisation des parcours tente à faire une expérience paysagère à l'usager et le faire rappeler aux éléments du ksar tel que les seguias, les sabats … cette organisation suit le même principe de la trame de repère ou l'espace non bâti sera la complémentarité de l'espace bâti, dans ce principe on trouve :

- Parcours de distribution extérieure piétonne : c'est un parcours de découverte et promenade.
- Parcours périphériques piéton : c'est un parcours proche les vois mécaniques pour mieux percevoir et limiter le projet.
- Les aires de détente : espace gazonné pour le repos.

Figure III.52 : Vue sur les parcours et la promenade, Source : Auteurs

Figure III.53 : Vue sur les jets d'eau, Source : Auteurs

Figure III.54 : Vue en perspective sur les parcours, Source : Auteurs

III. 3.2 Analyse des plans

III.3.2.1 Principes d'organisation intérieure

Le schéma dans la Figure…représente les différents principes appliqués dans la distribution intérieurs du centre :

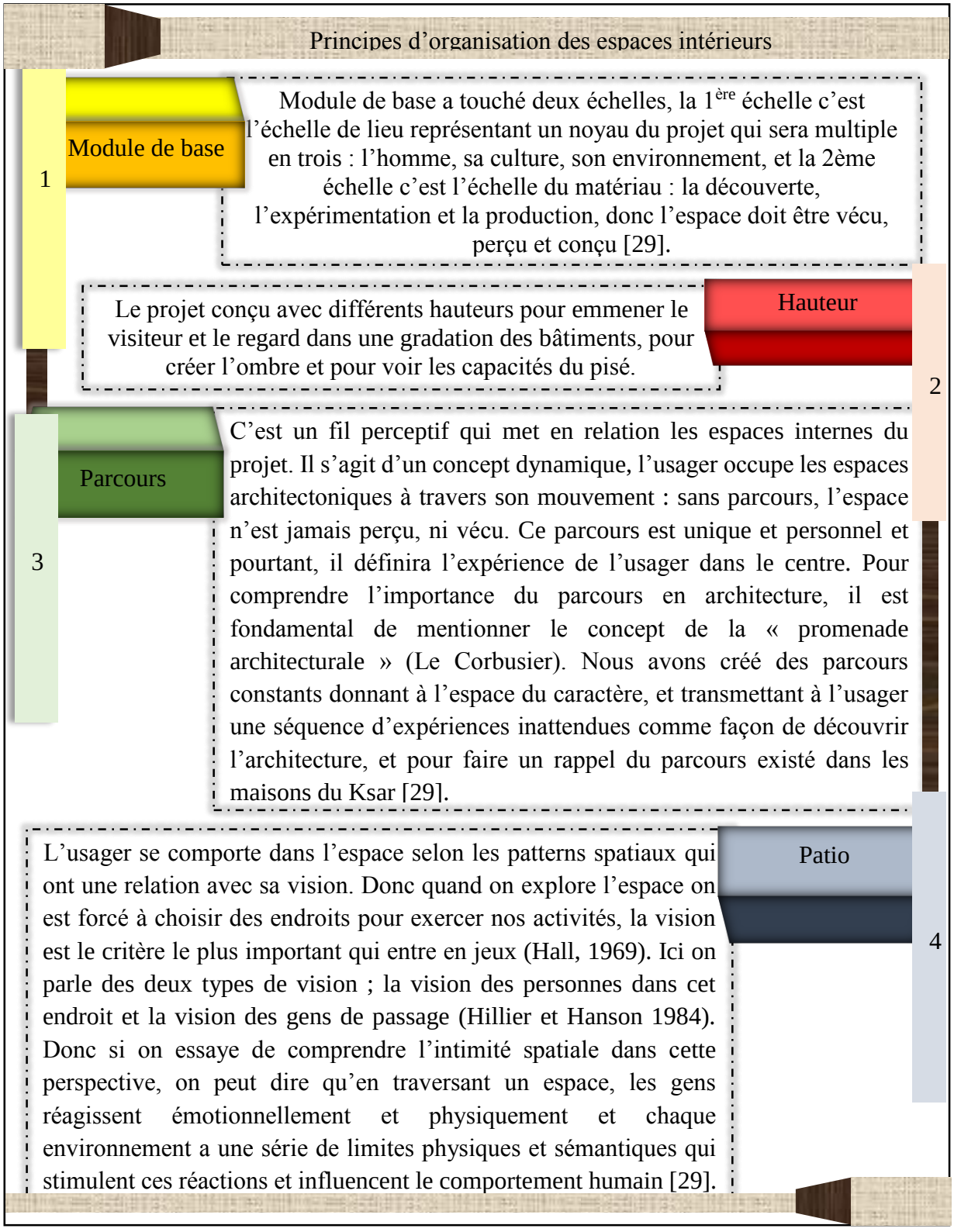


Figure. III- 55 : Les principes appliqués au projet, (Source : Auteurs)

III.3.2. Lecture des plans

Le plan du centre se compose par trois niveaux :

R.D.C : se compose par tous les espaces des cinq entités du projet, on commence par l'accueil et réception passant par un hall d'accueil en arcades, pour trouver par la suite de côté Est les salles de cours, les ateliers, les salles de projection, les labos, bibliothèque, salle d'informatique, salles des profs, bureau de service et vestiaire. Au côté Ouest on trouve l'auditorium. Les salles d'expositions, cafétéria et restaurant, les locaux de stockage au sud, tous ces espaces entourés par un patio secondaire a pour but d'éclairer et d'aérer, pour arriver à la suite d'un coin de méditation.

On passe d'un espace à l'autre par un parcours percé par Moucharabieh pour créer l'ombre et un effet de lumière, à l'intérieur de l'espace on trouve des piliers de forme palmier pour faire un rappel de palmeraie qui entoure le Ksar.

Le centre percé par un patio centrale pour créer un micro climat et donner un aspect visuel pour l'homme dans l'espace, ce patio entouré par des voutes contenant une fois un mur d'eau, et parfois un espace vert pour donner une certaine richesse dans l'espace, en plus il est aménagé par un petit parcours inspiré de l'Oued.

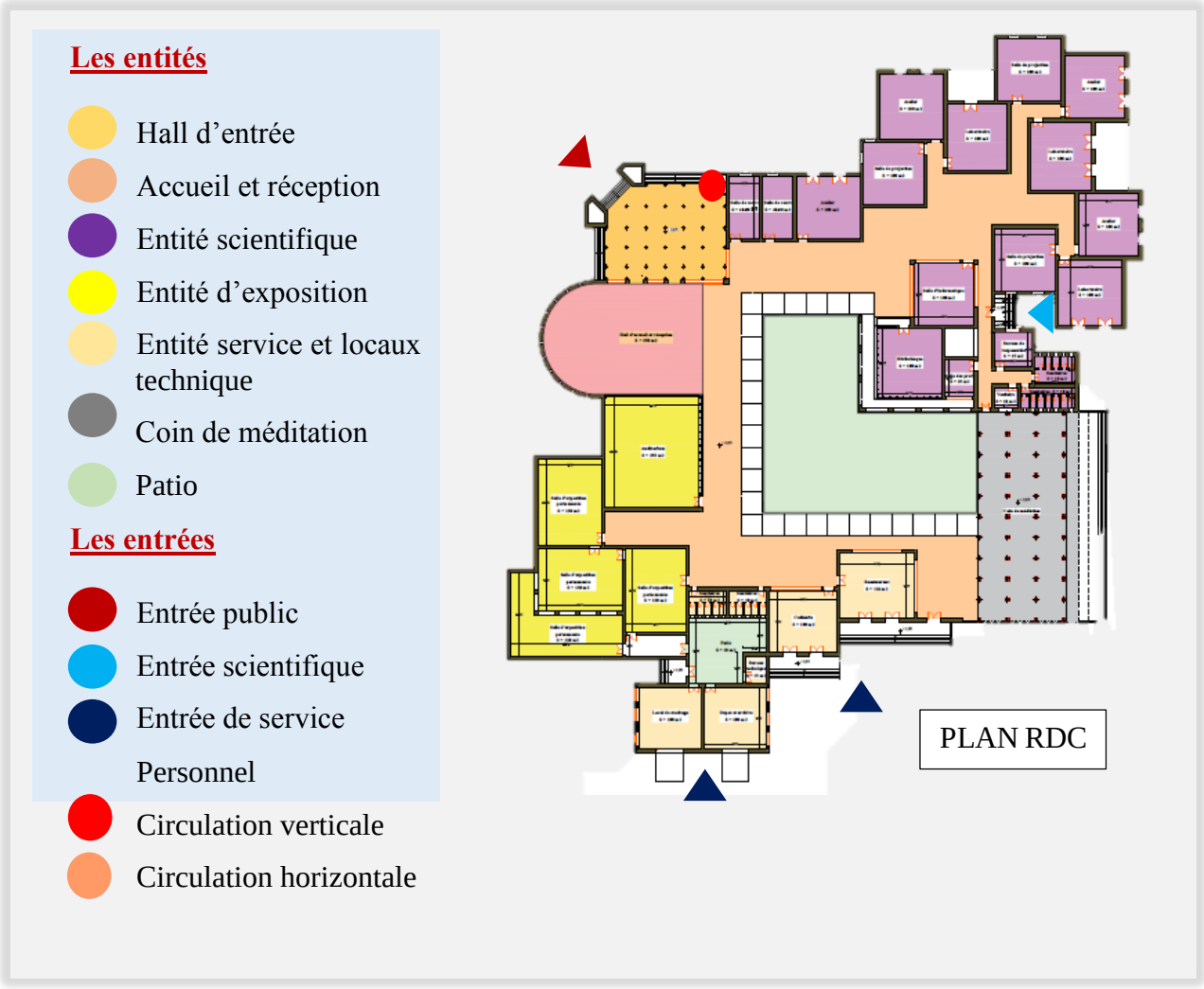


Figure. III- 56 : Plan RDC, (Source : Auteurs)

R+1 : se compose par l'administration et l'hébergement.

Les entités

- Entité administrative
- Entité d'hébergement
- Circulations verticale

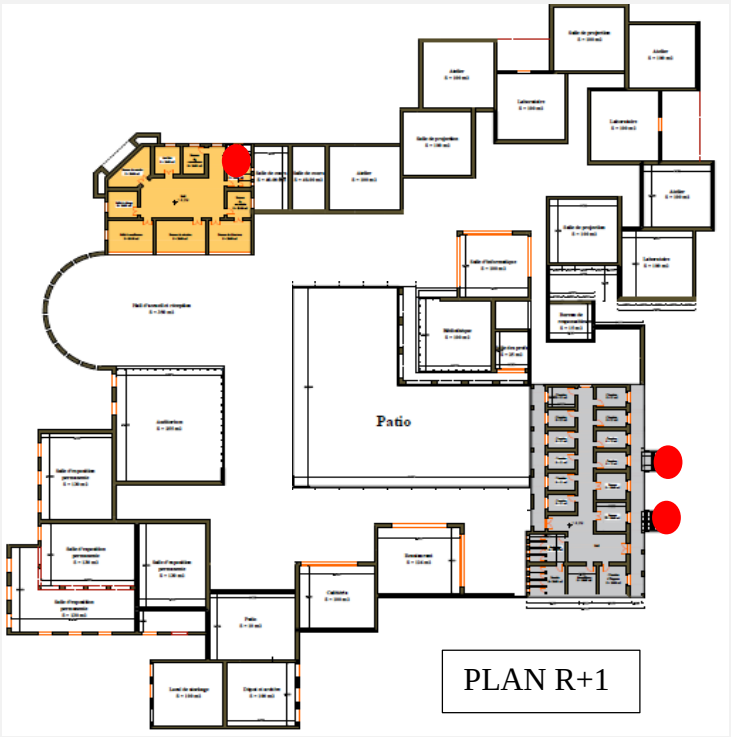


Figure. III- 57 : Plan R+1, (Source : Auteurs)

R+2 : se compose par l'hébergement.

Les entités

- Entité d'hébergement
- Circulation verticale

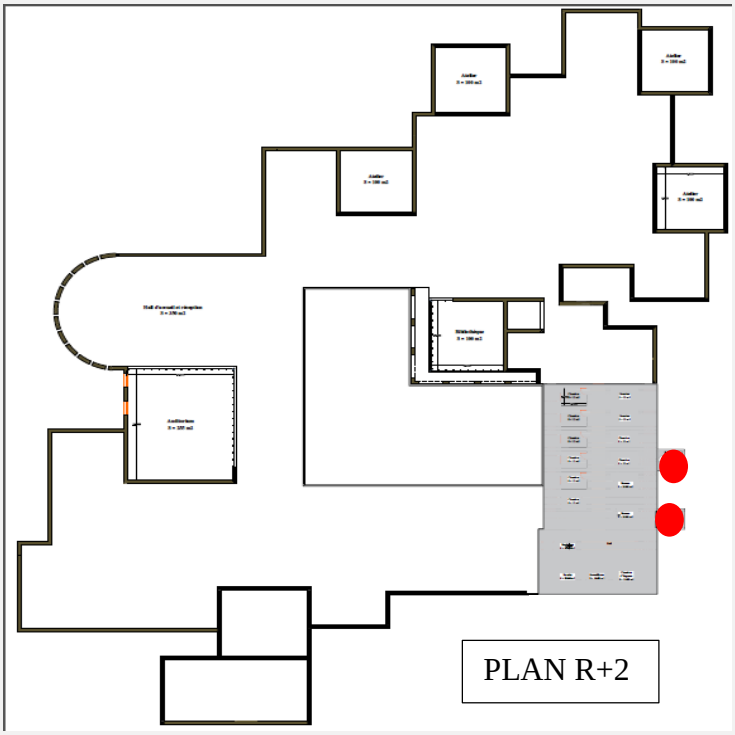


Figure. III- 58 : Plan R+2, (Source : Auteurs)

III.3.3 Façades

Dans le cadre de traitement des façades, on prendre en considération le contexte du site par l'inspiration de trois éléments permanents : le Ksar, la Zaouïa et les montagnes.

Donc le schéma ci-dessous représente les principes abordés ou appliqués dans la conception de façades de notre projet : [30]

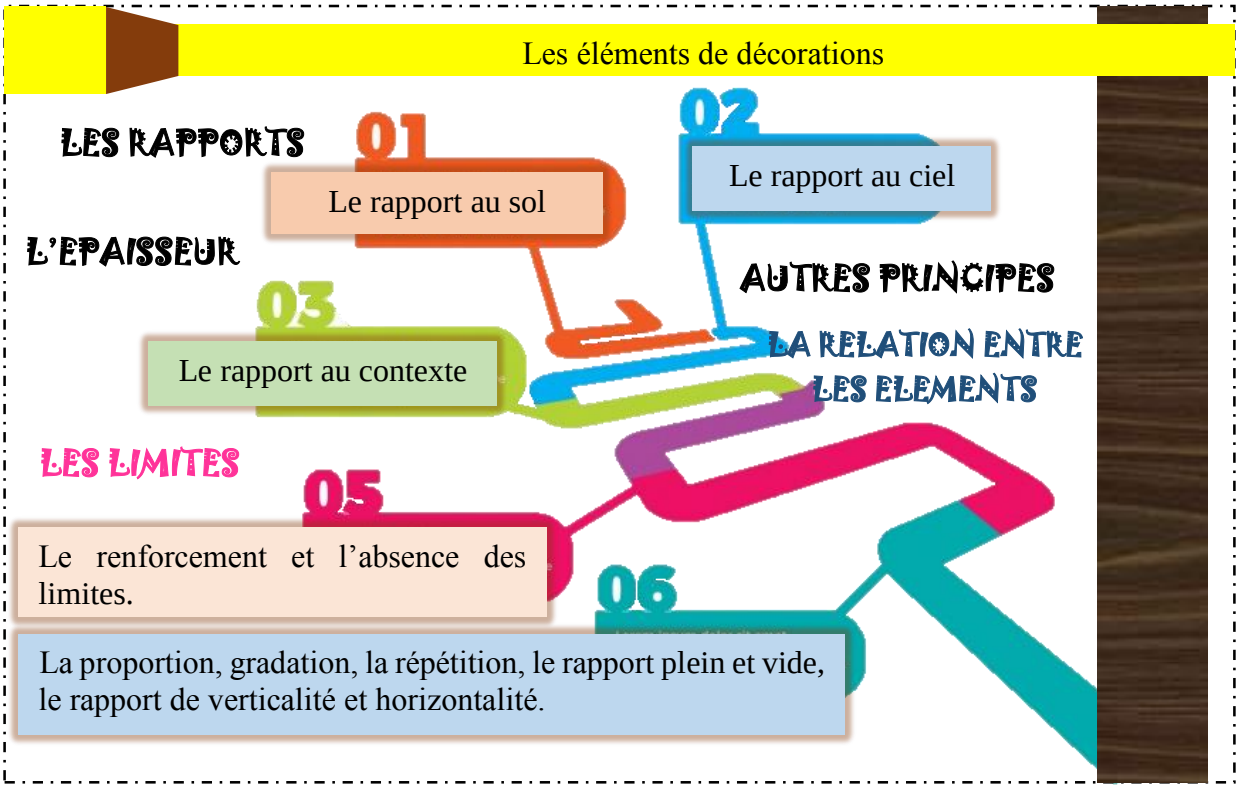


Figure. III- 59 : Les principes appliqués au projet, (Source : Auteurs)

III.3.3.1 Rapports :

On distingue trois types de rapports dans la conception des façades :

A Rapport au sol : horizontalité sur un seul socle.

B Rapport au ciel : le projet établie un rapport au ciel depuis l'extérieur comme depuis l'intérieur, le premier, par la disposition des volumes et leurs différents hauteurs emmène le visiteur et le regard dans une gradation des bâtiments, l'effet de jeu de volume juste pour faire un rappel aux montagnes, alors permet une vue dégagé vers l'horizontalité et le ciel. Et le deuxième, le projet est contenu dans le ciel, par l'intermédiaire de la notion de maison à patio pour faire un rappel à la maison traditionnel existée dans le Ksar et la notion du parcours.

C Rapport au contexte : le centre dans son esprit de la revalorisation du pisé dans laquelle elle a été conçue apparait dans son contexte par son aspect, sa couleur.

La légende : Rapport au sol Rapport au ciel

Figure. III- 60 : Vue d'une façade exprime les trois types de rapport, (Source : Auteurs)

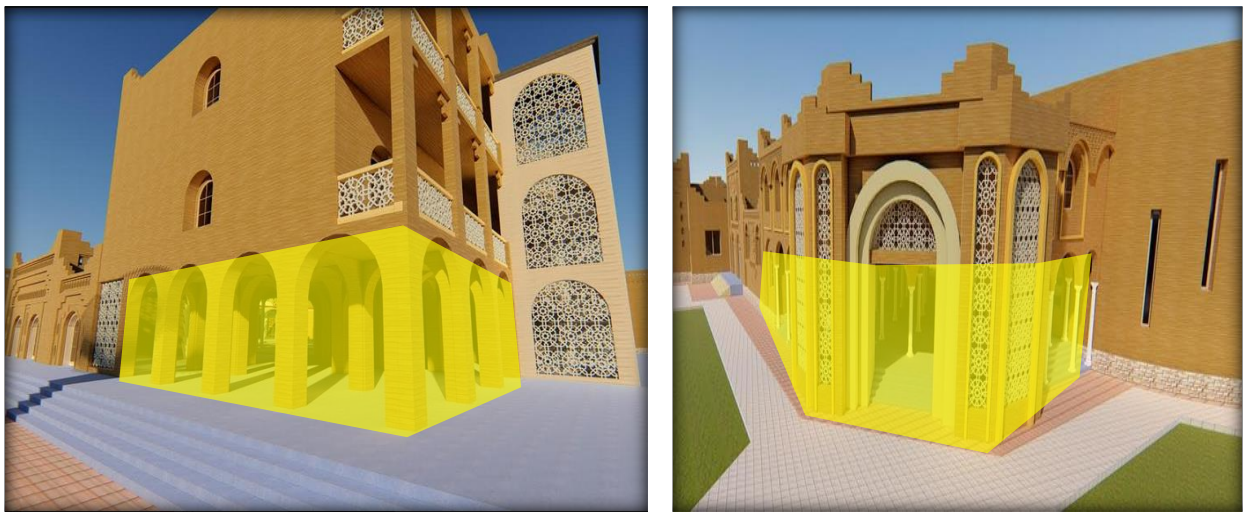
III.3.3.2 Limites des façades :

- La Figure 61 représente le renforcement des limites horizontales par un soubassement en pierre.

La légende : Renforcement des limites horizontales

Figure. III- 61 : Vue d'une façade représente le renforcement des limites horizontales, (Source : Auteurs)

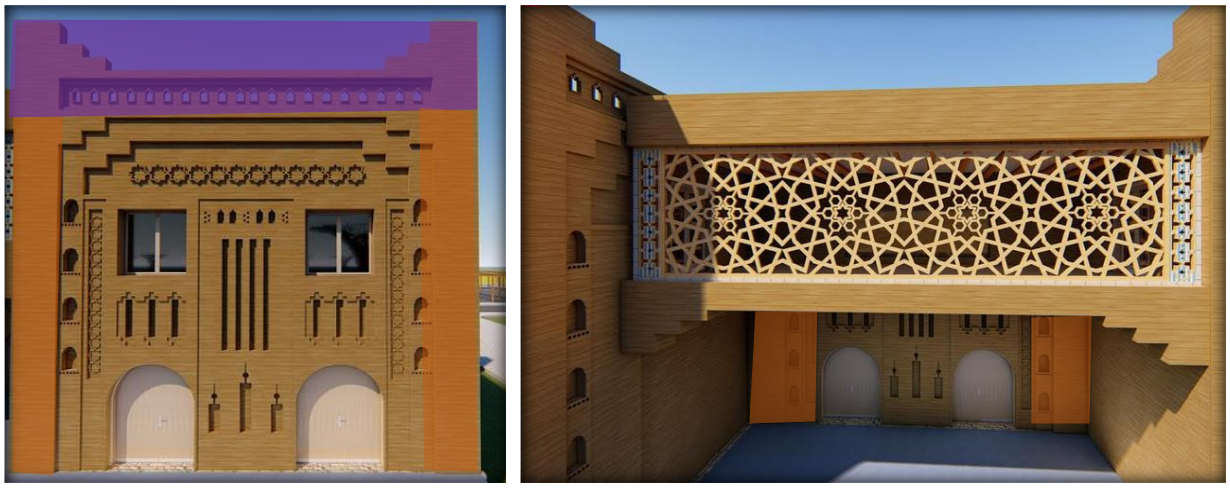
- La Figure 62 représentent l'absence des limites basses (le sur pilotis), l'un sous l'hébergement pour créer un coin de méditation et donner une certaine particularité, et l'autre sous l'administration.



La légende : L'absence des limites basses

Figure. III- 62 : Vue d'une façade représente l'absence des limites basses, (Source : Auteurs)

-Les deux Figure 63 et 64 représente le renforcement des limites hautes par les acrotères, et le renforcement des limites verticales par des éléments de décorations.



La légende : Renforcement des limites hautes Renforcement des limites verticales

Figure. III- 63 : Vue d'une façade représente le renforcement des limites hautes, (Source : Auteurs)

Figure. III- 64 : Vue d'une façade représente le renforcement les limites verticales, (Source : Auteurs)

III.3.3.3 Epaisseur des façades :

L'épaisseur de la façade embusquée par la notion d'inclusion et d'exclusion des éléments de décorations.

Figure. III- 65 : Vue d'une façade représente l'épaisseur des éléments de décorations, (Source : Auteurs)

III.3.3.4 Relation entre les éléments de la façade :

- La Figure 66 représente la proportion L/H, et le principe de gradation apparait dans les différentes hauteurs des espaces.
- Représente aussi le principe du série et alignement c'est-à-dire la répétition des éléments de décorations en verticalité ou en horizontalité.
- le rapport plein / vide : le plein actif et le vide passif pour des raisons liées au matériau pisé.

Figure. III- 66 : Vue d'une façade représente les deux principes l'un de série et alignement et l'autre d'horizontalité et verticalité, (Source : Auteurs)

III.3.3.5 Autres principes :

La figure 67 représente le principe de symétrie.

La légende : ——— Ligne de symétrie

Figure. III- 67 : Vue d'une façade représente la symétrie, (Source : Auteurs)

III.3.3.6 Ouvertures :

Le porche d'entrée : trois arcades en plein cintre percés par moucharabieh pour marquer l'entrée puisque elle est sur pilotis.

Les autres portes du projet inclus par des arcades en plein cintre, et pour les ouvertures inclus par des arcs ancéolés pour faire un rappel du Zaouia Tidjania à Ain Madhi.

Figure. III- 68 : Le porche d'entrée, (Source : Auteurs)

Figure. III- 69 : Vue d'une façade représente des portes et des fenêtres entourés par des arcs, (Source : Auteurs)

III.3.3.7 Eléments de décoration :

Le schéma ci-dessous représente les différents éléments de décorations utilisés dans notre projet, parmi ces éléments inspirés par le Ksar et La Zaouïa pour faire un petit rappel de ces deux éléments permanents [31].

