REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT D'ARCHITECTURE

MEMOIRE DE MAGISTERE
SPECIALITE : ARCHITECTURE
OPTION : ARCHITECTURE ET DEVELOPPEMENT DURABLE

Thème :

Le pisé, un patrimoine à préserver et une technique à promouvoir, cas de MAATKAS.

Présenté par :
Madame Alioua Rachida

Devant le jury composé de

Mr HANNACHI NACEUR EDDINE	**Professeur**	**UMMTO**	**Président**
Mr DAHLI MOHAMED	**Maitre de conférences (A)**	**UMMTO**	**Rapporteur**
Mr NAIT DJOUDI Oulhadj	**Maitre de conférences (A)**	**UMMTO**	**Examinateur**
Mr AICHE BOUSSAD	**Maitre de conférences (B)**	**UMMTO**	**Examinateur**

Soutenu le

Remerciements :

J'exprime tout d'abord ma grande gratitude à mon directeur de mémoire, M. DAHLIMohamed, maitres de conférences classe A à l'UMMTO,qui m'a aidé, par son encadrement et sa disponibilité, à relever le défi d'un sujet vaste et audacieux. Il m'a accordé sa pleine confiance et a été unvéritable partenaire dans des échanges d'idées très fructueux et stimulant pour mon travail.

J'adresse également mes remerciements à monsieur Hannachi Nacer Eddine pour avoir accepté de présider le jury de cette soutenance et à Mr NAIT DJOUDI Oulhadj et Aiche Boussad qui ont bien voulu accepter d'examiner ce travail de recherche.

Je tiens également à remercier tous mes collègues et amis (es) du département d'architecture : CHERNAI Samia, BALOUL Nadia, BOUKHALFA Karima, BELKHAMSSA Belkacem RASSOUL Hocine, BOUTIBA Ratiba, TOUBAL Remdhane, LARID Faiza et tout ce qui m'ontaidé a concrétisé ce travail, sans oublier les ingénieurs du CNERIB.

Comment oublier le personnel de l'APC de Maatkas à leur tête le P/APC, Mme HASSANI Ifriqiya, toutes les associations des villages et les habitants de Maatkas pour leur chaleureux accueil.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail de près comme de loin sans oublier GACEM Badreddine et FADLI Yacine.

Dédicace

À ma mère…

Résumé :……

La terre, crue ou cuite constitue l'un des premiers matériaux de construction que l'Homme a utilisé pour construire ses habitations. En effet son emploi s'est généralisé dans le monde sous différentes formes et techniques (briques pour la terre cuite, adobe, banco, torchis, bauge et pisé pour la terre crue). Ainsi, c'est plus de 100 sites qui sont classés comme patrimoine mondiale de l'UNESCO, passant de la simple demeure au plus spectaculaires tel que la muraille de chine. La présence et persistance de ces témoins du passé nous renvoi à la problématique de ces techniques de construction.

Le pisé, l'une de ces techniques est une tradition d'origine punique au Maghreb, connu sous le nom de *Tobiya,* notamment en Kabylie, qui par son patrimoine architectural, possède un gisement non négligeable en termes de constructions en pisé, mais, qui, de nos jours, sont dans un état de vétusté et d'insalubrité très avancé. Cet état de fait est dû à plusieurs facteurs physico chimiques et l'adoption de nouvelles pratiques économique et sociales.

Après notre visite d'investigation à la commune de MAATKAS, située à 20km du chef-lieu de **Tizi Ouzou**, nous avons pris conscience de ce patrimoine, aujourd'hui, en péril, un échantillon de région qui transforme « le génie du lieu » en un véritable « génie de la terre », mélange d'équilibre entre l'argile, le sable et le gravier, un matériau disponible en quantité dans la région. Notre travail s'inscrit dans une perspective de patrimonialisation définie en trois étapes : un état des lieux et ce par un recensement et une identification des constructions dans leurs contexte historique, géologique et social, l'étude des caractéristiques de ces constructions en pisé et enfin nous tenterons de présenter les solutions adéquates en vue d'entretenir, de réhabiliter et mettre en valeur cette richesse en tant que patrimoine matériel et immatériel afin de le promouvoir et se le réapproprier pour un développement local.

Mots-clés :
Patrimoine architectural, origine, technique de construction en pisé, terre a pisé, pathologies, promotion, MAATKAS.

Summary:

The raw or cooked earth establishes one of the first building materials that the man used to build his houses Indeed, its use became widespread in the world under various forms and techniques (scrub for terra-cotta, adobe, banco, wallow and rammed earth for the raw ground. So, it's more than sites which are classified as world heritage of UNESCO, starting from the simple house to the most spectacular such as the wall of china

The presence and the presence and the persistence of the sweetness's of the past, we dismissal in the problem of the these techniques of construction, the rammed earth, one these techniques, is a tradition of punico origin in the Maghreb know under the name of *Tobiya*, in particular, in kabylia, witch for its architectural heritage, possesses a not insignificant deposit in terms of constructions in rammed earth, but, witch, nowadays, are in a very advanced state of dilapidation and in salubrity these established factis due to several physico chemical factors, and the adoption of new economic and social practices

after our investigation visit to the municipality of Maatkas, situated in 20 kms of the administrative center of tizi-ouzou, we became aware of the she heritage, today , in danger one sample of region witch transforms ' the genius of the ground', mix of balance between the clay, the sand and the gravel, the avaible materials in quantity in the region ; our works joins in a prospect of patrimonisation defined in three stages : a current situation and it by a census and an identification of the constructions in the historic, geologic and social context, the study of the characteristics of the constructins in the historic geologic and social context, the study of the characteristics of these constructions in rammed earth and finally we shall try to present the adequate solutions to maintain, rehabilitate and emphasize this wealth as material and immaterial heritage to promote it and regain control for a local development

Keywords:

Architectural heritage, rammed earth know-know, technique of construction rammed earth, Maatkas

SOMMAIRE

Remerciements ……..
Dédicaces ……..
Résumé …….
Abstract ……
ملخص …….

Chapitre introductif

Introduction générale …… ……1
Les intérêts de notre thématique……...……3
Problématique ……...……4
Hypothèses……...……5
Objectifs…….. ……...……5
Méthodologie de recherche…… ……...……6

Chapitre I : le pisé, entre technique et matériau.

Introduction…….……..……..8
I.1 Origine de la technique du pisé ……..9
I.1.1 Origine du terme …….....10
I.2. le matériau terre …….....11
I.2.1. Propriétés fondamentale des terres ……13
I.2.1.1 La texture/ la granulométrie ……..13
I.2.1.1.1. L'appréciation de la texture ……14
I.2.1.1.1. a Sur le terrain ……14
I.2.1.1. b En laboratoire ……..14
I.2.1.2. La plasticité ……....16
I.2.1.2.A. Limite de liquidité (Li) ……..17
I.2.1.2.B. Limite de plasticité (Lp) ……17

I.2.1.3 La cohésion…… 18
I.2.1.4 La compressibilité 18
I.2.2. L'action de l'eau :……..... 20
I.2.2.1. Les forces capillaires…….. 21
I.2.3. Le liant : Les argiles.....21
I.3. Définition de la terre a pisé……22
I.4. le procédé constructif du pisé ……..…22
I.4.1. La mise en œuvre du pisé …….…….23
I.4.2. Les outils ……..…….24
I.4.2.1. Les banches ……..……...25
I.4.2.2. Le fond de banche…….……..25
I.4.2.3. Les poteaux …….…...25
I.4.2.4. Les clés ……..…..26
I.4.2.5. Les coins ……...27
I.4.2.6. Les jougs ……....27
I.4.2.7. Le pisoir ……...28
I.5 Évolution du procédé constructif du pisé ……30
I.5.1 Les différents types de coffrages ……...30
I.5.1.1. Progression horizontale ……....31
I.5.1.2. Progression verticale……32
I.5.1.3. Progression intégrale ……..32
Conclusion ……..….34

Chapitre II : Évolution et identification des mises en œuvre de la technique du pisé.

Introduction……35
II.1. Le processus de mise en œuvre du pisé……35
II.1.1. Préparation de la terre……37
II.1.1.1. le tamisage……37
II.1.1.2. le gâchage……..37
II.1.1.3. la stabilisation ……...……...38
II.1.2. La mise en œuvre……38
II.2. La technique du pisé préfabriqué……40
II.2.1. Les étapes de fabrication des modules préfabriqués en pise ……..……42
II.3. Identification des éléments associés……43
II.3.1. Identification des éléments associés des structures verticales……43

II.3.1.1. Les fondation et soubassements ……...……43
II.3.1.2. Les murs ……...…45
II.3.1.2.a le chainage……...47
II.2.1.2.b les angles…….47
II.3.1.3. Les ouvertures……48
II.3.2. Identification des éléments associés des structures horizontales……..49
II.3.2.1. Les planchers ……49
II.3.2.2. Les couvertures……...49
II.4. Identification des procédés de mise en œuvre du pisé dans le bassin méditerranéen……..50
II.4.1. Les murs en pisé de terre……..58
II.4.2 Les murs calicastrada……58
II.4.3 Les murs valenciens ……..58
II.5. Identification des procédés de mise en œuvre du pisé en Algérie……...…60
Conclusion……..……65

Chapitre III : les pathologies et recommandations dans les constructions en pisé.

Introduction ……..……66
III.1Les causes de dégradation dans les constructions en pisé ……..…..……66
III.2. Action mécanique de l'eau sur la construction en pisé ……..66
III.2.1. Humidité d'origine occasionnelle ……..…….67
III.2.2. Le rejaillissement ……..…….68
III.2.3. Ruissellement ……69
III.3. Action de l'humidité ……..70
III.3.1. Les remontées capillaires……70
III.3.2. L'infiltration ……..…….71
III.3.3 La condensation.……72
III.4. Pathologies affectant les autres matériaux ……....73
III.4.1 Pathologies affectant les éléments en bois……73
III.4.2. Pathologies affectant les éléments structurels en maçonnerie de pierre ……74
III.5. Pathologies lies à la structure……74
III.5.1. Fissures structurelles ……..….75
III.5.2. Le flambement ……75
III.5.3. La décomposition du matériau pisé……76

III.6. Illustration des pathologies structurelles et recommandations……..….77
III.6.1. Pathologies des structures verticales …….…….77
III.6.1.1.Au niveau des fondations …….…….77
a) Recommandations pour une bonne conception des fondations…….77
III.6.1.2. Au niveau du soubassement ……..…79
a) Recommandations pour une bonne mise en œuvre des soubassements…80
- La masse d'usure ……80
- Le Parement à la base ……..…81
- Le soubassement ……..…81
III.6.1.3. Au niveau des murs en pisé……82
b) Les recommandations pour une bonne mise en œuvre de ces derniers…82
- Liaison des murs en pisé ……....82
- Les angles ……...84
- Le renforcement des murs en pisé ……...……85
III.6.1.4. Les ouvertures ……..…85
a) Le linteau ……86
b) Les appuis…….86
III.6.2. Pathologies des structures horizontales…….…...87
III.6.2.1. Les planchers ……...….87
a) Le poinçonnement ……..……88
b) La rotation ……..…….88
c) La condensation……..…….89
III.6.2.2. Les toitures …….…….89
III.7. Illustration des pathologies non structurelles et recommandations…….90
III.7.1. Au niveau des enduits ……90
a) L'effritement……90
b) L'infiltration ……91
c) Les salissures ……..……91
d) Les efflorescences ……..….91
e) Les fissures ……..…..91
III.8. Les sollicitations parasismiques ……..…92
III.8.1. Le parasismique des constructions en pisé…….92
a) L'approche théorique……..92
b) L'approche expérimentale …….……93

III.8.2. Renforcement des maisons en pisé…….93
III.8.2.1. Ossature en béton arme ……..……93
III.8.2.2. Renforcement des murs en pisé par des armatures en acier …...……93
III.8.2.3. Renforcement par un grillage souple à l'extérieur du mur ……..…...94
III.8.2.4. Les tirants (verticaux)……..…94
Conclusion ……..…96

Chapitre IV Maatkas entre diagnostic et promotion

Introduction……..…98
IV.1. Présentation de l'aire d'étude ……99
IV.2. Limite géographique ……..101
IV.3. Analyse du milieu physique de la commune de Maatkas…….……..101
IV.2.1.1 Le relief.……..101
IV.2.1.2. Climatologie ……..……...101
IV.2.1.3. La pluviométrie ……102
IV.2.1.4 Les températures …….……..102
IV.4. Géologie et géotechnique…… …...……102
IV.5. Typologie de l'architecture traditionnelle en pisé à Maatkas……103
IV.6. Les Dimension …… .....…….....104
IV.7. Typologie de cellules relevées à Maatkas……..…105
IV.7.1. La typologie originelle……..……106
IV.7.2. Le développement vertical……..……106
IV.7.2.1. Introduction de l'espace « *taghorfet* »……..106
IV.7.2.2. Introduction du l'espace groupé à base de « *Theghorfetine* »……..107
IV.7.2.3. Surélévation par ajout d'un niveau avec escalier extérieur ……108
. IV.7.3. Le développement horizontal ……..…108
IV.8. Les éléments associés des constructions en pisé à Maatkas entre diagnostic et remèdes.109
IV.8.1. Structure verticale……..……109
IV.8.1.1. Les fondations ……109
IV.8.1.2. Les soubassements ……..……110
IV.8.1.3. Les murs en pisé ……111
IV.8.1.1.a. Les murs en pisé de terre……..……111
IV.8.1.1.b. Les murs en pisé mélangés avec des fragments de pierre de schiste…113
IV.8.1.1.c. Les murs en pisé avec lit de pierre en schiste ……..…114

IV.8.1.4. Ouvertures ……116
IV.8.1.5. Les poutres et les piliers ……117
IV.8.2. Structure horizontale……..……119
IV.8.2.1. Les planchers ……119
IV.8.2.2. La toiture ……119
IV.8.3. Les revêtements ……121
IV.9. Transformations du model architectural vernaculaire kabyle à Maatkas……122
IV.9.1. Le facteur psychologique ……122
IV.9.2. Le facteur économique ……123
IV.9.3. Le facteur administratif et législatif ……124
Conclusion ……125

Conclusion générale……126
Références bibliographiques
Listes des figures et photos
Annexes

Chapitre introductif

Introduction générale

L'architecture vernaculaire constitue une véritable richesse patrimoniale tant sur le plan des modes constructifs que de la typologie architecturale ; « *ces fruits du savoir-faire ancestral local ou régional se présente aujourd'hui comme source d'information sur la diversité et l'originalité de la production architecturale* »[1].Son authenticité s'exprime dans la typologie du bâti et des modes d'organisations de l'espace bâti ainsi que par l'ingéniosité dans l'utilisation des matériaux *sous ses différentes physionomies et de mises en œuvre (pisé, adobe, enduit…[2])*.

La volonté de préserver ces architectures, en particulier celle en terre crue, découle du fait qu'il représente un gisement patrimonial important à l'échelle mondiale « *30% de la population mondiale, soit près de 1 500 000 000* habitants vivent *dans un habitat en terre* »[3] et par son ancienneté « depuis près de 10 000 ans que les hommes bâtissent des villes, la terre crue a été et demeure, à travers les traditions historiques et populaires »[4]. Aujourd'hui, elle suscite l'intérêt grandissant de la communauté scientifique internationale par l'établissement d'un fond documentaire avec les manuels d'identification en vu de sa réhabilitation et de sa restauration. Sur un autre registre, elle est le sujet des conférences et des colloques pour la vulgarisation de son importance en tant que patrimoine matériel et immatériel.

La technique du pisé est l'une des quatre méthodes de construction en terre crue avec l'adobe, le torchis et la bauge. Elle est également connue sous le nom de*tabiya* par les arabes ou encore sous le nom de la *tapia* en Espagne. Elle consiste à de la terre moulée dans des coffrages en bois et compactée avec des outils rudimentaire. Henri Terrasse écrit dans son ouvrage kasbahs berbères à propos de cette technique « tandis que la bâtisse de pierre traduit l'intelligence soumission de l'homme au sol, c'est la bâtisse en terre qui exprime un effort d'indépendance humaine, un essai de domination de la matière, une volonté d'une architecture »[5].

Contrairement à cette richesse, notre pays est resté en marge de cette effervescence et l'intérêt portés à ce patrimoine. Néanmoins, Sur le plan juridique, nous observons un sursaut notamment à travers la loi 90-04 qui a élargi la notion du patrimoine aux biens culturels matériels et immatériels, définissant les règles de sa protection et de sa mise en valeur ainsi que des sites archéologiques. L'établissement du plan de sauvegarde et de mise en valeur des secteurs

[1]RehabiMed. Réhabiliter l'architecture traditionnelle méditerranéenne. Colloque. Marseille 2005.p 21.
[2]Zarhouni S, Guillaud H. l'architecture de terre au Maroc. Editions ACR, 2001.p.08.
[3]Houben H, Guillaut H. traité de construction en terre. Editions parenthèses, Marseille 1989.p.16
[4] Idem
[5]Terrasse H, kasbahs berbères. Edition actes sud, centre jaques Berque, 2010.p.88

sauvegardés (PPSMVSS) vise à l'élaboration du plan de sauvegarde mettant en exergue les différentes cultures constructives traditionnelles.

L'Algérie recèle un nombre important de témoignages de cette technique en pisé. Contrairement à l'idée acquise que cette technique est propre aux régions à climat sec, le pisé couvre la totalité des régions d'Algérie du nord et du sud : Blida, Ténès, Constantine, Miliana, Cherchell, Bejaia, Tizi Ouzou, Ghardaïa, Timimoune… pour ne citer que celles-ci. Une série d'investigations révèle bien l'existence de cette production dans une architecture purement identitaire reflétant la pratique sociale de l'espace et du sol telle que la maison kabyle.

Le village kabyle, objet de plusieurs travaux de recherches principalement en sociologie, ont mis l'accent sur l'aspect sociétal et l'organisation spatiale mais l'aspect de la matière et du matériau terre ainsi que les cultures constructives restent faibles en termes de documentation. Toutefois, cette production ancestrale riche et diversifiée est laissée à l'abandon, le patrimoine terre s'est dégradé au fil du temps et a été remplacé par de nouveaux matériaux de constructions tels que le ciment et l'acier qui sont l'un des aspects des mutations dans nos villages traditionnels ignorant ainsi tout cachet culturel.

De nombreuses recherches développent son origine à partir de la théorie de la terre a pisé qui consiste à travailler en amont la matière et le matériau terre avec l'existence des gisements et des conditions favorables à son développement « la diversité des sols (telle terre est sableuse, telle autre est graveleuse ou argileuse) et la variété des techniques constructives impliquent une localisation de types de mise en œuvre » [6] et en aval son parcours historique par les échanges et apports culturels successifs entre les populations qui définissent l'origine de l'exportation et de l'adoption de cette technique « en effet à chaque époque l'architecture traditionnelle s'enrichit par des nouvelles techniques de fabrication et de mise en œuvre développer localement ou importer à une autre architecture voisine »[7].

Suite à notre recherche bibliographique sur la technique du pisé, nous avons pu faire ressortir des similitudes dans la mise en œuvre de ce matériau mais aussi des divergences quant à l'association avec d'autres matériaux tels que la pierre et la terre cuite selon les régions. La maitrise des divergences dans les techniques constructives est très importante non seulement dans les opérations de restauration de ce patrimoine dit « mineur », mais dans la reconquête et la

[6]Zarhouni S, Guillaud H. l'architecture de terre au Maroc. Editions ACR, 2001.p.10.
[7]RehabiMed. Réhabiliter l'architecture traditionnelle méditerranéenne. Colloque. Marseille 2005.p 21.

réappropriation des techniques ancestrales vecteurs des identités locales afin de bannir à jamais l'idée d'une « architecture des pauvres » reflet de la misère des populations.

Après le constat alarmant, établi sur le village kabyle de Maatkas, au vu de l'état dans lequel se trouve ce patrimoine architectural, délaissé et abandonné, la question de sa conservation est un sujet très partagé. En effet, ce qui est considéré comme un patrimoine pour certain ne l'est pas forcement pour les autres notamment des riverains qui le rattache aux conditions de vie de l'époque , ceci nous renvoi à cerner la notion du patrimoine et des éléments qui le constituent en définissant les valeurs et les éléments à transmettre pour éviter les solutions utopistes qui accentuent la rupture entre les besoins et les attentes des populations villageoise.