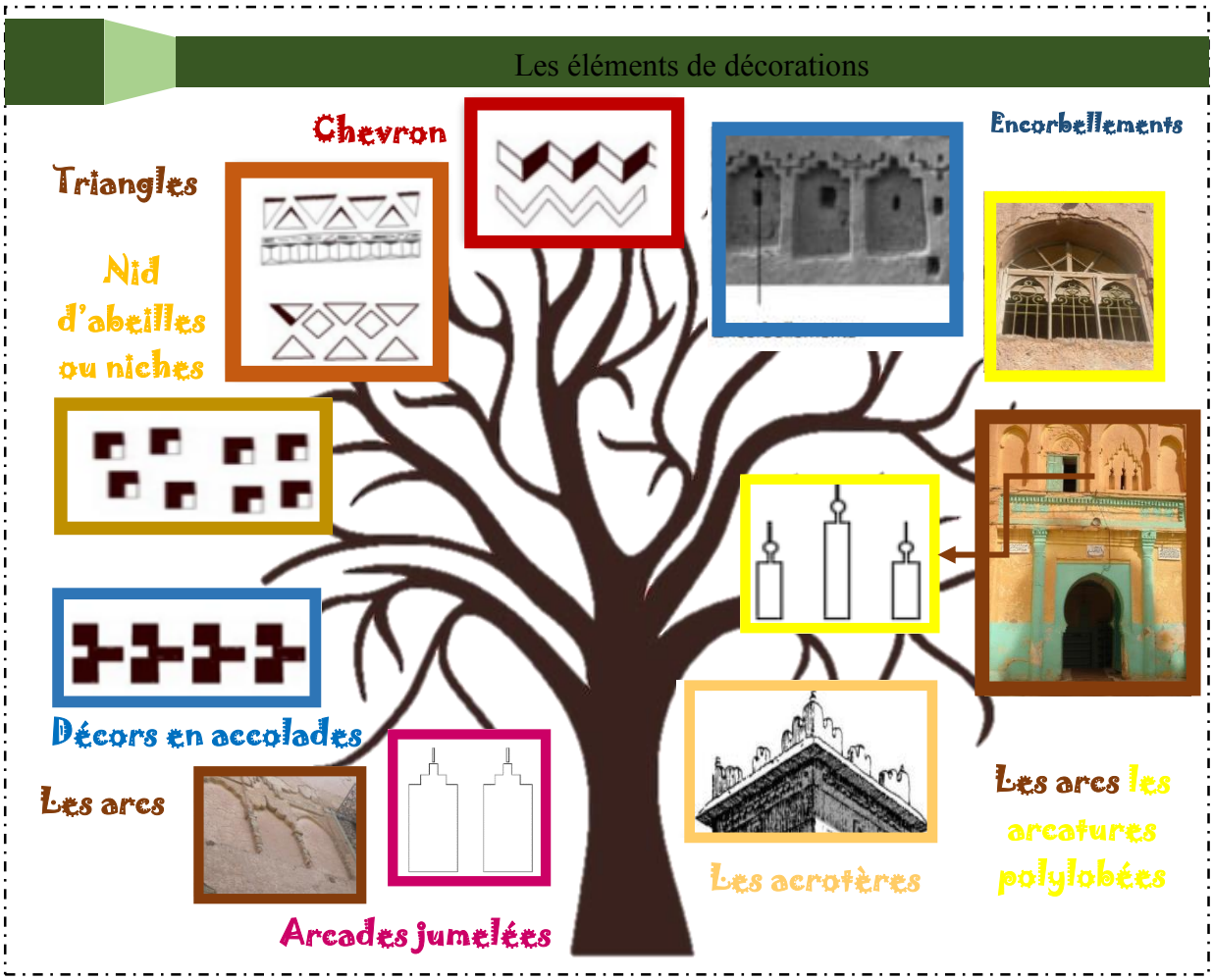


Figure. III- 70 : Schéma représente les différents types des éléments de décoration abordés au projet, (Source : Auteurs)

Figure. III- 71 : Façade représente les différents types de décoration, (Source : Auteurs)

III.3.3.8 D’autres vues des façades

Figure. III- 72 : Façade Nord, (Source : Auteurs)

Figure. III- 73 : Façade globale, (Source : Auteurs)

Figure. III- 74 : Façade Ouest, (Source : Auteurs)

Figure. III- 75 : Façade Est, (Source : Auteurs)

III.3.3.9 Vues intérieurs

Figure. III- 76 : Vue intérieur sur le patio centrale, (Source : Auteurs)

Figure. III- 77 : Vue intérieur sur le parcours, (Source : Auteurs)

Figure. III- 78 : Vue intérieur sur l'accueil, (Source : Auteurs)

Figure. III- 79 : Vue intérieur sur l'accueil, (Source : Auteurs)

Figure. III- 80 : Vue intérieur sur le patio, (Source : Auteurs)

Figure. III- 81 : Vue intérieur sur le parcours, (Source : Auteurs)

III.4 Détails constructifs

III.4.1 Construction sous le sol

III.4.1.1 Fondations

Le matériel utilisé pour les fondations en pisé et pour tous les murs inférieurs au niveau de la couche d'étanchéité doit consister en de la maçonnerie conforme aux exigences de la règlementation locale applicable pour la construction en pisé stabilisé à condition d'être protégé de l'humidité [32].

Les fondations utilisées dans le projet sont des semelles filantes, elles doivent être au moins aussi épaisses que le mur qu'elles soutiennent, et par ailleurs respecter les dimensions indiquées dans la Figure 82.

Type de soul-sol	Etat du sous-sol	Essai de terrain applicable	Largeur de la fondation	Epaisseur de la fondation
I roche	pas inférieur au grès, au calcaire ou à une craie ferme	exige au moins une pioche à opération mécanique pour l'extraction	égale à la largeur du mur	sans objet (S/O)
II gravier sable	 dense dense	exige une pioche pour l'extraction ; piquet en bois 50 mm x 50 mm difficile à enfoncer plus de 150 mm	égale à la largeur du mur	S/O
III argile argile sableuse	 dur dur	ne peut pas être moulue entre les doigts et exige une pioche ou un pelle mécanique pour l'extraction	400 mm	$\frac{F-M}{2}$ ou la largeur du mur, selon laquelle est la plus grande
IV argile argile sableuse	 ferme ferme	peut être moulue en appliquant une pression ferme avec les doigts et peut être extraite avec une pelle	500 mm	$\frac{F-M}{2}$ ou la largeur du mur, selon laquelle est la plus grande
	meuble meuble meuble	peut être extraite avec une pelle ; piquet en bois 50 mm x 50 mm facile à enfoncer	donc mieux vaut creuser plus profond jusqu'à un sous-sol plus ferme puis appliquer la largeur nécessaire pour ce type de terre	
VI limon argile (et argiles sablonneuses/limoneuses)	 mou mou	assez facile à mouler entre les doigts et facile à extraire	donc creuser plus profond jusqu'à un sous-sol plus ferme	
VII limon argile (et argiles sablonneuses/limoneuses)	 très mou très mou	échantillon naturel dans la saison des pluies exsude entre les doigts quand serré dans le poing	donc creuser plus profond jusqu'à un sous-sol plus ferme	

Figure. III- 82 : Tableau représente les dimensions des fondations selon le type de sol, (Source : Les structures en pisé, (SADCSTAN TC 1/SC 5/CD SAZS 724), PDF)

NOTE 1 F est la largeur de la fondation ; M est la largeur du mur.
NTE 2 Une fondation de conception d'ingénierie peut être utilisée.

Principe de la mise en œuvre du projet

Le sol est excavé de la fondation de la tranchée, il est tamisé et ensuite mesuré en même temps sur la tranchée. Le sable doit toujours être ajouté. Habituellement, le niveau supérieur de la fondation se situe au niveau du sol d'origine. La section de la fondation devrait normalement être carrée. Il est essentiel que ce ne soit pas plus large que plus profond, car la charge du mur créera une charge pointue et la fondation pourra le supporter.

Figure. III- 83 : Semelle filante d'un mur en pisé, (Source : Source : rammed earth construction, a comprehensive study, PDF)

III.4.1.2 Sols

Les sols en pisé du projet doivent être protégés contre les remontées capillaires pour que l'humidité ne pénètre pas dans le bâtiment (voir Figure 84) [32].

Si les sols seront lavés, la surface du sol doit être rendue étanche, et le point de jonction entre sol et murs doit être protégé par une plinthe de hauteur adéquate.

Les niveaux des sols doivent être au moins 150 mm au-dessus de la surface environnante, et 300 mm dans des zones de pluviométrie forte (voir Figure 84) [32].

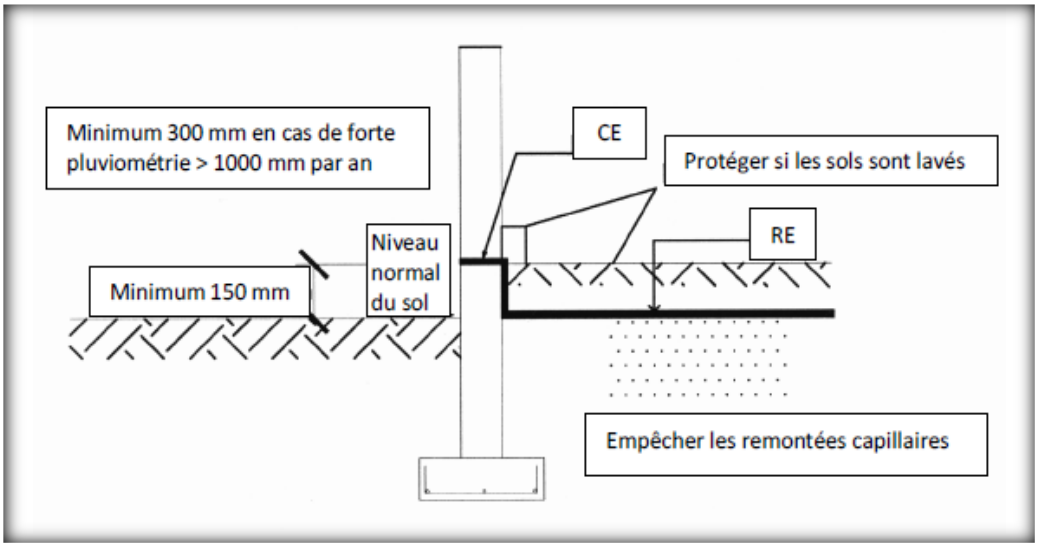


Figure. III- 84 : Protection contre l'humidité pour les sols, (Source : Les structures en pisé, (SADCSTAN TC 1/SC 5/CD SAZS 724), PDF)

III.4.2 Construction hors le sol

III.4.2.1 Soubassement

Le soubassement du projet est réalisé en maçonnerie de gros moellons ou de galets et de chaux, ce dispositif, d'une hauteur variant entre 50 et 80 cm, permet de renforcer la base des murs contre les rejaillissements d'eau et les remontées capillaires.

Figure. III- 85 : Soubassement du projet, (Source : Auteurs)

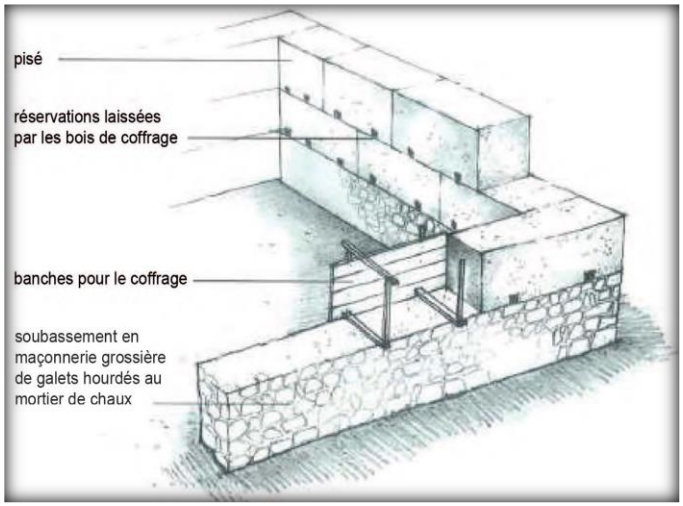


Figure. III- 86 : Protection contre les remontées capillaires dans les murs, (Source : mur-pisé, PDF)

III.4.2.2 Murs

III.4.2.2.1 Protection des murs

Les murs en pisé du projet doivent être construits de façon à empêcher l'humidité dans le sol de remonter dans le bâtiment (voir Figure 87).

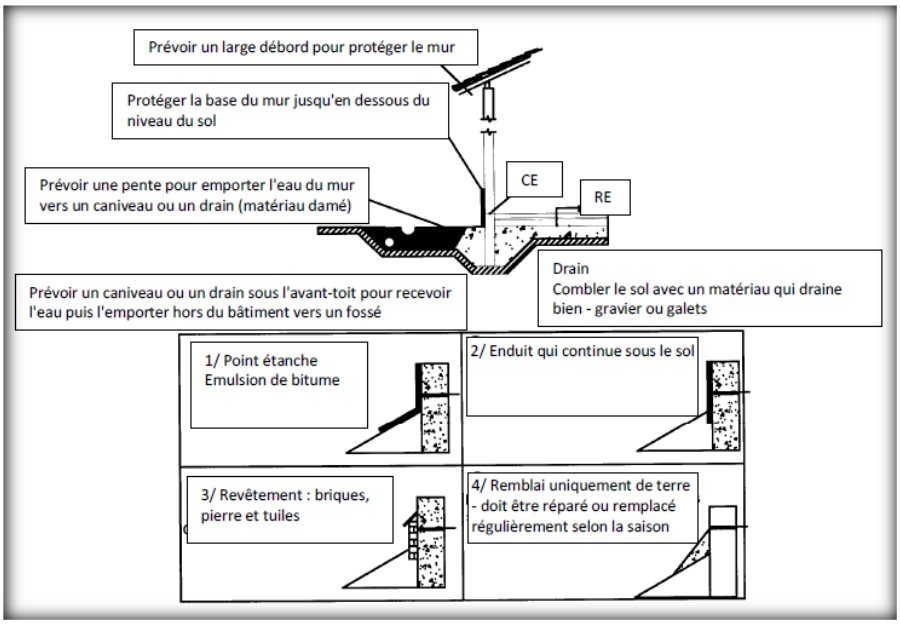


Figure. III- 87 : Protection contre les remontées capillaires dans les murs, Source : Les structures en pisé, (SADCSTAN TC 1/SC 5/CD SAZS 724), PDF

III.4.2.2.2 Réalisation des murs

En sus de la méthode moderne, le projet doit réaliser avec la technique du pisé préfabriqué. Nicolas Meunier, artisan piseur, a développé la technique du pisé préfabriqué qui lui permet de le construire en atelier puis de transporter les blocs afin de les monter une fois arrivé sur le chantier. Dans notre cas, le projet doit réaliser dans le site lui-même, en plus, après sa réalisation il sera joué le rôle de réalisation et la fabrication des blocs en pisé [32].

Cette technique permet de s'affranchir des aléas climatiques qui font partie des impondérables du chantier. Elle a ensuite été reprise et s'est peu à peu développée.

Sur les quatre séries de photos suivantes, on montre du pisé préfabriqué depuis sa fabrication jusqu'à son acheminement sur chantier et sa mise en œuvre.

Figure. III- 88 : le cheminement du pisé depuis sa fabrication jusqu'à sa mise en œuvre, Source : Travail de fin d'étude sur le Construire en terre crue réalisé par Jehanne Paulus, Université de Liège en 2014/2015, PDF

III.4.2.2.3 Stabilisation des murs

Pour stabiliser les murs en pisé, utiliser des éléments dans la forme de L, T, U, X, Y et Z. En raison de leurs angles, ils montrent une meilleure stabilité contre les forces latérales.

Dans notre cas, on doit utiliser la forme L et I parce qu'elles sont plus pratique dans l'existence des décrochements. En plus, on doit utiliser la banche de forme courbé dans le cas d'entité d'accueil et réception (Voir la Figure 89 et la Figure 90).

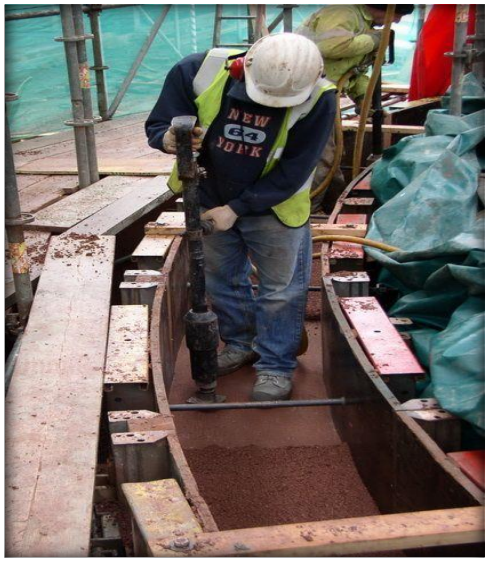


Figure. III- 89 : les différents types des banches de pisé, (Source : www.pinterest.co.uk)

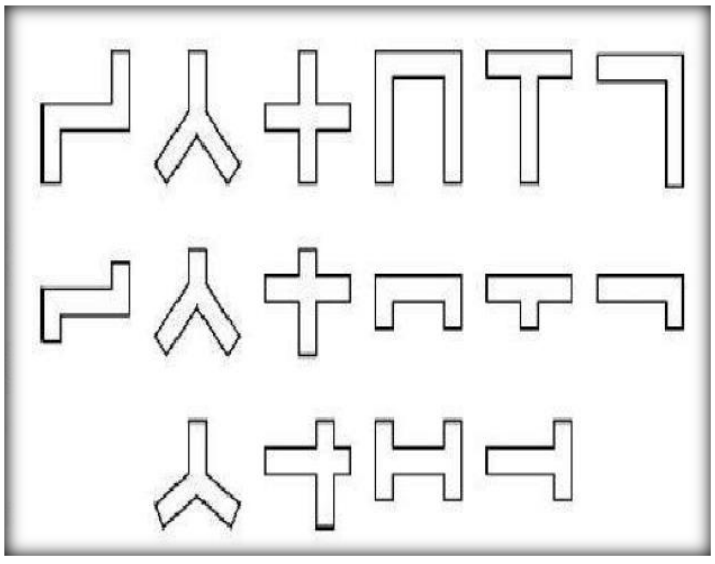


Figure. III- 90 : les différents types des banches de pisé, (Source : rammed earth construction, a comprehensive study, PDF)

Figure. III- 91 : Mur courbé d'accueil et réception du projet, (Source : Auteurs)

Figure. III- 92 : Mur de degrés 90° du projet, (Source : Auteurs)

A Stabilisation dans les coins (angles dans les murs)

Pour un coin de 90° dans un mur en pisé existé dans notre projet, nous devons faire un coffrage séparé pour faire les angles, ce qui signifie que les angles doivent être construits comme un seul élément. Et pour assurer la stabilité de ces coins, nous devons laisser de l'espace à une tige verticale qui est fixée à la fondation et à la poutre au-dessus et qui fait partie du renforcement [33].

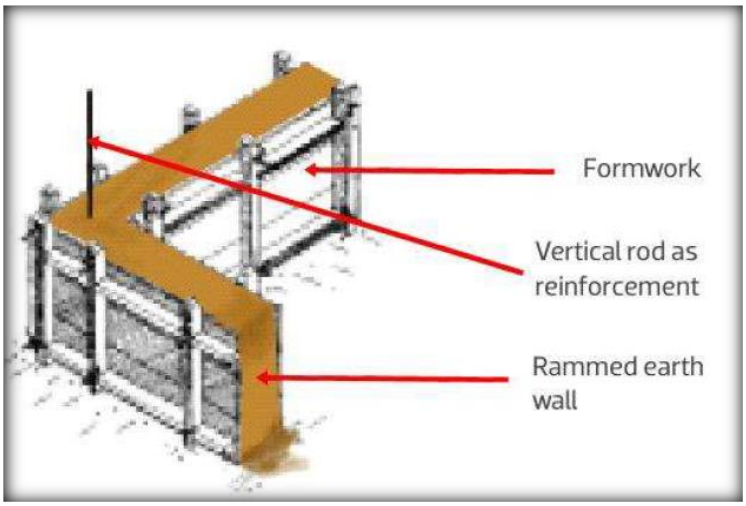


Figure. III- 93 : La stabilisation des angles d'un mur en pisé, (Source : rammed earth construction, a comprehensive study, PDF)

B Renforcement intérieurs

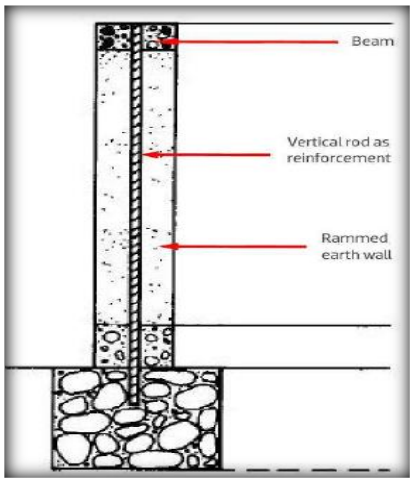


Figure. III- 78 : La stabilisation des angles d'un mur en pisé, (Source : Source : rammed earth construction, a comprehensive study, PDF)

Le renforcement intérieur c'est une méthode de stabilisation des murs en pisé contre les forces horizontales en utilisant des routes verticales de bambou, de bois ou d'acier dans le puits. L'élément doit être fixé à la fondation ci-dessous et à la poutre annulaire ci-dessus. Les joints entre les éléments de pisé sont des joints de rupture prédéfinis qui ne peuvent pas se fissurer lors d'un séisme et permettre un mouvement indépendant de chaque élément. L'énergie cinétique du choc sismique sera absorbée par déformation, mais l'élément étant fixé en haut et en bas ne tombera pas. Après le tremblement de terre, les joints ouverts peuvent facilement se refermer avec la terre [33].

C Joints

Les murs en pisé du projet doivent être construits de façon à permettre à chaque partie du mur d'être liée au reste du mur grâce à des joints qui sont décalés d'au moins la largeur du mur [32].

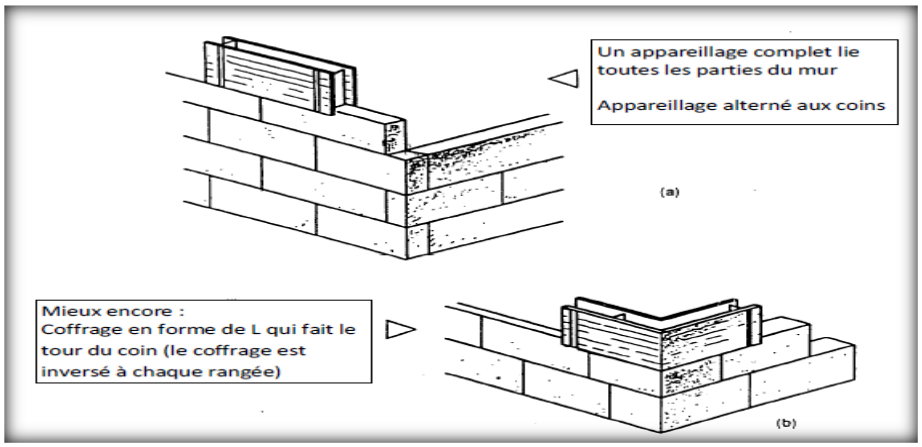


Figure. III- 94 : L'appareillage du mur en pisé utilisé dans le projet, (Source : Les structures en pisé, (SADCSTAN TC 1/SC 5/CD SAZS 724), PDF)

Lorsqu'un mur est constitué de plus d'un panneau, un renfoncement est ménagé dans l'extrémité de la première paroi. La seconde paroi est ensuite moulée pour bloquer la paroi en vue d'une stabilité latérale. Cette jonction est appelée joint à rainure et languette. Cependant, si les éléments sont bien reliés à une poutre annulaire au-dessus et à un socle ci-dessous, le joint à rainure et languette n'est pas nécessaire [33].

Figure. III- 95 : Renforcement d'un mur pisé, (Source : rammed earth construction, a comprehensive study, PDF)

B Stabilisation ouvertures et linteaux

Le nombre, la taille ou la position des ouvertures ou des recoins dans un mur en pisé ne doivent pas être de nature à menacer la stabilité des murs. En plus, Les linteaux au-dessus des ouvertures et des renfoncements dans les murs en pisé doivent être suffisamment résistants pour pouvoir porter la structure supérieure. Ce pour cela, dans notre projet, les appuis des linteaux doivent mesurer pas moins de 200 mm au-delà de l'ouverture (voir Figure 96) [32].

Dans le cas où les ouvertures sont possibles sans linteaux lorsque les ouvertures montent jusqu'à la poutre sablière du toit (sous réserve que la sablière peut supporter toute charge qui est placée sur elle), ou lorsqu'on utilise une ouverture en forme d'arc.

Les ouvertures de tout mur ne doivent pas excéder la moitié de la longueur du mur, et lorsque la distance entre les ouvertures est moins que leur largeur, les linteaux doivent être continus sur toute la série d'ouvertures (voir Figure 96) [32].

La distance minimale entre ouvertures avec des linteaux séparés doit être de 600 mm (Voir Figure 96).

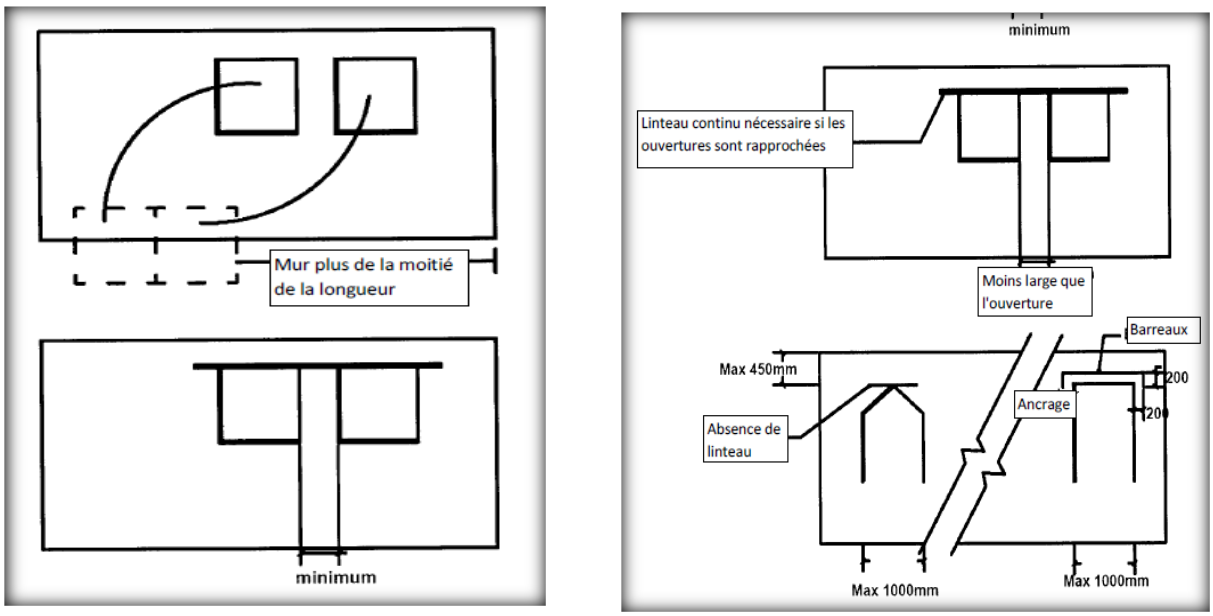


Figure. III- 96 : Stabilisation ouverture et linteaux, (Source : Les structures en pisé, (SADCSTAN TC 1/SC 5/CD SAZS 724), PDF)

Un linteau n'est pas nécessaire si :

a) il n'y a pas de mur au-dessus de l'ouverture (l'ouverture atteint la sablière).

b) l'ouverture est fermée par un arc (plein cintre, surbaissé ou pointue).

c) avec un minimum de 450 mm de mur au-dessus du point le plus haut de l'ouverture.

d) les ouvertures ne dépassent pas 1 000 mm de largeur.

C Percement de L'ouverture [33]

Le percement peut se faire par exemple par demi-face, en deux étapes identiques. Après avoir marqué l'emplacement de l'ouverture, le mur est creusé sur la moitié de son épaisseur seulement, puis les jambages et le linteau sont installés (bois, maçonnerie appareillée ou banchée).

Le lindage doit être solide et bien ancré dans le pisé qui résiste mal aux battements de portes et fenêtres. Une fois que la première face est terminée et parfaitement sèche, la deuxième peut être percée selon le même principe. Les reprises du mur autours de l'ouverture peuvent être masqués par un bandeau d'enduit, réalisé avec la terre récupérer lors du percement.

Réalisation

Le percement d'une ouverture dans un pan de pisé modifie la descente des charges sur le mur et crée un point de fragilité propice aux fissurations. Il convient de limiter la largeur des ouvertures à 1/3 de la longueur du mur. Le positionnement de l'ouverture est également un facteur important à considérer : on place les ouvertures loin des angles de mur, et jamais sous un appui de charpente. L'option la plus simple pour s'affranchir des risques de fissuration est de percer le mur sur toute sa hauteur pour y intégrer portes, fenêtres et panneaux de remplissage en bois. Il faut toutefois s'assurer que ce découpage de la structure n'entrave pas la stabilité des murs.

C Arcs [33]

Si la portée excède 1 000 mm, dimensionner les linteaux et les arcs.

On peut prévoir des ouvertures en dehors des limites, si l'on peut démontrer que le mur reste stable. S'assurer que les linteaux ont suffisamment de dépassement à chaque extrémité (200 mm exigés).

Figure. III- 97 : Percement d'arcs, (Source : Auteurs)

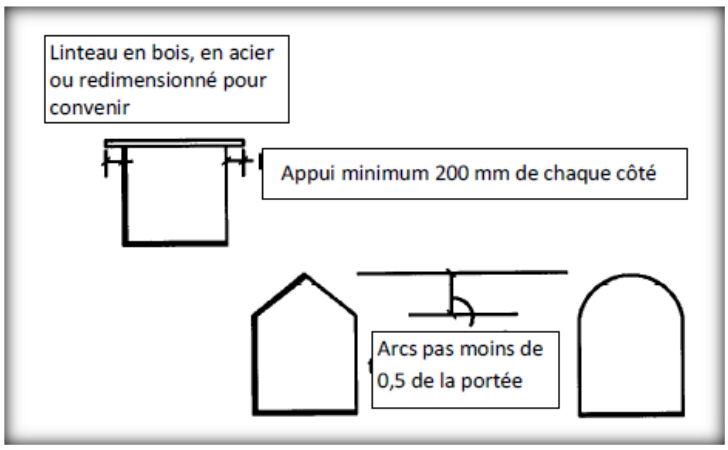


Figure. III- 98 : Percements d'arcs, (Source : Les structures en pisé, (SADCSTAN TC 1/SC 5/CD SAZS 724), PDF)

III.4.2.3 Planchers

Le projet doit réaliser avec deux types de planchers : le premier, plancher traditionnel dans l'extérieur des labos.

Le deuxième, Concernant les grands portés existent dans notre projet, on doit réaliser plancher en bois avec des poutres droites en bois lamellé-collé parce que l'intégration de nouveaux planchers en bois est courante et tout à fait adaptée aux structures en pisé.

A Plancher traditionnel

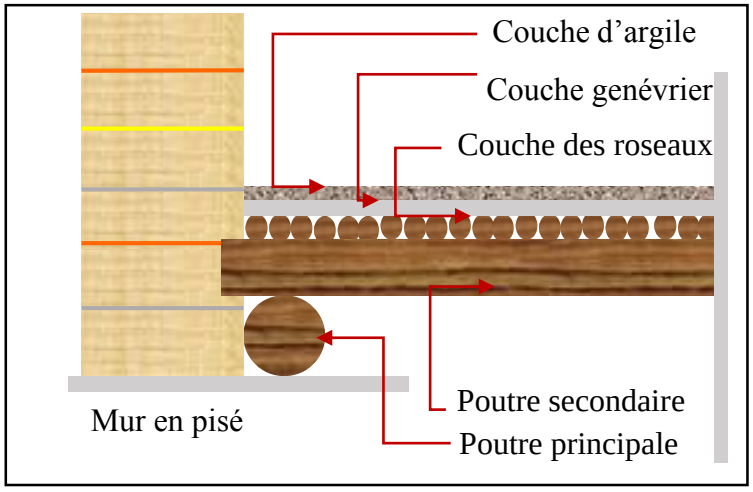


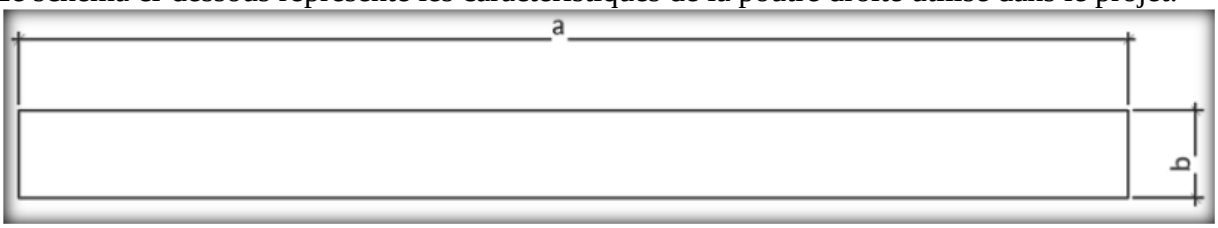
Figure. III- 99 : Plancher traditionnel appliqué au projet, (Source : Auteurs)

Figure. III- 100 : Vue sur le plancher traditionnel, (Source : Auteurs)

B Lamellé-collé ou en bois lamellé est un procédé de fabrication consistant à coller des lamelles de bois, avec les fibres dans le même sens les unes sur les autres. Son intérêt est, d'une part la fabrication des pièces de grande dimension ou de forme particulière qui n'auraient pu être obtenues par utilisation du même matériau sans transformation [34].

C Poutre droite en lamellé-collé

Le schéma ci-dessous représente les caractéristiques de la poutre droite utilisé dans le projet.



		Charges permanentes : 45 daN/m² + Charge de neige : 35 daN/m²			
Portée (m)	a	20,00	25,00	30,00	35,00
Hauteur (cm)	b	107,6	134,6	157,1	179,6
Epaisseur		11,5	11,5	13,6	16,0
Volume		2,48	3,87	6,41	10,06

Figure. III- 101 : Les caractéristiques de la poutre droite en lamellé-collé, (Source : Structure bois lamellé-collé, PDF)

D Assemblage

Le schéma ci-dessous représente les types d'assemblage bois avec bois.

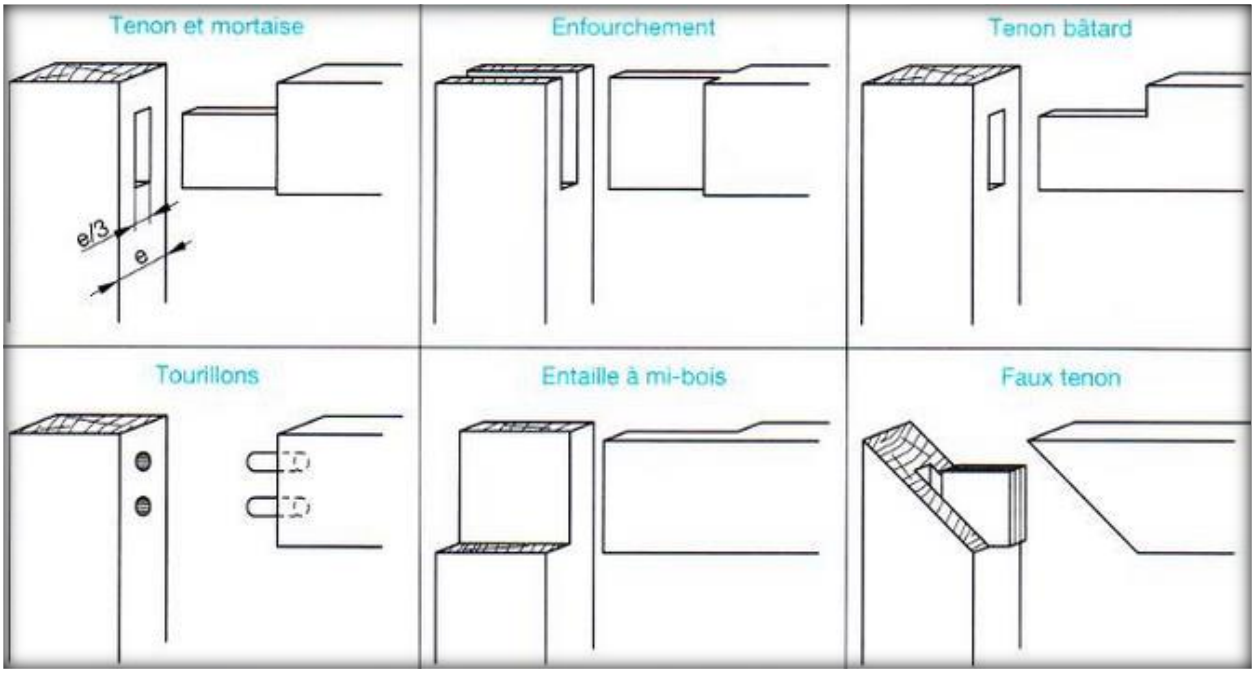


Figure. III- 102 : Assemblage bois avec bois, (Source : Structure bois lamellé-collé, PDF)

III.4.2.4 Autres matériaux de construction

On utilise la pierre dans les arcades, les colonnes intérieurs, bois lamellé collé dans les voutes.

Figure. III- 103 : Autres matériaux de construction utilisés dans le projet, (Source : Auteurs)

III.4.2.5 Enduit terre [35]

Les enduits intérieurs en terre Ils jouent un rôle à la fois décoratif et contribuent au confort hygrothermique du projet. Sur des épaisseurs importantes et mélangé à des fibres (chanvre, paille...), ils peuvent-être un complément d'isolation intéressant pour des maisons anciennes aux murs épais en pierre ou en terre.

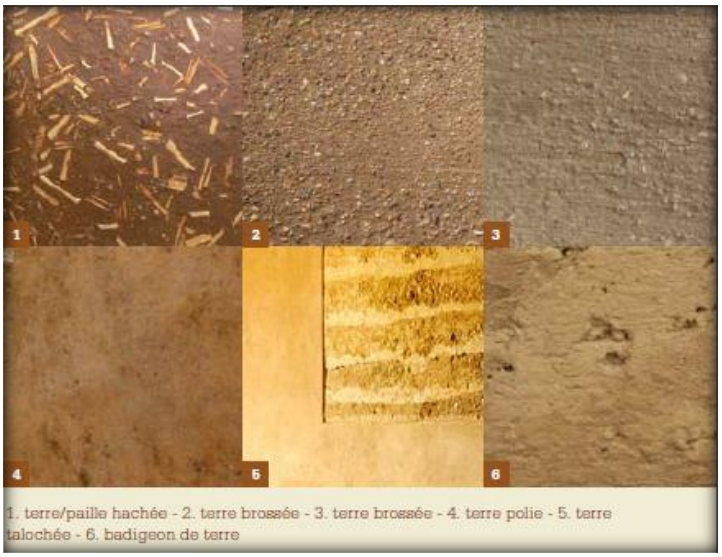


Figure. III- 104 : Les types d'enduit terre, (Source : Rénover et construire en pisé, PDF)

A Avantages

Les enduits en terre :

• respirent.
• absorbent l'humidité de l'air.
• adhèrent parfaitement au pisé
• résistent au feu.
• sont simples et rapides à mettre en œuvre.
• peuvent être indéfiniment retravaillés en les remouillant.
• sont faciles à réparer.
• ne renferment pas de substance polluante
• sont manipulables à main nue
• sont faciles à travailler et modeler
• ne décolorent pas dans le temps
• sont économiques.

B Finitions

La terre permet une infinité de finitions de surface selon qu'elle est modelée à la main, talochée, lissée, travaillée à l'éponge ou grattée. L'ajout de fibres ou de sables colorés permet également de jouer sur sa texture.

C Provenance

Des terres Les enduits en terre prêts à l'emploi sont de plus en plus courants sur le marché des matériaux. Si certaines terres sont peu transformées, il faut savoir qu'elles font souvent des centaines de kilomètres avant de parvenir sur les chantiers, et que certaines terres sont préparées en mélangeant des argiles, des sables de carrières différentes et des adjuvants pour éviter les

phénomènes de farinage en surface. Pour des raisons de couleur, de texture, mais également dans une logique écologique, une terre locale est tout à fait appropriée à la réalisation d'enduits.

D Enduits terre et pièces humides

Les enduits en terre ne sont pas incompatibles avec les pièces humides (salle de bain, cuisine, buanderie...) car ils régulent l'hygrométrie et contribuent de manière significative au confort thermique. Seuls les murs exposés aux projections (douche, proximité des éviers) devront recevoir des parements étanches. Les autres murs peuvent être enduits en terre ou laissés en matériau apparent : pisé.

E Mise en œuvre d'un enduit en terre

Un enduit doit à la fois être esthétique, perméable à la vapeur d'eau et s'accrocher au support, ce qui nécessite le plus souvent plusieurs couches, remplissant chacune un rôle particulier : accroche, forme, finition. Les mortiers doivent avoir une bonne perméabilité à la vapeur d'eau et avoir une résistance la plus proche possible du support sur lequel ils sont appliqués (dosage progressif dans le cas d'une stabilisation).

Figure. III- 105 : La mise en œuvre d'un enduit en terre, (Source : Rénover et construire en pisé, PDF)

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, en première partie, nous avons évoqué l'analyse de site et ses caractéristiques. Dans la deuxième partie, nous avons extrait le programme quantitatif et qualitatif du projet.

Dans la troisième partie, la revalorisation du pisé dans la région d'Ain Madhi par la conception d'un centre de formation d'architecture en terre à travers des principes architecturaux appliqués soit dans l'idée du projet, ou soit dans la conception des façades par l'inspiration du contexte par des éléments permanents tels que : la zaouïa, l'Oued, le Ksar… La revalorisation de cet éco-matériau à travers ce projet est une approche très intéressante pour la mise en valeur du patrimoine architectural afin de donner à la région d'Ain Madhi son identité architecturale et son historique.

Pour terminer à la fin par le détail constructif du matériau, pour comprendre bien le côté technique ou la structure du pisé soit dans ce projet ou d'une vue générale, et redécouverte les aspects de ce matériau.

IV.1 Introduction

Le patrimoine en pisé exploite intelligemment les ressources physiques et climatiques de son environnement basées sur l'économie de moyens.

Cette architecture faite de matériaux peu transformés est un témoignage de solidarité sociale et de développement local durable, Après avoir été négligé, le pisé redevient une alternative crédible pour la construction neuve. Les précurseurs de ce renouveau de la terre nous montrent qu'il est possible de concevoir une architecture contemporaine avec cette technique séculaire.

Le pisé est particulièrement apprécié pour ses valeurs esthétiques, et pour la réponse pertinente qu'il apporte aux questions environnementales. Sa forte inertie et sa capacité de régulation de l'humidité lui confèrent des propriétés de confort très recherchées et notamment sa durabilité.

Ce matériau d'hier est du futur aujourd'hui, il présente une grande flexibilité d'usage et d'aspects, les vestiges des grandes civilisations anciennes sont présents pour nous le prouver. Cependant, le plus grand inconvénient du matériau terre est sa sensibilité à l'eau. Quand on parle d'une construction en terre, ce problème est tout de suite posé. Le cas du pisé n'est pas une exception de ce constat.

La présence de l'eau dans la structure du bâtiment présente une pathologie à laquelle il faudra faire très attention, car elle est le premier facteur qui nuit à la durabilité des ouvrages en terre.

À part les avantages communs du matériau abordés précédemment, le pisé, grâce à sa grande épaisseur, nous offre une grande inertie thermique et une régulation de l'humidité intérieure de la maison, il permet une nette diminution de l'impact tant financer qu'environnemental de la construction grâce aux économies d'énergie.

A cet égard, nous allons faire dans ce chapitre une sorte de revue bibliographique à double vision comme ci-suit :

- En premier lieu des essais actuels concernant la durabilité du matériau terre en général et le pisé en particulier seront présentés. Par la suite nous exposons les différentes caractéristiques, les manips et les différents essais d'identifications à savoir, les procédés de stabilisation du pisé, et finalement quelques essais de labos et in-situ dans une perspective d'une approche scientifique sur ce matériau.
- En deuxième lieu nous abordons le confort thermique des bâtiments en pisé. Notamment la performance thermique qui est considérée très importante car une bonne performance thermique de l'enveloppe est bien recherchée et exigée dans le développement durable actuel ensuite une bibliographie des résultats de ces recherches sur le confort d'habitation du pisé est aussi intéressante pour contribuer au panorama des caractéristiques du pisé.

IV.2 Durabilité des constructions en terre, témoignage de l'histoire

Nous pouvons présenter ici un célèbre exemple qui est le cas de la Grande Muraille de Chine, cet ouvrage a été construit il y a 2000 ans avec du pisé, des pierres, des briques de terre cuite, du bois, ... selon le principe d'utilisation des matériaux locaux.

Il faut savoir que la durabilité des constructions en pisé est conditionnée par une bonne mise en œuvre et des règles très strictes qui demandent un savoir-faire propre. Mal conçues, les constructions peuvent être l'objet de graves désordres, qu'on peut localiser :

- 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, etc. [36] [37] [38]

Figure. IV- 1 : Partie de la grande muraille de Chine, Source : Google-image.com

Les principes constructifs indiqués dans la figure suivante 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 [39] [40].

Figure. IV- 2 : Partie de la tour de la grande muraille de Chine, Source : Google-image.com

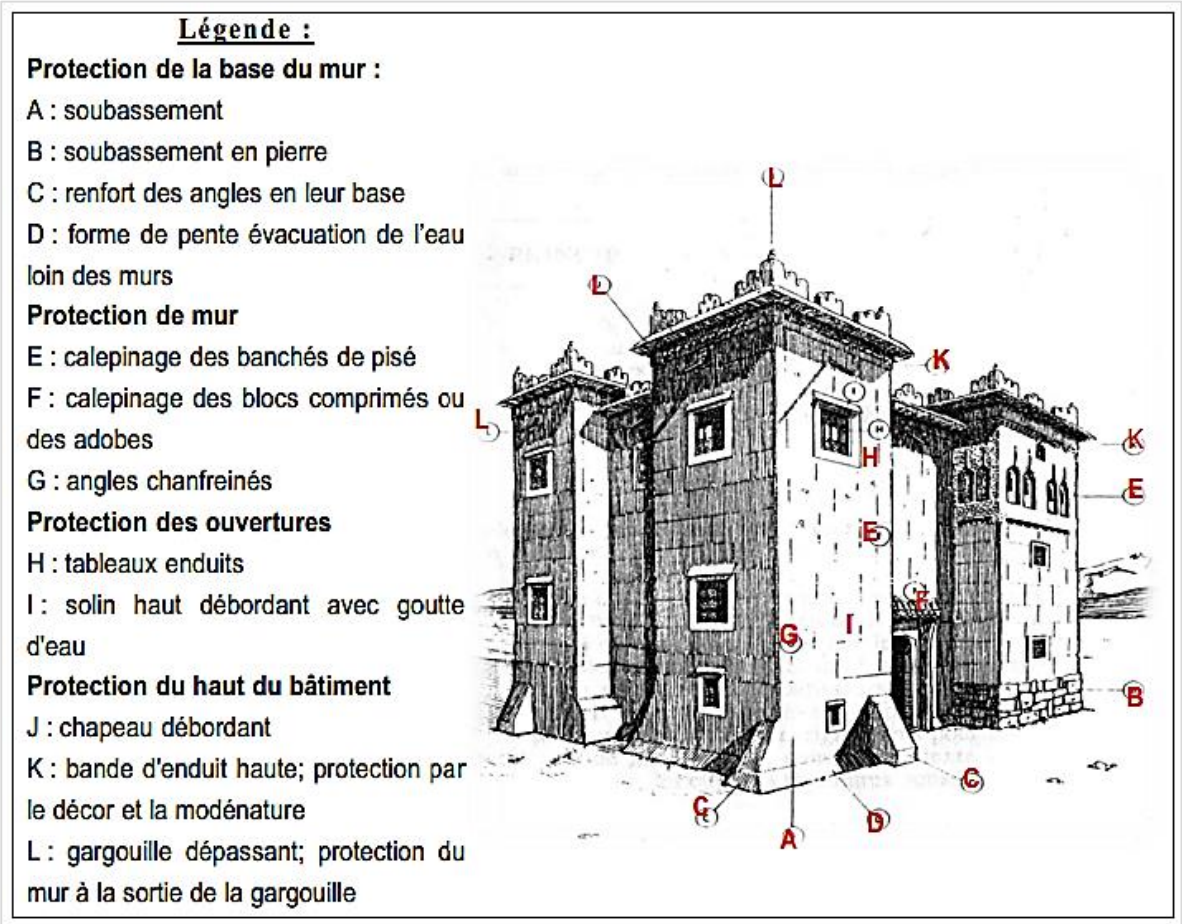


Figure. IV- 3 : Un schéma d'une bonne conception architecturale d'un bâtiment en terre, Source : CRAterre

IV.3 Constituants et composition de la terre à pisé

La terre à bâtir provient de la désagrégation et de l'altération de la roche mère et des matières organiques à travers le temps. On ne construit pas avec n'importe quelle terre. La terre à bâtir est prélevée sous la couche arable, entre 5 cm et 1 m sous le niveau du sol selon les cas. Une présence de matière organique trop importante pourrait contrarier la cohésion du matériau [41] [42].

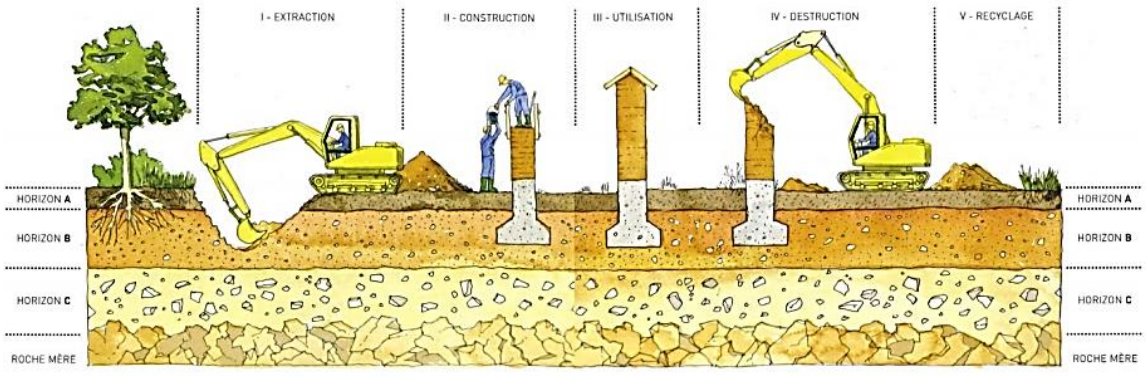


Figure. IV- 4 : La terre à bâtir, un matériau recyclable, Source : Anger et Fontaine, 2009 : p100-101

Lors de l'extraction de la terre, nous vous proposons de suivre les instructions citées ci-dessous :

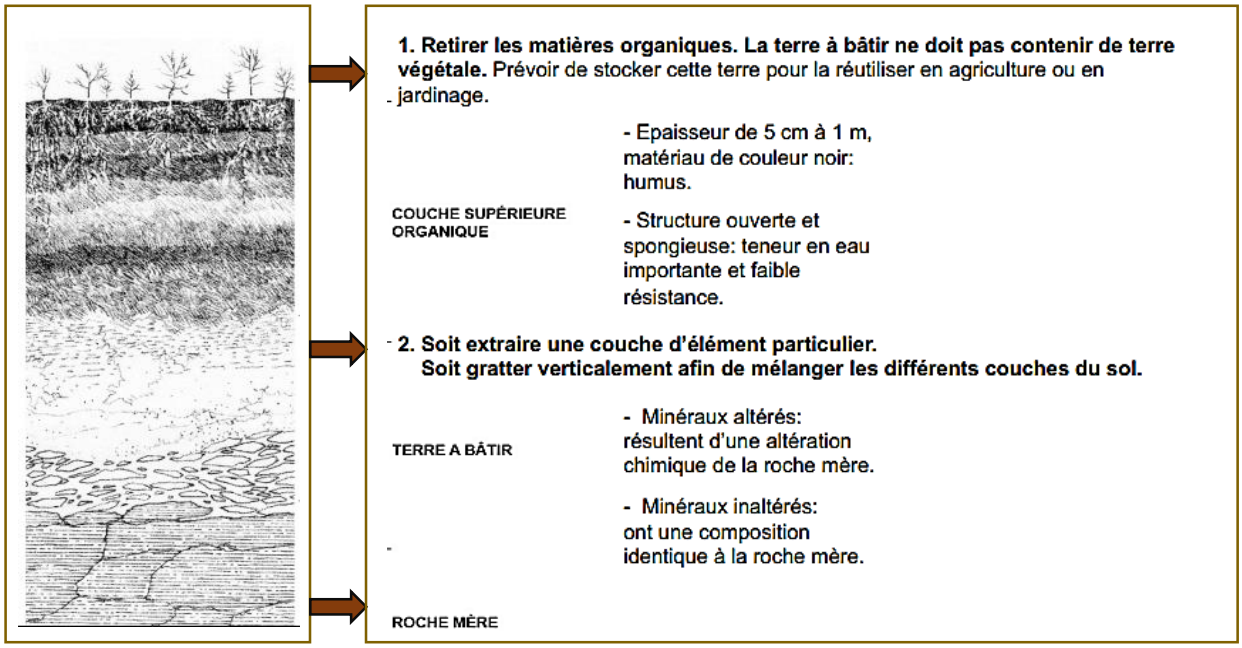


Figure. IV- 5 : La terre à bâtir (précautions), Source : CARACOL SCOP ARL, 2011 : p 4-6

La terre est un matériau granulaire. Il existe différentes types de terre selon l'importance en quantité d'un des composants :

TERRE GRAVELEUSE- TERRE SABLEUSE - TERRE SILTEUSE - TERRE ARGILEUSE

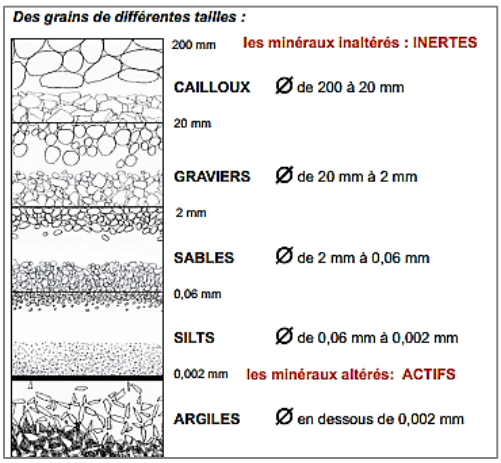


Figure. IV- 6 : Les grains composants la terres et leurs tailles, Source : CARACOL SCOP ARL, 2011 : p 6-8

IV.3.1 Constituants liquides de la terre à pisé (principalement l'eau)

Les liquides contenus dans la terre proviennent à la fois de la pluie et des conditions atmosphériques, des apports de l'homme et de la décomposition des matières organiques : c'est la solution de la terre. Le principal constituant liquide est l'eau [36].

L'EAU COMME COLLE : Sans cette eau, il est impossible de construire un mur en terre : le mur lui doit une grande partie de sa cohésion. En l'absence d'eau, la terre ne peut se présenter sous la forme d'un solide cohérent.

LES FORCES CAPILLAIRES : La présence d'un liquide dans la terre fait intervenir une force appelée force capillaire. C'est la tension superficielle de l'eau qui attire les grains comme des aimants.

Cette force est responsable à la fois de la cohésion du matériau terre et des remontés capillaires. L'eau est nécessaire, mais en grande quantité elle devient nocive.