Les intérêts de notre thématique

L'intérêt de notre recherche découle en premier lieu de la réalité dans lequel se trouve ce patrimoine ancestral, de son abandon mais aussi pour tout ce que représente ce patrimoine architectural en pisé, chargé de beaucoup de potentiel pouvant apporter des solutions radicales aux crises et problèmes de notre époque et de nos régions. Une époque caractérisée par l'uniformisation du paysages et d'une architecture énergivore et ce parallèlement à l'épuisement des ressources naturelles non renouvelables. Cependant, le développement de cette filière se heurte à de nombreux obstacles, principalement d'ordre psychologique qui rejette cette architecture en pisé pour être synonyme de précarité de pauvreté et de sous-développement.

De plus, la technique du pisé fut utilisée pour la construction depuis des siècles, elle était très répandue sur tous les territoires pour se retrouver de nos jours cantonnée dans les zones rurales[8]. Aujourd'hui, surtout dans les pays industrialisés ont développé non seulement les techniques constructives rattachées au matériau terre mais aussi ont pu répondre et sensibiliser leur population aux intérêts qu'offrent les systèmes constructifs à base du matériau terre, qui présente de nombreux avantages sur bien des plans

1. Au plan environnemental

La revalorisation de l'architecture en pisé relance la relation et le dialogue entre l'Homme et son environnement architectural représenté par les volumes, les formes et des pratiques issues de sa tradition respectueuse de son échelle humaine. Ces constructions produisent très peu de

[8]Jacques Mullender, Des architectures de terre ou l'avenir d'une tradition millénaire, Centre George Pompidou 1982 P5.

pollution pendant tout leur cycle de vie. Les constructions en pisé ne demandent pas d'autres matériaux d'entretien ou de traitement. Par ailleurs, ces constructions présentent un atout majeur à savoir leur réutilisation en fin de vie ou de retrouver leur état originel, contrairement aux matériaux nouveaux qui sont non renouvelables. Il est aussi à noter que les productions en pisé ne consomme que très peu d'énergie et quelles sont l'émanation de leur environnement.

2. Au plan socio-économique

L'intérêt économique constitue indéniablement l'aspect le plus important que peut représenter la revalorisation de l'architecture en pisé et mettant en valeur sur :

- Les faibles coûts des réalisations des constructions en pisé ;
- Vaste gamme de production architecturale, qui peut englober le logement et/ou autres équipements.
- A la politique de l'emploi qui peut à travers la revalorisation de cette technique permettra d'absorber le chômage et d'amélioré les conditions de vie à l'échelle locale.

Problématique

Le patrimoine en pisé reste mal documenté et en déperdition, en Algérie, rejeté par la société et traité d'architecture de pauvre et de misères. Il tente, toutefois, de perdurer dans le temps et dans un contexte qui le fragilise d'avantage, malgré la dynamique scientifique dont il fait l'objet ces dernières années.

L'expérience des autres pays tel que la France, l'Espagne et l'Italie en Europe, le Maroc, comme pays voisin, ont marqué l'évolution de la technique du pisé pour produire une architecture contemporaine et répondre à la dualité tradition/modernité. Cet aboutissement est le fruit d'un long processus et de parcours d'étude et de recherche que notre pays doit entreprendre pour arriver à un niveau appréciable de prise en charge de son patrimoine en pisé

Le village de Maatkas, objet de la présente recherche, nous interpelle à plus d'un titre. Les constructions en pisé qui constituent l'âme de toute cette région de Kabylie sont tombées en désuétude. L'abandon de cette typologie constructive ne peut être que néfaste et fatal pour le devenir architectural et paysager du village de Maatkas et représente une perte inestimable du patrimoine culturel de la région de la Kabylie.

Dans le but de mener une recherche traitant de la technique du pisé relative au village de Maatkas, notre cas d'étude, nous posons les questionnements de départ suivants :

- Quels sont les spécificités propres aux matériaux et à la technique du pisé ?
- Le progrès exponentiel des techniques constructives ont-elles eues une influence sur les constructions en terre réalisées avec la technique du pisé

.Comment promouvoir cette architecture en pisé à Maatkas pour un devenir durable et une pérennité identitaire ?

Hypothèses

En premier lieu l'abandon et la négligence de la technique du pisé en Algérie est probablement due à la méconnaissance de la technique et potentialités des structures en terre crue notamment le pisé ; la non maitrise de certaines caractéristiques de la terre crue ainsi qu'à la déperdition des savoirs faire constructifs traditionnels.

La politique nationale d'urbanisation qui soutient le modèle « d'uniformisation » parallèle à l'avènement de nouveaux matériaux comme le ciment est le soubassement de la mise à l'écart de ce patrimoine en pisé dans la région de Maatkas au détriment d'une évolution objective de notre savoir-faire ancestral.

Objectifs

L'objectif principal du présent travail de recherche est la reconquête de notre de patrimoine à travers l'exploration et la sauvegarde de l'architecture en pisé. Afin d'atteindre ce but nous avons défini des sous objectifs pour mieux cerner les différents angles que peu englober ce patrimoine en pisé notamment dans la région de Maatkas. Ces derniers se déclinent comme suit :

- Explorer l'architecture en pisé à travers la mise en lumière des caractéristiques des matériaux auxquels fait appel la technique du pisé ;

- Comprendre et Analyser l'ensemble des étapes par lesquelles passe une construction en pisé ;

- Identifier les pathologies pouvant affecter les constructions en pisé et proposer les recommandations nécessaires à même d'assurer une meilleure durabilité de ces ouvrages

- Proposer un plan de sauvegarde, de mise en valeur ainsi qu'une réhabilitation des constructions en pisé de la région de Maatkas comme support de promotion de cette technique du pisé.

Méthodologie de recherche

La méthodologie adoptée afin de concrétiser le présent travail de recherche, tout en s'inscrivant dans les objectifs tracés au départ, se présente en deux parties. :

La première partie : Elle consiste en une recherche bibliographique se rapportant à notre thématique. Ces ouvrages nous permettent de cerner les architectures en terre et plus particulièrement l'architecture en pisé. Malgré le nombre réduit de travaux ayant abordés la technique en pisé dans la région de Maatkas, nous avons puisé dans les ouvrages traitant du pisé à travers le monde à l'instar de publication de CRAterre pour ne citer que ces dernières.

Afin de constituer une base de données relative à l'usage de la technique du pisé à Maatkas, un travail in situ a été mené. Cette investigation nous permet de cerner les spécificités des constructions en pisé de la région tant sur le plan des matériaux que celui des outils utilisés (reconstitution des outils originels) pour la mise en œuvre de cette technique. Les particularités ainsi que les dispositions architecturales ancestrales ont été également développées

Structure du mémoire

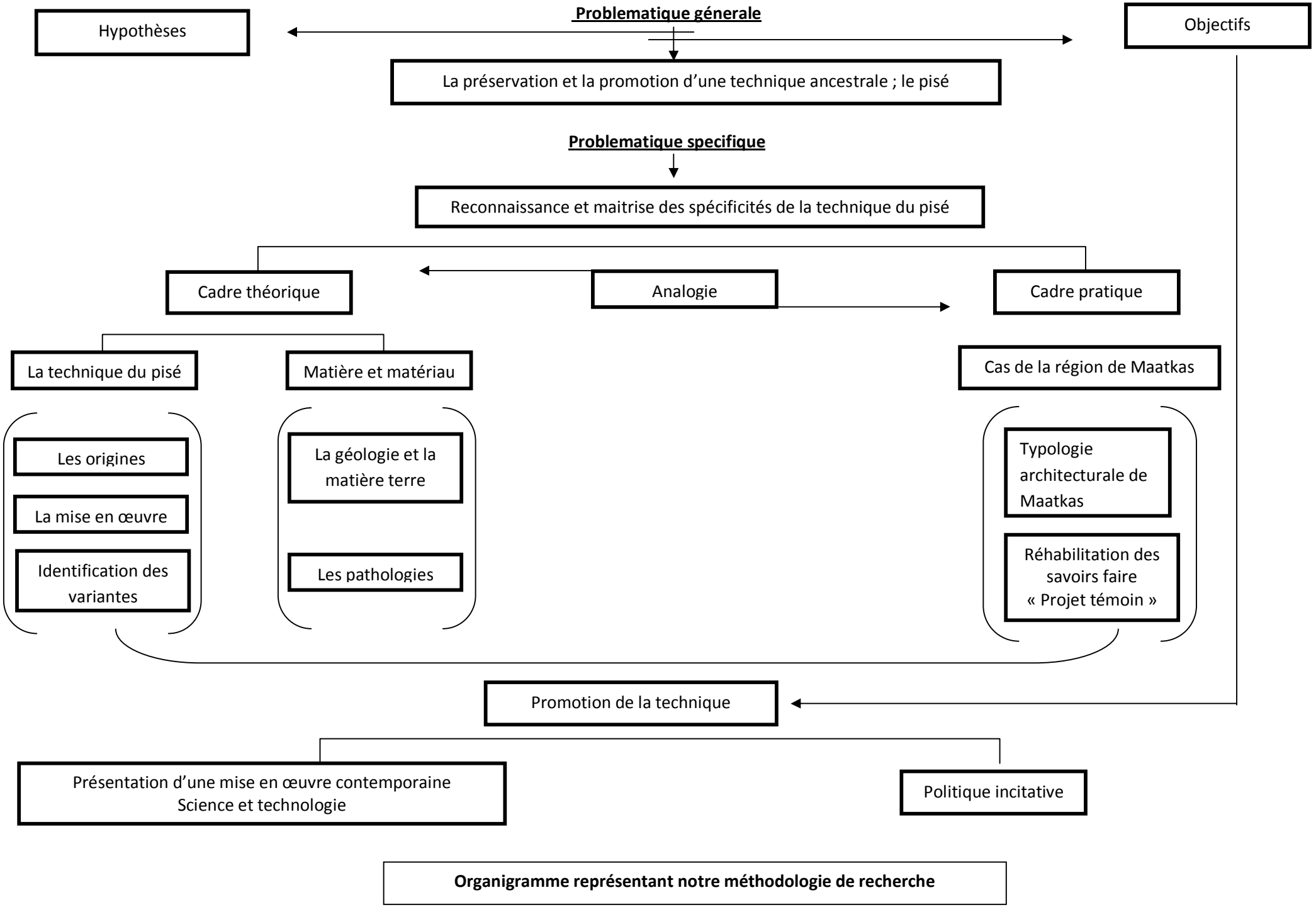
Notre mémoire comprend quatre chapitres

Le premier chapitre se rapporte à la définition et à la compréhension de notre thématique qui est une technique constructive appelée le pisé. Nous avons décrit le procédé constructif, ses caractéristiques notamment la mise en œuvre pour ensuite pouvoir développer la technique, l'aspect et la matière : la terre. Il sera aussi question de retracer les origines de la technique à travers le monde, pour appréhender les conditions de son apparition et sa diffusion. Lors de cette phase, nous avons aussi abordé la dualité ancienneté/ modernité a laquelle cette technique constructive se heurte, d'une part dans la mise en œuvre et d'autre part les politiques de sauvegarde, à travers des exemples des expériences des différents pays. Une lecture historique nous révèle la problématique liée à la terminologie désignant le procédé constructif, ce qui contribue à la circonscription du champ de sa naissance.

Le deuxième chapitre porte sur la présentation détaillée du processus de mise en œuvre de la technique du pisé à travers son identification dans le bassin méditerranéen d'abord par la suite cette technique rapportée dans différentes régions de notre pays

Le troisième chapitre s'intéresse à présenter les éléments associes aux constructions en pisé et aux pathologies pouvant affecter ces dernières et de définir les recommandations nécessaires pour éviter les désordres notamment ceux causés par l'humidité pour une meilleure pérennité dans le temps.

Le quatrième chapitre aborde la présentation des caractéristiques de la région et à la typologie architecturale de notre cas d'étude, Maatkas. Il permet de s'inscrire dans un contexte plus global. En second lieu, il sera question de proposer les assises nécessaires à une promotion de la technique, ce qui contribuera à la préservation de ce patrimoine et de l'identité de la région en abordant les trois piliers fondamentaux de toute politique de promotion et de développement à savoir l'aspect réglementaire, scientifique et économique.



Organigramme représentant notre méthodologie de recherche

Chapitre I :

Le pisé, entre technique et matériau.

Introduction

La reconnaissance d'un procédé constructif ancestral comme le pisé, n'est surement pas une tâche facile. Elle contribue à affiner l'histoire des savoir-faire et des cultures constructives en terre crue à travers le monde. Il est vrai que pour les périodes datant du XIIème au XIXème siècle, le travail a été plus facile contrairement aux périodes antérieures qui demeurent, à nos jours, mal documentées.

Loin de pouvoir dresser un historique exhaustif de la technique du pisé à travers le monde, les hypothèses des recherches tablent sur deux théories. La première, est celle du développement chronologique des techniques constructives[9] traduite par le génie du lieu, du matériau et du bâtisseur[10]. Cette dernière est confirmée par l'archéologie. On parle alors d' « *une évolution à partir de modes de construction en matériaux végétaux vers des solutions mixtes(torchis), avec un degré plus avancé de sédentarisation de l'Homme, vers la bauge, la brique crue et le pisé répondant à l'exigence d'un habitat plus solide et durable* »[11]. La deuxième orientation se penche sur les mouvements et les échanges des populations. *Claire-Anne de Chazelles*dit à ce sujet qu'*« Un examen attentif met en lumière des situations disparates à l'égard des traditions constructives. Certains peuples semblent être les dépositaires de savoir-faire séculaires qu'ils ont portés à un degré de perfection. D'autres, plus sensibles aux influences ou plus innovateurs, ont exploré des pistes liées à d'autres matériaux que la terre. Leurs cheminements sont moins linéaires.»*[12].

L'étude historique du procédé constructif du pisé ne constitue qu'un point de départ pour sa reconnaissance. Une présentation détaillée de la technique du pisé sera traitée ultérieurement, et dans l'objectif de cerner la technique et des différents outils nécessaires pour sa mise en œuvre.

Ce premier chapitre abordera la lecture rétrospective du matériau terre afin de procéder à l'identification de la technique du pisé. La maitrise approfondie des deux éléments fondamentaux, terre et l'eau, qui constituent la matrice de cette technique ainsi que l'interaction qu'ils entretiennent entre eux est plus qu'indispensable. Elle nous permettra d'affirmer ou d'infirmer la théorie de la terre à pisé.

[9] L'homme a travaillé la terre comme matériau de construction pour sa sédentarisation, il a appris à le façonner et à maitriser la résistance des éléments compacté à travers le temps.
[10]Houben.G, Guillaud.H, Traité de la construction en terre, Ed parenthèses, 2006, p 16.
[11]Zerhouni.S,Guillaud.H, Moulay.E, l'architecture de terre au Maroc, Ed ACR Edition, p18.
[12]Baudreu.D, Dechazelles.C.A, Guyonnet.F, « Maison médiévale du sud de la France, bâties en terre massive : état de la question », in M.S.A.M.F. hors-série 2008.

I.1. Origine de la technique du pisé

Le pisé est le plus récent des procédés constructif en terre crue. Néanmoins, son utilisation remonterait à très longtemps à travers le monde[13], « *Le pisé apparait plus récemment au cours de l'histoire et semble être assez logiquement dérivé de pratique de compactage pour la réalisation d'habitat en terrasses plates ou de plates-formes cylindrées recevant les structures*»[14]. Cependant son origine reste une énigme à nos jours. Les documents étayés, les fouilles archéologiques ainsi que les études historiographiques nous livrent plus d'informations sur la période néolithique. Il semblerait qu'à cette époque la bauge et le pisé, formés de terre dite massive ont été associés, mais ils représentent deux types de procédés bien différenciés.

Les sources littéraires romaines accréditent l'hypothèse selon laquelle les puniques d'Afrique du nord auraient inventé le pisé, *« on constate que c'est précisément dans ces régions de l'occident méditerranéen que la technique du pisé est restée la plus usitée entre le IIIème siècle avant la nouvelle ère et le XX siècle»*[15]. Le pisé a été vite adopté par les romains lors de la conquête de l'Afrique et de l'Hispanie comme en témoigne l'architecture des grandes agglomérations en Tunisie (*Thysdrus, Acholla*)[16] et en Espagne (*Ampurias*). Ensuite sa diffusion était élargie à toute l'Europe par les constructeurs romains.

Selon *Martin Sauvage*, c'est probablement en basse Mésopotamie, pendant la période néolithique, que les premières formes du pisé ont été retrouvées dans les sites archéologiques d'*Oueili*et *Djaffarabad*. Les travaux de fouille ont révélé l'existence de brique d'une taille allant jusqu'à 1m de long mais d'une épaisseur n'excédant pas les 20 cm, *« les fouilles pensent que ces briques auraient pu avoir été non pas modelées à la main mais pressées entre deux planches»*[17].Toutefois, c'est en Iran que le premier foyer du procédé a été retrouvé dans le site de *Choga Sefid* (VIIème- VIème millénaire), qui révéla des longueurs de banches pouvant atteindre 2.60m[18].

[13]Dali.A. étude de valorisation du patrimoine architectural de terre, cas de ksour dans le sud algérien. Mémoire de magistère. Université Mohamed kheider, Biskra. 2001.
[14]Zerhouni.S,Guillaud.H, Moulay.E, l'architecture de terre au Maroc, Op. Cite, p18.
[15]De Chazelles.C.A, Manuscrit auteur, ". « 1ra Conferenzamediterraneasul l'architetturadeTerracruda »,1st mediterraneanconference on earth architecture, Cagliari : Italie (2009)" MEDITERRA 2009.
[16] De Chazelles.C.A, « stabilité, disparition et fluctuation des traditions constructive en terre dans les pays méditerranéens », in MEDITERRA 2009, proceedings, EdicomEdizione, Monfalcon, Italie, pp139-150.
[17]M.sauvage, « les début de l'architecture en terre au proche orient », in MEDITERRA 2009, proceedings, EdicomEdizione, Monfalcone, Italie. P 189-198.
[18]idem

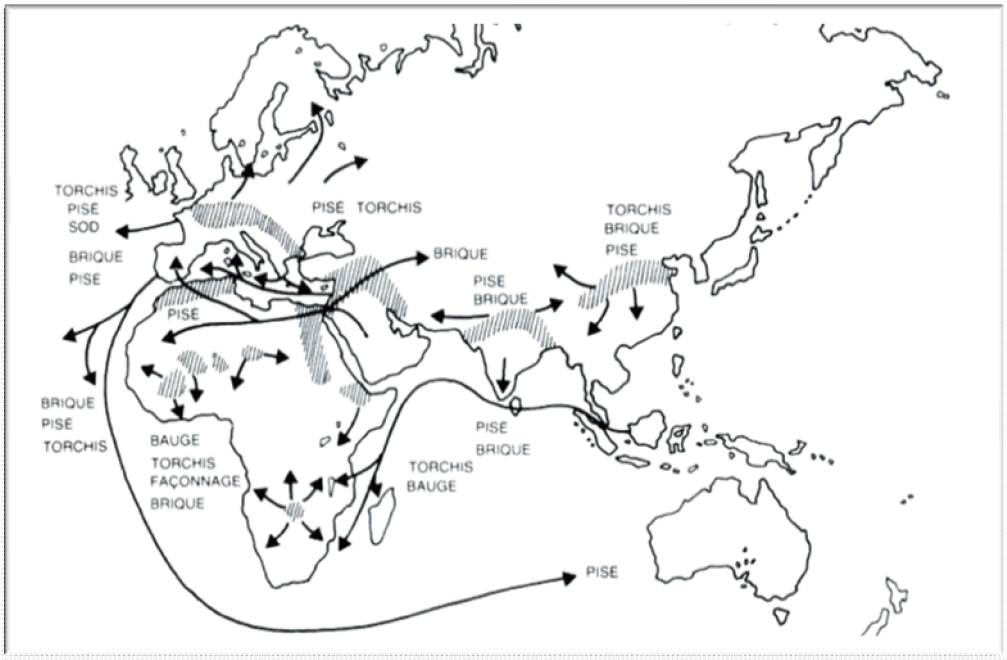


Figure I.1: Localisation et sens de propagation des architectures en terre crue. Source : CRAterre

I.1.1. Origine du terme *tâbiya*

Le terme *tâbiya* remonte à *Ibn Hawqal* Xème siècle [19] lors de description des remparts de la ville de Syrte. Mais c'est au XIVème siècle avec *Ibn Khaldoun* que fut donnée la définition la plus détaillée de la technique de la *Tâbiya.* Il a proposé une distinction entre le matériau terre et la technique de la mise en œuvre de ce matériau « *min turabtâbiya* »[20].Cette technique s'est généralisée au moyen âge dans l'occident musulman. Au départ, à travers l'architecture monumentale à vocation militaire (enceinte urbaine, forteresse…), civile (palais) puis religieuse avec les mosquées, au point de devenir l'un des traits caractéristiques de la culture matérielle de cette région du monde musulman[21].

Plus Récemment, l'étude menée par *Van Staevel,* à propos de l'usage du mot *Tâbiya*, émet l'hypothèse que le terme n'identifie ni le matériau terre ni une technique constructive mais plutôt un produit fini obtenu suite au façonnage d'un matériau naturel qui est la terre[22]. Le résultat de la mise en œuvre d'un ou plusieurs matériaux (ajout de la chaux par exemple) dans un coffrage. Il apparente l'idée que génère la *tâbiya* au mot français banchée. Mais, le terme finira par désigner le mur ou toute la construction, ce qui renvoie au produit fini.

[19]Géographe arabe et auteur d'un Livre de la configuration de la terre (Kitābṣūrat al-arḍ, éd. J. H. Kramers, Leyde, 1938 ; traduit, en français. G. Wiet, Configuration de la terre, Paris-Beyrouth, 1964) in Encyclopdiauniversalis.
[20]StaevelJ.P, « réflexion à propos de la nomenclature médiévale de l'architecture de terre en occident musulman : exemple de la tabiya » dans l'architecture de terre en méditerranée, de Mohammed Hammam.
[21]Ibn hawqal a parcouru l'Afrique du nord et l'Espagne entre 947 et 951, son ouvrage kitabsurat al ard fut achevé vers 988.
[22].StaevelJ.P, « réflexion à propos de la nomenclature médiévale de l'architecture de terre en occident musulman.. ».Op. Cité.

Par contre, l'origine berbère de ce terme est vite écartée, absence de matériaux linguistiques anciens. Il écarte aussi l'origine hispano latine vu que l'utilisation du terme *Tâbiya* chez les arabes est antérieure à celui de *Tapia en Espagne.*

Au Maghreb, Plusieurs termes sont employés pour designer la *Tâbiya* à savoir *Tabit*, *Tabut* ou *Tadabit.* Cette situation est identique en Espagne où le mot *tapia,* retrouvé dans les sources chrétiennes à partir du XIIIeme siècle, est associé à d'autres termes pour définir une variété de *Tapia* à savoir la *Tapiavalenciana, la tapia real, la tapiacalicastrada.* Cette variété de terminologie s'expliquera par l'association de différents ajouts de matériaux telle la chaux, la pierre et la brique cuite, lors la mise en œuvre

Par ailleurs, pour *Bazzana,* la *Tâbiya* n'est pas tout à fait le pisé. Le procédé de mise en œuvre est le même, mais présente des différences dans la composition et ce, par l'introduction d'autres matériaux à la terre. Il distingue trois typologies de *tâbiya* ; la *tâbiya* de terre, *tâbiya* de pierre et la *tâbiya* de mortier répondant à une évolution chronologique du procédé constructif. Bien que l'aspect extérieur du mur ne présente aucune différence, l'étude granulométrique démontre cette distinction en trois typologies.

De ce qui précède, nous pouvons dire que la *Tâbiya* fait moins référence à un matériau primaire qu'à son mode de mise œuvre (le coffrage), qui est un résultat concret, tangible, physique d'une opération de transformation[23]. Par analogie, le mot pisé d'origine latine qui fait son apparition en 1572 à Lyon[24] désignant la banchéeen français, constitue un bloc de matériau compacté obtenu après retrait du coffrage[25].

2. le matériau terre :

Les terres à pisé, baptisées aussi les alluvions[26], sont par définition des argiles sableuses[27] que de nombreux chercheurs tentent, par l'étude des cas, de déterminer les conditions ainsi que le processus de formation de cette dernière. Selon le Verrier[28] les « terres à pisé » sont des argiles maigres. L'argile est mêlée a de nombreux agents extérieur tel que le Quartz ou le Mica qui ont l'effet de réduire leur plasticité et de la rendre plus au moins sableuse, de manière naturelle.

[23]Ce terme *tâbiya* que Ibn hawqal cite cinq fois, pour décrire les enceintes des villes de l'occident musulman, ne le mentionne jamais lors des pérégrinations au proche orient, le terme est remplacé par tin « argile » pour désigner les constructions en terre et ce, malgré les origines orientale ce qui témoigne d'un usage linguistique propre à l'occident musulman du Xeme siècle.
[24] Dali A. etude de valorisation du patrimoine architectural de terre, cas de ksour dans le sud algérien, Op. Cité.
[25] Hammam. M, architecture de terre en méditerranée, colloques et séminaires N° 80, rabat, p100.
[26] Le Griel.A, « Les « terres à pisé » du Forez : étude d'une formation corrélative », Revue de géographie de Lyon,1975, Volume 50, N° 3,p. 212
[27] Idem p. 214
[28] Le verrier, chercheur sur les formations géologique du forez, à qui nous devons la première édition de la carte géologique.

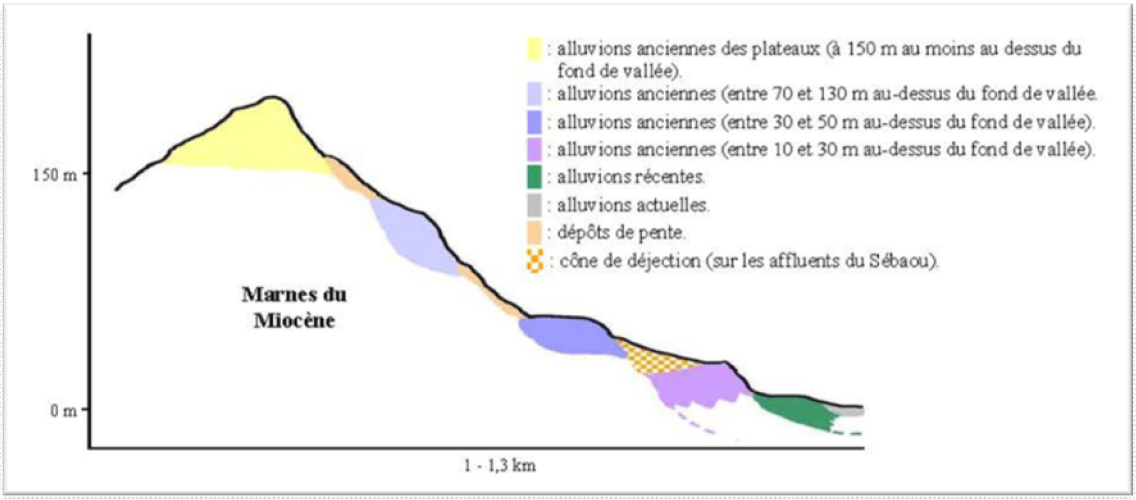


Figure I.2: Les différents types de terres alluviales.
Source : géographie physique et environnement,
Si Smail. A, Bouheraoua. A et Abdesselam. M.

L'hypothèse de la formation naturelle de ces terres à pisé est controversée.[29] Car, selon les chercheurs, à l'instar de *François Tomas*[30], il évoque l'hypothèse de l'origine « des terres à pisé » en proposant une définition plus précise de ces terres en distinguant deux typologies :

- Il peut s'agir d'un dépôt peu épais inferieur à 1m, ou l'argile servant de liant est rare et peu évoluée, et parsemé de blocs de roche comme le granit et le quartz par exemple.
- Le second est semblable au premier, la différence est dans l'accroissement de la teneur en argile et des grosseurs des fractions rocheuses ainsi que dans l'épaisseur qui peut atteindre 3 à 4 m de profondeur.

Les divergences des hypothèses attestent de la difficulté à déterminer l'origine des « terres à pisé ». Toutefois, une définition générale de ces dernières est retenue ; « *Les terres à pisé est un mélange de sable et d'argile, accompagné quelque fois de quelque cailloux formant un horizon d'épaisseur variable, cette définition volontairement vague correspond au terme de terre a pisé lui- même très général* »[31]. De ce fait, les terres à pisé sont distinguées selon :

✓ Argilo sableux. ;	✓ Sablo argileux ;
✓ Limono sableux ;	✓ Sableux

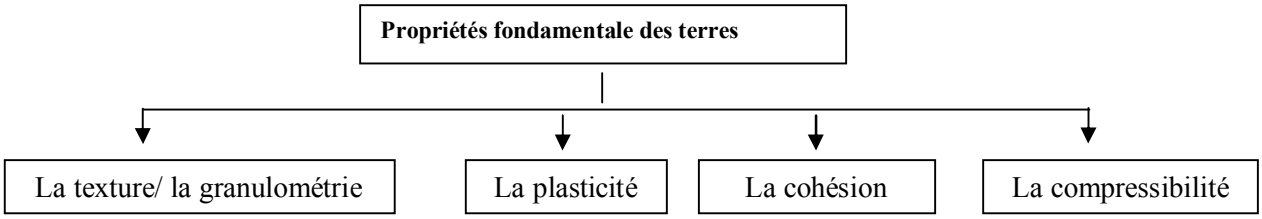
- La texture[32] ; permettant de faire ressortir quatre type de « terres à pisé » :

[29] Le Griel.A, « Les « terres à pisé » du Forez : étude d'une formation corrélative », op. Cité,p 213.
[30] Tomas.F. « Le relief et les sols de la plaine du forez », centre d'étude foreziennes, 1971.
[31] Le Griel.A, « Les « terres à pisé » du Forez : étude d'une formation corrélative »,op. Cité, p 216.
[32] Le changement de texture intervient fréquemment quelque mètre, rendant toute cartographie à grande échelle presque impossible.

- l'épaisseur : la hauteur de la couche de terre à pisé est variable de 1m à plusieurs mètres de profondeur.
- la fraction : variabilité quantitative et naturelle relative aux régions de la fraction des éléments constituant ces terres.

2.1 Propriétés fondamentale des terres :

Les études, effectuées parCRATerre, permettent aujourd'hui de définir les principaux paramètres fondamentaux afin de choisir la terre. Ce choix est basé sur un nombre de tests in situ ou en laboratoire, chose qui n'est pas toujours nécessaire, mais indispensable quand la terre nécessite une stabilisation particulière. Les propriétés à connaitre sont: la granularité, la plasticité, la compressibilité et la cohésion.



2.1.1 La texture/ la granulométrie :

La texture est définie par les proportions relatives en pourcentage (%) des particules argileuses, limoneuses et sableuses qui constituent la terre fine de l'horizon, par opposition aux éléments grossiers qui comportent les fractions suivantes ; graviers, cailloux, pierre et blocs[33].

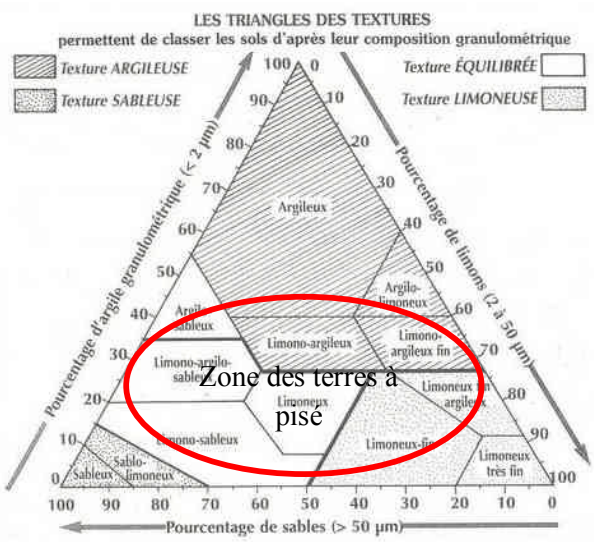


Figure I.3: Représentant Triangle Textural.

[33] Romain Anger, Laetitia fontaine. Grains de bâtisseurs. La matière en grain, de la géologie à l'architecture. Éditions CRAterre. 2005. p.12.

Cette texture peut être appréciée sur le terrain ou déduite d'une analyse granulométrique en laboratoire. Une opération qui permet d'attribuer au matériau observé le nom d'une classe texturale (exemple : argile sableuses). Les différentes classes texturales sont rassemblées et représentées dans un triangle textural.

2.1.1.1 L'appréciation de la texture :

2.1.1.1. In situ :

L'appréciation tactile de la texture sur le terrain, se fait en malaxant entre les trois doigts (le pouce, l'index et le majeur) quelque cm³ de terre, préalablement débarrassée des éléments grossiers. Néanmoins, cette appréciation reste une opération subjective, et les impressions ressenties sont dépendantes de l'état de l'humidité et la teneur en matière organique[34].

Afin de déterminer le pourcentage de l'argile, on affine ce test avec l'essai du boudin consistant à rouler l'échantillon de terre fine pas trop humide en un « boudin » de 5 à 10mm de diamètre. Les résultats ainsi obtenus se résument dans le tableau suivant:

Boudin impossible à fabriquer	**Moins de 10-12% d'argile**
Roulé sur la paume de la main, le boudin se fragmente	Mois de 18% d'argile
Le boudin ne se fragmente pas mais ne peut être enroulé en anneau	Entre 18 et 25 % d'argile
L'anneau peut être réalisé et ne se brise pas	Plus de 25- 30% d'argile

Tableau I.1: représentant la quantité d'argile avec un examen sur terrain.

2
.1

.1.1. B En laboratoire

L'essai le plus fréquent consiste à filtrer la terre à travers une série de tamis normalisé et superposé par diamètre décroissant, puis déterminer les fractions de grains retenus par chaque tamis.

Cette analyse est généralement suivie d'un autre procédé (sédimentaire) qui affine les résultats à un diamètre inférieur à 0,08mm, nécessaire pour les constructions en terre crue[35]. La lecture de ces résultats se fait suivant la vitesse de chute des particules de terre en suspension

[34]Bruno PIGNAL. « Bâtir en pisé »Edition association « Pisé terre d'avenir ».Op Cite.page 14.
[35]Houben.G, Guillaud.H, Traité de la construction en terre. Op. Cité. p 63.

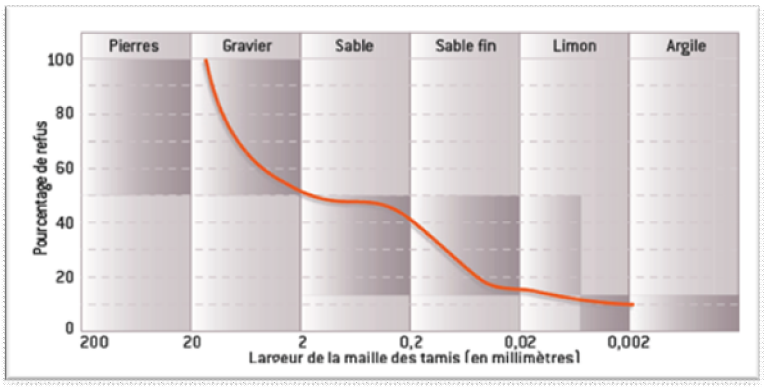
dans l'eau (les particules les plus lourdes ou grosses se déposent en premier). Cette lecture nous permet de calculer les proportions des différentes grosseurs de grains.



Photo I. 1.2: Les tamis pour l'Analyse granulométrique en laboratoire.



Photo I.3 : résultat du test de sédimentation



Source: Cour physique sur sol IRD.**Figure I.4:** Exemple de résultat d'essai granulométrique des tamis.

A travers la connaissance de la texture, nous pouvant indiquer le degré d'aération du sol. La porosité d'une texture sableuse est le signe d'un sol bien aéré, contrairement à une texture argileuse signifiant que le sol imperméable et mal aéré.

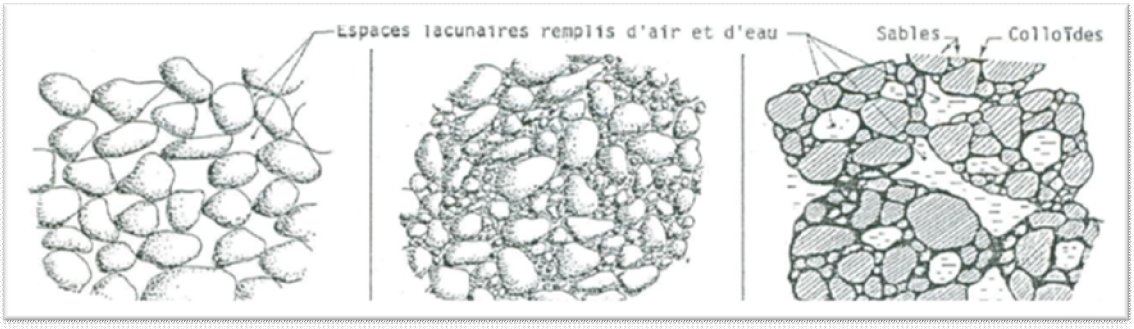


Figure I.5: Vue microscopique de la structure de sol (texture).

La courbe granulométrique de la terre destinée au pisé doit appartenir au fuseau granulométrique dont les caractéristiques principales sont[36]:

- Pourcentage de gravier non nul (2 à 10%).
- Pourcentage de sable entre 32 et 58 %.
- Pourcentage de limons entre 8 et 16 %.
- Pourcentage d'argiles entre 8 et 26 %.

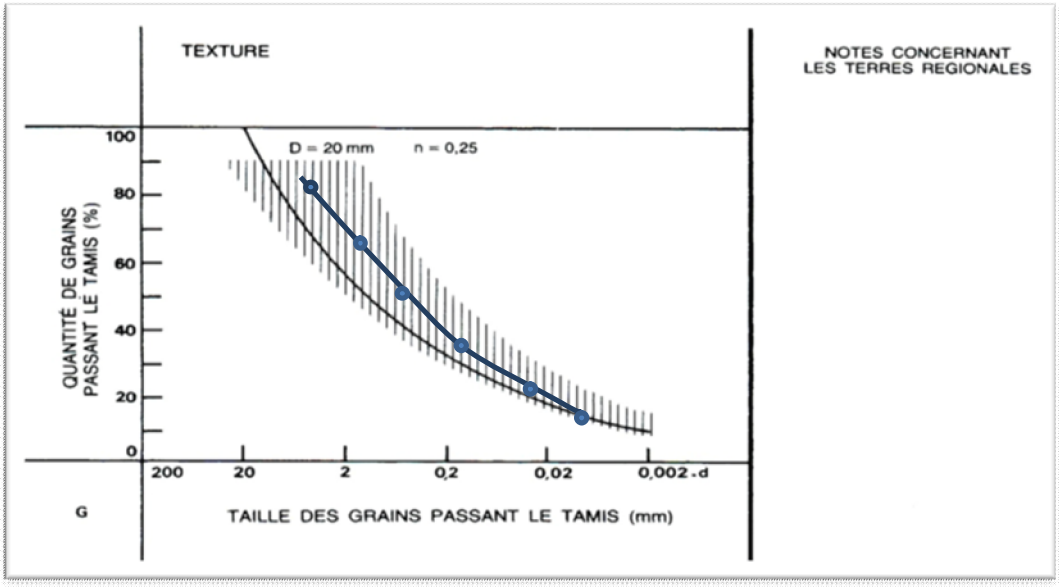


Figure I.6: Diagramme représentant les limites de la texture d'une terre a pisé.
Source: Craterre.

2.1.2 La plasticité :

Elle représente l'aptitude d'une terre à être modelée, et à subir des déformations sans réaction élastique importante qui entrainerait une fissuration ou pulvérisation .Atteberg a défini ces différents états hydriques et les frontières qui les séparent par des limites et des indices exprimés en pourcentage pondérale (%) de la teneur en eau qui sont[37] ;

- Limite de liquidité
- Limite de plasticité
- Limite de retrait
- Limite d'observation
- Limite d'adhérence

En ce qui concerne notre travail de recherche, nous ne retiendrons que deux limites.