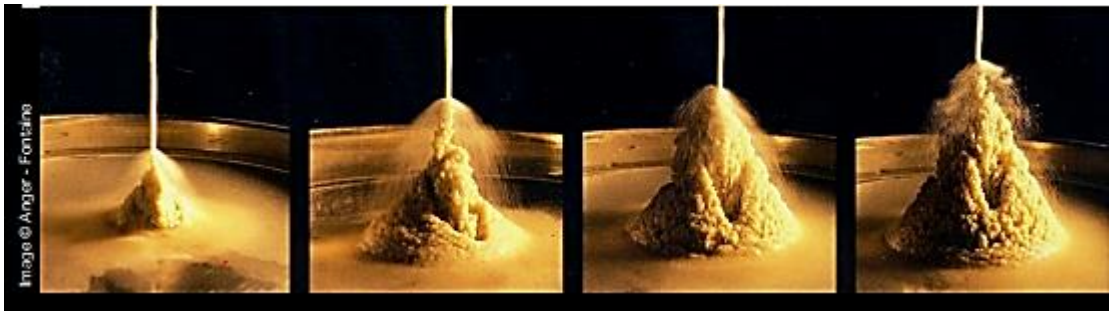


Figure. IV- 7 : Une expérience montrant l'action des forces capillaires, Source : CARACOL SCOP ARL, 2011 : p 6-8

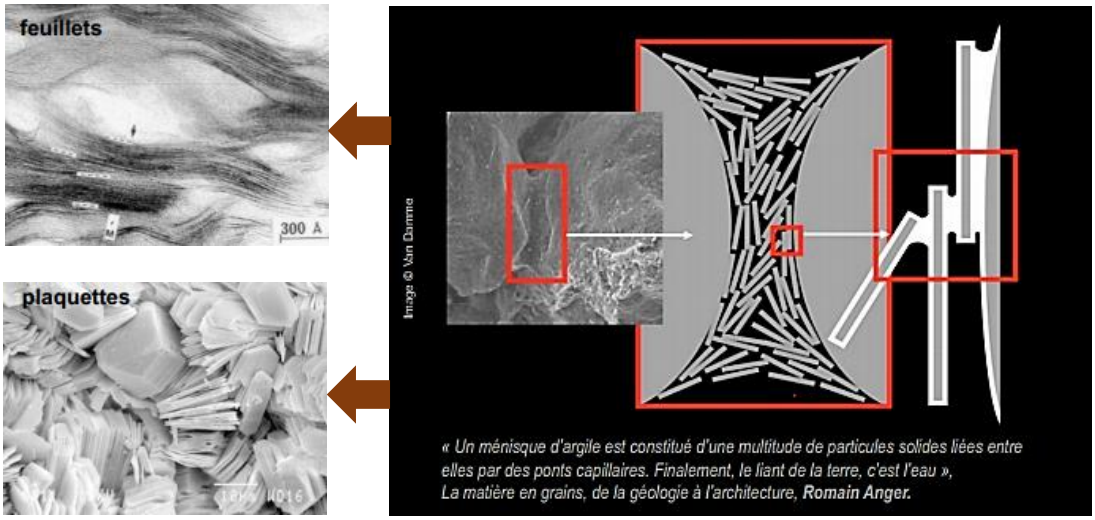


Figure. IV- 8 : L'action de liaison dans un ménisque d'argile, Source : CARACOL SCOP ARL, 2011 : p 9

La consistance de la terre varie en fonction de sa teneur en eau. C'est en fonction de ses différents états hydriques que la mise en œuvre de la terre dépend [37].

Il est à noter que pour passer d'un état hydrique à un autre, la quantité d'eau varie selon le type de terre :

- TERRE SABLEUSE : très peu d'eau est nécessaire pour changer la consistance.
- TERRE ARGILEUSE : beaucoup d'eau est nécessaire pour changer la consistance car plus l'argile est collante et plus la capacité d'absorption d'eau de la terre est grande.

IV.3.2 Constituants gazeux de la terre à pisé (principalement l'air)

La terre est constituée de gaz qui se trouvent entre les grains et proviennent de la décomposition des matières organiques : c'est l'atmosphère de la terre. Les plus fréquentes sont l'azote ; l'oxygène et le dioxyde de carbone [42].

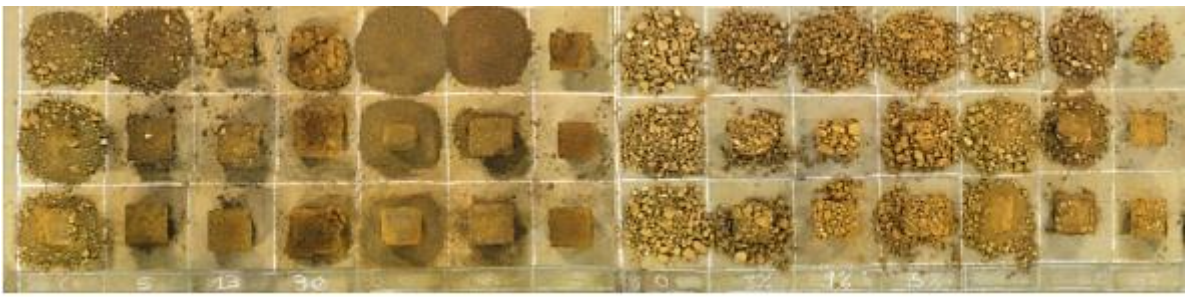


Figure. IV- 9 : Les 3 phases de la terre solide, liquide et gazeux (carazas), Source : CARACOL SCOP ARL, 2011 : p 9

A partir de ces trois éléments : eau, air et gaz, on obtient un matériau meuble que l'on peut transformer afin de construire des murs solides de remplissage ou structurels.

IV.3.3 Composition de la terre à pisé

Comme n'importe quelle terre, la terre à pisé est constituée de grains, d'eau et d'air. C'est une terre argilo-graveleuse souvent issue des anciennes plaines glacières.

A-LES GRAINS : (Le squelette) Un spectre granulométrique très large permet un agencement compact du matériau. Il s'agit de remplir un maximum d'espace pour obtenir un matériau plus dense. La taille des cailloux commencent à 45 mm et sont de formes rondes. Ex : la terre de Brézins, par la nature de sa composition, nécessite peu de modifications, mis à part un tamisage préalable dans certains cas.

B-L'EAU : Pour la mise en œuvre Teneur en eau faible qui correspond à un état humide de la terre. Elle varie de 10 à 12% selon le type de terre.

C-L'AIR : Il faut réduire les vides pour obtenir une cohésion optimale du matériau. Un mur sera plus résistant et plus stable.

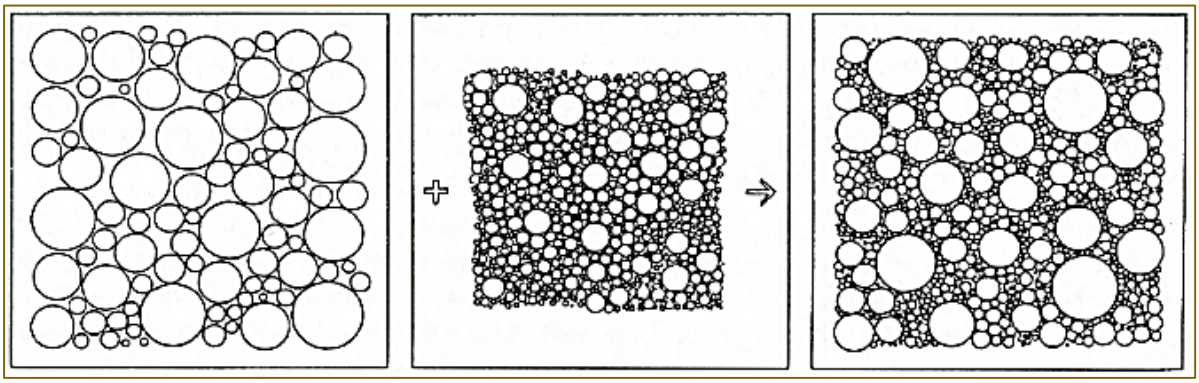


Figure. IV- 10 : L'empilement optimal des grains (Apollonien), Source : CARACOL SCOP ARL, 2011 : p 10-11

D-LA MATRICE :

Présence d'un minimum d'argile qui fera le liant entre les différents éléments. Ex : dans les terres du Dauphiné, la proportion de la fraction argileuse ne dépasse pas 8% de la masse totale.

A ce propos la figure à droite représente le fuseau correspondant aux terres idéales au pisé

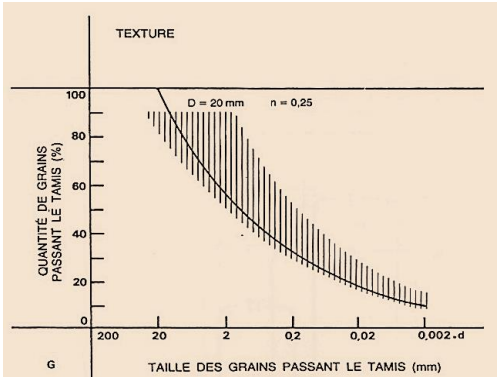


Figure. IV- 11 : Une courbe symbolise la granulométrie idéale pour le pisé, Source : CARACOL SCOP ARL, 2011 : p 10-11

IV.4 Tests et essais d'identifications

Pour identifier la terre on distingue les essais de terrain et les essais de laboratoire. Ils permettent tous les deux de prendre une décision quant à l'utilisation de la terre comme matériau de construction. Les essais de terrain peuvent aussi confirmer la nécessité de passer par des essais de laboratoire. Quelques points importants :

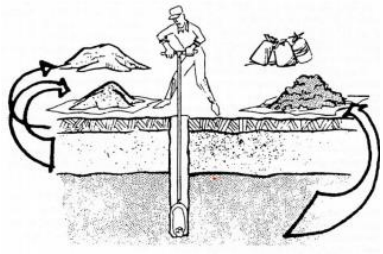


Figure. IV- 12 : Schémas de l'extraction de la terre Source : CARACOL SCOP ARL, 2011 : p 12

- Pour chaque échantillon, noter : le lieu/ la profondeur/ la date
- Etre sûr d'examiner un échantillon représentatif de la carrière.
- En plus des tests sur échantillons, il faut faire une observation de toute la zone :
  - constructions en terre déjà existantes,
  - terres utilisées pour les routes,
  - tailles des différentes couches de sol, etc…

IV.4.1 Manipulations

Les propriétés fondamentales d'une terre sont les suivantes : [43]

A- LA TEXTURE- LA PLASTICITÉ – LA COHÉSION – LA COMPRESSIBILITÉ – LA COULEUR

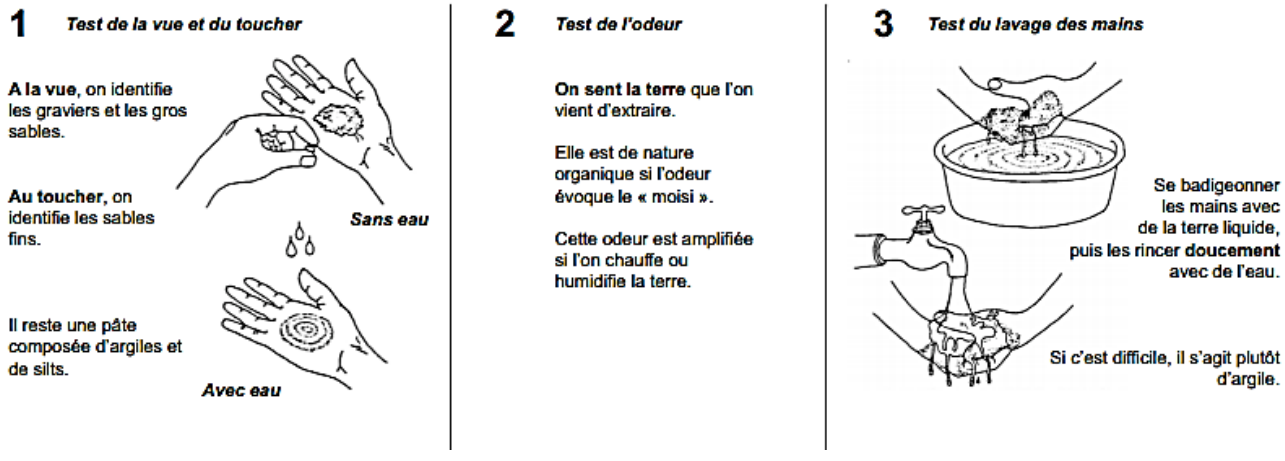


Figure. IV- 13 : les manipulations, Source : CARACOL SCOP ARL, 2011 : p 15

Les essais de terrain sont réalisés en premier, ils sont assez empiriques et il convient de les répéter régulièrement afin de se faire une meilleure idée du matériau. Ces manips visent à identifier : [43]

LA GRANULOMETRIE DU SOL	LES MATIERES ORGANIQUE	SOL ARGILEUS OU SILITEUX

B- LA TEXTURE- LA PLASTICITÉ – LA COHÉSION – LA COMPRESSIBILITÉ – LA COULEUR

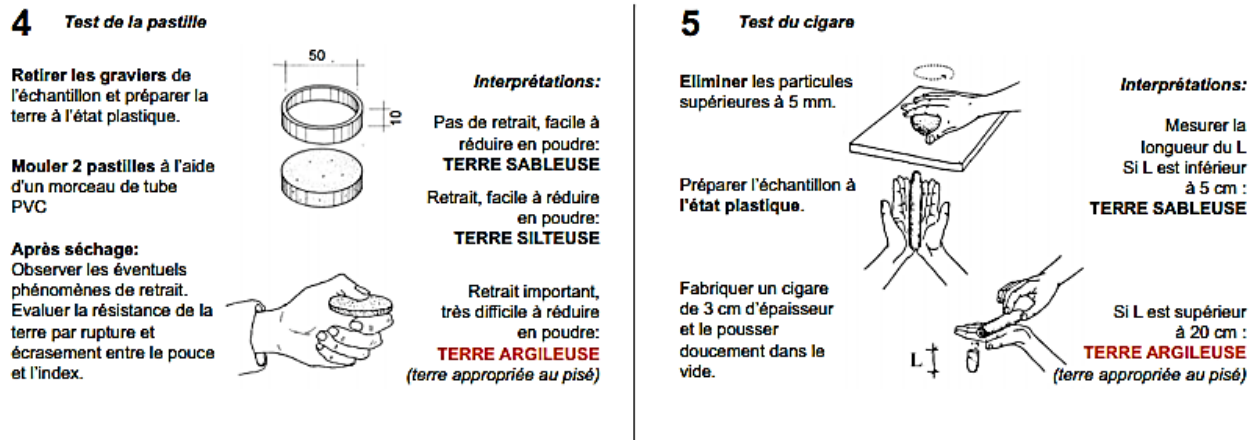


Figure. IV- 14 : les manipulations, Source : CARACOL SCOP ARL, 2011 : p 15

Préparer la terre à l'état plastique, et la laisser reposer une demi-journée avant de mouler les deux pastilles. Ainsi l'argile au temps de réagir avec l'eau. Ces manips visent à déterminer : [43]

LA RESISTANCE A SEC -% DE RETRAIT DES ARGILES	LA COHESION DE LA TERRE	LA QUANTITE D'ARGILE APPROPRIEE

C- LA TEXTURE- LA PLASTICITÉ – LA COHÉSION – LA COMPRESSIBILITÉ – LA COULEUR

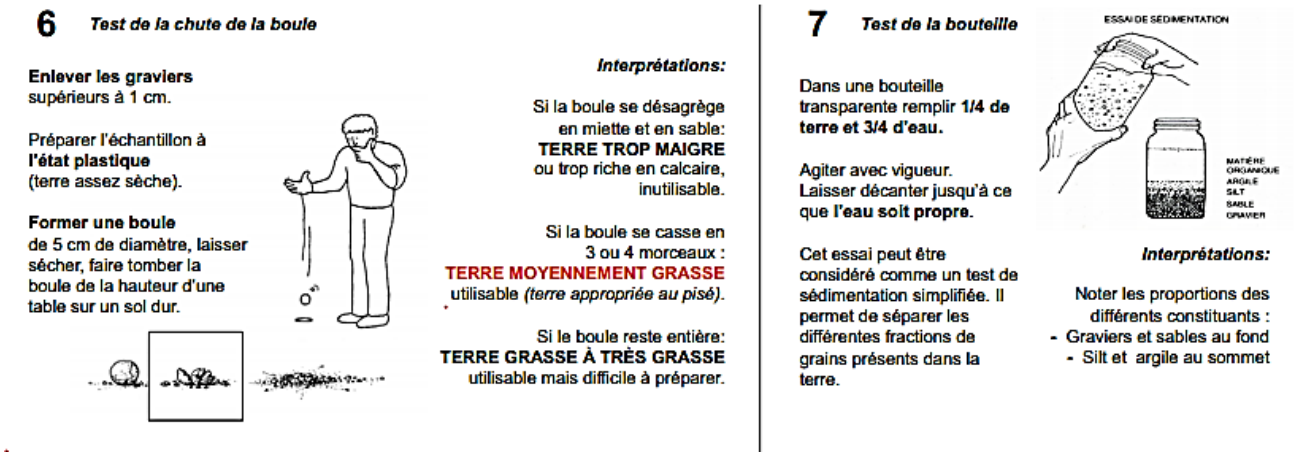


Figure. IV- 15 : les manipulations, Source : CARACOL SCOP ARL, 2011 : p 16

La terre ne doit être trop molle et elle doit être bien malaxée avant de former une boule. La boule peut être séchée au four (jusqu'à 60C°). Ces manipulations nous permettent de déterminer :

LA COHESION DE LA TERRE	LA PROPORTION ENTRE LES GRAINS INERTES ET LES FINES DE LA TERRE

IV.4.2 Essais de labo

IV.4.2.1 Test de CARAZAS

Le test est facilement réalisable permettant d'identifier les propriétés idéales du matériau à mettre en œuvre a été mis au point par l'architecte Wilfredo Carazas-Aedo. Il a donc créé un tableau, appelé test Carazas, représentant l'influence qu'ont les proportions des différentes phases (solide, liquide et gazeuse) composant la terre sur son comportement. Il s'agit donc de comparer différents blocs de terre qui ont été mis en œuvre dans un même moule cubique en bois mais avec des quantités d'eau et d'air différentes. Ainsi, la terre est mise en œuvre à l'état sec, humide, plastique, visqueux et liquide. Afin de faire varier la teneur en air, on compacte la terre de façons différentes : moule rempli simplement, terre tassée ou encore compactée. On obtient alors des cubes d'aspects différents qui expliquent les interactions existant entre les phases solide, liquide et gazeuse. La terre se présente donc soit sous forme d'un « tas pulvérulent sans cohésion, soit comme un bloc cohérent, soit comme une pâte, soit comme une boue, etc. » [44].

Figure. IV- 16 : Test de CARAZAS, Source : Anger et Fontaine 2009 : p 111

IV.4.2.2 Essai granulométrique

Parmi les premiers tests réalisés en laboratoire est l'essai granulométrique. Pour celui-ci, la terre sera simplement passée dans plusieurs tamis aux mailles de tailles différentes, superposés par ordre d'ouverture décroissant. On pourra ainsi déterminer les différents éléments constituant le sol (graviers, sables, limons et argiles) et leur quantité respective en pesant après dessic cation les différents refus des tamis. Avec les résultats obtenus, on peut tracer sur un diagramme la courbe granulométrique de la terre. On notera la grosseur des grains en abscisse et le pourcentage des tamisât cumulés en ordonnée, exprimant « la proportion en poids par rapport au poids de l'échantillon sec, de grains dont la grosseur est inférieur e à la grosseur portée en abscisse » (Doat et al., 1979 : p. 168) [44].

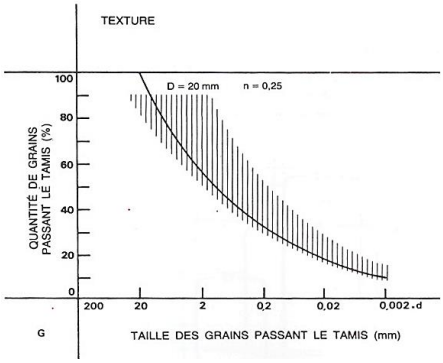


Figure. IV- 18 : La courbe d'analyse granulométrique, Source : Anger et Fontaine 2009 : p 113

Figure. IV- 17 : L'analyse granulométrique, Source : Anger et Fontaine 2009 : p 113

Les terres à pisé doivent de préférence présenter une granulométrie s'inscrivant dans la zone hachurée. La courbe passant au milieu de la zone hachurée symbolise une terre de granulométrie idéale.

IV.4.2.3 Sèdimentometrie

Ce test est celui de la sédimentométrie. Il correspond en quelque sorte au test de la bouteille expliqué ci-avant. Il sert à mesurer les teneurs en particules fines en utilisant la propriété de différence de vitesses de chute des particules en suspension dans l'eau, exprimée par la loi de Stockes. Pour réaliser cet essai, il faut conserver les grains traversant le tamis de 0,1mm d'ouverture qui ont été recueillis au test précédent et puis on suit le même processus que celui du test de la bouteille, mais dans une éprouvette graduée dans ce cas -ci. On peut alors calculer les proportions des grains de tailles différentes.

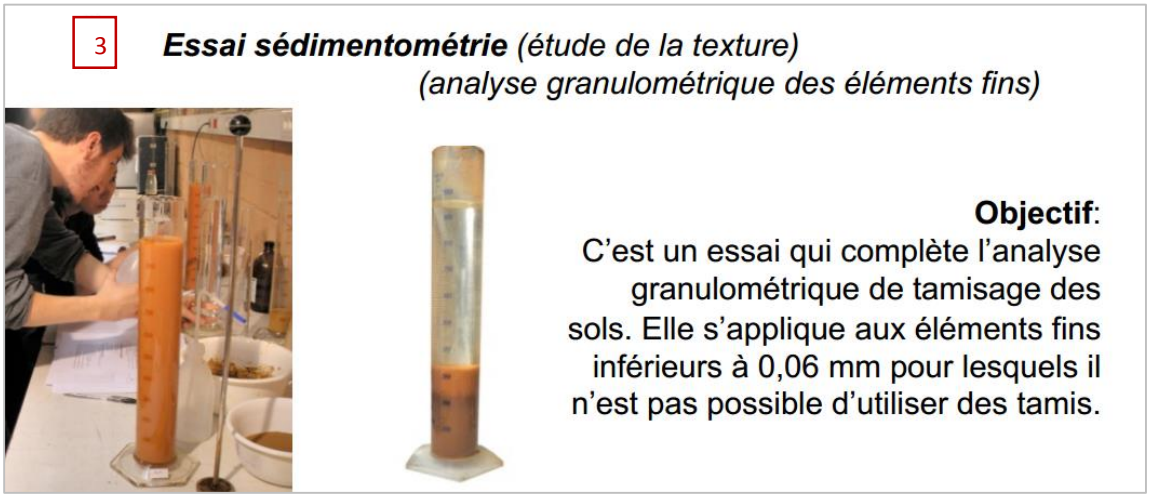


Figure. IV- 19 : Essai de sèdimentometrie, Source : Anger et Fontaine 2009 : p 114

Il est à noter que ces trois essais s'intéressent beaucoup plus sur l'aspect textuel de la matière.

IV.4.2.4 Granulométrie optimale

L'essai de la granulométrie optimale permet de comparer la courbe granulométrique de la terre analysée à la courbe optimale, encadrée de ses courbes limites inférieures et supérieures. Cette courbe idéale est la courbe qui permet de tirer le meilleur parti des qualités des éléments du sol. Elle est tracée à partir du regroupement des spécifications granulométriques de la terre. La courbe granulométrique doit être contenue dans le fuseau limite et être la plus proche possible de la courbe idéale. Elle doit également être quasiment parallèle aux courbes limites et à la courbe idéale. Si la courbe répond à ses trois critères, il n'y aura pas de problèmes pour construire avec cette terre. Si par contre elle n'y répond pas, on peut tout de même construire à l'aide cette terre mais il faudra auparavant résoudre d'importants problèmes [45].

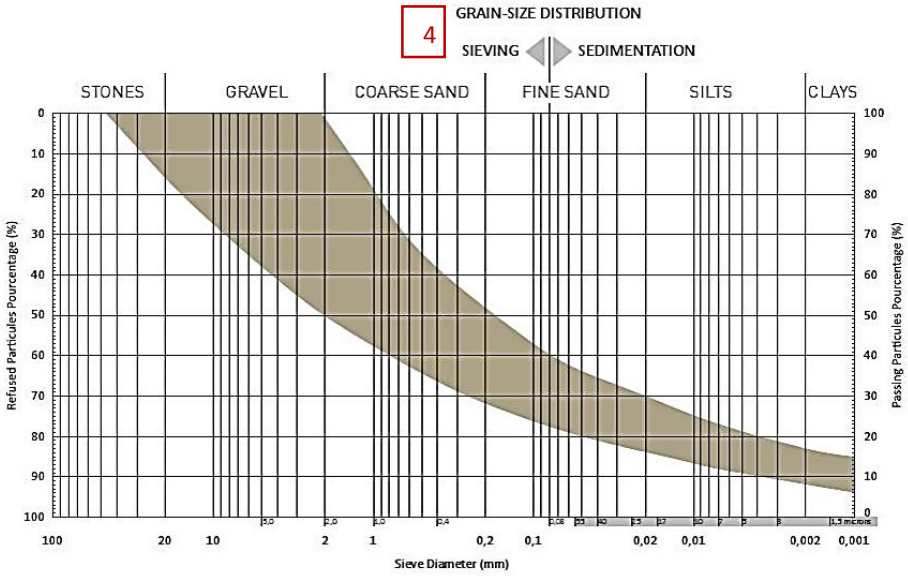


Figure. IV- 20 : Spectre granulométrique, Source : CRAterre- ENSA

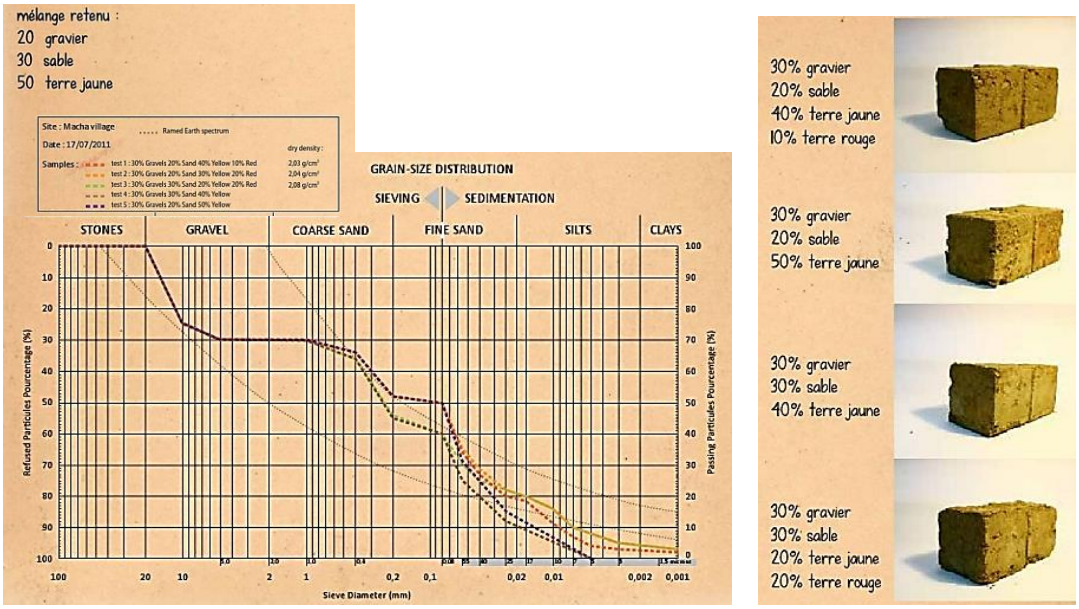


Figure. IV- 21 : Spectre granulométrique, Source : Rammed earth in China ,p :37

IV.4.2.5 Limites d'Atterberge

Avec les limites d'Atterberg « idéales » qui ont été définies par des études statistiques, on pourra déterminer les propriétés physiques et mécaniques spécifiques des argiles selon la nature minéralogique ou chimique de leurs particules mais également analyser la consistance du sol et ainsi prévoir s'il est envisageable de construire avec celui-ci. Les limites d'Atterberg définissent les limites entre les différents états de consistance pour la partie du sol passant à travers un tamis de 0,4mm. On retrouve les états suivants : état de dispersion, état liquide, état plastique, état solide avec retrait et finalement, état solide sans retrait. Entre l'état liquide et l'état plastique, on retrouve la limite de liquidité Wl. Celle-ci se mesure à l'aide de l'appareil de Casagrande . La terre contenant une certaine teneur en eau est étalée dans une coupelle et est divisée en 2 par une rainure de minimum 4cm de long et 1cm de large. Cette coupelle est ensuite soumise à un certain nombre de chutes de 1cm de hauteur sur une surface dure. Lorsque la rainure se referme sur une longueur de 1cm, le nombre de coups total est comptabilisé et mis en rapport avec la teneur en eau. Une droite d'évolution est tracée pour différentes teneurs en eau. La limite de liquidité correspond à la teneur en eau lorsque 25 coups ont dû être appliqués pour refermer la rainure sur 1cm [45].

Figure. IV- 22 : Protocole de l'essai d'Attergerg, Source : CRAterre- ENSA

Entre l'état plastique et l'état solide, on retrouve la limite de plasticité Wp. Elle correspond à la teneur en eau que contient un petit boudin de terre de 3mm de diamètre lorsqu'il se rompt en morceau. Avec la limite de liquidité et la limite de plasticité, on peut calculer l'indice de plasticité Ip du sol, équivalent à Ip = Wl - Wp. Si le résultat est compris entre 5 et 10, la plasticité est faible. S'il se situe entre 10 et 20, la plasticité est moyenne et si le résultat est supérieur à 20, la plasticité est forte. La limite de retrait se situe entre l'état solide avec retrait et l'état solide sans retrait. Elle correspond à la teneur en eau qu'il ne faut pas dépasser pour que le volume reste constant,

c'est-à-dire la teneur en eau limite à laquelle tous les grains sont encore en contact. La limite d'absorption Wa correspond quant à elle à la teneur en eau maximale qui peut pénétrer dans la terre. Si cette dernière limite est inférieure à la limite de retrait, le matériau se trouve à l'abri du gonflement, ce qui est préférable pour la construction. Afin d'avoir une idée du gonflement et du retrait du sol, il faut calculer le coefficient d'activité Ça qui est le rapport entre Ip et le pourcentage de grains inférieurs à 2µm : [46]

Le degré d'activité sera décrété comme inactif si Ça est inférieur à 0,75. Il sera d'activité moyenne si Ça est compris entre 0,75 et 1,25 et actif si compris entre 1,25 et 2. Si C'est supérieur à 2, on dira que le degré d'activité est très actif. Il est plus avantageux d'utiliser une terre inactive car elle ne nécessitera pas l'emploi supplémentaire d'un stabilisant.

$$C_a = \frac{I_p}{\%\ argiles\ (\emptyset<2\mu m)}$$

Limite de liquidité notée w_L (norme NF P 94-050) : teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état liquide et un état plastique.
Limite de plasticité notée w_P (NF P 94-054) : teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état plastique et un état solide.

IV.4.2.6 Essai du bleu de méthylène

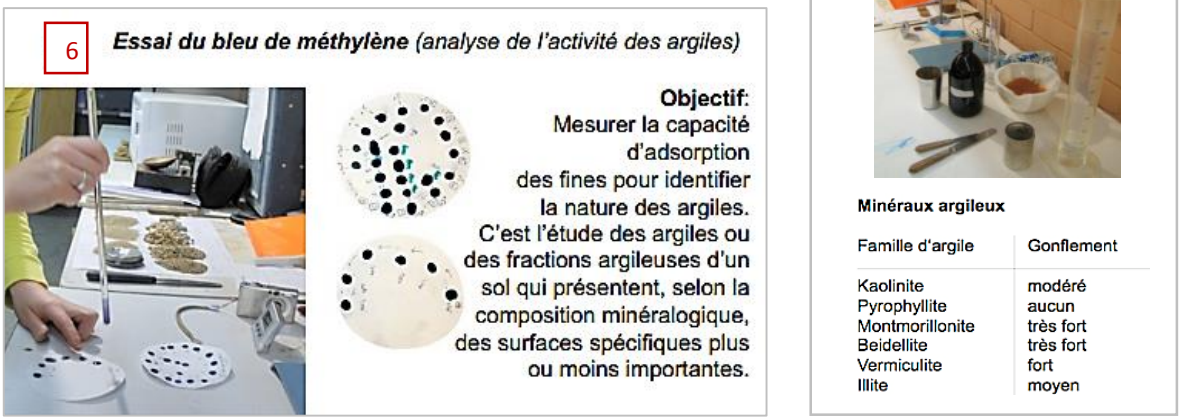


Figure. IV- 23 : Essai du bleu de méthylène, Source :CRAterre ENSA

IV.4.2.7 Essai du Proctor

L'essai Proctor permet de déterminer la teneur en eau optimale (T.E.O.) de compactage. Cette teneur en eau est celle qui permet d'assurer un enrobage de chaque grain du sol afin qu'ils puissent se réarranger de la façon la plus compacte possible. La T.E.O. coïncide avec la masse volumique la plus grande qu'il est possible d'atteindre avec l'énergie de compactage mise en œuvre. L'interprétation des résultats obtenus est la suivante : « si la masse volumique sèche obtenue à la T.E.O. est comprise entre 1650 et 1760 kg/m3, le résultat est assez médiocre, entre 1760 et 2100 kg/m3, le résultat est très satisfaisant, le matériau assez argileux. Entre 2100 et 2200 kg/m3, le résultat est excellent, le matériau riche en gros éléments. Entre 2200 et 2400 kg/m3, le résultat est exceptionnel » (Doat et al. 1979 : p. 178). La T.E.O. Peut également être estimée rapidement sur chantier. Pour cela, il suffit de laisser tomber sur une surface dure une boule de terre d'une hauteur de 1,10m. Si celle-ci se décompose en 4 ou 5 morceaux, c'est que la teneur en eau

est correcte. Par contre, si elle s'aplatit sans se désagréger, c'est qu'elle contient trop d'eau et si elle s'émiette, c'est qu'elle en contient trop peu [47].

Figure. IV- 24 : Essai du Proctor, Source : CRAterre ENSA

IV.4.2.8 Essai du 8

L'essai du 8 (également appelé essai de cohésion ou essai à la traction humide) fut inventé par l'architecte allemand Niemeyer et permet de mesurer la cohésion de la terre ainsi que sa résistance en traction. Pour le réaliser, il faut avant tout éliminer les grains de diamètre supérieur à 2mm. Avec la terre ainsi obtenue, on constitue une boule de terre de 5cm de diamètre à l'état humide et homogène. On la laisse tomber d'une hauteur de 2m sur une surface lisse et dure. Si la partie qui s'aplatit mesure 5cm, c'est que la terre a la consistance requise pour le test. On remplit avec cette terre un moule en forme de 8 en trois couches. Chacune de ces couches est bien damée dans le moule. On démoule ensuite immédiatement la terre en laissant tomber le moule sur une surface dure d'une hauteur de 10cm. Le huit obtenu est accroché par sa partie supérieure à un appareil de mesure. On vient ensuite suspendre à la partie inférieure du huit un récipient qui recevra la charge de rupture. Ce test est recommencé 3 fois afin de faire la moyenne des mesures et ainsi obtenir la résistance en traction [43].

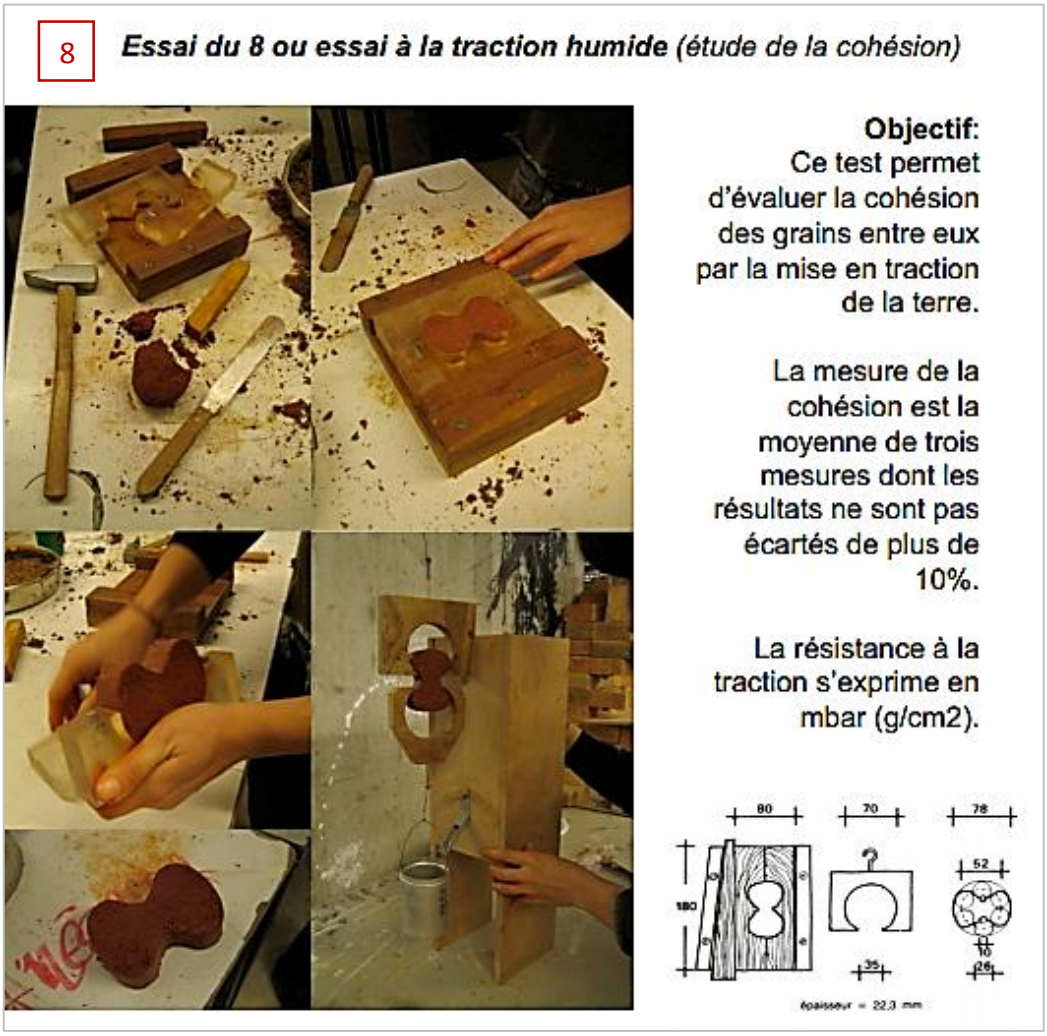


Figure. IV- 25 : Essai du 8, Source : CRAterre ENSA

IV.4.2.9 Essai de compression

L'essai de compression se réalise sur 5 échantillons afin de faire la moyenne des résultats. Les éprouvettes cylindriques de 5cm de diamètre et de 5cm de haut sont passées à l'étuve après un premier séchage naturel. Une fois un poids constant atteint, on place une fine couche de plâtre sur les faces inférieures et supérieures du cylindre afin d'assurer une planéité parfaite. Ils sont ensuite placés dans une machine spécifique et sont soumis à une charge pouvant aller de 500 à 1500 kg [47].

Référence	Résistance à la compression (MPa)	Résistance en cisaillement (MPa)	Module de Young (MPa)
New Zealand code [NZS 98]	0,5	0,035	150
Australian Handbook [WAL 02]	0,4 à 0,6	0	500
New Mexico code [TIB 01]	2,07	-	-

Figure. IV- 26 : Valeurs de calculs recommandés pour le pisé, Source :CRAterre ENSA

IV.4.2.10 Essai de résistance à la flexion

La résistance à la flexion (ou module de rupture) se calcule par l'intermédiaire d'une charge concentrée, équivalente à une poussée de 250 kg par minute, appliquée sur 5 échantillons placés chacun à leur tour sur des supports parallèles espacés de 25cm. La charge à la rupture de chaque échantillon est notée. Le module de rupture se calcule comme suit :

$$R = \frac{3}{2} \times 25 \times \frac{P}{l \times e^2}$$

Où "R" est le module de rupture en kg/cm², "25" la distance d'appui en cm, "l" la largeur de l'échantillon en cm et "e" l'épaisseur de l'échantillon en cm. On calcule ensuite la moyenne des 5 valeurs obtenues. Celle-ci équivaut au module de rupture de la terre testée.

IV.4.2.11 Essai d'absorption

L'essai d'absorption se réalise également sur 5 échantillons passés à l'étuve au préalable afin d'obtenir un poids constant. On pose ceux-ci sur une surface poreuse saturée d'eau en permanence, dans une atmosphère humide. Après 7 jours, on mesure l'augmentation du poids des échantillons. On l'exprime en pourcentage du poids sec. On calcule la moyenne des 5 résultats : celle-ci est la valeur d'absorption de la terre étudiée.

IV.4.2.12 Essai d'érosion

L'érosion est un test indicatif qui est calculé sur un bloc de terre placé verticalement sur une grille, 17cm devant un jet d'eau horizontal. Celui-ci arrose le bloc avec un jet horizontal d'une pression de 1,6 kg/m² durant deux heures. On mesure alors la perte de poids de l'échantillon ainsi que la profondeur des trous [47].

IV.4.2.13 Essai du mouillage et séchage

Le dernier essai est celui du mouillage séchage. Il se fait à l'aide de trois éprouvettes : la première servira à calculer les variations du volume et de la teneur en eau tandis que les deux autres serviront à étudier la perte de poids de la terre après chaque cycle. Après séchage à l'air, les échantillons sont soumis à 12 cycles de mouillage et de séchage. Un cycle correspond aux étapes suivantes : les échantillons sont d'abord immergés durant 5 heures, après quoi le premier échantillon est pesé et mesuré tandis que les deux autres sont brossés puis pesés. Ensuite, ils sont tous trois séchés à l'étuve à 60°C durant 42 heures. Après ces 12 cycles, les éprouvettes sont séchées à 100°C jusqu'à atteindre un poids stable. La perte de poids admissible après les 12 cycles ne doit pas excéder 10%.

IV.4.3 Valeurs caractéristiques

Ces tests de laboratoire permettent de connaître les caractéristiques de la terre disponible avec plus de précision qu'avec les tests réalisés sur chantier. À l'heure actuelle, il existe très peu

de normalisation pour l'utilisation de la terre comme matériau de construction. On retrouve seulement quelques normes pour l'adobe et pour la terre damée stabilisée qui précisent la résistance minimale et la durabilité du matériau terre. Des essais expérimentaux réalisés par différents organismes de pays industrialisés permettent d'avoir tout de même une idée des performances techniques du matériau terre en général. Ces caractéristiques peuvent être comparées aux résultats obtenus aux essais énoncés précédemment afin de s'assurer de la fiabilité de ceux-ci [37] [47]

Figure. IV- 27 : Les normes et les codes de terre, Source : CRAterre ENSA

On vous recommande recommande les caractéristiques suivantes pour une construction à un seul niveau : [46]

- Résistance à la compression : 2 kg/cm²
- La résistance à la compression humide vaut environ la moitié de la résistance à sec
- Résistance à la traction : 0
- Résistance au cisaillement : 0,3 kg/cm²
- Module d'Young : 7000 à 70 000 kg/cm²
- Perméabilité : 1x10-6cm/sec
- Dilatation thermique : 0,012 mm/m par °C
- Coefficient de conduction thermique : 0,44 à 0,57 Kcal/h.m.°C
- Chaleur spécifique : 0,2 Kcal/kg
- Déphasage horaire pour un mur de 40cm : 8 à 12 heures
- Amortissement phonique pour un mur de 40cm et une fréquence de 500 Hz : 56 dB

Propriété	Unité	Pisé
Masse volumique [ρ]	kg/m^3	1800 < 2400
Retrait hydraulique	%	0 < 0,5
Résistance mécanique à la compression	N/mm^2	1 < 6
Module d'élasticité [E]	N/mm^2	450 < 3000
Classe des matériaux	NBN EN 13501-1	A1
Coefficient d'imperméabilité à la vapeur [μ]	μ	5 < 10
Coefficient de conductivité thermique [λ]	W/mK	0,82 < 1,4
Coefficient de conductivité thermique [λ]	W/mK	0,82 < 1,4
Capacité thermique massique [C]	J/kgK	836
Capacité thermique [ρC]	kJ/m^3K	1504 < 2006
Diffusivité thermique [d]	m^2/s	$6,28.10^{-7}$
Effusivité thermique [Ef]	$J/m^2Ks^{1/2}$	1390
Déphasage thermique [φ] 40 cm	h	12,343
Résistance thermique [R] 40 cm	m^2K/W	0,28 < 0,49

Figure. IV- 28 : Tableau récapitulatif des propriétés du pisé, Source : CRAterre ENSA

IV.5 Recherches contemporaines

La source principale de l'érosion des murs en terre est due à l'énergie cinétique battante des gouttes de pluies (Heathcote, 1995). Les facteurs principaux qui influencent l'amplitude de l'énergie cinétique battante des murs en terre sont : l'intensité des pluies, l'angle des pluies, le dépassement de la toiture et la rugosité du mur.

Pour développer des essais sur la durabilité du matériau pisé, Plusieurs recherches ont été mises en place, en laboratoire avec les conditions "simulés " [48].

IV.5.1 Essai de brosse métallique *("wirebrush test" - ASTM D559, 1989)*

Dans ce test, la terre est compactée dans un moule de 100 mm de diamètre jusqu' à une épaisseur approximative de 125 mm Après 7 jours de stockage, les éprouvettes sont séchées en étuve et pesées Elles sont ensuite placées dans l'eau pendant 5 heures, puis séchées et brossées par une brosse métallique ferme (avec une pression verticale constante) pour enlever tous les matériaux perdus pendant les cycles de séchage-humidification. Après 12 cycles de séchage et humidification, les éprouvettes sont séchées en étuve et leur masse finale est enregistrée. Le pourcentage des matières perdues en masse est calculé [46].

IV.5.2 Essai d'arrosage (spray test)

En Australie, cet essai s'appelle aussi "*Accelerated Erosion Test*". Il est utilisé souvent pour tester des adobes, des BTC et des pisés. Dans ce test, l'échantillon est arrosé pendant une période d'une heure jusqu'à ce que L'échantillon soit transpercé Le jet d'eau qui projette 50kPa à partir d'un tuyau standard est placé à 470mm de l'échantillon. La surface exposée de l'échantillon est un cercle de 150mm de diamètre. L'épaisseur maximale de l'érosion est mesurée après une heure d'exposition et l'échantillon est vérifié à l'œil pour déterminer l'extension de la pénétration de l'humidité. L'échec est avéré quand l'épaisseur maximale de l'érosion dépasse 60mm ou la pénétration de l'humidité vient jusqu'à l'arrière de l'échantillon.

Figure. IV- 29 : L'essai d'arrosage du pisé, Source : CRAterre ENSA

IV.5.3 Essai de durabilité des murs en pisé exposés pendant 20 ans aux conditions naturelles

Les murs sont construits en 1985 dans le cadre du programme Rexcoop, piloté par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), sur un terrain proche de Grenoble, à une altitude de 212m Cette région est particulièrement riche en constructions vernaculaires en pisé environ 300 000 maisons âgé de plus de 50 ans (Michel, P et al, 1987). Le programme voulait expérimenter l'utilisation des produits du marché (de 1985) issus de l'industrie chimique, pour la protection des murs en terre sous conditions climatiques naturelles. La construction avec plusieurs types de matériau, plusieurs types de protection superficielle sur un même site avec les mêmes conditions naturelles ont permis des comparaisons directes de l'efficacité des produits testés les uns par rapport aux autres.104 murs à base de terre 55 ont été construits, mis en œuvre en masse (pisé, terre paille)

ou en blocs maçonné (BTC vibrocompressé). Les terres utilisées sont différentes pour chaque mise en œuvre. Les protections superficielles changent d'un mur à l'autre. L'étude était faite uniquement sur les murs en pisé [46].

L'étude de la durabilité du pisé a été réalisée sur les murets en pisé exposés pendant 20 ans dans les conditions naturelles sur site. Une méthode de mesure de l'érosion des murs en pisé est mise au point à partir de la méthode de stéréophotogrammétrie. Des résultats obtenus ont montré une durée de vie de plus de 60 ans pour des murs en pisé non-stabilisé [46].

L'étude des caractéristiques mécaniques en compression du matériau pisé a été réalisée sur trois échelles différentes. La première est l'échelle des murs sur site. Des mesures dynamiques ont été réalisées sur site pour déterminer des fréquences propres des murs. Le module d'élasticité est déterminé à partir des fréquences propres mesurées en utilisant une modélisation par éléments finis. La deuxième est l'échelle des échantillons représentatifs du matériau pisé (des dimensions proches des murs sur site) fabriqués et testés en laboratoire. Finalement, en ce qui concerne la dernière échelle (microscopique), des essais sont réalisés sur des blocs de terre comprimée (BTC) équivalents. Une procédure d'homogénéisation est réalisée pour mettre au point une procédure de test en laboratoire qui permet de remplacer les échantillons de pisé par les BTC équivalents pour faciliter la procédure de test [46].

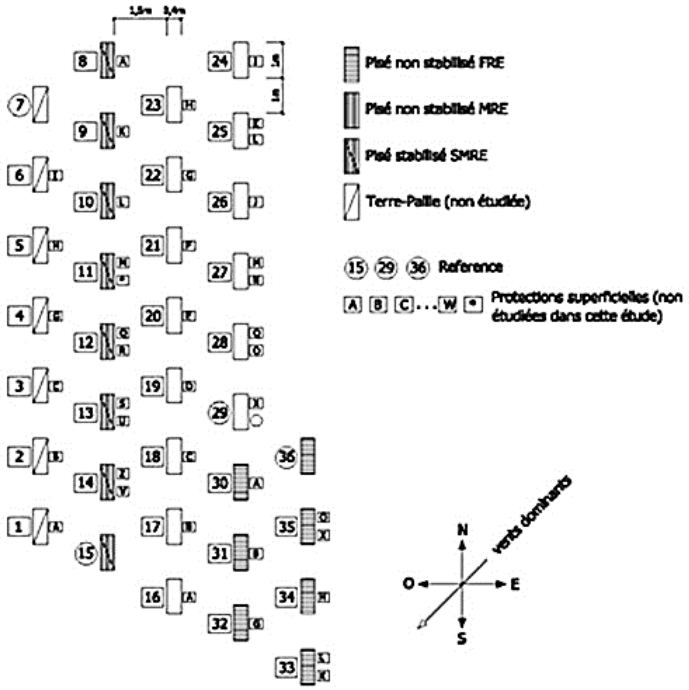


Figure. IV- 30 : Plan du site des murets mis en œuvre en masse et la distribution des différents types de protection (enduit, badigeon, peinture, imprégnation, témoin) sur différents supports, Source : CSTB

Figure. IV- 31 : Vue générale sur des murets sur site, Source : CSTB 2008

IV.5.4 Mesures d'érosion par la méthode stéréophotogrammétrique :

La stéréophotogrammétrie est l'enregistrement photographique de plusieurs vues d'un même objet. Cette technique a d'abord été développée dans la cartographie aérienne, où, en prenant deux clichés d'un même paysage à partir de deux endroits différents, on peut restituer le relief du paysage. Plus généralement, on peut connaître les caractéristiques géométriques d'un objet à partir de deux clichés pris sous deux angles différents (Desrues & Duthilleu, 1984) [46].

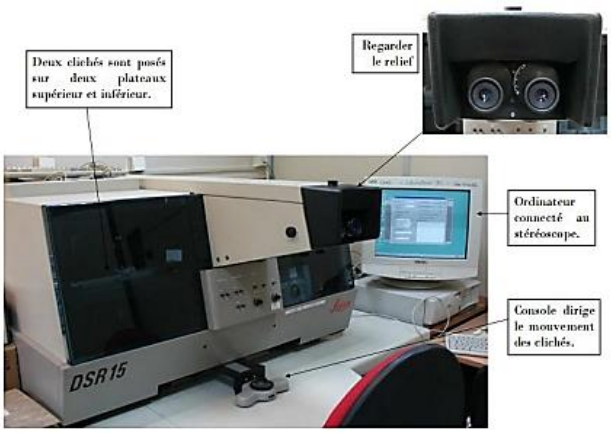


Figure. IV- 32 : Stéréoscope, Source : CSTB 2008

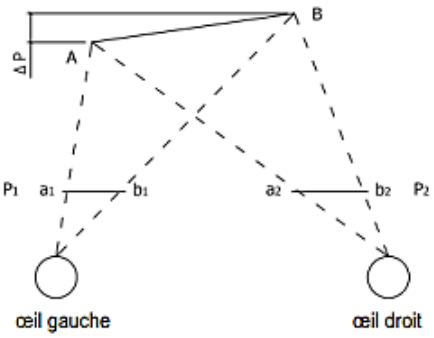


Figure. IV- 33 : Principe de la méthode de stéréophotogrammétrie, Source : CSTB 2008

IV.5.5 Essai de compression uni axiale

L'essai de compression uni axiale sert à déterminer la résistance à la compression et le module d'élasticité. Des essais peuvent donner les premières connaissances de ce matériau pisé et pourrait servir dans les études du comportement des murs en pisé pendant les tremblements de terre.

Figure. IV- 34 : compression uniaxiale, Source : CSTB 2008

IV.5.6 : Procédés de stabilisation :

La stabilisation permet d'améliorer principalement la résistance à l'eau et aux sollicitations mécaniques extérieures de la terre crue. On peut stabiliser le matériau terre : soit en y ajoutant des stabilisants, (stabilisation chimique), soit de manière mécanique ou alors physique, (sans apport de stabilisants).

IV.5.6.1 Stabilisation physique :

On arrive à stabiliser le matériau terre en agissant sur sa texture grâce au contrôle de la granulométrie, de manière à créer une certaine densité qui réduit les pores et les canaux capillaires. La stabilisation physique peut se faire aussi par traitement thermique (déshydratation ou gel) ou par choc électrique (électro-osmose) pour obtenir de meilleures qualités structurales du matériau permettant ainsi, l'amélioration de sa résistance à la compression, à la traction et au cisaillement (Houben, H et al, 2006

IV.5.6.2 Stabilisation chimique :

Figure. IV- 35 : Pisé stabilisé au ciment, Source : CSTB 2008

Traditionnellement, le pisé est fabriqué à partir de la terre ou le liant unique est de l'argile. Aujourd'hui, avec le but de diminuer la sensibilité du pisé à l'eau et d'augmenter sa résistance à la compression, la terre est stabilisée au ciment ou à la chaux. On les appelle des "pisés stabilisés". La figure suivante présente un bâtiment en Grande-Bretagne construit avec du pisé moderne stabilisé au ciment.