[36] Romain Anger, Laetitia fontaine. Grains de bâtisseurs. La matière en grain, de la géologie à l'architecture. Op Cite p.14.
37Houben.G, Guillaud.H, Traité de la construction en terre. Op. Cité. p 196.

Limite de liquidité (Li) :

Représente le passage de l'état plastique à l'état liquide (Li). Cette limite correspond à la teneur en eau en pourcentage (%) par rapport au poids du matériau sec. Elle se mesure avec un appareil nommé « Casa grande »[38].

Limite de plasticité (Lp) :

Définit le passage de l'état plastique à l'état solide avec retrait (Lp). Elle exprime la teneur en eau en pourcentage relative au poids du matériau sec. Elle est appréciée sur un tronçon de 1- 2cm de long qui se brise une fois atteint un diamètre de 3mm et il doit être long de 5- 6cm.

- **indice de plasticité (Ip) :**

Les deux limites déterminent la plasticité de la terre. Elle est calculée par l'équation suivante Ip = Li- Lp. Cet indice est important car il nous renseigne sur les risques de déformation du matériau.

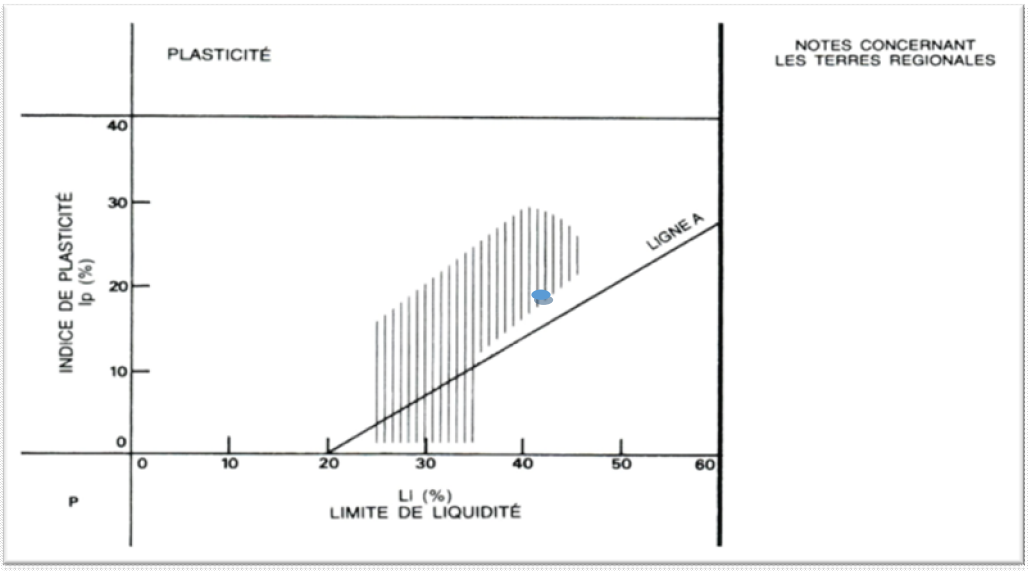


Figure I.7: Diagramme représentant les limites de plasticité de la terre a pisé.
Source: Craterre.

Les terres convenables pour le matériau pisé ont un indice de plasticité (IP) compris entre 7 et 29 %, une limite de liquidité inférieure à 50 % et une unité de plasticité supérieure à 10%.

Si l'indice de plasticité est en dehors de cette fourchette, la terre ne peut être utilisée que si elle subit une correction granulaire ou si elle est stabilisée à la chaux ou au ciment[39].

38Houben.G, Guillaud.H, Traité de la construction en terre. Op. Cité. p 195.

2.1.3 La cohésion :

Elle exprime la capacité des particules formant la terre à se maintenir ensemble lorsqu'il est exercé sur elle une contrainte de traction. Cette propriété est tributaire de la quantité et de la qualité collante des argiles qui lient les grains inertes entre eux.

En outre, elle exprime la capacité des particules de la terre à rester associées et à se maintenir ensemble sous l'effet d'une contrainte de traction. Elle dépend de la teneur en eau et de la quantité de l'argile qui lie les grains entre eux[40].L'essai de la cohésion, appelé aussi essai à la traction humide donne la classification suivante :

Qualification de la cohésion				
Cohésion	Mortier	Qualification	Poids (kg)	Résistance à la traction (m bar)
A peine cohésif	Sableux	Très maigre	200 – 300	40 – 60
Faiblement cohésif	Maigre	très maigre maigre	300 - 400 400 – 550	60 – 80 80 – 110
Moyennement cohésif	Moyen	Presque maigre Presque gras	550 - 750 750 – 1000	110 – 150 150 – 200
Fortement cohésif	Gras	Gras Très gras	1000 - 1350 1350 - 1800	200 – 270 270 – 360
Extrêmement cohésif	Argileux	Maigre Gras Très gras	1800 - 2400 2400 - 3200 3200 - 4500	360 – 480 480 - 640 640 – 900

Tableau I.2: Représentant la qualification de la cohésion des terres

[39]Houben.G, Guillaud.H, Traité de la construction en terre. p200.
[40]Le Tiec .J.M, Paccoud.G, Pisé H_2O, « De l'eau et des grains pour un renouveau du pisé en Rhône-Alpes Année de publication », 2006. P14.



Photo I.4: représentant essai de la cohésion.
Source: pisé H_2O.

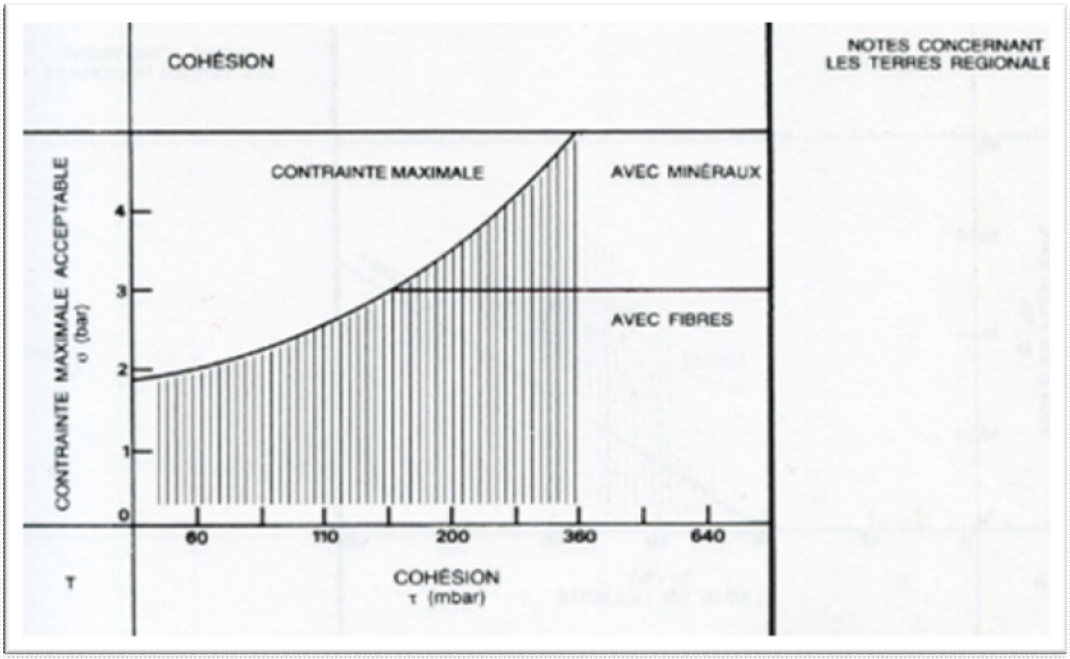


Figure I.8: Diagramme représentant les limites cohésion de la terre a pisé.
Source: Craterre.

2.1.4 La compressibilité :

Elle nous informe sur la potentialité de la terre à réduire au maximum sa porosité, l'efficacité du compactage est liée à la teneur en eau qui doit être suffisante pour assurer une bonne lubrification des grains et leur permettre de se réarranger entre eux pour diminuer le vide (occuper moins espace possible)[41].

En outre la compression est influencée par l'énergie de compactage ; une énergie de compactage croissante entraine une augmentation de la densité sèche et une diminution de la teneur en eau optimale d'une part, et d'autre part, par la teneur en eau; une faible teneur en eau rend le sol difficile à comprimer, quant à la texture, elle dépond de la nature de la terre et de ses caractéristiques principales

[41]Houben.G, Guillaud.H, Traité de la construction en terre. Op. Cité. p 63.

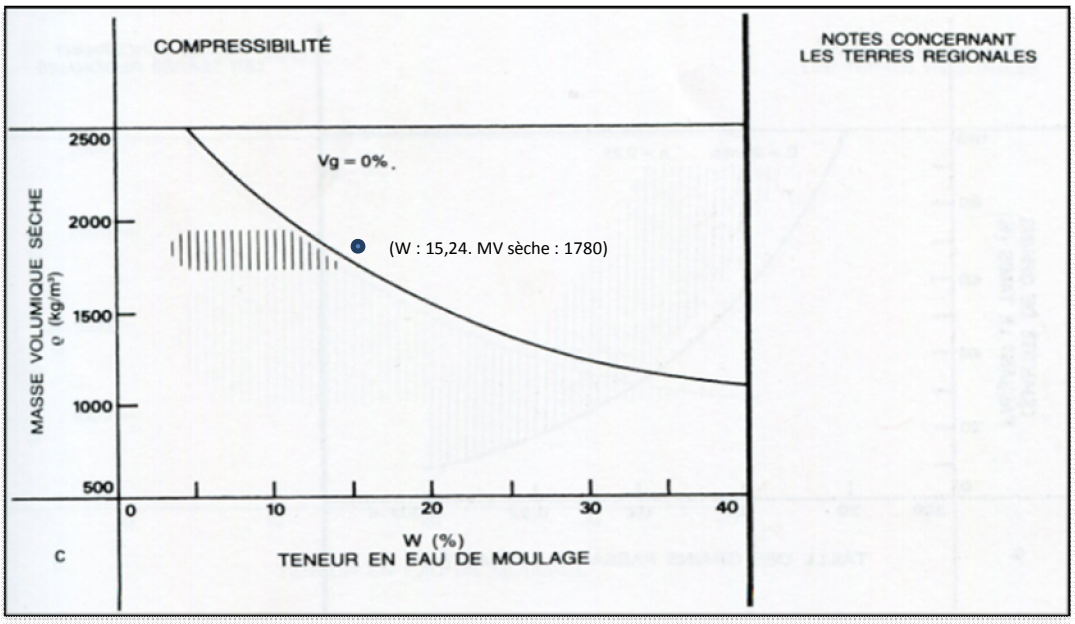


Figure I.9: Diagramme représentant les limites de compression de la terre a pisé. Source: Craterre.

La compactibilité d'un matériau est caractérisée par sa teneur en eau optimale et sa densité sèche maximale. Ces paramètres doivent répondre aux fourchettes suivantes[42]:

- Teneur en eau optimale: 7% < Wopt < 16 % ;
- Densité sèche maximale: 1,7% <Ds max <2.1 %.

2.2. L'action de l'eau :

L'eau est un élément important dans le comportement de la terre et dans le processus de la mise en œuvre des constructions en pisé. Elle joue un rôle essentiel pour renforcer sa cohésion et ce par l'augmentation de l'interaction entre les particules de l'argile. Les murs en terre crue et précisément en pisé, renferment toujours une quantité d'eau qui ne s'évapore pas et qui est en équilibre avec l'humidité relative de l'air environnant. Le pourcentage de l'humidité est de 2% (15 litres par m²)[43] pour un mur en pisé de 40 cm d'épaisseur.

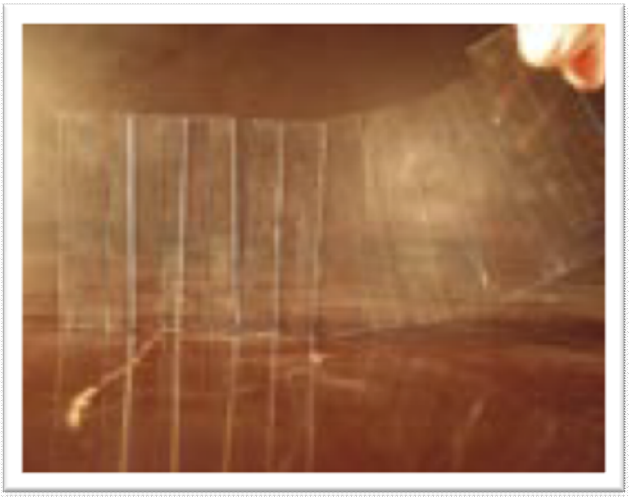


Photo I.6: Représentant la force capillaire. Source: Pisé H_2O.

[42]Doat P, Hays A, Houben H, Matuk S, Vitoux F. construire en terre. CRAterre. Op .cité. p 204.
[43]Le Tiec .J.M, Paccoud.G, Pisé H_2O, « De l'eau et des grains pour un renouveau du pisé en Rhône-Alpes, op cite. P13.

2.2.1 Les forces capillaires :

Grâce à ces forces capillaires, l'eau « colle » les grains entre eux. Les petits espaces qui séparent les grains sont en effet des lieux privilégiés de condensation de vapeur d'eau sous forme de ponts capillaires. Le scientifique Lord Kelvin (1824 -1907) a démontré que la condensation est d'autant plus précoce que l'espace est petit[44]. Par conséquent, grâce aux forces capillaires que la cohésion est due pour les murs en pisé. Ces dernières agissent à travers les films d'eau de deux à trois couches moléculaires qui entourent les plaquettes d'argiles.[45]

2.3. Le liant, Les argiles :

Les grains d'argile, par leur structure (forme) et taille, sont soumis à des forces capillaires beaucoup plus importantes que les autres grains. En effet, leur taille microscopique et leur forme aplatie leur confèrent une masse insignifiante en comparaison à leur surface.

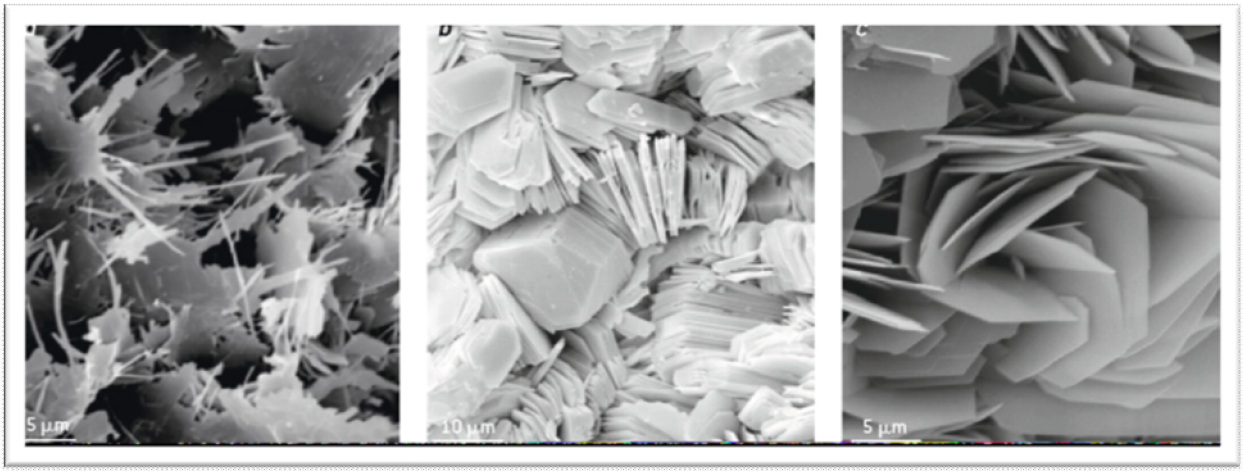


Photo I.7: Vue microscopique des plaques d'argiles.
Source: Pisé H_2O

[44] Il n'est donc pas nécessaire d'ajouté de l'eau liquide pour former les ponts capillaires exemple du cas d'une terre argileuse il suffit qu'il y ait de l'humidité dans l'air.
[45] Van Damme. H, « La terre un béton d'argile » revue pour la science. Janvier, N°423 /2014.

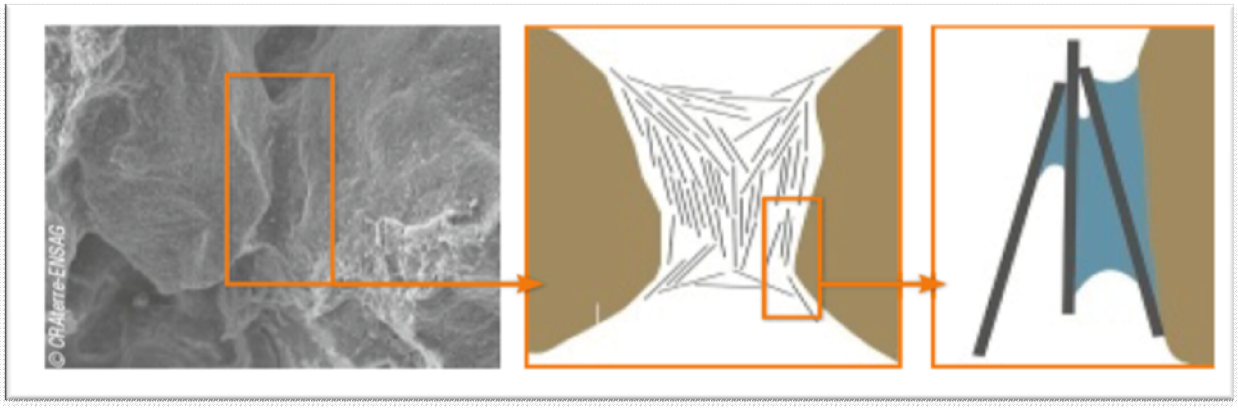


Figure I.10: Schéma représentant l'interaction de l'argile et de l'eau.

Source: Pisé H2o.

3. Définition de la terre a pisé :

La terre à pisé est une terre ordinaire, naturellement élaborée par la nature[46]avant d'être transformée par l'Homme, et ce grâce à des savoirs faires acquis pour en faire un véritable béton de terre destiné à la construction. L'interaction de ces fractions « Leurs structures, leurs solidités dépendent en partie des fractions respectives des grains qui les constituent »[47]. C'est une terre pas trop argileuse, elle contient aussi beaucoup de petits cailloux, graviers et sables. Humide, elle se tient bien dans la main, on peut la serrer, la comprimer et former aisément une boule de terre compacte. La terre à pisé est donc une texture et état hydrique[48].

4. le procédé constructif du pisé :

La définition la plus exhaustive[49]de la technique du pisé est sans doute celle donnée par François Cointreau ; *« le pisé est un procédé d'après lequel on construit les maisons avec de la terre, sans la soutenir par aucune pièce de bois, et sans mélange de paille, ni de bourre. Il consiste à battre, lit par lit, entre des planches, à l'épaisseur ordinaire des murs de moellons, de la terre préparé à cet effet. Ainsi battue, elle se lie, prend de la consistance, et forme une masse homogène qui peut être élevée à toutes les hauteurs données pour les habitations.»*[50]. L'aspect final d'un mur de pisé est celui d'un appareil cyclopéen[51] de terre que lui confère la succession latérale et verticale des banchées.

[46]Par définition, les terres, les sols, sont composés d'un ensemble de grains de tailles diverses, cailloux, graviers, sables, silts et argiles, qui proviennent de la désagrégation et de l'altération de la roche dite mère.
[47]Le Tiec .J.M, Paccoud.G, Pisé H_2O, « De l'eau et des grains pour un renouveau du pisé en Rhône-Alpes. Op cite. p 10.
[48] L'eau est nuisible lorsqu'elle setrouve en trop grande quantité, dans le matériau.

[49]Doat P, Hays A, Houben H, Matuk S, Vitoux F. construire en terre. CRAterre. Edition d'harmattan. Paris.1995.p 13.
[50]Cointeraux F : architecture rurale, auteur de 72 fascicules. Ses écrits a plusieurs reprises et se diffuse à travers le monde, contribuant ainsi au développement de la construction en pisé.
[51]Baudreu.D, Dechazelles.C.A, Guyonnet.F, « Maison médiévale du sud de la France, bâties en terre massive : état de la question »,Op.cité.