La terre est stabilisée grâce à l'ajout d'un ou de plusieurs stabilisants qui peuvent se présenter sous forme de produits minéraux (ciments, chaux, plâtre…) ou de produits organiques (différentes résines, bitumes …). Parmi les stabilisants les plus utilisés on peut citer :

Stabilisation au ciment : 50 à 100 kg/cm²
Stabilisation à la chaux : 30 à 80 kg/cm²
Stabilisation au bitume : 15 à 60 kg/cm²
Stabilisation aux fibres : 5 à 20 kg/cm²
Stabilisation aux produits chimiques : 20 à 40 kg/cm²
Stabilisation aux produits chimiques puissants : 150 à 400 kg/cm²

- Les hydrophobants (Doat, P et al, 1983) (résines, dérivés aminés, bitumes et hydrocarbures) qui permettent l'insensibilisation de la terre à l'eau [49].
- Les liants, (chaux aériennes, chaux hydrauliques, lignosulfites etc.), qui en plus de leur capacité à rendre les argiles moins hydrophiles, peuvent aussi contribuer à obtenir de meilleures caractéristiques mécaniques et de durabilité.

IV.5.6.3 La stabilisation mécanique :

C'est un procédé qui consiste à réduire la porosité des briques de terre par compactage mécanique sans ajout de stabilisant. Il peut être statique, (à l'aide de rouleaux cylindres, de rouleaux à pieds de mouton ou de rouleaux à pneus), et convenir aux terre à grains fins, comme il peut être dynamique (rouleaux vibrants, aiguilles et coffrages vibrants, etc.) et utilisé pour les terres à grains plus importants [47].

MOYENS DE STABILISATION DES TERRES REMANIÉES

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

Figure. IV- 36 : Tableau recap du mécanisme de stabilisation, Source : Guillaud et Houben 2009, p : 81

IV.5.6.4 Quelques techniques de renforcement :

Nous présentons ci-après quelques techniques de renforcement des murs en pisé qui pourront servir à renforcer des maisons existantes ou appliquer aux maisons neuves.

- **Ossatures en béton armé : Cette technique est utilisée assez fréquemment :** en réalité par manque des connaissances scientifiques sur le matériau terre. Par contre, elle est déconseillée par des recherches scientifiques (Bruce, K et al, 2008), due à une incompatibilité de la raideur entre le matériau terre et l'ossature en béton armé.
- **"Armer" des murs en pisé :** Walker et Morris proposent l'utilisation des armatures en acier pour renforcer des murs en pisé La densité et la disposition des armatures dépendent de la zone sismique où se situe le bâtiment. La Figure 34 présente un exemple de ce type de renforcement.(Morris & Walker, 2000).

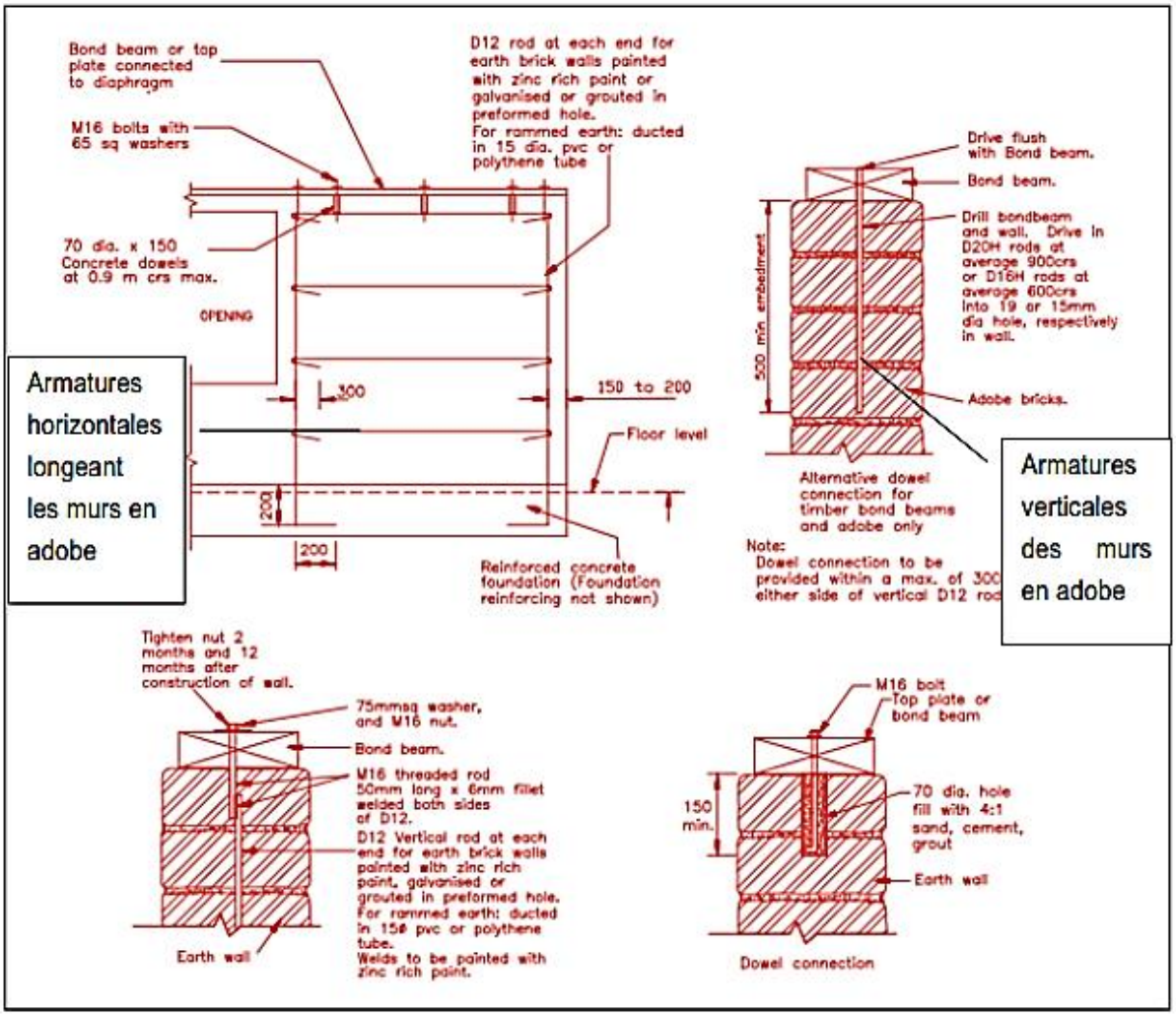


Figure. IV- 37 : Renforcement parasismique des murs en terre proposé dans la norme de Nouvelle-Zélande, Source : Bui.Q.B, 2008 CSTB

- **Tirants verticaux :** La technique des tirants verticaux à l'intérieur du mur a été appliquée aux murs en pisé stabilisés dans des études de (Hamilton, H et al, 2006)(Morris & Walker, 2000), avec l'utilisation des tirants en acier précontraint. Ces tirants sont placés dans les tubes mis dans le coffrage pour protéger les tirants contre la corrosion par l'humidité de la terre du pisé. Ces tirants sont introduits la précontrainte après le damage du mur. L'utilisation de la précontrainte peut diminuer la quantité des tirants nécessaires, par rapport à la technique des tirants normaux. Cela diminue non seulement le travail de l'emplacement des renforcements mais aussi facilite le damage du pisé. Avec les tirants précontraints, pour chaque mur, on n'aurait besoin que de 2 tirants aux deux bouts du mur pour supporter la force sismique "en plan" du mur et un tirant au milieu du mur pour supporter la force sismique "hors plan" du mur. Cette technique est tout à fait applicable aux murs en pisé et ouvre une nouvelle voie du renforcement des maisons en pisé neuves ou existantes par son efficacité et sa simplicité de réalisation [47].

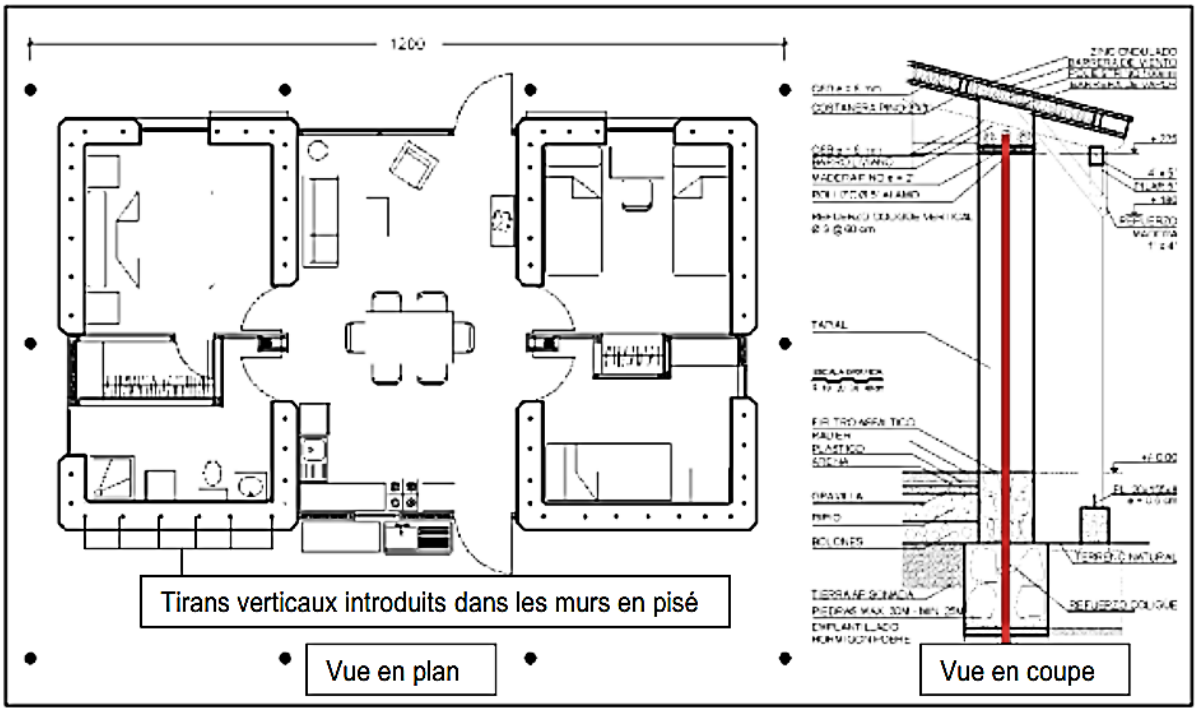


Figure. IV- 38 : Renforcement par des tirants verticaux, Source : Bui.Q.B, 2008 CSTB

IV.5.7 : Intérêt de la stabilisation :

Lorsque l'on décide de stabiliser la terre, c'est-à-dire de « modifier les propriétés d'un système terre-eau-air pour obtenir des propriétés permanentes compatibles avec une application particulière » (Guillaud & Houben, 2009 : p. 90), il faut d'abord étudier :

- les propriétés de la terre à stabiliser
- les améliorations envisagées
- l'économie du projet, c'est-à-dire les coûts et délais de réalisation
- les techniques de mise en œuvre de la terre choisies pour le projet et les systèmes constructifs.

- la maintenance du projet réalisé, c'est-à-dire le coût d'entretien ».

La stabilisation ne connaît toujours pas de « recette miracle » pouvant répondre à tous les besoins. Les méthodes les plus pratiquées sont celles de : la densification par compression, l'ajout de fibres au mélange, l'addition de ciment ou de chaux à la terre ou encore le mélange de la terre avec du bitume. Mais il ne faut pas pratiquer la stabilisation de façon automatique car celle-ci coûte relativement cher et complique la production du matériau en ajoutant des études préalables. La terre présente déjà de nombreuses propriétés intéressantes à l'état naturel. Les stabilisants ne sont donc pas toujours utiles. Ils doivent être utilisés de façon réfléchie afin de répondre à des besoins faisant défaut. Ainsi, pour un projet, il existe trois façons de procéder : soit on construit avec la terre présente sur site en adaptant le projet à cette terre, soit on importe de la terre afin de répondre aux exigences du projet, soit on modifie la terre présente sur site afin qu'elle puisse correspondre au projet souhaité [45] [47].

IV.5.8 : Inconvénient de la stabilisation :

La plupart des constructions neuves en pisé aujourd'hui sont stabilisés (au ciment ou à la chaux). Pourtant, la compréhension de l'inconvénient et l'intérêt de la stabilisation du pisé sont indispensables pour déterminer la stratégie convenable. La stabilisation du pisé augmente considérablement le coût de la construction. Ensuite, le recyclage devient difficile, voire impossible. Donc, l'avantage de la non-production de déchets du matériau terre est supprimé. (Bui.Q.B, 2008). A cet effet, Il n'est pas toujours nécessaire de stabiliser le matériau terre. Les deux raisons principales de la stabilisation sont de limiter la sensibilité de ce matériau à l'action de l'eau et d'augmenter sa résistance à la compression. Concernant la première raison, la durabilité du pisé dépend fortement du climat, des précipitations de chaque région, donc, le besoin de stabilisation change d'un pays à l'autre ainsi que d'une région à l'autre. Ensuite, pour la deuxième raison, la résistance à la compression du pisé dépend de la descente de charge sur le mur. En fonction de cette descente de charge, il est nécessaire de stabiliser ou pas. En général, le pisé non-stabilisé convient tout à fait pour construire des maisons de 1 à 3 niveaux [47].

"Si des matériaux stabilisateurs doivent être utilisés il serait plus économique de les utiliser pour le revêtement étanche, plutôt que pour toute l'épaisseur du mur. " (Hassan Fathi) [41].

IV.6 Synthèse du chapitre :

Il est très répandue que les constructions en terre sont extrêmement sensibles à I' eau et que très fragilisées par ce fait, elles ne peuvent en aucune manière répondre aux normes modernes de confort, de sécurité et de durabilité paradoxalement, des architectures de terre ont traversé les siècles pour nous parvenir et la durabilité de ces architectures est en effet parfaitement incontestable et l'eau ne peut porter atteinte aux bâtisses réalisées en terre crue que si ces dernières sont mal conçues, c'est à dire que leur réalisation ne respecte pas les règles de I' art de bâtir en terre. Cela signifie que la vulnérabilité à l'eau des architectures de terre est un mythe construit sur la réalité de la perte des savoir-faire constructif traditionnels et de la culture d'entretien. En réalité, La terre, en tant que matériau de construction, présente une très bonne capacité de résistance à I 'eau à la seule condition d'être mise en œuvre dans les règles de I' art, et les constructions en terre peuvent par conséquent répondre aux normes les plus modernes de confort, de sécurité et de durabilité.

Cependant, il est toujours possible d'améliorer la résistance des constructions en pisé par différents modes de stabilisation ou de renforcement. Dans cette optiques différentes recherches sont menées soit au laboratoire ou sur site pour évaluer les caractéristiques du pisé et améliorer ses performances.

A travers cette recherche bibliographique nous avons pu voir que les qualités physiques de la résistance et de la durabilité du matériau ne sont plus un obstacle, à ce propos nous ne souhaitons pas arrêter aux aspects techniques du matériau seul , nous voulons également apporter une nouvelle perspective qui se base sur la revalorisation et la réactualisation des matériaux locaux à travers un choix du système constructif et structurel qui doit être soigneusement pensé en fonction des données contextuelles pour un meilleur résultat par exemple l'utilisation du sable dunaire ou alluvionnaire dans la construction en pise prochainement et de donner la parole aux usagers à travers un champ disciplinaire qui se rapporte aux sciences sociales et les faire participer dans la construction de leurs propres maisons .

IV.7 Confort et caractéristiques thermique du matériau pisé

On va donner quelques définitions qui ont relation avec le confort thermique :

IV.7.1 Confort thermique

Est défini comme un état de satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique, et ne dépend pas seulement de la température mais aussi d'hygrométrie de l'air ambiant « confort thermo hygrométrique » [48].

Il est déterminé par « l'équilibre dynamique établi par échange thermique entre le corps et son environnement » [48].

Il est atteint grâce à quatre mécanismes : la conduction, la convection, l'évaporation et le rayonnement. Il est donné par l'ensemble des interactions entre l'occupant et l'enveloppe bâtie [48].

IV.7.2 Performances thermiques

- **L'isolation thermique**

Au plan architectural, le concept de compacité règle les problèmes de déperditions thermiques, par la suite l'avènement de l'isolant libère l'architecture de la contrainte de forme, l'isolation thermique permet à la fois de réduire les consommations d'énergie, et d'accroitre le confort [48].

- **La conductivité thermique**

La conductivité thermique d'un matériau est égale au flux de chaleur qui traverse un mètre d'épaisseur de ce matériau par seconde et par mètre carré de surface, lorsque la différence de température entre les deux faces du matériau est de 1°C51. Elle s'exprime en (W/m°C) [48].

- **La capacité thermique**

La capacité thermique d'un matériau désigne son aptitude à stocker de la chaleur, elle est exprimée en Watt heure par mètre cube Kelvin (Wh/m3.K) [48].

- **La résistance thermique**

La capacité d'un matériau à s'opposer au froid et au chaud est mesurée par sa résistance thermique. La résistance thermique R d'un matériau traduit sa capacité à empêcher le passage de la chaleur, pour une épaisseur donnée. Elle s'exprime selon la formule : $R=e / \lambda$, où, R est la résistance thermique ($m^2.K/W$), e épaisseur de l'isolant (m) et λ conductivité thermique (W/m. °C).Plus la résistance thermique est élevée plus le matériau est isolant [48].

- **La diffusivité thermique**

C’est la vitesse à laquelle la chaleur se propage par conduction dans un corps. Elle s’exprime en m²/heure. On parle de déphasage de 10 à 12 h quand il permet d’atténuer les différences de température entre le jour et la nuit. "a", la diffusivité thermique s’exprime par : $a= \lambda/ \rho \times c$ [48].

- **L’effusivité thermique (chaleur subjective)**

L'effusivité thermique exprime la capacité d'un matériau à absorber ou à restituer une puissance thermique ((W/m2.K)1/2) [48].

- **L’inertie thermique**

D’après Liebard A « l’inertie thermique est une notion qui recouvre à la fois l’accumulation de chaleur et sa restitution, avec un déphasage dépendant de la paroi de stockage, Une grande inertie thermique permet la récupération de la chaleur du jour afin de la restituer la nuit. Ceci est particulièrement intéressant dans les climats où la différence de température diurne et nocturne est importante.»53. Le maximum de température atteint sur la face extérieure n’est pas immédiatement ressenti sur la face intérieure de la paroi [48].

- **Le déphasage**

Le déphasage correspond au temps que va mettre la chaleur à passer de l’extérieur à l’intérieur de la maison, à travers l’isolation. Cette valeur est très intéressante en été, pour se protéger des surchauffes, sans avoir recours à la climatisation [48].

IV.8 Recherche contemporaine sur le confort thermique du pisé

Les recherches scientifiques actuelles sur le confort thermique d’habitation du pisé peuvent être groupées en deux directions principales. Pour la première, il s’agit de recherches sur le confort thermique en faisant des enquêtes sur des bâtiments réels, soit par des modèles et des calculs directs (Porta-Gandara et al, Parra-Saldivar et Batty), soit par des opinions de la satisfaction des occupants des bâtiments réels (Paul et Taylor, Taylor et al, Taylor et Luther, 2011). A partir des enquêtes, on peut aussi comprendre et évaluer la performance et la qualité thermique des maisons réelles en pisé en prenant en compte les factures d’électricité et de gaz. La deuxième se compose des recherches en laboratoire. Des essais sur des échantillons fabriqués en laboratoire sont réalisés pour déterminer des caractéristiques thermiques du pisé (CSIRO, Hall, Hall et Allinson, 2010).

IV.8.1 Qualités thermiques du pisé

Le pisé n'est pas un bon isolant mais il a des caractéristiques très intéressantes pour le confort de l'habitat. Sa densité et sa capacité à absorber ou rendre de l’humidité contribuent directement à la régulation de deux facteurs essentiels dans le confort : l’hygrométrie et la température. Ajoutée à de grandes quantités de fibre (paille, chanvre, etc.), la terre à pisé peut se transformer en bon isolant pour le doublage de murs [49].

Selon les méthodes actuelles de calcul thermiques, les caractéristiques des murs en pisé ne répondent pas aux exigences d’isolation. Mais avant d'isoler les murs en pisé et de se priver du confort hygrothermique qu'ils apportent, il faudra s’assurer que les autres sources de déperditions thermiques sont traitées [49].

IV.8.1.1 Confort thermique d'une habitation

Le confort thermique d'une habitation dépend principalement de : [50]

• la température de l'air ambiant.
• la température des murs et du sol.
• le taux d'humidité de l'air.
• la vitesse de déplacement de l'air.
• l'activité des habitants.

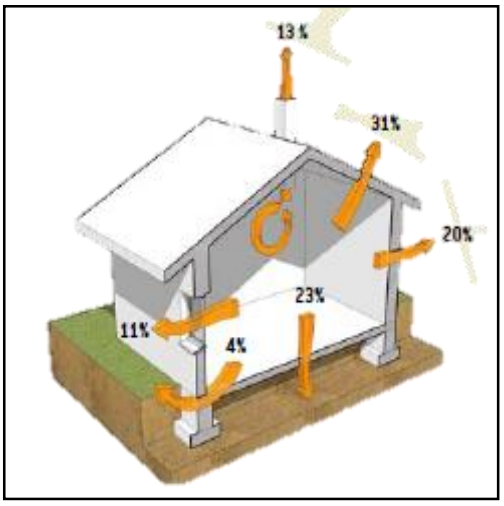


Figure. IV- 39 : Les principales pertes d'énergie d'une maison non isolée, Source : Rénover et construire en pisé, page 18

IV.8.1.2 Améliorer le confort thermique d'un bâtiment en pisé

De nombreuses interventions peuvent optimiser le confort thermique d'une maison en pisé (recommandations principalement pour le confort d'hiver) : [50]

• réduire les déperditions de chaleur en isolant en priorité la toiture, les menuiseries, le sol, et enfin les murs en particulier les façades non ensoleillées.
• augmenter la surface de captage au sud : agrandissement ou création d'ouvertures, construction d'une serre (améliore les captations diurnes et réduit les déperditions nocturnes).
• installer une source de chaleur (poêle, mur chauffant...) contre un mur de refend qui emmagasinera les calories.

Donc le schéma ci-dessous représente un exemple sur l'intervention d'une habitation en pisé pour l'amélioration du confort thermique :

Exemple et priorité d'intervention pour l'amélioration thermique d'une construction en pisé

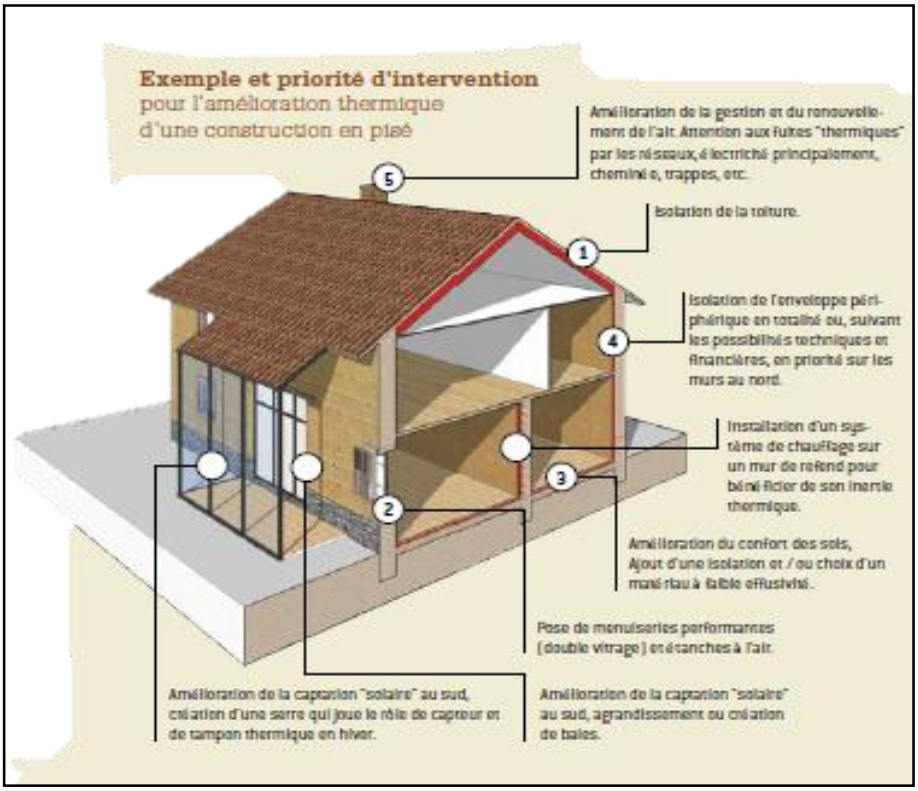


Figure. IV- 40 : Un exemple d'une maison pour l'amélioration du confort thermique, Source : Rénover et construire en pisé, page 18

IV.8.1.3 Avantages du pisé pour le confort thermique

L'hiver :

• matériau à forte inertie, capable de stocker de la chaleur et de la restituer par rayonnement. L'inertie permet des variations très lentes de température [50].

• La terre maintient l'humidité de l'air à un taux faible, ce qui permet d'abaisser la température de confort, et donc d'économiser de l'énergie. Cette capacité évite également les problèmes de condensation. Cela ne fonctionne que si les murs restent apparents, ou qu'ils sont doublés avec des matériaux perspirants [50].

L'été :

• matériau déphasant qui ralentit le transfert de chaleur et permet un réel confort d'été. Un mur de 40 cm procure un déphasage de 10 à 12 heures, ce qui signifie que la fraîcheur nocturne est restituée le jour [50].

Les deux Figures ci-dessous représentent des maisons bioclimatiques en pisé qui expriment l'avantage du pisé pour le confort thermique, donc (la figure IV.41) représente un mur masse en pisé en cours de finition, réaliser par Makjo. Et (la figure IV.42) représente des murs massifs en pisé, complétés sur les murs extérieurs d'un mortier isolant chaux chanvre participent au confort de l'habitation réalisés par les deux architectes J. Jeannet & P. Scarato.

Figure. IV- 41 : Maison bioclimatique à ossature bois à Mazeyrat-d'Allier, Source : Rénover et construire en pisé, page 18

Figure. IV- 42 : Maison bioclimatique en pisé à Teilhède, Source : Rénover et construire en pisé, page 18

IV.8.1.4 Faiblesses

Selon les méthodes de calcul actuelles, la densité du matériau lui confère de mauvaises propriétés isolantes. Sa conductivité thermique est relativement élevée, et oscille entre $0,6 < \lambda < 0,9$ W/m.K en fonction de nombreux paramètres à la fois physiques (densité) et dynamiques (taux d'humidité). Cela donne une résistance variant de $0,44 < R < 0,66$ m².K/W pour un mur de 40 cm [50].