4.1. La mise en œuvre du pisé :

Techniquement la terre est mise en place sans préparation préalable, extraite sur les lieux et damée entre de grandes planches[52] (les banches) qui sont reliées entre elles par des traverses (les clés)[53]. Selon Goiffon, les banches peuvent mesurer entre 1,60 m et 4,20 m de long pour une hauteur courante de 0,80 m à 1,00 m et les épaisseurs des murs au moins égales à 0,40 m selon les régions[54]. Le matériau utilisé sans ajout d'eau présente généralement une granulométrie hétérogène. Sa cohésion[55]lui est conférée par le compactage. Le fait qu'il soit « sec » permet de démouler chaque banchée à peine terminée et de construire la suivante, car le travail s'effectue en assises en déplaçant les banches latéralement tout autour d'une pièce ou d'un bâtiment. Les temps de séchage entre les assises sont variables en fonction du climat et de la saison[56].



PhotoI.9.10: Construction contemporaine en pisé au Maroc, région de Marrakech.
Source: C.-A. Dechazelles**.**

Les constructions extrêmement normalisées possèdent des similitudes permettant leurs identifications. Selon les périodes, les lieux, les habitudes constructives des maçons, les dimensions des coffrages et ainsi que l'ajout d'autres matériaux que la terre, qui peuvent intervenir dans la mise en œuvre *« Le plus courant est la chaux sous la forme de cordons répandus à la périphérie des banchées, soit entre les assises, soit parfois entre les lits de damage à l'intérieur de chaque assise. On trouve aussi, mais plus rarement, entre les lits de damage des rangées de dalles de pierres, de tessons de tuiles ou de céramiques qui donnent une meilleure accroche aux enduits* »[57]. En outre, la mise en évidence des indices, tels que les limites de coffrage, des trous de clés, des lits de damage ou encore d'un matériau assez granuleux, conduit à une interprétation non contestable.

[52]Baloul N. conservation et valorisation du patrimoine architectural en terre de la région du Twat- gourara : cas du ksar Tmassekht. Memoire de magistère, sous la direction de Dahli M. UMMTO 2007.p.90.
[53]Doat P, Hays A, Houben H, Matuk S, Vitoux F. construire en terre, Op. Cité.
[54] Idem.p.17.
[55]Jeannet J, Pignal B, Scarato P. Bâtir en pisé : technique, conception, réalisation. Pisé terre d'avenir. Cahier technique n°3, 1998.p.4.
[56]Jeannet J, Pignal B, Scarato P. Bâtir en pisé, Op. Cité. p.39.
[57]Baudreu.D, Dechazelles.C.A, Guyonnet.F, « Maison médiévale du sud de la France, bâties en terre massive : état de la question » Op. Cité.

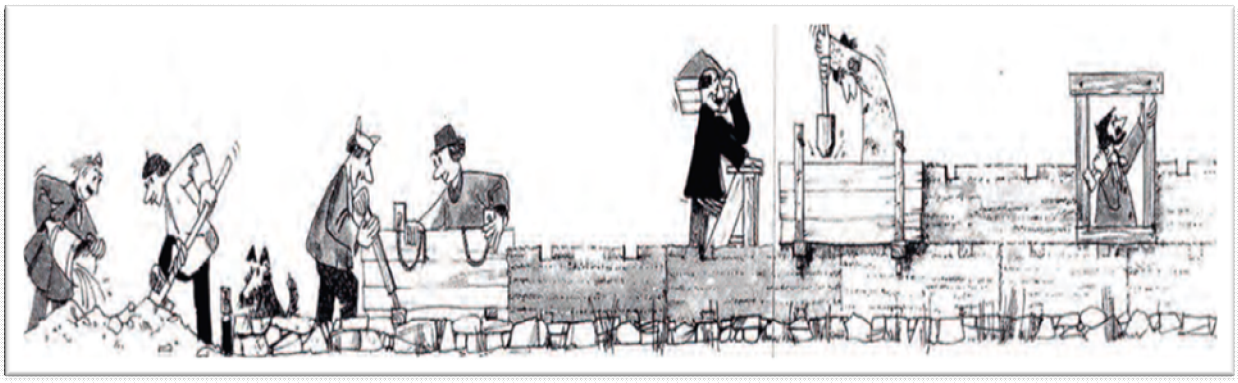


Figure I.11: Les étapes constituant le procédé constructif.
Source:Craterre.

4.2. Les outils :

Les formes des outils utilisés dans la technique du pisé n'ont guère changé depuis des siècles, mais l'utilisation d'autres matériaux particulièrement le fer a permis leur évolution. Sa mise en œuvre nécessite l'utilisation d'un coffrage constitué de:



Photo I.11 Photo du coffrage traditionnel
A Maatkas.
Source : auteur

A- Mur en pisé
B- clé
C- Panneaux de banches
D- Poteaux
E- Le gros du mur
F- Corde
G- Bâton
H- Coins enfoncés

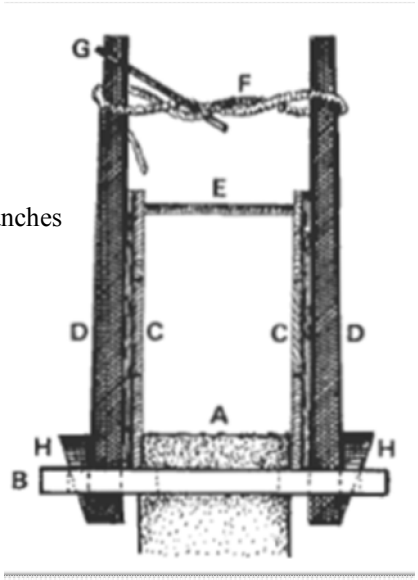


Figure I.12: Profil de l'outil de la technique pise (banche lyonnaise).
Source: CRAterre.

4.2.1. Les banches :

Elles constituent les pièces maitresses du coffrage pour une construction en pisé. Ils consistent, traditionnellement, en un coffrage en bois qui maintient la terre pendant la mise en œuvre. Leurs dimensions sont variables d'une région à une autre, en moyenne 3 à 4 planches droites rassemblées par des languettes.[58] Ces dernières sont rabotées afin d'obtenir un parement

[58]Doat P, Hays A, Houben H, Matuk S, Vitoux F. construire en terre. CRAterre. Op .cité p15.

lisse à l'intérieur et d'empêcher les mottes de terres d'adhérer aux planches. Ces banches sont rassemblées par des montants en bois ou poteaux, « lkwaym » en amazighe, servant à fixer et à serrer les planches. Deux manettes de part et d'autre de ce coffrage servent à soulever ou à transporter les banches.

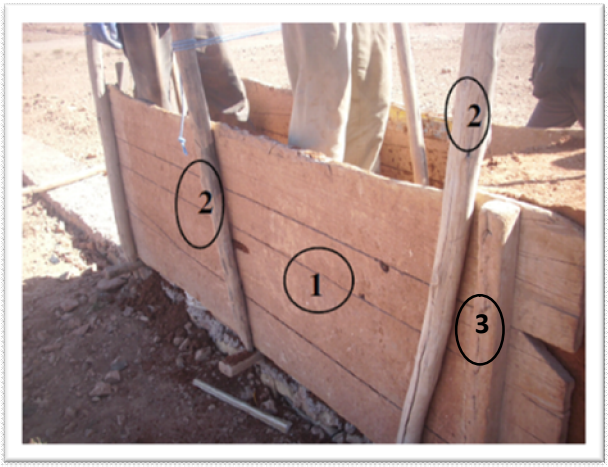


Photo I.12: Panneau de banche au Maroc.
Source: Mohamed Naim.

1 : les planches
2 : les poteaux
3 : les languettes
4 : les manettes

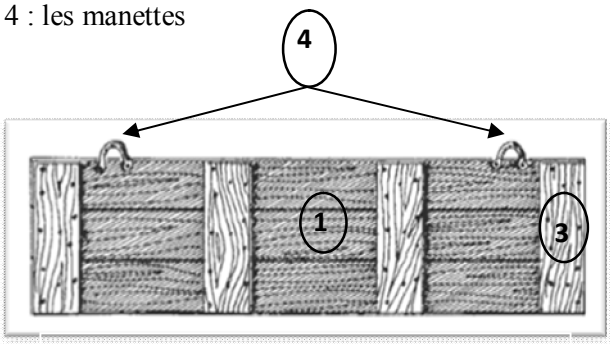


Figure I.13: Panneau de banche.
Source: Craterre.

4.2.2 Le fond de banche :

Ce sont deux petites planches en bois, appelées aussi closoir, placées dans chaque extrémité des banches, de dimension variable allant de 40 à 60 cm de largeur et de 90 cm de hauteur[59] (soit la largeur et la hauteur de la banche). Ces fonds de banches sont généralement de forme rectangulaire mais peuvent se trouver aussi avec une base plus large que la tête donnant ainsi du fruit au mur[60]. On place les deux fonds de banche quand le mur est isolé, par contre, on utilise une seule lors du remplissage lorsque la banche est précédée d'un autre mur, qui remplace la

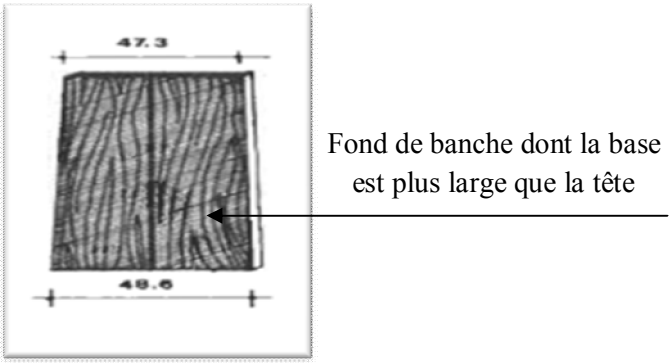


Figure 1.14: Fond de banche
Source: Craterre.

[59]Idem.p15.
[60]Idem.p15.



Photo I.13: Fond de banche de Maatkas
Source: auteur

seconde petite planche.

4.2.3 Les poteaux :

Appelés aussi aiguilles, n'excédant pas six éléments. Ils sont réalisés en bois ou en fer. Plus récemment, équarrie, rond. Leurs base est de forme ronde, équarrie ou pointue, ils servent à fixer et à serrer les deux côtes du coffrage. Leur hauteur dépasse toujours celle des banches.

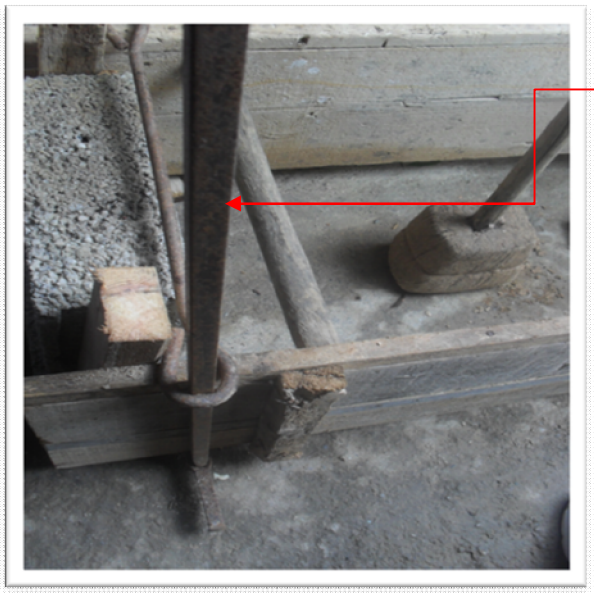


Photo I.14 : Poteau métallique à Maatkas
Source : auteur

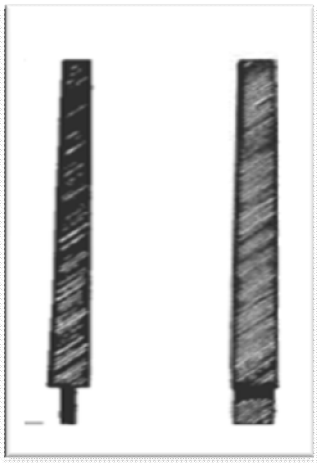


Figure I.15 : poteau en bois équarris.
Source : CRAterre

4.2.4 Les clés :

Faites en bois dur ou en fer, de forme ronde ou équarrie, elles sont placées à la base du coffrage. Le système constructif traditionnel prévoit trois à quatre clés selon la longueur de la banche et le nombre de poteaux.

Placées à une distance de 80 cm au maximum entre-elle[61]. Elles sont à l' origine des trous laissés sur les murs en pisé. Ces bâtons servent comme support des deux planches, d'une part, et fixent les tiges d'autre part. Pour faciliter leur extraction, les clés peuvent être taillées légèrement en forme conique.

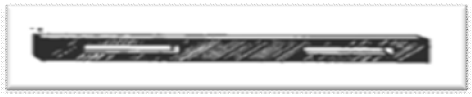


Figure I.16: exemple de clé lyonnaise. Source: Craterre.

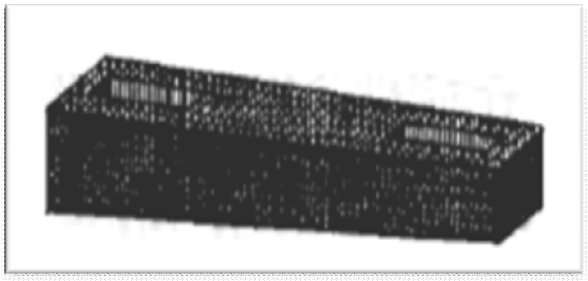


Figure I .17: Clé en forme de tronc de pyramide d'auvergne. Source: Craterre



Photo I.15: Clé en fer à maatkas
Source auteur

4.2.5. Les coins :

Ils servent à serrer les poteaux et les panneaux sur l'assise du mur déjà faite. Ils peuvent aussi être utilisés dans le réglage de l'épaisseur du mur en l'enfonçant plus au moins profondément. Pour le cas de la banche d'Auvergne, on les retrouve aussi dans la partie supérieure des montants pour la fixation des jougs.

[61] Idem. P 15.

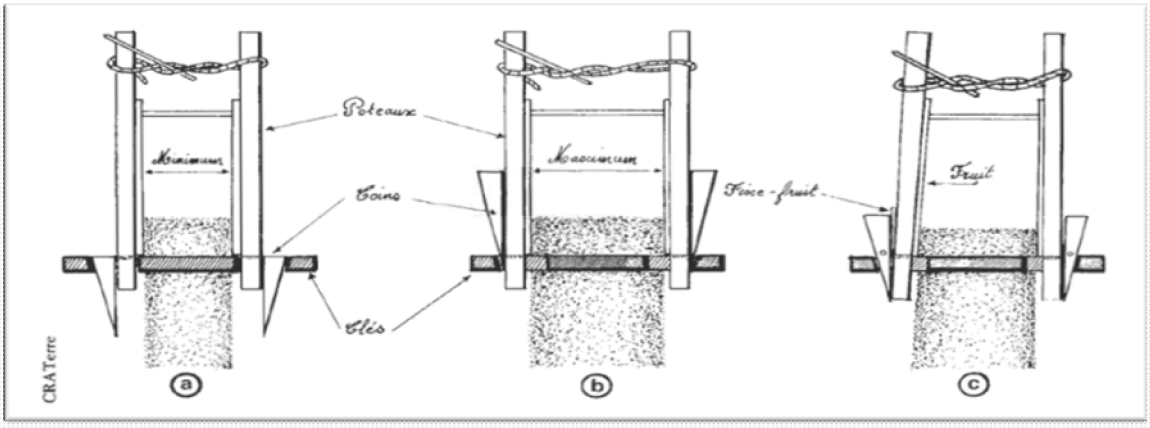


Figure I.18: Les différentes positions des clés pour une épaisseur définissent du mur.
Source: Craterre.

4.2.6. Les jougs :

Ils sont de même forme que les clés ou sous forme d'une simple corde bridée à l'aide d'un bâton qui s'arrête en contact avec le poteau.



Photo I.16 : des jougs en fer à Maatkas
Source : auteur

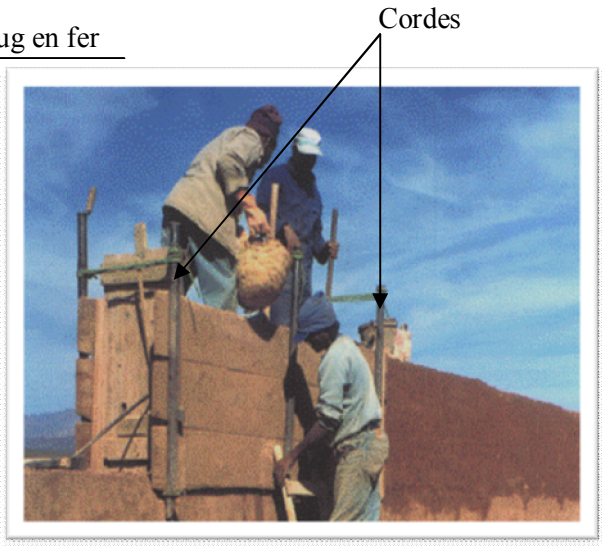


Photo I.17 : des jougs en cordeau Maroc
Source : auteur

4.2.7. Le pisoir :

Désigné par dame, pison, pilon, c'est l'outil avec lequel la terre est mise en œuvre et compactée dans les banches afin d'atteindre une cohésion suffisante qui permettra le décoffrage. Fait en bois avec un manche ou par fois deux, de longueur variable encadrant à la base un grand morceau en bois de différentes formes selon les régions. Ce dernier est remplacé par d'autres moyens de damage comme le damage par impact qui rassemble les fouloirs pneumatiques et les marteaux piqueurs ainsi que le damage par vibration à l'aide les plaques vibrantes ou de dames vibrantes.



Photo I.18 : représentant le pisoir en bois à Maatkas
Source : auteur

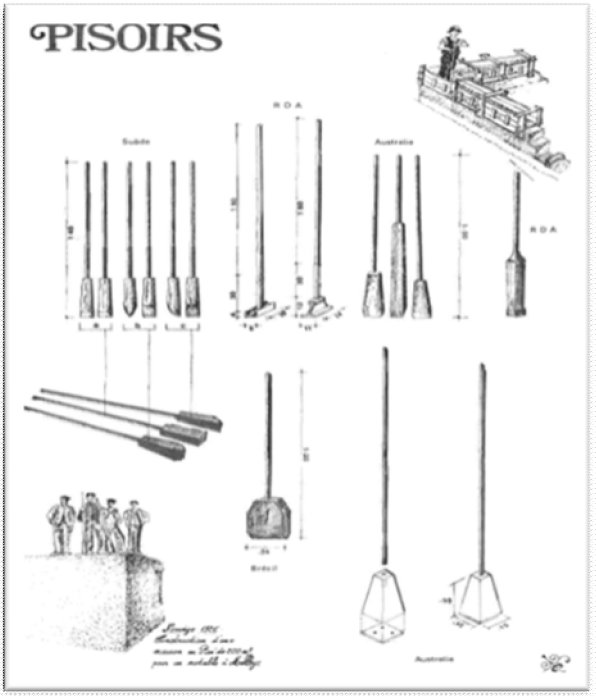


Figure I.19: Les différents types de pisoirs
Source: Craterre.