IV.8.2 Etude de performance thermique du pisé

IV.8.2.1 Notoriété de la performance thermique du pisé

Depuis longtemps, les constructeurs et les habitants en France ont constaté que les bâtiments en pisé offraient un très bon confort thermique. Dans les maisons en pisé traditionnels en France, hiver comme été, les amplitudes thermiques entre le jour et la nuit sont très faibles, du fait de l'épaisseur du mur, généralement 50cm (Pignal, Meunier). Le jour, la chaleur rayonnante est accumulée (soleil, chauffage,...). La nuit, cette chaleur est restituée dans l'habitation. Ces caractéristiques prédisposent le pisé à être utilisé dans une architecture bioclimatique [51].

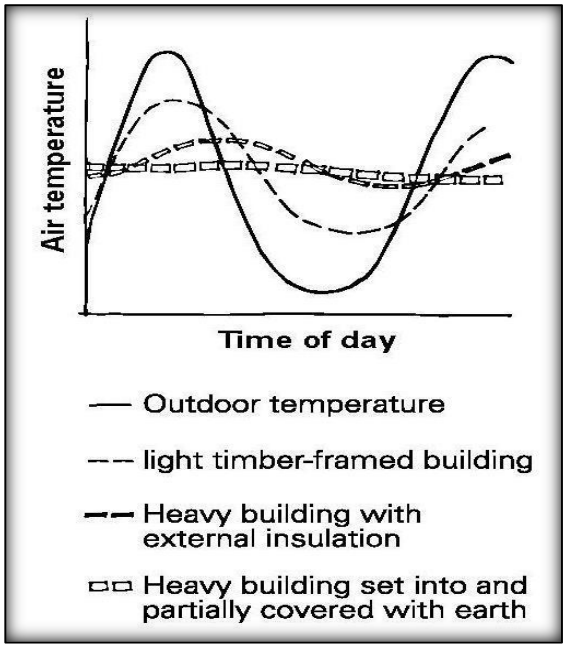


Figure. IV- 43 : Principe de l'influence de la masse thermique dans le confort thermique du bâtiment, d'après Reardon, Source : Mémoire sur la stabilité des structures en pisé, page 39

Dans les pays anglophones aussi, à partir des années 1980, des constructeurs et des habitants sont impressionnés par un très bon confort thermique des maisons en pisé et en BTC (Mortensen), bien que leur pisé n'ait en général que 30 cm d'épaisseur. Reardon a une vue très positive du confort thermique du pisé, présentée dans le Figure 43 :

Dans les zones où la température est extrême, la performance thermique du matériau terre est aussi affirmée. MacLeod dans son rapport à d´écrit que des maisons "modernes" (construites avec briques et l'ossature métallique) en Afrique du Sud présentaient une faible performance thermique par rapport aux maisons traditionnelles en terre dans la zone ou` les températures sont extrêmes [51].

Avec la notoriété de la performance thermique du pisé chez des habitants, plusieurs recherches scientifiques sont lancées pour évaluer la performance thermique de ce matériau, en laboratoire ainsi que sur des maisons réelles [51].

IV.8.2.2 Evaluation de la performance thermique du pisé par sa résistance thermique

A Etude de CSIRO

En admettant un bon confort thermique des maisons en terre en Australie, CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) a fait une étude de la performance thermique du pisé en s'appuyant sur la résistance thermique R. Les échantillons étaient des murs de 1m de longueur, 1m de largeur et 20cm d´épaisseur, la masse de chaque mur était de plus de 400kg. Des mesures ont été réalisées sur un dispositif du CSIRO d'un m2 de flux de chaleur. Les résultats montraient que la plupart des valeurs de R du pisé en Australie sont inférieures à 0,4, qui n'est pas une valeur acceptable dans les règlements australiens. Par exemple, la règle locale à Victoria exige la valeur minimale de 1,3 de R pour les murs. Donc, suivant le résultat de cette étude, les pisés en Australie présentent une mauvaise résistance thermique [51].

Les auteurs de cette étude ont suggéré que la masse thermique élevée du pisé pouvait compenser la faible résistance thermique. Pourtant, ce ne sera vrai que dans le cas où le climat est tempéré.

Dans le cas où la période de froid est longue, ce sera la résistance thermique R qui d´détermine la capacité thermique des murs [51].

Les auteurs ont proposé aussi la nécessité, dans les règlements, de considérer encore d'autres facteurs (par exemple la masse thermique) pour ´évaluer la capacité thermique des murs [51].

B Etude de Hall et Allinson

Hall et Allinson ont fait aussi une étude sur la résistance thermique des pisés stabilisés à 6% de ciment (en poids). Ils ont trouvé que la résistance thermique du pisé n'est pas influencée par la densité sèche de leurs pisés (des densités sèches de 1,98 à 2,12) mais elle change suivant la granulométrie de la terre utilisée et la teneur en eau du pisé. Une teneur en eau importante peut établir des "ponts thermiques "dans les pores du matériau [51].

Leurs résultats de la résistance thermique sur trois types de mur différents sont présentés dans le Tableau ci-dessous :

Etude	Type d'échantillon de pisé	R (m2 K/W)
CSIRO	20 cm d'épaisseur	0,4
Hall et Allinson	30 cm d'épaisseur	0,48 - 0,54
_____	40 cm d'épaisseur	0,58 - 0,66
_____	40 cm d'épaisseur, dont 5 cm d'isolation	2,91 - 2,97
Règlement (Australie)		≥ 1.3

Tableau. IV- 1 : Synthèse de la résistance thermique des études existantes, Source : Mémoire sur la stabilité des structures en pisé, page 40

IV.8.2.3 Masse thermique dans la performance thermique du pisé

A Masse thermique

La masse thermique dans les bâtiments permet la réduction de l'énergie consommée pour le chauffage et refroidissement dans la plupart des climats (Baggs). L'effet de la stabilisation de la température intérieure grâce à la masse thermique est expliqué dans la Figure IV.44. Un mur avec une grande masse thermique a un double effet. Non seulement il peut stabiliser la température intérieure mais il fait encore un "décalage" thermique. Pendant la journée, il absorbe la chaleur du soleil et il libère cette chaleur et chauffe la maison pendant la nuit [51].

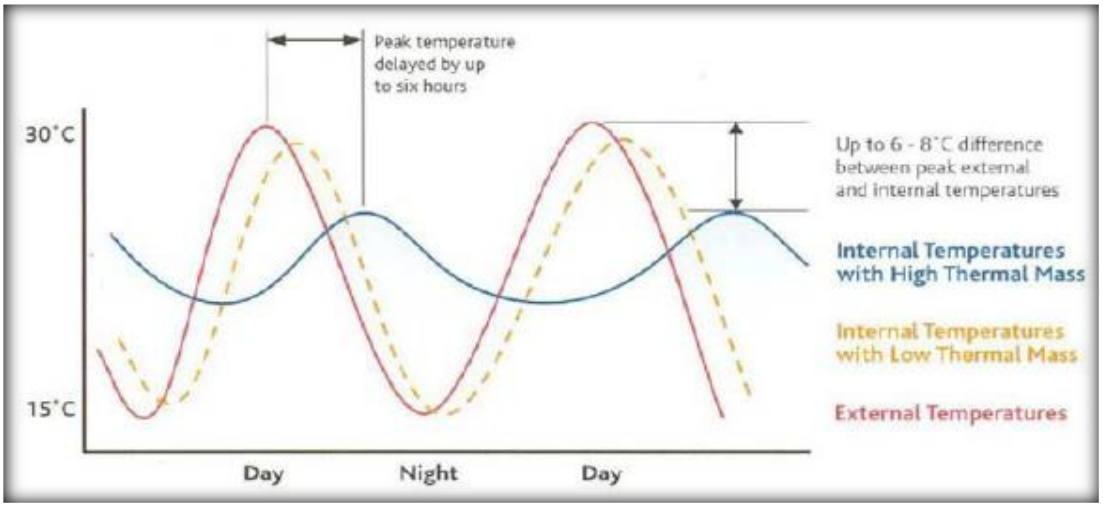


Figure. IV- 44 : Effet de la stabilisation de température intérieure grâce à la masse thermique, de Saulles, 2005, Source : Mémoire sur la stabilité des structures en pisé, page 41

B Masse thermique et matériau terre

Contrairement aux résultats de l'étude de (CSIRO, Kruithof et ASEG) pensent que la grande masse thermique du pisé peut compenser une valeur faible de la résistance thermique R. Ils confirment que R n'est pas le seul critère pour juger le confort thermique des bâtiments en terre.

Plusieurs études ont été mises en place sur des bâtiments existants pour évaluer la performance thermique générale du matériau terre et du pisé, notamment pour vérifier, dans chaque contexte de leur étude, si la grande masse thermique du matériau terre et du pisé peut apporter une bonne performance thermique [51].

C Conception solaire « Solar design »

Mortensen propose de bien maitriser les principes de la conception solaire pour profiter au maximum de l'avantage d'une grande inertie thermique du matériau terre. Il a montré qu'avec une bonne conception, des bâtiments en terre peuvent obtenir une bonne performance thermique en minimisant considérablement la consommation d'énergie [51].

Le Tableau. IV- 2, présente des résultats obtenus à partir des maisons réelles conçues par Mortensen. En été, ces bâtiments n'utilisent pas de ventilation. En hiver, ces maisons consomment une énergie minimum par un chauffage de secours [51].

Nom du bâtiment	T. Ambiante (°C)	T. Intérieure (°C)
Mudgee	-8	14
Gulf of Carpentaria	45	26-27
Hunter Valley	2-42	17-30
Mona Vale	7-42	18-27

Tableau IV.2 : Performance thermique en été et en hiver des bâtiments en BTC stabilisé à 5% de ciment, avec une bonne conception solaire passive, d'après Mortensen, Source : Mémoire sur la stabilité des structures en pisé, page 41

D Etude de Taylor et Luther

Taylor et Luther ont réalisé des mesures en Australie ou le climat est froid humide en hiver et chaud sec en été. Leur étude s'est déroulée en été. La température moyenne du mois était 24,4˚C. La moyenne des températures élevées pendant les journées était de 31,4˚C et la moyenne des températures faibles pendant les journées était de 17,6˚C. Des mesures ont été réalisées sur un bâtiment de bureaux de travail pendant 4 jours [51].

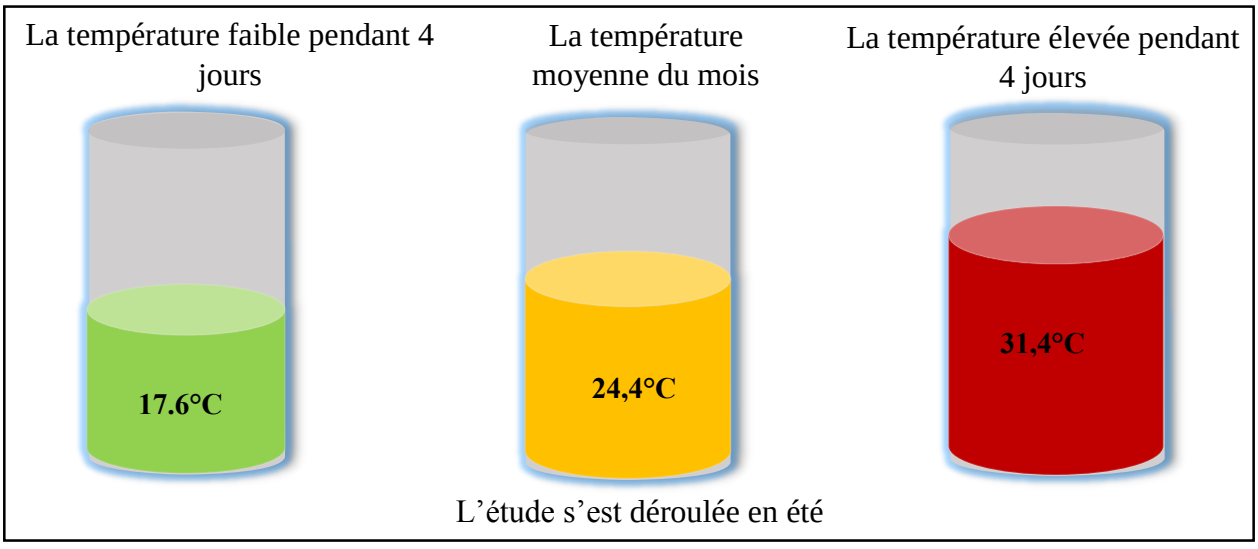


Figure. IV- 45 : Etude de Taylor et Luther, Source : Mémoire sur la stabilité des structures en pisé, page 42 réalisé par auteur

Les résultats de leur étude montrent que la grande masse thermique du pisé australien est capable d'améliorer la caractéristique thermique du pisé. L'évaluation des caractéristiques thermiques du pisé par seulement R comme le cas de l'étude de CSIRO n'est donc pas suffisant.

IV.8.3 Calcul de la conductivité thermique du pisé

Dans la littérature, les valeurs du coefficient de conductivité thermique en fonction de la densité pour la terre en tant que matériau de construction sont légions et surtout éparses. La figure 46 est un recensement de plusieurs valeurs que l'on peut trouver dans diverses publications pour des terres stabilisées (chaux ou ciment) ou non stabilisées et suivant différents modes de mise en œuvre de terre compactée ou damée. Quand cela est indiqué dans la publication originale, le type et la quantité de stabilisant [51].

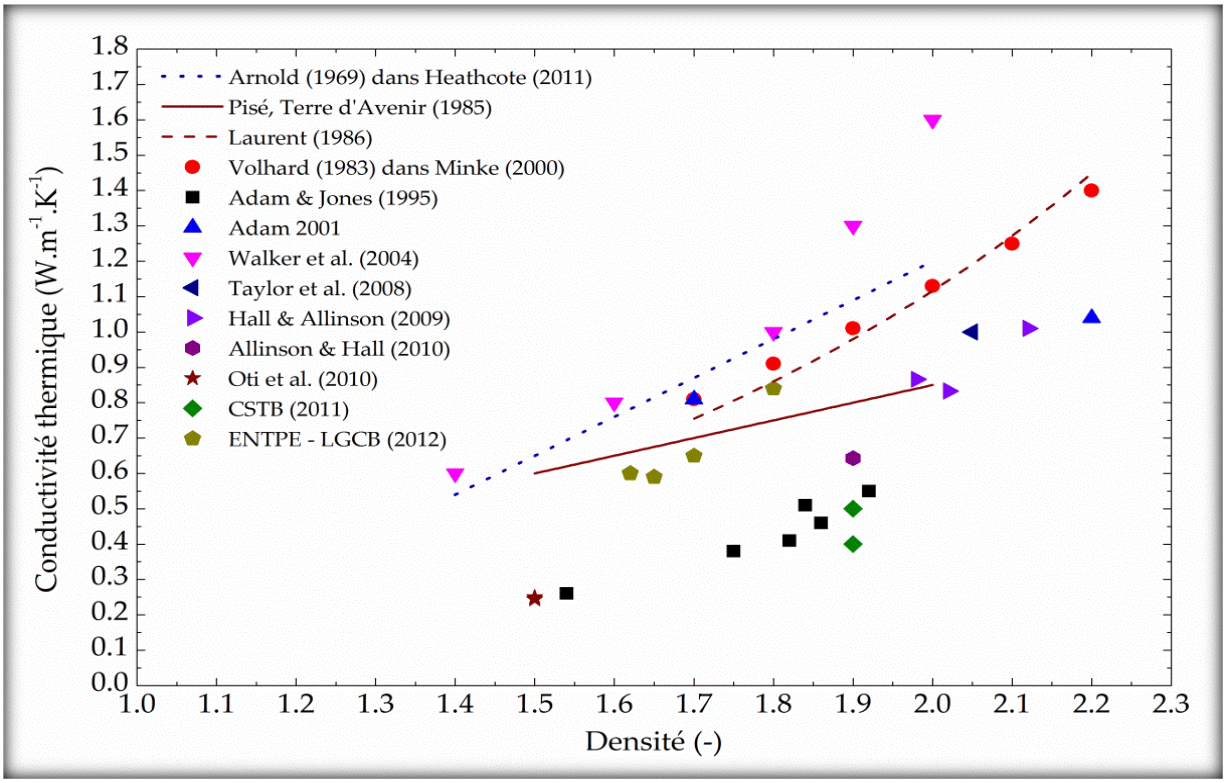


Figure. IV- 46 : Conductivité thermique en fonction de la densité du matériau terre à l'état sec, Source :: (Adam and Jones, 1995; Adam, 2001; Allinson and Hall, 2010; Arnold, 1969; CSTB, 2011; Hall and Allinson, 2009c; Heathcote, 2011; Laurent, 1986; Minke, 2000; Oti et al., 2010; Pisé terre D'avenir (association loi 1901), 1985; Taylor et al., 2008; Volhard, 1983; Walker et al., 2004)

Cette Figure met en évidence qu'il est impossible de définir à l'avance une valeur unique de conductivité thermique pour le pisé, même en fonction de sa densité. Une mesure de la conductivité thermique est donc nécessaire à chaque étude [52].

De plus, comme on l'a observé précédemment, le pisé est un matériau capable d'adsorber et de désorber de l'eau. L'eau étant plus conductrice de la chaleur que les grains constituants le pisé, la conductivité thermique d'un pisé est proportionnelle à sa teneur en eau. C'est pourquoi, les essais ont été réalisés pour différentes teneurs en eau [52].

IV.8.4 Calcul de L'inertie dans un bâtiment

L'inertie thermique d'un bâtiment est sa capacité à emmagasiner puis à restituer la chaleur de manière diffuse. Plus l'inertie d'un bâtiment est forte, plus il se réchauffe et se refroidit lentement [53].

Cela permet d'obtenir un déphasage thermique (décalage dans le temps) par rapport aux températures extérieures : ainsi lorsqu'on chauffe une maison, les éléments à forte inertie (murs, dalles, ...) vont accumuler de la chaleur et vont ensuite la restituer pendant des heures, même si on coupe le système de chauffage [53].

Voici un exemple d'un écocentre réalisé par la pierre et matériau terre, les cinq éléments qui apportent de l'inertie à l'écocentre :

Total inertie du bâtiment = 66 tonnes

Figure. IV- 47 : Mur en pisé dans « Earth pavilion », Source : www.pierreetterre.org

IV.8.5 Test de déphasage d'un mur en pisé

Etude du comportement d'un mur à forte inertie en terre crue à l'écocentre

A Le contexte

Le système de chauffage est essentiellement un système passif, grâce à la façade sud entièrement vitrée. En complément, les panneaux solaires thermiques (10 m² en orientation sud et inclinaison 62°) chauffent de l'eau qui passe ensuite dans le mur en pisé. C'est un mur accumulateur chauffant/rafraîchissant [53].

B Le test

Le but de ces mesures est de comprendre et d'évaluer le temps de déphasage d'un mur en pisé et donc du matériau terre sous cette mise en œuvre spécifique [53].

C La méthode

Il y a une prise de température par des sondes situées dans le mur de masse à différents endroits ainsi qu'aux entrées et sortie d'eau. Le souhait est de regarder dans un premier temps sur un axe horizontal et un axe vertical pour voir les

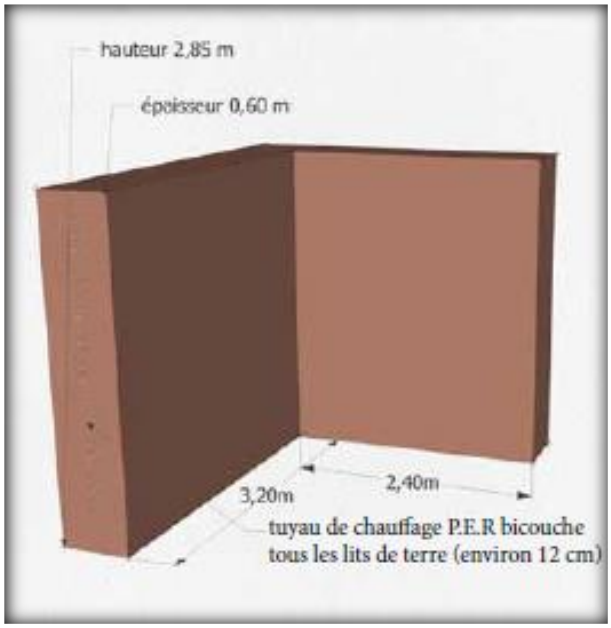


Figure. IV- 48 : Test du déphasage d'un mur en pisé dans « Earth pavilion », Source : Ecocentre Pierre et Terre - www.pierreetterre.org

variations. Il y a une prise de mesure toutes les 30 minutes pendant 4 mois dans un premier temps, qui sont analysées par un logiciel relié à l'installation [53].

D Détail de l'installation

Les sondes sont glissées dans des trous (passage des tiges filetées pour le montage des banches) [53].

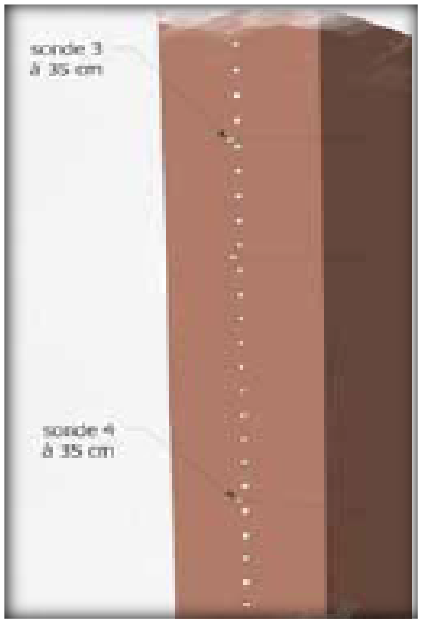


Figure IV.49
Sonde 1 : tuyau haut
Sonde 2 : tuyau bas
Sonde 3 : à 35 cm partie haute du mur
Sonde 4 : à 35 cm partie basse du

Figure. IV- 49 : Détail d'installation d'un mur en pisé dans « Earth pavilion », Source : Ecocentre Pierre et Terre - www.pierreetterre.org

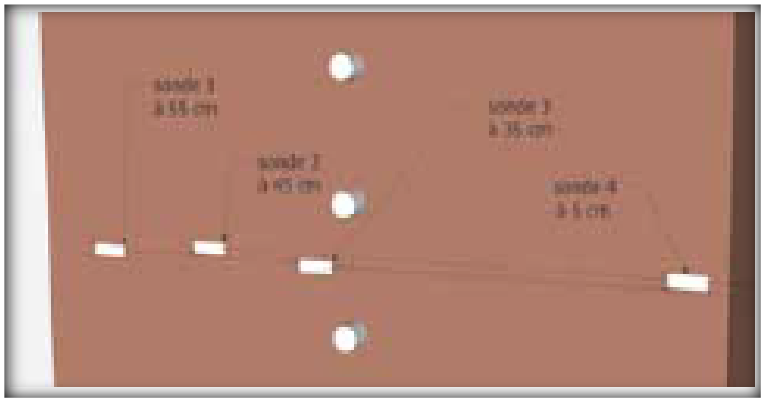


Figure VI.50
Sonde 1 : à 55 cm
Sonde 2 : à 45 cm
Sonde 3 : à 35 cm
Sonde 4 : à 5 cm

Figure. IV- 50 : Détail d'installation d'un mur en pisé dans « Earth pavilion », Source : Ecocentre Pierre et Terre - www.pierreetterre.org

IV.8.6 Résistance thermique ou Masse thermique ?

Pendant que les règles thermiques actuelles évaluent la performance thermique d'un matériau par sa résistance thermique, les résultats des études présentés au-dessus montrent que l'évaluation de la performance thermique du pisé par une résistance thermique simple n'est pas suffisante. Plusieurs auteurs ont proposé l'utilisation de la masse thermique dans l'évaluation de la performance thermique d'un matériau croyant que ce paramètre est décisif pour le matériau terre (par exemple Reardon et Baggs).

Pourtant, la performance de la masse thermique dépend forcément du climat de la localité du bâtiment. La masse thermique présente significativement son rôle quand pendant une période de 24 heures, l'extrémité inférieure du cycle de la température ambiante est inférieure à celle de la température intérieure, et en même temps, l'extrémité supérieure du cycle de la température ambiante est aussi supérieure à celle de la température intérieure (Wilson). Donc, la masse thermique apporte un bénéfice maximal dans le cas d'un climat tempéré qui a une température élevée en journée autour la température intérieure d´désirée. Dans les zones où la température ambiante pendant la période de 24 heures est toujours inférieure à la température intérieure, la masse thermique n'offre pas de bénéfice (Wilson).

On sait bien que la grande masse thermique joue un rôle positif dans les constructions, pourtant, ce rôle change suivant ou le bâtiment se situe. Aujourd'hui, on n'a pas encore des outils efficaces

pour calculer exactement la performance de la masse thermique (Wilson). Il est donc difficile d'intégrer la masse thermique dans les standards.

IV.8.7 Ajout des couches d'isolation thermique

Puisqu'il est difficile d'intégrer la masse thermique dans les standards, les règlements thermiques actuels utilisent la résistance thermique comme le seul critère pour évaluer la performance thermique du matériau. Dans ce contexte, plusieurs études ont été mises en place pour chercher des solutions pour que le matériau terre et le pisé satisfassent aux règlements thermiques.

Les études de Goodhew et Griffths, de Hall et Allinson, de Parra-Saldivar et Batty, de Mendonca montrent qu'avec des installations convenables d'isolation thermique, des murs en terre et en pisé peuvent satisfaire les demandes des règlements.

L'installation des couches d'isolation thermique augmente l'énergie consommée dans la phase de construction du bâtiment mais des études de Morel et al, Mendonca, montrent que malgré cette augmentation, la consommation de l'énergie dans la phase de construction des bâtiments en terre et en pisé reste encore très avantageuse par rapport aux bâtiments construits avec des matériaux conventionnels (réduction encore de l'ordre de 40-60%).

Donc, même dans le cas où l'on ne prend pas encore en compte la grande inertie thermique des murs en pisé, ces derniers restent très favorables dans la performance énergétique générale du bâtiment.

IV.8.8 Etudes du confort général des bâtiments en pisé

IV.8.8.1 Comparaison du confort entre une maison en pisé et une maison conventionnelle

Paul et Taylor en 2008 ont réalisé une comparaison du confort entre un bâtiment en pisé et un bâtiment conventionnel. Dans leur étude, un "bâtiment vert" ("green building") et un bâtiment "conventionnel" ont été l'objet d'une enquête. Le bâtiment "vert" a des murs externes et internes en pisé de 30cm d'épaisseur. Le bâtiment conventionnel a des murs externes en blocs d'isolation et ossature d'aluminium. Des questionnaires concernant l'esthétique, la sérénité, la lumière, l'acoustique, la ventilation, la température, l'humidité et la satisfaction générale ont permis de faire l'enquête. L'enquête s'est déroulée durant la période estivale [54].