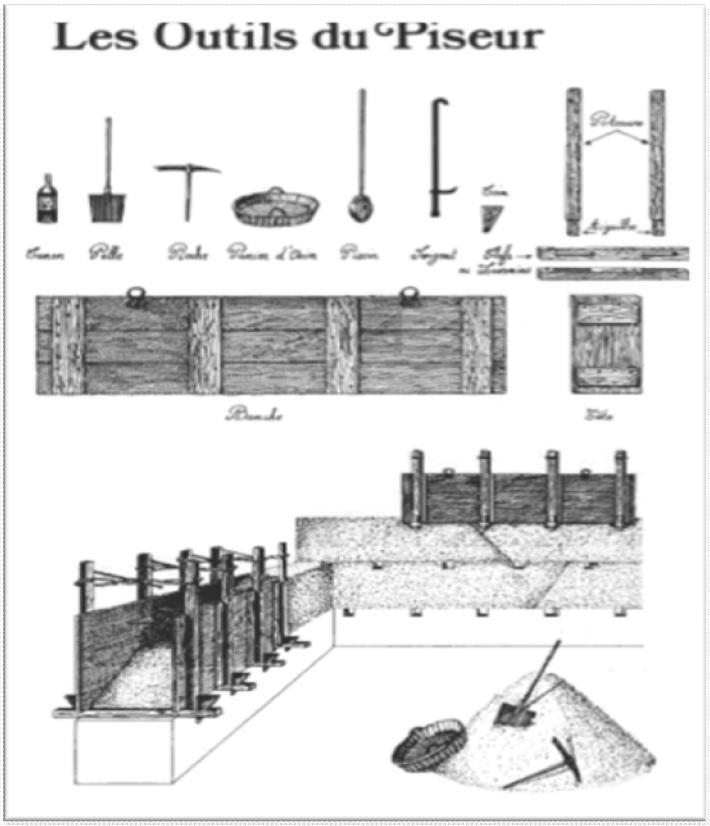


Figure I.20 : Récapitulatif des différents outils de la technique du pisé.
Source: CRAterre.

5. Évolution du procédé constructif du pisé :

Les travaux et les recherches, entrepris ces dernières années sur le pisé traditionnel, ont permis de développer la technique en apportant des améliorations pour répondre à des problèmes soulevés lors de l'étude de cette dernière. Toutefois, il est important de souligner que l'esprit de la technique elle-même n'a pas changé.

La modification apportée se résume au coffrage lui-même afin d'améliorer sa durabilité, sa maniabilité et sa légèreté tout en assurant la sécurité aux ouvriers. Les banches sont passées du bois à la fibre de verre en passant par l'acier[62]. Traditionnellement, le système de coffrage est horizontal ou vertical mais le développement a permis une évolution simultanée de ce dernier.

De nos jours, les coffrages modernes permettent de réaliser aussi bien des murs droits avec des finitions irréprochables mais également des décorations ou même des murs courbés. Ils permettent aussi un traitement des angles soit en les intégrant dans le coffrage ou par intégration des éléments en béton armé.

5.1. Les différents types de coffrages :

Le principe fondamental du pisé consiste en l'utilisation d'un coffrage adapté. L'efficacité des coffres est tributaire du bon choix et de la qualité des matériaux et du moyen de compression tout en optimisant ses caractéristiques, notamment, sa légèreté, sa facilité de montage et démontage, sa fixation et son serrage, son efficacité et sa sécurité au moment de sa mise en œuvre et surtout une parfaite modulation de la dimension des murs en hauteur, longueur et épaisseur. Ce coffrage peut être exclusivement en bois (Maroc), rondins (Chine), en aluminium (France) et en acier (Algérie)[63].

Le coffrage peut être réalisé sans les clés en deux façons distinctes. La première appelée coffrage indépendant pincé consiste, selon le laboratoire CRATterre, à maintenir les panneaux par des systèmes de tendeurs ou de pinces à vis ou encore de vérins hydrauliques de serrage. La deuxième, très répandu au Brésil, dite coffrage pincé sur poteaux, exige une distance maitrisée pour éviter les ventres du mur.

Ajouté au système de maintien, le coffrage peur être identifié aussi selon le mode de progression :

[62]Houben.G, Guillaud.H, Traité de la construction en terre, Op. Cité. p200.
[63]Kebaili N. L'architecture de terre contemporaine en Algérie, évaluation post-occupation d'habitations rurales dans la région du centre des hauts plateaux. Mémoire de magistère, sous la direction du prof Bensalem. EPAU 2006. P.41.

5.1.1 Progression horizontale :

Son principe est le même utilisé dans la tradition du pisé, le plus fréquent. Ce système consiste en un développement horizontal du mur grâce aux banches qui sont de taille moyenne[64].Cette évolution produit des murs sur lesquels on distingue des joints (limite des banches) horizontaux et verticaux.

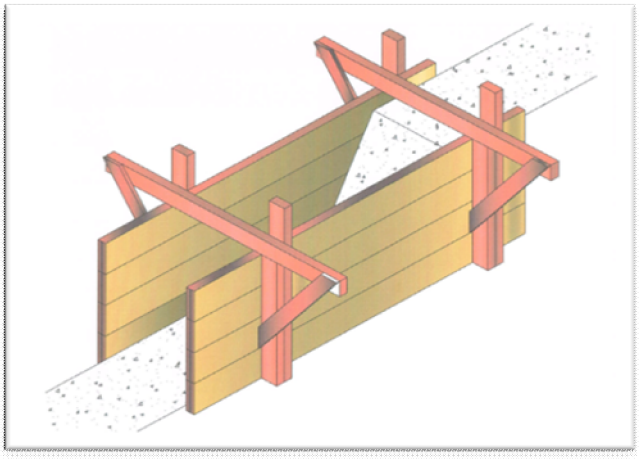


Figure I.21 : Progression horizontale.
Source: Craterre reprise par l'auteur.



Photo I.19: Progression horizontale.
Source : https://echangesecoconstructifs.

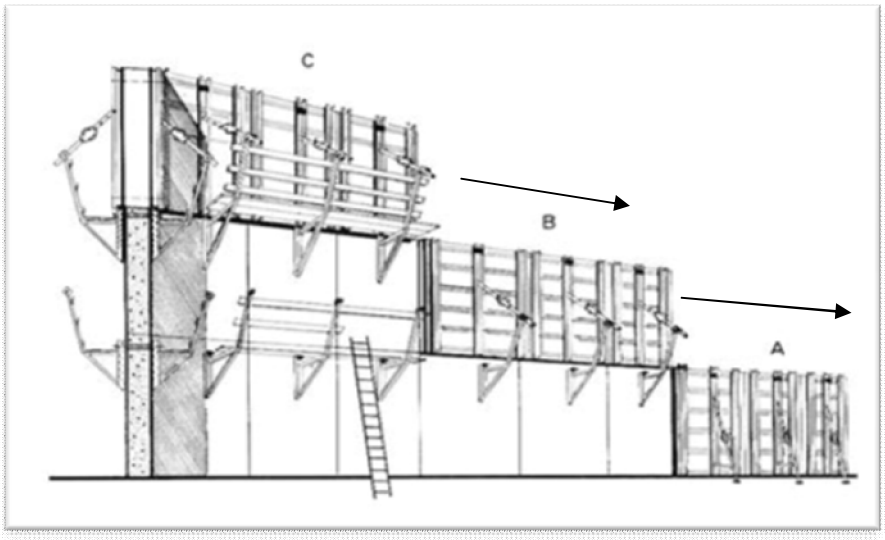


Figure I.13: les étapes d'une progression horizontale.
Source: CRAterre.

5.1.2. Progression verticale :

[64]Houben.G, Guillaud.H, Traité de la construction en terre. Op.cit. p 204.

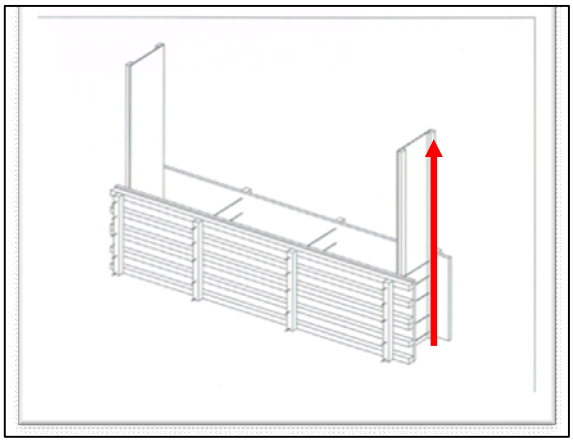


Figure I.23: Schéma repesent la progression verticale
Source: CRAterre reprise par l'auteur.

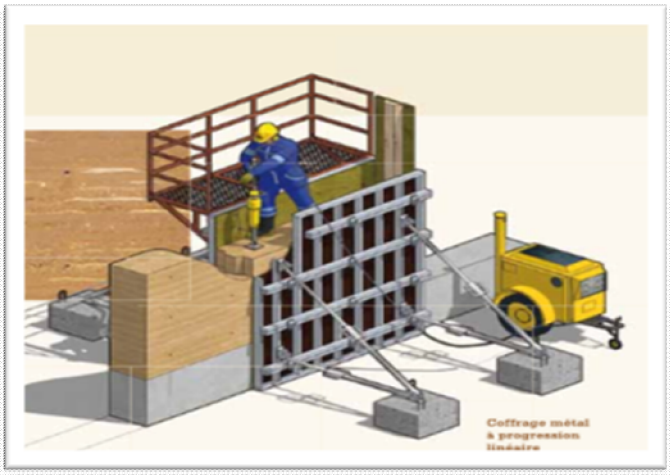


Photo I.20 : Schéma repesent la progression verticale

Résultat de l'évolution de la technique du pisé, elle est adaptée particulièrement à la construction des murs en pisé en trumeaux. La particularité de cette progression est de permettre une exécution plus rapide et plus facile de la construction.

5.1.3 Progression intégrale :

Technique inspirée de la technologie du béton. L'expérience réalisée révèle la complexité de cette progression. Sa fiabilité est étroitement liée à la conception architecturale. Dans le cas contraire, elle est vouée à l'échec. Nous distinguons trois types d'intégrales.

➢ Intégrale horizontale :

Reprend le même principe d'une progression horizontale faite en une seule ceinture permettant une évolution verticale dans sa totalité.

Utilisée dans la construction des murs en trumeaux de grande dimension coffrée en toute hauteur. Pour sa réalisation, une face du coffrage est fixée contrairement à l'autre qui doit évoluer au fur à mesure en raison du damage.

La reconnaissance de ce type de coffrage est facilement détectable par l'absence des joints horizontaux.

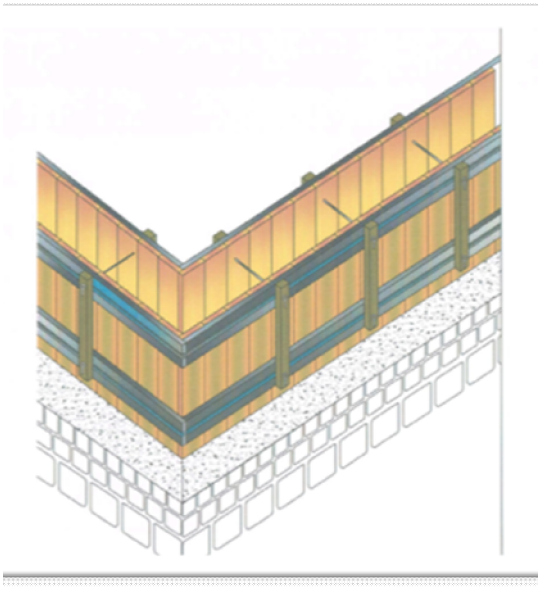


Figure I.24: Schéma représentant intégral horizontal
Source: Craterre reprise par l'auteur

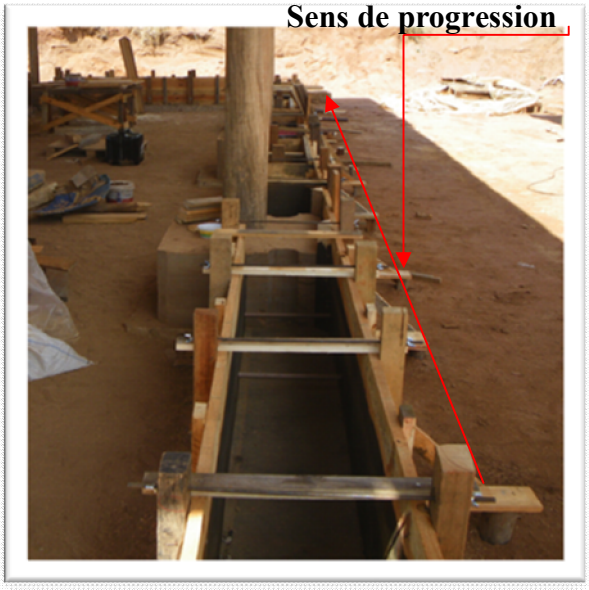


Photo I.21: Schema représentant integral horizontal
Source: Craterre

➢ Intégrale verticale :

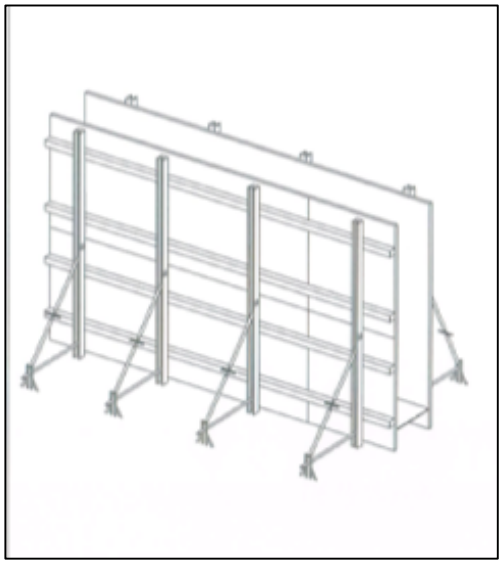


Figure I.25 : progression Intégrale verticale.
Source: Craterre reprise par l'auteur.

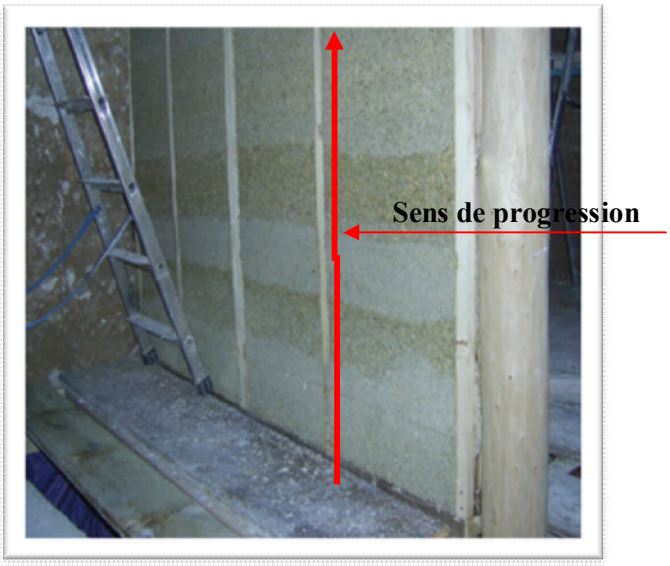


Photo I.22progression Intégrale verticale.

➢ Intégrale- intégrale :

Le bâtiment est coffré en entier, avec un ensemble de coffres continus .Les conceptions architecturales doivent être étudiés de petite taille et simples. Ce procédé est utilisé au Maroc pour la réalisation du projet BTS67[65].

[65]Houben.G, Guillaud.H, Traité de la construction en terre, Op. Cité. p 201.

Conclusion :

Dans ce premier chapitre nous avons présenté une lecture sur l'origine de la technique du pisé à travers le monde pour mettre en avant la théorie de sa naissance et les conditions de sa propagation dans le monde. Basé sur l'évolution chronologique des techniques constructives et des échanges des populations grâce à leurs mouvements qui exporte avec eux tous leurs savoir-faire.

Les différents termes associés à la technique du pisé, à savoir tâbiya en arabe, tapia en espagnol, tapial ou taipa en portugais, souligne d'avantage la difficulté d'affirmer son origine. L'étude étymologique de la Tabiya a permis de dégager trois typologies de tâbiya avec de différentes variantes intermédiaires, cette identification est basé sur l'étude granulométrique de cette dernière ce qui nous permet de donner la première définition de sa mise en œuvre.

La technique du pisé est étroitement liée à la matière de la terre. L'analyse de l'échantillon prélevé dans notre cas d'étude : Maatkas confirme cette hypothèse. La maitrise des paramètres fondamentaux de cette dernière révèle bien l'existence d'une terre à pisé naturellement formée. Ces paramètres permettent aujourd'hui d'apporter les corrections nécessaires pour toutes les natures (type) de terre afin de lui apporter la performance voulue.

Par ailleurs l'étude détaillée du procédé constructif, partant de la mise en œuvre jusqu'aux outils, nous permet de définir les paramètres clés permettant l'évolution de la technique à savoir les différents coffrages.

Chapitre II :

Évolution et identification des mises en œuvre de la technique du pisé

Introduction

Le pisé est l'une des techniques les plus anciennes que l'Homme a exploitée pour construire. Sa pérennité au fil des siècles a permis d'acquérir une compétence et plus de finesse dans la maitrise et la mise en œuvre de cette technique.

L'étude des éléments associés caractéristiques des constructions en pisé permet de comprendre le système constructif (les fondations et soubassement, les murs, les couvertures…etc), et d'apporter une lecture critique, notamment de souligner les points faibles, de ce mode constructif.

L'évolution de la technique du pisé et de ces outils dont le coffrage est l'élément clé pour sa mise en œuvre en plus des différents matériaux combinés nous renseigne sur l'origine et la nature des différences et des variations de mise en œuvre. Le support documentaire dont nous disposons nous a permis de les identifier dans le bassin méditerranéen, dans une échelle plus globale, puis en Algérie pour une échelle plus spécifique dans le but de situer le cas de la région de la Kabylie, qui reste très mal documentée.

II.1. Le processus de mise en œuvre

Le processus de mise en œuvre d'un mur en pisé parait une opération simple d'apparence durant laquelle, la matière prend forme et devient matériau et au final un élément de construction. Cette technologie traditionnelle nécessite un savoir-faire et une maitrise de la matière première et de la technique. Le processus est constitué de plusieurs phases, allant de l'extraction à la mise en banche tout en passant par le transport et la préparation de la terre.

De nos jours, la recherche scientifique se penche non seulement sur le choix de la terre et l'amélioration de ses caractéristiques mais aussi sur le type de banche et les outils de compression. Ces études recherchent l'optimisation et la durabilité du matériau et des constructions en pisé

Le schéma suivant expose les principales opérations de production d'éléments et des constructions en pisé ainsi que les outils nécessaires à chacune d'elles.

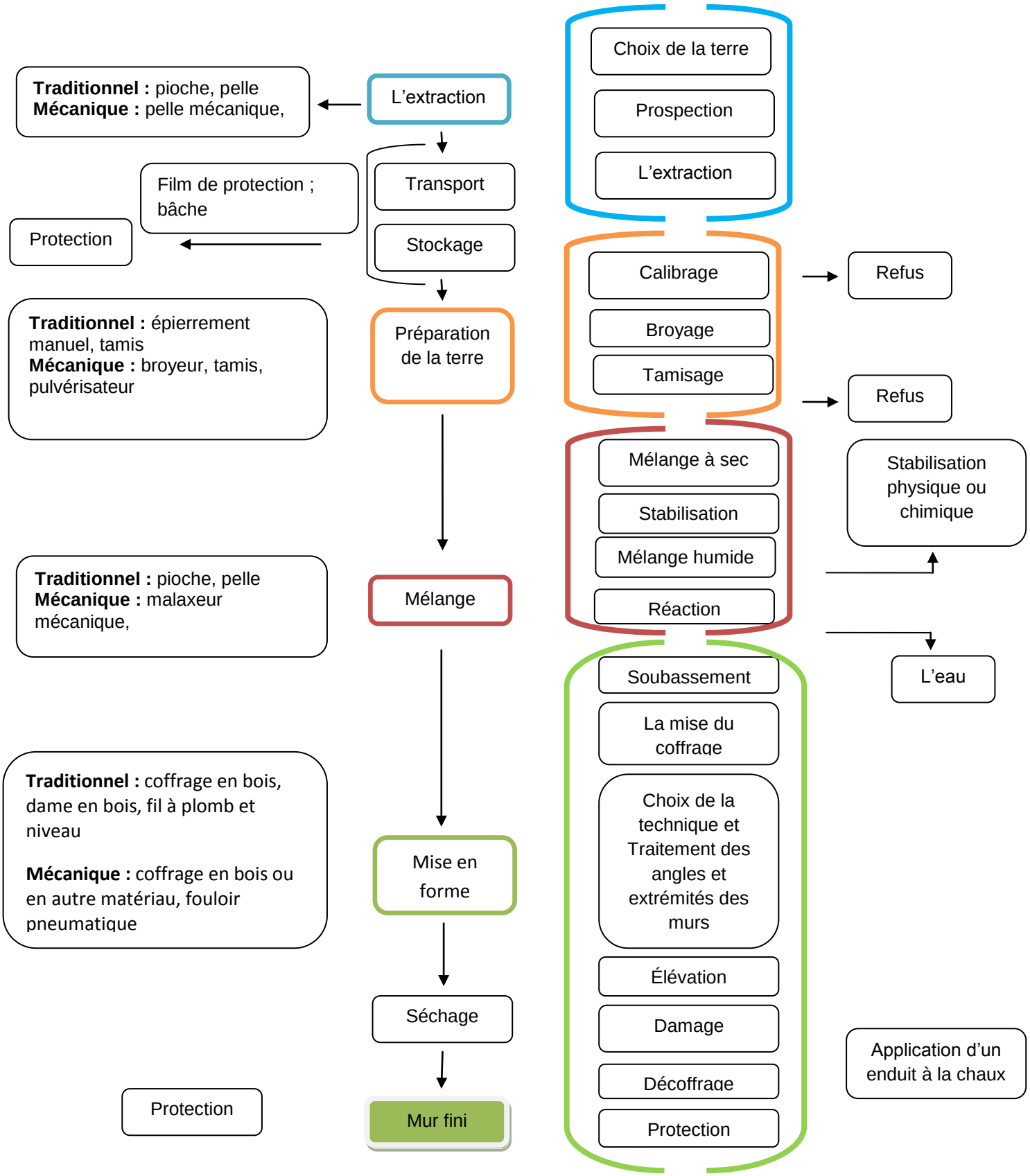


Figure II.1 : organigramme des étapes de mise en œuvre de la technique du pisé.

La première étape consiste à choisir le type de terre à utiliser, par une prospection ensuite son extraction. Par définition, la terre à pisé est une terre utilisée à l'état naturel puis stabilisée par compactage (compression)[65].

Elle est considérée comme un béton de terre naturel car la terre garde sa structure globale (gravier, sable, liant…). L'argile joue le rôle de liant. Les différentes recherches ont apporté des précisions sur cette liaison et que ce n'est qu'en présence de l'eau que la cohésion est atteinte[66]. (Voire chapitre 1).

L'extraction s'effectue à l'aide de moyens manuels rudimentaires (pelles et pioches) ce qui nécessite beaucoup de temps et de main d'œuvre. Aujourd'hui, il est possible d'effectuer l'extraction de la terre à pisé par des engins mécaniques, ce qui réduit considérablement le temps et la main d'œuvre sur chantier.

La terre est extraite localement, mais parfois, l'extraction s'effectue loin du site de réalisation et dans ce cas en raison le recours au transport est inévitable, ce qui implique le stockage en tas sur le lieu du chantier[67].

II.1.1 Préparation de la terre[68]

II.1.1.1 Le Tamisage

Après l'extraction on passe à la phase d'épierrement ; débarrasser la terre de tous les gros cailloux. Cet opération est effectuée manuellement ou en utilisant des tamis vibrants pour un calibrage et une granulométrie homogène.

II.1.1.2 Le gâchage

Avant de procéder à l'humidification de la terre, il est impératif de mélanger la terre à l'état sec pour former un mélange homogène. La quantité d'eau de gâchage dépond de la nature de la terre tout en évitant la sur-humidification. Si la terre est de mauvaise qualité pour la construction en pisé on définit le type de stabilisant à préconiser selon la nature de la terre utilisée.

[65] Pignal.B, « bâtir en pisé », Edition association « pisé terre d'avenir », 1998, p14
[66] L'eau renforce la cohésion de la terre en augmentant l'interaction entre les particules d'argiles.
[67] Si la terre stockée (n'est pas utilisée dans l'immédiat) elle doit être recouverte à l'aide d'un bâche ou de film protecteur pour éviter son humidification ou le séchage.
[68] Houben H, Guillaut H Traiter de la construction, op cite p

II.1.1.3 La stabilisation

Cette phase est indispensable dans le procédé de construction en pisé, le recours à ce type de traitement ne doit pas être utilisé uniquement pour améliorer les propriétés de la terre, si ces dernières ne sont pas concluantes. Cependant, la stabilisation engendre un surcout selon la nature de la terre à stabiliser. Le compactage est considéré comme l'un des moyens de stabilisation. Cette étape contribue à modifier la densité de la terre, sa porosité ainsi que sa résistance mécanique[69].

- **Stabilisation physique**

Elle consiste à corriger la granulométrie de la terre, en ajoutant des fractions de grains manquants ou qui peuvent changer le comportement de la terre (comme du sable pour les terres argileuses), ou par élimination des vides entre les grains par compactage[70].

- **Stabilisation chimique**

En fonction de la nature de la terre et sa sensibilité à l'eau, nous optons pour une stabilisation à la chaux[71] aérienne pour les terres argileuses ou les terres humides ; en réduisant la teneur en eau et en augmentant les propriétés de sa résistance mécanique. Pour les terres sableuses, la stabilisation est assurée avec un liant hydraulique tel le ciment[72] ou de la chaux hydraulique pour assurer une meilleure résistance à la compression. En outre, la stabilisation chimique prévoit des dosages minimes de l'ordre de 6%[73].

II.1.2 La mise en œuvre[74]

La construction d'un mur en pisé commence par la réalisation des fondations exécutées avec divers matériaux à l'instar de terre stabilisée, de la pierre, de la brique cuite ou plus récemment en béton armé. Une mise hors de l'eau est à prévoir par, notamment, un drainage à proximité de

[69]Doat P, Hays A, Houben H, Matuk S, Vitoux F. construire en terre. Op cite. P216.
[70] Idem.
[71]Chaux aérienne éteinte: Le processus de durcissement doit se faire à l'air libre mais pas sous l'eau. Son action est plus efficace sur les terres argileuses. On recommande pour le pisé un pourcentage de chaux compris entre 6 et 10% en masse.
[72]Ciment: la stabilisation au ciment est plus compatible avec les terres sableuses avec une teneur en matières organiques inférieures à 2 %. Le taux du ciment sera déterminé en fonction de l'agressivité du climat de la région et de la résistance recherchée (généralement entre 4 et 8%).
[73] J, Jeannet, P,Scarato,cahier d'expert bâti en pisé conaissance, analyse traitement des pathologies en pisé. Feverier 2015. Fiche N°09
[74]Doat P, Hays A, Houben H, Matuk S, Vitoux F. construire en terre. Op cite. P216.

la fondation. Le prolongement de ces fondations au-delà du sol constitue les soubassements de hauteur variable selon les régions (allant de 50 cm à 2m pour le cas de Maatkas).

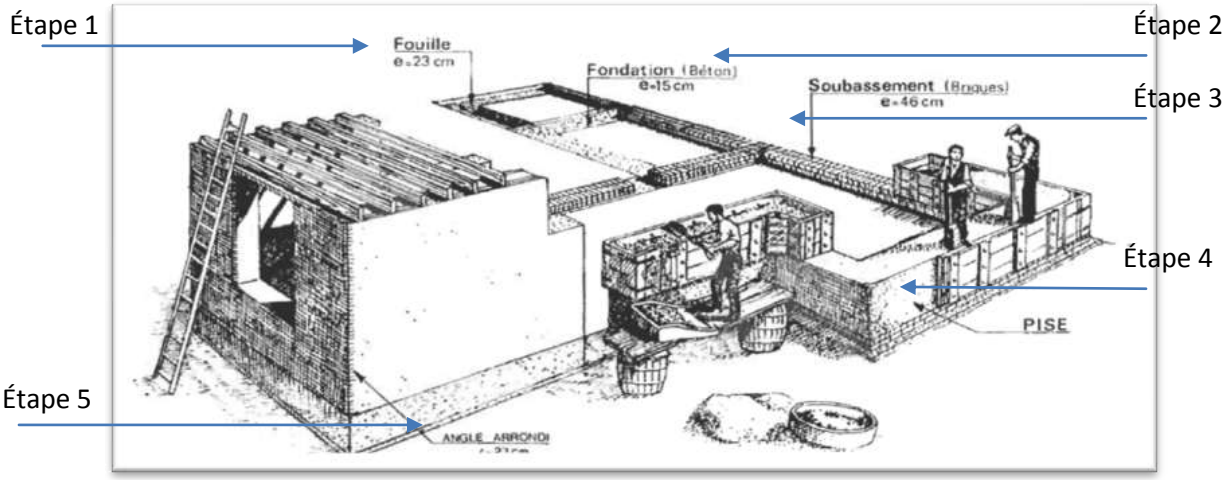


Figure II. 2 : Les différentes étapes de la mise en œuvre d'une construction en pisé.
Source: ECN, centrale Nantes.

Une fois les fondations et les soubassements réalisés et nivelés, on procède au traçage des tranchées destinées à recevoir les clés, leurs distances dépendent de la longueur du coffrage. Toutefois, ces dernières posent problème à cause des trous laissés dans les murs après extraction des clés, leurs diamètres a été revu à la baisse (clé en fer) ou totalement éliminé avec un système de coffrage pincé en utilisant des tendeurs ou des pinces à vis.

Après le coffrage posé sur la maçonnerie fraiche du soubassement, on commence l'édification à partir d'un angle de la maison. On procède à la fermeture du caisson au départ des deux côtés puis en un seul dans les autres mises en œuvre. Traditionnellement, ce coffrage est en bois mais différentes variantes ont été expérimentées[75]. Aujourd'hui, les banches sont conçues avec plusieurs matériaux, acier, aluminium, bois…avec des structures extérieures les maintenant.

Une fois le coffrage monté, on passe à la mise en œuvre de la terre, selon le type et la technique du pisé.La terre est mise dans des caissons par couches d'une épaisseur de 8 à 10 cm, étendue avec les pieds et comprimée avec le pisoir. Ensuite, vient le damage sur les pourtours du coffrage et les deux extrémités, puis on croise les coups afin de percer la terre dans tous les

[75] L'expérimentation a révélé que la banche en contre-plaqué de faible épaisseur sont utilisé pour leur légèreté mais qui fléchissent au moment de la compression.

sens[76]. Le coup du pisoir doit atteindre à chaque fois la couche inferieure avec sa pointe pour assurer une bonne cohésion entre les couches successives de terre.

Une fois la première couche bien battue, le maçon répète la même opération, couche après couche jusqu'à la réalisation de la banchée, puis banchée après banchée par le déplacement horizontal du coffrage le long du mur, pour permettre une élévation en hauteur.

Les angles sont traités par le croisement des banchés ou réalisés avec d'autre matériaux comme la brique de terre cuite et la pierre réalisée en harpes pour s'imbriquer dans les murs en terre.

Les réservations pour ouvertures doivent être bien placées afin de reprendre les efforts des murs par les linteaux et cadre en bois, en pierre ou en maçonnerie.



Figure II.3 : Les différentes étapes de la construction en pisé.
Source: Asterre.

II.3. La technique du pisé préfabriqué

Tout comme pour le béton, la préfabrication du pisé est possible[77] « *pour adapter la technique traditionnelle au contexte économique et social de l'époque* »[78], elle permet aujourd'hui de résoudre deux problèmes :

- Le temps de mise en œuvre important ;
- La planification de la construction d'un mur en pisé (Le chantier est très sensible aux intempéries qui viennent modifier l'humidité du sol).

Le fait que les modules sont réalisés à l'abri permet d'éviter les aléas climatiques et une meilleure tenue du planning des travaux. La préfabrication inclue l'utilisation d'une machine à

[76] Sous les liages des cordes, il faut coordonner les coups de la dame, car à cet endroit il est difficile à atteindre la verticale.
[77] La technique crue rentre dans le moule, technique & chantier, le moniteur, le 18 janvier 2013, p38-41
[78] Heitz.P, architecture en terre, isolation et préfabrication les nouveaux enjeux du pisé, qualité construction, N°144, mai/juin 2014, p72-80

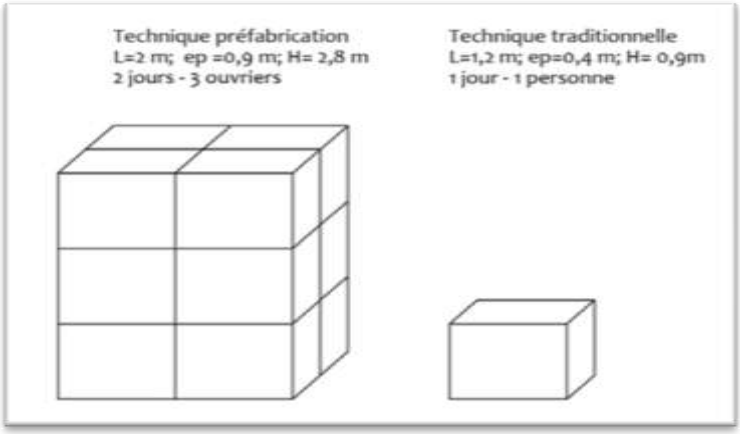


Figure II.4 : Comparaison des volumes réalisés en fonction de la technique.
Source: ECN centrale, Nantes.

double fouloir pneumatique permettant d'augmenter la vitesse de réalisation du ML de pisé, et ainsi réduire les coûts de réalisation.

Grâce à une préfabrication en entrepôt du pisé, le temps de durée du chantier est réduit. Il devient aisément calculable et la construction peut être réalisée en toute saison. Cela permet aussi de faciliter la réalisation des éléments en cas d'exiguïté de l'espace de travail sur le chantier et enfin d'assurer un meilleure gestion et contrôle de la qualité des éléments.

Les éléments sont transportables par camions et soulevés à l'aide d'une grue. Chaque module pèse moins de 7 tonnes avec une épaisseur suffisante[79]. Ils sont préalablement noyés dans de la chaux à l'endroit de pose afin de bien fixer les joints. Ces derniers peuvent être renforcés par du ciment afin d'agir comme des barrières anti-érosion.



Photo II.1.2 : Transport et mise en place des blocs du pisé préfabriqués
Source : rauche 2007

[79]Chabanne.julien, mémoire de spécialisation et d'approfondissement, « une ossature bois spécifique aux remplissages » architecture de terre DSA terre soutenu le 29 septembre 2006, p22.

II.3.1. Les étapes de fabrication des modules préfabriqués en pise

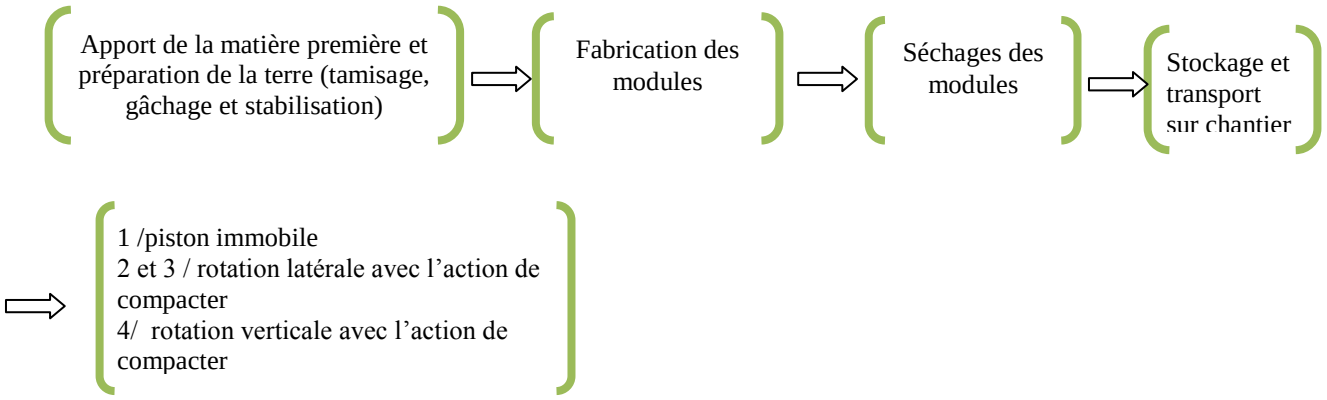


Figure II.5: Processus de préfabrication du pisé

Le principe de la préfabrication du pisé repose sur l'automatisation de la technique traditionnelle[80]. Ce qui permet de réaliser plusieurs éléments préfabriqués à la fois. Pour cela, on dispose de plusieurs banches afin de mouler un mur de 15 à 20 m de long, de 2,8 m de hauteur maximale (en général 2,2 m) et d'une épaisseur de 0,90 m[81].

Ce moule est séparé en plusieurs parties à l'aide de cales facilement démontables. Elles délimitent les différents éléments à préfabriquer. Au fond des banches, on dispose des palettes qui serviront au transport des blocs.

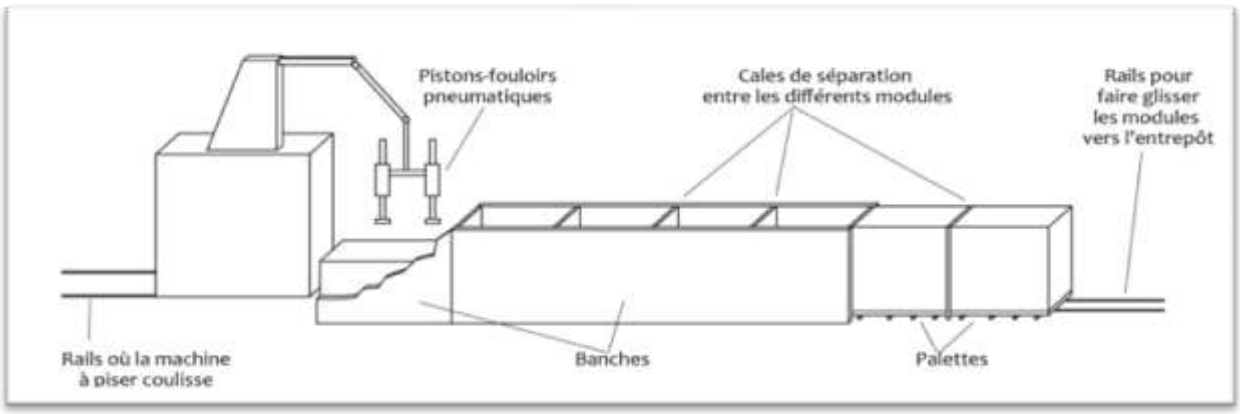


Figure II.6: Processus de préfabrication des modules. Des échafaudages autour des banches permettent aux ouvriers d'accéder à l'intérieur du moule.
Source: ECN centrale, Nantes.

[80] La technique crue rentre dans le moule, technique & chantier, le moniteur, le 18 janvier 2013, op cite, p38-41.
[81] Idem.

Le compactage s'effectue le long du moule, grâce à un fouloir pneumatique composé de deux pistons circulaires servant à compacter la terre[82]. Ces derniers peuvent pivoter autour de leur axe et ainsi atteindre toutes les zones du moule, excepté les angles qui sont réalisés manuellement par des ouvriers.

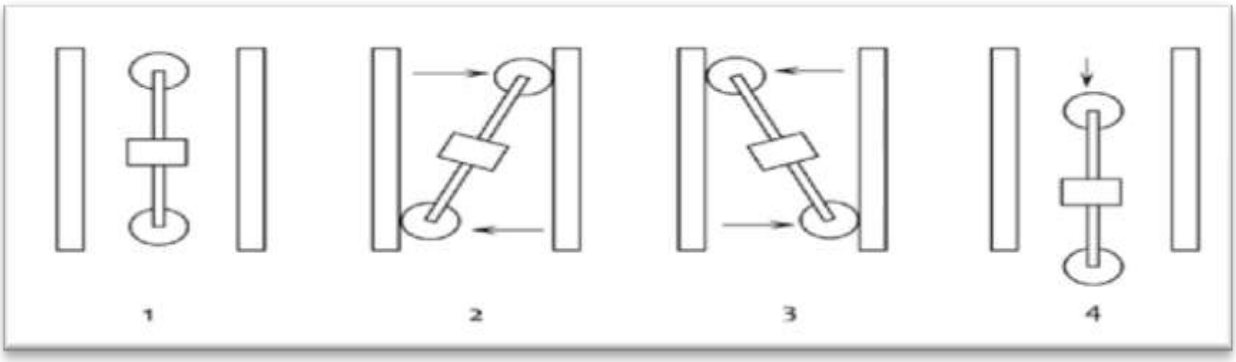


Figure II.7: Détail de préfabrication du pisé.
Source: ECN centrale, Nantes.