Figure. IV- 51 : Constructions en pisé de terre (CSU), Source : Mémoire du Magister sur la terre un matériau de construction

Figure. IV- 52 : Construction conventionnelle (LTU), Source : Mémoire du Magister sur la terre un matériau de construction

Le résultat de l'étude a montré que la différence de l'évaluation des occupants pour ces 2 types de bâtiments n'était pas évidente, sauf que les habitants dans le bâtiment "vert" se sont sentis un peu plus "tiède", Figure 53 (colonne de "too cold" à "too hot"). La raison est que le système de climatisation dans le bâtiment-vert n'a pas été utilisé, ce qui conduit à une consommation d'énergie beaucoup plus faible par rapport à celle des bâtiments conventionnels, Figure 53 :

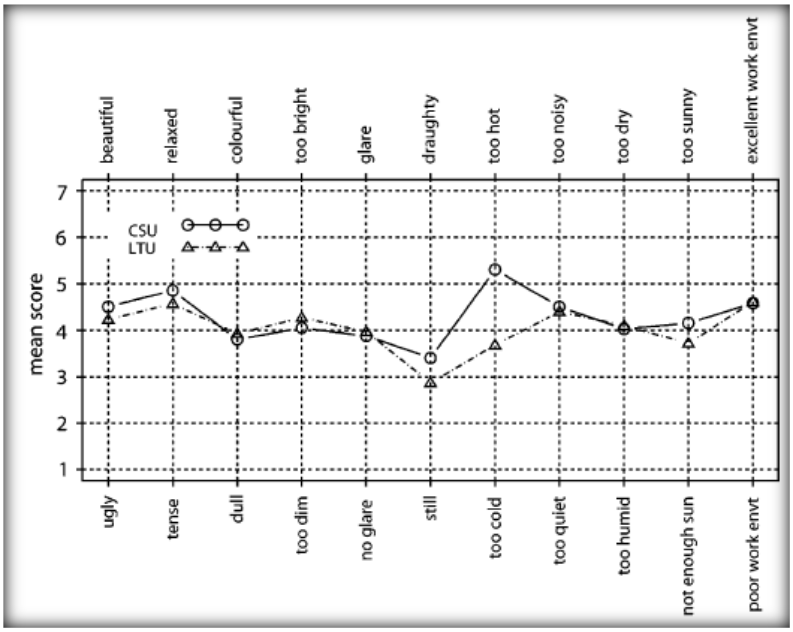


Figure. IV- 53 : Etude de Taylor et Luther, Source : Mémoire sur la stabilité des structures en pisé, page 44

L'étude de Paul et Taylor n'a pas montré une différence significative des critères de confort entre le bâtiment "vert" et le bâtiment conventionnel, sauf pour le cas des températures.

Les résultats de Paul et Taylor sont intéressants à consulter mais peut-être ils ne sont pas encore représentatifs pour ces deux types de bâtiment, "vert" et "conventionnel", car l'étude a été réalisée sur un seul bâtiment "vert" et un bâtiment "conventionnel". En plus, un changement des détails d'un bâtiment à l'autre peut modifier les résultats obtenus (type de fenêtres, ...). De plus, le pisé utilisé avec 30 cm d'épaisseur n'est pas le cas des pisés traditionnels en Europe.

Source d'énergie	Bâtiments conventionnels	Bâtiments verts
Electricité	321	35
Gaz naturel	101	0
Total	422	35

Tableau. IV- 3 : Résultats de Paul et Taylor [119] de la consommation d'énergie (en MJ/m2) en été des bâtiments "vert" et conventionnels, Source : Mémoire sur la stabilité des structures en pisé, page 45

IV.8.8.2 Etude de Taylor et Luther

Pour le sujet de la performance du confort thermique, les chercheurs P. Taylor, M.B. Luther ont entrepris une étude sur un bâtiment existant en pisé de terre, La recherche est comme une réponse à la polémique récente concernant la convenance de Construction en pisé de terre, comme enveloppe efficace de bâtiment en vue de sa performance thermique [53].

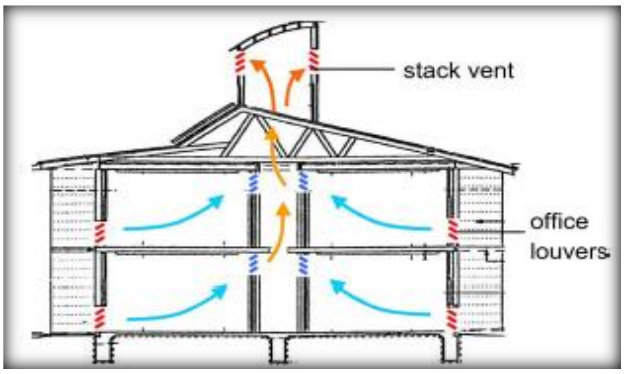


Figure. IV- 54 : Coupe sur le bâtiment montrant une ventilation naturelle, Source : P. Taylor, M.B. Luther Aout 2003, ELSEVIER

La grande masse de ces murs et le retard thermique associé dans le transfert thermique de l'extérieur à l'intérieur peut avoir comme conséquence la performance d'une manière satisfaisante des murs dans un bâtiment qui est seulement occupé pendant des heures de travail.

Les murs en pisé de terre, internes, peuvent agir comme des modérateurs de la hausse de températures journalières et contribuent à réaliser une température confortable dans le bâtiment [53].

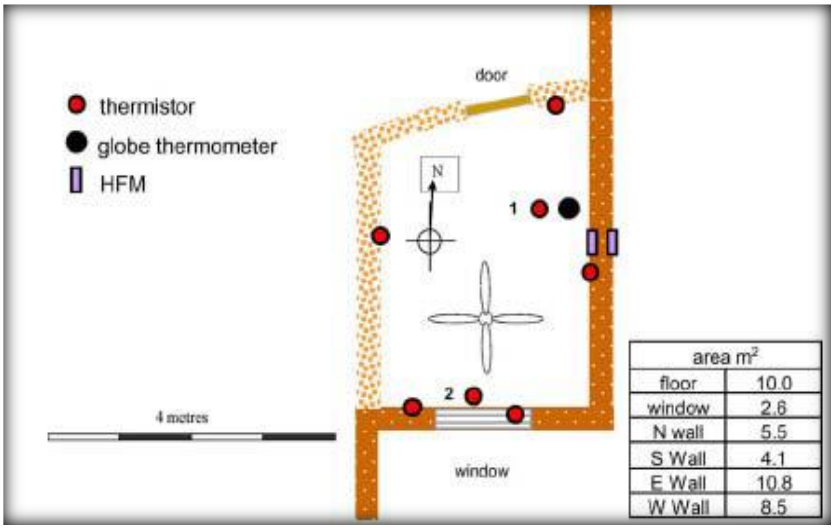


Figure. IV- 55 : Schéma montrant les points de mesures, Source : P. Taylor, M.B. Luther Aout 2003, ELSEVIER

Les calculs de transfert d'énergie pendant des heures occupées indiquent que la charge thermique du mur Est, était la même que la charge thermique d'infiltration, mais elle était seulement de 25% de la charge thermique diffuse de rayonnement. Le mur Ouest interne a absorbé autant de chaleur que le mur Est a émis. Ces Données ont démontrées que le mur Est retarde le matin le rayonnement transmis à la surface du mur intérieur jusqu' au soir [53].

La chaleur a été transférée par les murs à l'espace du bureau par convection et rayonnement.

Les murs externes se sont avérés peu transmissibles de chaleur absorbée par les murs internes pendant ce temps. Le rayonnement diffus de ciel transmis par la fenêtre et l'infiltration sont tous deux, probablement facteurs importants dans la charge thermique d'été. La performance thermique des murs en pisé de terre dans ce climat et à ce moment d'année a pu probablement être améliorée avec un refroidissement de nuit plus efficace. L'analyse a, aussi, montrée la grande capacité thermique des murs de terre et la nécessité d'améliorer leurs propriétés thermiques au-dessus de celle prévu par considération de R - seules valeurs [53].

IV.8.8.3 Etude de l'architype

L'entreprise Architype a construit un système complexe avec plusieurs pavillons, chaque pavillon est construit avec un matériau différent (Figure IV.56) : de la terre (”earth pavilion”) ; de la paille (”straw pavilion”) ; du bois (”timber pavilion”) ; des briques cuites (”clay bloc pavilion”) et du métal (”metal pavilion”) [55].

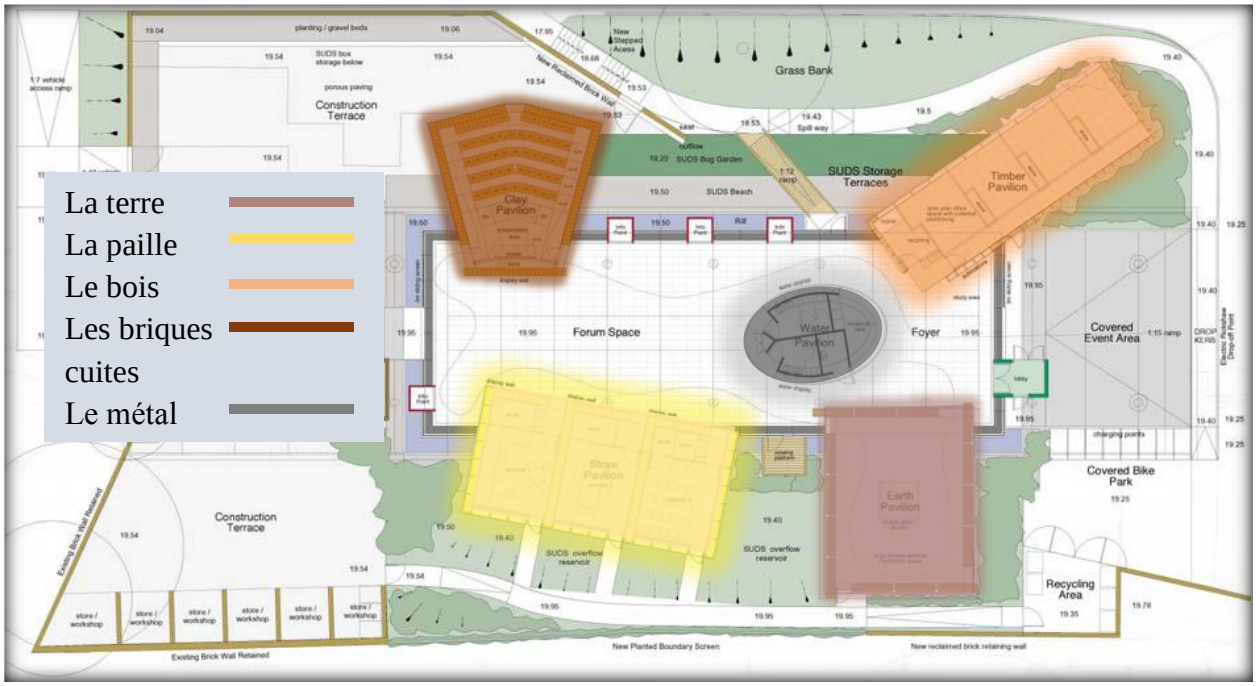


Figure. IV- 56 : Etude de Taylor et Luther, Source : Mémoire sur la stabilité des structures en pisé, page 44

Le pavillon de terre (”earth pavilion”) est exploité en magasin. Plusieurs techniques ont été mises en œuvre : du pisé, des blocs de terre compressée et de la bauge. La Figure IV.57 illustre des murs en pisé dans ce pavillon [55].

Le changement des conditions environnementales dans chaque pavillon a été enregistré par des instruments installés. Des résultats montrent que le pavillon du matériau terre présente une humidité constante et une bonne acoustique. En plus, grâce à une masse thermique modérée de ce matériau en une occupation élevée (magasin), une faible consommation d’´énergie a été observée.

Figure. IV- 57 : Mur en pisé dans « Earth pavilion », Source : Mémoire sur la stabilité des structures en pisé, page 46

IV.8.9 Les caractéristiques thermiques du pisé

Entre 1982 et 1984 une étude menée par J.Jeannet et G.Pollet a été mise en place pour déterminer les caractéristiques thermiques du pisé. L'étude consistait à comparer le comportement de deux petites constructions identiques en volumétrie, ayant les mêmes conditions d'orientation et de climat. Trois campagnes de mesures ont été mises en place : deux campagnes hivernales de 1982 /1983 et 1983/1984 (avec un système de chauffage pour simuler une présence humaine) et une campagne estivale de 1983 pour mesurer l'adaptabilité de ce matériau pour les climats chauds. Nous nous intéresserons ici uniquement aux résultats de la campagne estivale car notre étude a pour objet les climats chauds et arides. La première construction est constituée de murs agglomérés de béton de 20 cm avec une isolation intérieure comprenant 4 cm de plaques de polystyrène expansé. La deuxième construction est réalisée en murs de pisé de 50 cm d'épaisseur sans ajout d'isolation. Les fondations, la toiture, les ouvertures et l'isolation planché et plafond sont identiques dans les deux cas. « Vingt-cinq thermocouples « cuivre-constantan » sont reliés à une centrale de mesures, qui enregistre toutes les heures les températures. Les murs nord et sud des deux cellules sont instrumentés, les deux ambiances internes ainsi que la température extérieure sont aussi relevées. » (Jeannet et al, 1986) [56].

Températures	Pisé	Agglo	Extérieure
Maximum	25˚C	33˚C	35˚C
Minimum	19˚C	17˚C	09˚C
Amplitude	06˚C	16˚C	26˚C

Tableau. IV- 4 : Détermination des caractéristiques thermiques du Pisé, résultats de la campagne d'été 1983 (Jeannet et al, 1986), Source : Thèse de doctorat sur l'architecture en terre crue dans la vallée du Jourdain, Mlle Rania Daher

Ces résultats mettent en évidence le confort thermique interne qu'apporte la construction en pisé par rapport à la construction en agglo. Dans la construction en pisé, lorsque la température extérieure atteint son maximum de 35 degrés, la température intérieure est à 25 degrés soit dix degrés de moins. La construction en agglo est à ce moment à 33 degrés, à peu près l'équivalent de la température extérieure. Il y a 6 degrés d'amplitude pour le pisé ce qui permet d'avoir une température intérieure qui reste relativement stable. Cette étude a été effectuée sans système de ventilation, elle peut être retenue pour les climats tempérés et améliorée pour les climats chauds en y intégrant des systèmes de ventilation naturelle [56].

IV.9 Discussions sur des études des projets sur site

Le premier avantage de cette méthode est que nous pouvons évaluer un confort général du bâtiment, non seulement le confort thermique mais encore le confort hygrométrique, la qualité d'air, ... Ensuite, le confort peut être évalué directement par ce que les habitants ressentent et il est donc plus réaliste. Enfin, nous pouvons aussi regarder la consommation d'énergie à partir des factures énergétiques des habitants (l'électricité, le gaz). Mais par contre, l'inconvénient de cette méthode est que les résultats dépendent de plusieurs facteurs comme : le type du bâtiment suivi (bureau de travail ou maison, des matériaux, ...) ; la conception générale du bâtiment (type de chauffage, de ventilation, de fenêtre, ...) ; l'âge des habitants ; le sexe; ... En plus, la consommation énergétique dépend aussi du besoin de chacun, de l'habitude, etc. de chaque habitant et ce facteur n'est pas objectif.

IV.10 Synthèse du chapitre

Dans ce chapitre, l'étude sur le confort thermique du pisé a été effectuée pour déterminer le facteur responsable qui fournit ce type de confort dans les habitations en pisé à travers deux volets : le premier, faire des enquêtes réelles sur des habitations à travers des études. Parmi ces études concernant la performance du pisé et sa qualité thermique sont : CSIRO, Pignal, Meunier, Mortensen Taylor et Luther. Le deuxième, faire des essais en laboratoire sur des échantillons de petit échelle à grande échelle. Alors l'étude du confort thermique du pisé passer de l'échelle inférieure à l'échelle supérieure.

Ce matériau se produisent une série de transferts qualifiés «thermiques», alors pour rester comme un matériau de construction favorable, il doit satisfaire en même temps des critères : un confort thermique satisfaisant c'est à dire une performance thermique satisfaisante pour minimiser la consommation énergétique dans la circonstance de l'épuisement des ressources naturelles.

A travers ce chapitre, on ouvre les portes aux générations futures de connaitre les aspects de ce éco-matériau, et de faire à long terme des essais ou des études sur le confort thermique des habitations réelles, et pourquoi pas de préciser le fournisseur du confort thermique du pisé.

Conclusion générale

Les projets de revalorisation de l'architecture de terre crue à travers le monde nous ont permis de voir l'intérêt que recèle cette architecture, notamment dans le contexte actuel de développement durable. La revalorisation de l'architecture de terre permet aussi de préserver le patrimoine bâti ancien en terre ainsi que les particularités culturelles régionales des peuples qui sont aujourd'hui menacées de disparition.

Pour le cas de l'Algérie, les expériences de revalorisation de l'architecture de terre crue n'ont pas réussi malgré les améliorations apportées au matériau terre, c'est l'idée de progrès qui rejette tout ce qui est ancien ou traditionnel. Les actions de revalorisation de l'architecture de terre s'affrontent à de nombreux obstacles, d'ordre psychologique, économique, et réglementaire.

Les programmes de développement ne sont pas tentés par les avantages que représente l'architecture de terre. c'est dans cette optique que s'inscrit l'idée de la conception d'un centre de formation en architecture de terre construit en pisé dans le but d'établir un projet qui met en équilibre et qui respecte à la fois l'homme, son environnement et sa culture.

Le pisé de terre mis en œuvre dans le passé nous montre donc la voix d'une solution contemporaine. Alors, Lui donner un statut patrimonial et le protéger, c'est reconnaître ses qualités et les projeter dans l'avenir. Par le présent travail, nous avons exploré cette technique ancestrale de construction, nous avons pu voir que les avantages de l'architecture de terre sont indéniables et suscitent son retour dans le domaine du bâtiment à travers le monde depuis le début des années quatre-vingt, et que les obstacles d'ordre techniques liés au matériau ou bien aux procédés de productions ne sont plus évoqué pour s'opposer aux projets de revalorisation de l'architecture de terre. Cependant, l'architecture de terre pose le problème de la perte du savoir-faire et la disparition de la majorité des mises en œuvre traditionnelles locales.

En rapport avec le contexte, l'étude morphologique du ksar Ain Madhi nous a aidés à faire une maitrise des paradoxes qui se base sur un projet qui prit en considération les paramètres du contexte locale et qui s'adapte facilement aux exigences modernes, dans cette même longueur d'onde la revue bibliographique menée tente à explorer et prouver que le matériau pisé et ses qualités physiques de la résistance et de la durabilité ne sont plus un obstacle, cependant, cette recherche a été complétée par un deuxième aspect qui est le confort thermique en montrant qu'Il assure confort et santé aux occupants durant toute la vie du bâtiment, ce matériau contribue à la diminution de l'impact environnemental du bâtiment dans l'ensemble de son cycle de vie, notamment en terme de maîtrise de l'énergie, et contribue à un développement local équitable. Il se présente aujourd'hui comme un «véritable matériau écologique » : inépuisable et recyclable, économe en énergie, à forte inertie thermique, aux propriétés acoustiques élevées, aux capacités d'assainissement de l'air, et aux grandes qualités esthétiques, s'intégrant bien au site et présentant des couleurs et des formes variées.

Ces deux aspects développés ne sont qu' une première contribution qui vise la préservation et la revalorisation du patrimoine bâti des ksour et leurs savoir –faire ancestrale , nous espérons donc par ce modeste travail mettre en relief toute la complexité qui se cache derrière ce matériau et sera une initiation dont plusieurs aspects peuvent être traités ultérieurement.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

[1] Mémoire de master 2 sur la Réhabilitation Durable Du patrimoine Bâti en terre crue cas d'étude Ksar De Tadjemout réalisé par LAROUI Imane, CHAOUI Lina.

[2] CRAterre, Hugo Houben et Hubert Guillaud, *Traité de construction en terre*, Marseille, Parenthèse, 2006, p. 360, (ISBN 978-2-86364-161-3).

[3] Jacky Jeannet, Gérard Pollet et Pascal Scarato, *Le Pisé : Patrimoine, Restauration, Technique d'avenir*, Nonette, Éditions CREER, 2006, p. 107, (ISBN 2-902894-33-3).

[4] Hubert Guillaud, Claire-Anne de Chazelles et Alain Klein (dir.), *Les constructions en terre massive : pisé et bauge. Actes de la table-ronde des 28-29 mai 2005, comprenant 19 articles. Échanges transdisciplinaires sur les constructions en terre crue*, Montpellier, Éditions de l'Espérou (École nationale supérieure d'architecture de Montpellier), 2007, p 328, (ISBN 978-2-912261-35-9).

[5] Jacques Gubler, « Le pisé sous l'œil des nations. Note sur la maçonnerie de terre crue en France, Prusse et Argovie », dans Collectif, *Points de vue, pour Philippe Junod*, Paris, L'Harmattan, 2003, p.137-152. Republié dans : Jacques Gubler, *Motions, émotions. Thèmes d'histoire et d'architecture*, Infolio, Gollion 2003, p. 111-128.

[6] BEAUD M., (2006), L'art de la thèse, Ed La découverte, Paris, 202p.

[7] OULEBSIR N., la construction du patrimoine en Algérie de la conquête au centenaire (1830-1930), thèse de doctorat, EHESS, Paris, 2000, p. 270

[8] Site d'Internet : http://www.anna-heringer.com/index.php?id=66.

[9] Site d'Internet :https://www.lafargeholcim-foundation.org/projects/training-center-for sustainable -construction-Marrakech-morocco.

[10] Site d'Internet : https://www.architectural-review.com/today/training-centre-for sustainability-by-anna-heringer-chwiter-morocco/8618621.article.

[11] Holcim awards11_ame_bronze.pdf.

[12] Site d'Internet : https://www.construction21.org/maroc/

[13] Site d'Internet : https://www.archdaily.com/770938/moroccan-pavilion-milan-expo-2015-kilo architectures.

[14] Site d'Internet : https://www.construction21.org/maroc/case-studies/ma/pavillon-du-royaume-du-maroc-a-loccasion-de-lexpo-universelle-2015-a-milan.html.

[15] Site d'Internet : https://www.medias24.com/ECONOMIE/ECONOMIE/151163-Milano-2015-le-pavillon-marocain-pour-sort-de-terre.html.

[16]Site d'Internet :http://ameditions.net/councours-architecture/le-pavillon-marocain-invente-le-pise-du-futur/.

[17] Site d'Internet : http://www.archimedia.ma/avis-paroles-dexperts/construction-durable-/20614-pavillon-du-maroc-milan-le-maroc-leve-le-voile-sur-son-architecture-.

[18] Site d'Internet : http://www.amush.org/pavillon-du-maroc-exposition-universelle-milan-2015/.

[19] www.meteoblue.com.

[20] www.tidjaniya.com.

[21] Touil Hamida.Revalorisation du patrimoine architecturale de la région d'Ain Madhi par la conception d'un complexe touristique, Cas d'étude effet de l'orientation des murs en pierre et en adobe utilisé en combinaison sur le temps de déphasage. (2016/2017).

[22] http://espritdepays.com/patrimoines-en-perigord/patrimoine-bati-du-perigord.

[23] http://sidielhadjaissa.over-blog.com/2016/09/les-jardins-de-ain-madhi-par-ahmed-bahri.html.

[24] Conception d'un centre de recherche Agro-pastoral durable A la ville de Djelfa

[25] Conception d'un Centre de Loisirs Scientifique Ecologique à Ghardaïa dans un climat chaud et aride Présenté par : ABID Ziane et ZADEM Zakaria.

[26] Site d'Internet : http://formation-cip.com/.

[27] Site d'Internet : http://viesdevilles.net/pvdv/664/creation_d_un_centre.

[28] www.universalis.fr/encyclopedie/jean-piaget/1-la-genese-du-projet/

[29]https://www.ensci.com/file_intranet/mastere.../projet_Alejandra_Pumar_Silveira.pdf.

[30] https://issuu.com/doc_aecc/docs/maroc_2004_manuel_conservation__ver.

[31] Les structures en pisé, (SADCSTAN TC 1/SC 5/CD SAZS 724), PDF).

[32] Travail de fin d'étude sur le Construire en terre crue réalisé par Jehanne Paulus, Université de Liège en 2014/2015, PDF.

[33] rammed earth construction, a comprehensive study, PDF.

[34] Structure bois lamellé-collé, PDF.

[35] Rénover et construire en pisé, PDF.

[36] Encyclopédie du bâtiment, V. 3, P : 5-2135.

[37] CRATERRE 2012: Caractéristiques mécaniques, thermiques et hygrométriques du Matériau terre crue bilan de la littérature.

[38] L. Fontaine, R. Anger, P. Doat, H. Houben, and H. Van-damme, Bâtir en terre: du grain de sable à l'architecture, 2009.

[39] Houben, H et al. (2006). *Traité de construction en terre.* 3ème ed. parenthèses.

[40] Bui.Q.B. (2008). *Stabilité des structures en pisé : durabilité, caractèrestiques mécaniques, thèse de doctorat,* Lyon : INSA.

[41] Guillaud, H. (2005). Histoire et évolution de la technique du pisé.

[42] Rauch, M. (2007). Earth house with european standard : A review of the project "rammed earth house". (I. Publishing, Éd.) *International symposium on earthen Structures*, pp. 45-52.

[43] CRATerre. (1987). *Marrakech 87 Habitat en terre.* Grenoble : CRATerre.

[44] Galerie Eureka & CRATerre. (2009). *Grains de batisseurs : la matière en grains, de la géologie à l'architecture.*

[45] Doat, P et al. (1983). *Construire en terre.* Paris: Alternative.

[46] Fathy, H. (1970). *Construire avec le peuple.* Paris: Jean Martineau.

[47] Hall, M. (2005). Assessing the environmental performance of stabilised rammed earth walls using a climatic simulation chamber. *construction and building materials*.

[48] LES STRUCTURES EN PISE, CODE DE PRATIQUE THC 03, ARSO, PDF.

[49] thèse de doctorat STABILITE DES STRUCTURES EN PISE : DURABILITE, CARACTERISTIQUES MECANIQUES réalisé par Mr. BUI Quoc-Bao, le 13 novembre 2008.

[50] Mémoire du Magister sur le Patrimoine architectural, entre technicité, confort et durabilité : Cas de la maison de L'Oukil du Sanctuaire de Sidi Boumediene réalisé par Mme BELAID née GHAFFOUR WAFA, le 03 Juillet 2014.

[51] Le Déphasage Thermique, Pour lutter contre la surchauffe ! PDF.

[52] Rénover et construire en pisé dans le parc naturel régional Livradois-Forez, PDF.

[53] La construction de L'écocentre Pierre et terre, PDF.

[54] THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE PARIS-SACLAY PREPAREE A L'UNIVERSITE VERSAILLES SAINT-QUENTIN EN YVELINES sur L'architecture en terre crue dans la vallée du Jourdain ; Une filière en reconstruction…temporaire réalisé par Mlle Rania Daher.

[55] Mesure du comportement hygrothermique du pisé Pierre-Antoine Chabriac, le 10 Déc. 2016.

[56] Mémoire du magister sur La terre un matériau de construction, une alternative pour une solution durable réalisé par Mr. BERREHAIL .Tahar, le 27 octobre 2009.

Introduction

Etat de l’art

Dimensions contextuelles

Dimensions conceptuelles

Aspect : Revue bibliographique sur la durabilité du matériau pisé

Aspect : Revue bibliographique sur le confort thermique du matériau pisé