L'épaisseur des couches de terre sont maintenues à 10 cm pour une meilleure maitrise de l'action de compactage. Une fois la hauteur finale atteinte, on procède au décoffrage des blocs de murs et ils seront transportés aux entrepôts de séchage pour une durée d'environ une semaine, avant livraison sur chantier.

II.3. Identification des éléments associés des constructions en pisé :

II.3.1. Identification des éléments associés des structures verticales :

II.3.1.1. Les fondations et soubassements:

Les fondations des constructions en pisé sont généralement peu profondes. Elles ont les mêmes largeurs que les murs. Traditionnellement, elles sont construites en pierre mais aujourd'hui elles peuvent être en béton. Leur édification se base sur l'utilisation du même coffrage que celui des murs.

[82]Idem



Photo II.3 : Mise en place du coffrage pour édification des fondations



Photo II.4 : édification des fondations en pierre

Quant aux soubassements, ils sont le prolongement des fondations. Leurs hauteurs est variable. Ils protègent les bâtisses contre les actions fragilisant la partie inférieure du mur (les rejaillissements des gargouilles, le développement des flores parasite « mousses », du ruissellement et des remontés capillaire[83]).



Photo II.5.6 : photo représentant l'exécution des murs en pisé avec soubassement à gauche et sans soubassement à droite

[83] Les remontés capillaires à la base des murs peuvent avoir différentes origines : fluctuations saisonnières de la nappe phréatique, rétention d'eau par des racines d'arbustes, absence de drainages, stagnations et mauvaises évacuation des eaux….



PhotoII.7. : Reste d'un mur en pisé à Maatkas sans soubassement en pierre
Source : auteur

Les soubassements, tout comme les fondations, constituent une ceinture le long des constructions sur lesquels les murs prennent naissance et appuis. Traditionnellement, ils sont en pierre ou en brique de terre cuites, mais, aujourd'hui, les matériaux utilisés sont divers telle quela brique de parpaings, le béton cyclopéen[84], le béton armé selon les techniques actuelles ou même le pisé stabilisé[85] avec du ciment.

II.3.1.2. Les murs

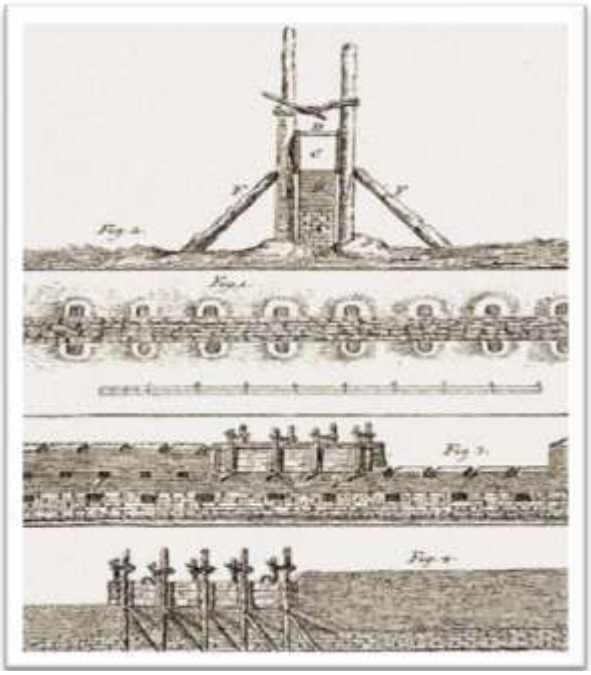


Photo II.8 : Épaisseur du mur en pisé à Maatkas, à gauche épaisseur est de 40cm, à droite 60cm.
Source : auteur

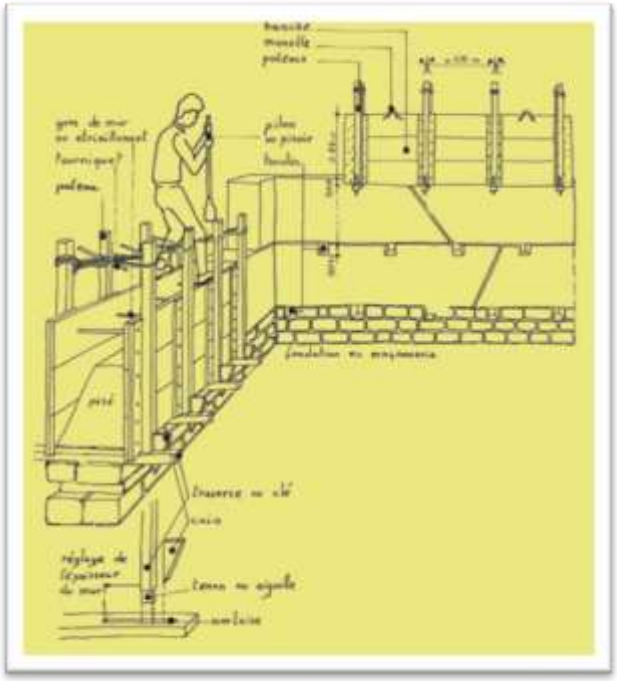
L'épaisseur des murs en pisé varie entre 40cm et 60cm selon l'importance de l'édifice et sa fonction[86]. Les études effectuées par le CRATterre, démontrent qu'il existe un rapport entre la hauteur et l'épaisseur du mur. Ce rapport est légèrement supérieur à 10[87](un mur de 50 cm d'épaisseur peut développer une hauteur de 7 mètre, cependant, il est impossible de diminuer l'épaisseur sous la fourchette de 40 cm pour des raisons de mise en œuvre).

Selon les régions et les cultures constructives, les murs présentent des différences dues à l'ajout d'autre matériaux, l'exécution et même le type de coffrages (méthode lyonnaise, méthode de Bugey[88]).

[84] Consiste a enveloppé les moellons dans des couches de béton, l'enrobage doit être égale au supérieur à 3cm.
[85]Houben H, Guillaut H Traiter de la construction, op. Cité. p 247.
[86]Doat P, Hays A, Houben H, Matuk S, Vitoux F. construire en terre. Op cite. p 25
[87]Idem
[88] La méthode du Bugey, dans la région de l'Ain, consiste à maintenir les banches par un étayement directement du sol par de longues perches verticales (poteaux de bois de 8 cm de diamètre) de chaque cote du mur. Avec la méthode de Bugey, on peut éviter



FigureII.9 : représentant la méthode bugey très répondue en chine



FigureII.8 : représentant la méthode lyonnaise
Source : CRAterre

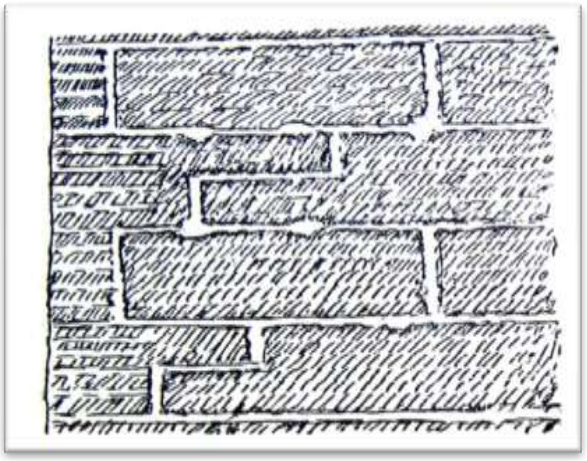


Figure II.10: Pisé a joints en gradin.
Source: Vincent Durand.

En se réfèrent au mode de mises en œuvre, on dénombre trois variantes de joints, verticaux, obliques[89]et en gradins[90]. Les obliques obéissent à l'utilisation du fond de banche incliné, en générale de 45° à chaque banchée contrairement aux joints verticaux.Goiffon nous explique à ce propos que« *...chaque banchée se termine donc en un plan incliné ; or c'est l'œil du piseur qui le guide quand il le forme ; il voit sur les rives des banches, le mieux où il doit aboutir en montant. Il termine la longueur de ses lits, en conséquence de cette observation, en tant qu'il travaille sur ce plan incliné, il dirige son pison perpendiculairement à la ligne d'inclinaison qu'il s'est proposé, c'est dans ce cas qu'il frappe parfois des flancs de masse… »*[91].

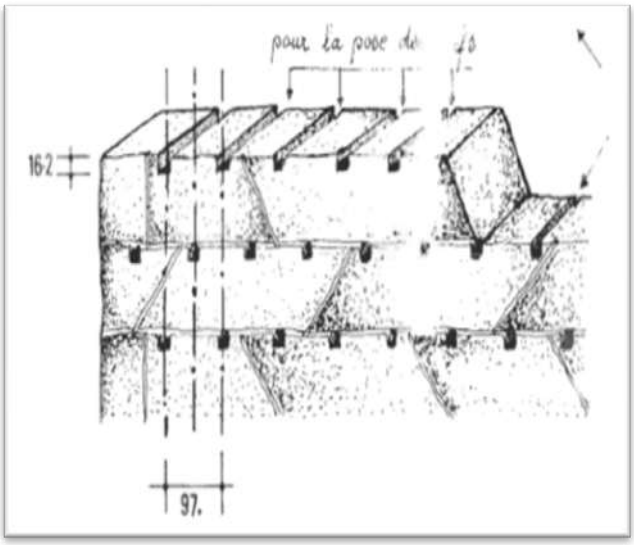
les trous sur le mur. Ce système présente l'avantage de la rapidité, mais il ne permet d'édifier que des constructions de hauteur limitée, et le matériel nécessaire à sa mise en œuvre est encombrant et difficile à transporter.

[89]Doat P, Hays A, Houben H, Matuk S, Vitoux F. construire en terre. Op cite. P 22.

[90]Durand.V, « les constructions en pisé », bulletin de Diana, Tome. XI, communication 27 décembre 1900, p.514-523.

[91]Doat P, Hays A, Houben H, Matuk S, Vitoux F. construire en terre. Op cite. p22.

II.3.1.2.a. Le chainage



Les constructions en pisé peuvent être chainées ou pas du tout, ce qui représente un point faible, provoquant des problèmes au niveau les fondations notamment en l'absence d'harpage.

Par ailleurs, Il a été relevé un chainage efficace par des tiges en bois assemblées aux angles par encastrement dans l'épaisseur du mur horizontal. Selon *Goiffon*, leur diamètre optimal est de 15 cm, il préconise selon l'utilisation de la nature du bois ;

- Utilisation du bois de sapin : faire passer au préalable dans un bain de chaux et de sable
- Bois de chêne : faire passer au préalable dans un bain de plâtre ou de terre « *si c'est du sapin, il est d'expérience que le mortier de chaux et sable brule le chaine et nourrit le sapin ; c'est la raison pour laquelle il faut maçonner en plâtre ou a son défaut de bon mortier de terre toute portée de bois en chêne* »[92].



Photo II.9: Utilisation du bois dans le chainage des murs en pisé.
Source: Craterre.



Photo II.10 : érosion de l'angle laissant apparaitre le chainage à Maatkas
Source: auteur.

II.3.1.2.b. Les Angles

Les angles des constructions en pisé constituent une préoccupation majeure. Leur traitement pose toujours un problème. Il existe plusieurs solutions pour leur renforcement :

[92]Idem p 26.

- un harpage des banches,
- un traitement en maçonnerie de pierre ou de brique,
- par des coffrages adaptés (réalisé en une pièce).

Cette partie est particulièrement sensible à l'érosion, on prévoit alors la pose d'un chanfrein, ou l'utilisation d'un sabre triangulaire afin d'éviter l'angle droit, ou en alternant les couches de terre et de lits de chaux. Ce système est appliqué aux angles et aux murs de refends.



Photo II.11 : Renforcement par la chaux au niveau des angles.
Source: Craterre.

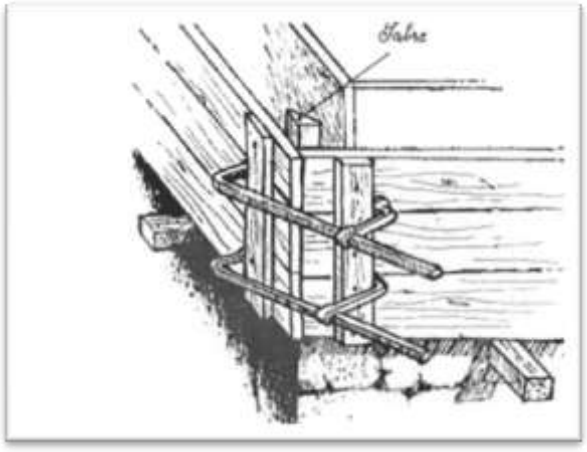


Figure II.12 : Chanfrage de l'angle par pose d'un ''Sabre'' dans l'angle extérieur de la banche.
Source: Craterre.

II.3.1.3. Les ouvertures

Les ouvertures des constructions en pisé sont régulières et de forme rectangulaires, associées, parfois à des arcs et de dimensions réduites. Le placement de deux fonds de banches suffit pour leur réalisation ou bien en utilisant des coffrages perdus de dimensions préalablement définies. Les linteaux et les cadres sont soit en bois, en pierre ou en briques selon les régions.



Photo II. 12: typologie d'ouvertures dans les constructions en pisé à maatkas.
Source: auteurs.

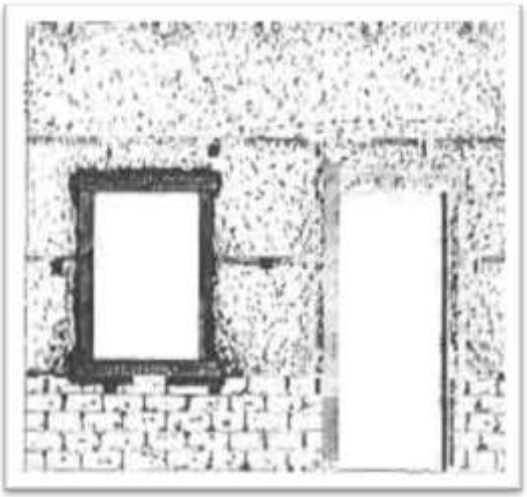


Figure II. 13: Les ouvertures dans les constructions en pisé.
Source: Craterre.

II.3.2. Identification des éléments associés des structures horizontale :

II.3.2.1. Les planchers :

Les planchers particulièrement lourds, sont de formes rectangulaires en bois à base de solives ou de rondins noyés dans l'épaisseur des murs. Qu'ils soient à travures simples ou composées[93], selon les régions et les cultures constructives, il existe deux types de pose des solives :

- la première consiste à aller graduellement en hauteur, « *on creuse le logement des solives sur le sommet des murs* »[94] puis on installe le plancher pour pouvoir progresser dans le banchage de l'étage suivant.
- La deuxième méthode consiste à poser les solives qu'après avoir réaliser le mur dans lequel on applique des creusements pour leur logement.



Photo II. 14 : poids du plancher supporter par des lambourdes posé sur corbeau à Maatkas
Source : auteur



Photo II.13 :poids du plancher posé sur l'épaisseur du mur à Maatkas
Source : auteur

Toutefois, il est recommandé de placer des semelles de répartitions sous chaque solive et d'appliquer une couche de goudron dans la partie noyée afin d'éviter son pourrissement[95].

II.3.2.2. Les couvertures

Partie importante de la construction, elle permet de protéger la construction en pisé des eaux de pluie et de l'érosion. Elles sont souvent constituées de deux auvents dont les dépassements n'excédant pas 1 m. Les matériaux utilisés varient selon les régions, en chaume en ardoise et tuiles plates ou Canales…etc.

[93]AliliS, guide technique pour une opération de réhabilitation du patrimoine architectural villageois de Kabylie, mémoire de magistère, sous la direction de Dahli M, UMMTO.2013 page 71
[94]Doat P, Hays A, Houben H, Matuk S, Vitoux F. construire en terre. Op cite. p 28.
[95]Philkyprou M. Op Cite.p.239.



Photo II.15 : couvertures en tuiles à Maatkas
Source : auteur



Photo II.16 : Protection des murs de clôtures a Maatkas, avec de la tuile
Source : auteur

II.4.Identification des procédés de mise en œuvre du pisé dans le bassin méditerranéen

La technique du pisé, en méditerranée remonte à la période punique (rive ouest), puiselle s'est diffusée dans le pourtour méditerranéen à partir du moyen âge par les musulmans[96]. Des spécificités propres à chaque région ont été relevées relatives à la nature de la terre, la climatologie et à la typologie architecturale propre à chaque région et culture.

Ces variantes trouvent leur explication dans l'adjonction d'autres matériaux[97] lors de la mise en œuvre des éléments structurels et des coffrages, induisant, ainsi, des pisés à joints verticaux ou obliques, ou encore l'application de cordons de mortier de chaux entre les lits pour lutter contre l'érosion.

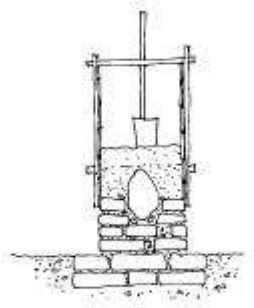
Dans l'objectif d'augmenter l'adhérence des enduits ou en association avec la terre de mauvaise qualité, selon les régions, on retrouve des lits en pierre, en tuile plates ou non, en brique d'adobes ou en brique cuite, d'une façon régulière ou non dans les ouvrages associés.

En se référant aux fiches établies par *EuroMed héritage* sur l'architecture traditionnelle méditerranéenne nous avons établi une lecture comparative entre les différentes régions de cette partie du globe ;

[96]MEDAcorpus, Architecture traditionnelle mediteranieenne, A8-mur en terre banchée (pisé) méditerranée, www.medacorpus.net.
[97] Le recours a d'autre matériaux peut s'expliqué soit par la volonté de répondre au problème de résistance, un souci d'économie, de rapidité de mise en œuvre ou pour répondre au problème d'adhérence des enduits sur ces murs en pisé.

	France	Espagne	Portugal	Egypte	Syrie	Maroc	illustration
Période d'apparition	l'usage de cette technique est attesté à partir du XVIIème siècle. Elle est tombée en désuétude au début du XXème siècle.	-	A connu une expansion pendant la période islamique à partir du VIII^{eme}siècle et jusqu'au XIIIeme siècle.	-	cette technique s'emploie depuis l'Antiquité dans la région	très ancienne a connu une large diffusion avec l'expansion de l'Islam et le contact avec la péninsule ibérique aux environs du Xe siècle.	
Situation dans le pays	Région : Lyonnaise, Dauphiné, Auvergne, Bresse et Perpignan.	Zone rurale urbaine et maritime	courante en milieu urbain et rural, en plaine et dans les régions maritimes.	milieu rural et dans les régions maritimes.	répandu dans les campagnes de Damas du fait de son coût de production minime et de la rapidité de leur exécution. Notamment dans les murs de séparation entre les champs.	couramment dans le monde rural, en particulier dans les plaines (ex. : plaine du Gharb) et les zones côtières (ex. : Rif côtier).	

PRINCIPE CONSTRUCTIF								
Fondation		constituée de moellons bruts, de galets, et parfois d'un mélange moellons/briques qui dépasse largement le niveau du sol (de 40cm à 1m)	Constituée en une superposition de couches de pierre.	La fondation du mur est directe et superficielle, constituée de pierres, d'épaisseur égale à celle du mur lui-même. Elle forme un soubassement d'une hauteur d'environ 50 cm.	constituées soit de pierre, ou de petites briques.	les fondations ont 60 - 80 cm de largeur. Leurs profondeurs peuvent atteindre 120 cm suivant la nature du sol ; ces tranchées seront ensuite remplies de pierres calcaires surélevées pour former un soubassement de 30/40 cm au-dessus du niveau du sol, afin d'assurer la protection contre les eaux et l'humidité.	la fondation est plus large que le mur en élévation et mesure de 50 à 60 cm de largeur. Elle se prolonge généralement en soubassement. Dans les zones humides, peut dépasser un mètre hauteur.	 En France  Maroc
Matériaux constructif	durabilité	5	Le pisé est moyen 5	terre banchée est parfois additionnée de chaux ce qui augmente la dureté avec le temps, et peut atteindre 6 ou 7 (pisé est	le pisé est faible les murs de pisé sont composés de terre glaise.	Riche en graviers ou en petits cailloux. La chaux et la paille sont également incorporées au mélange de terre. 5		 Syrie

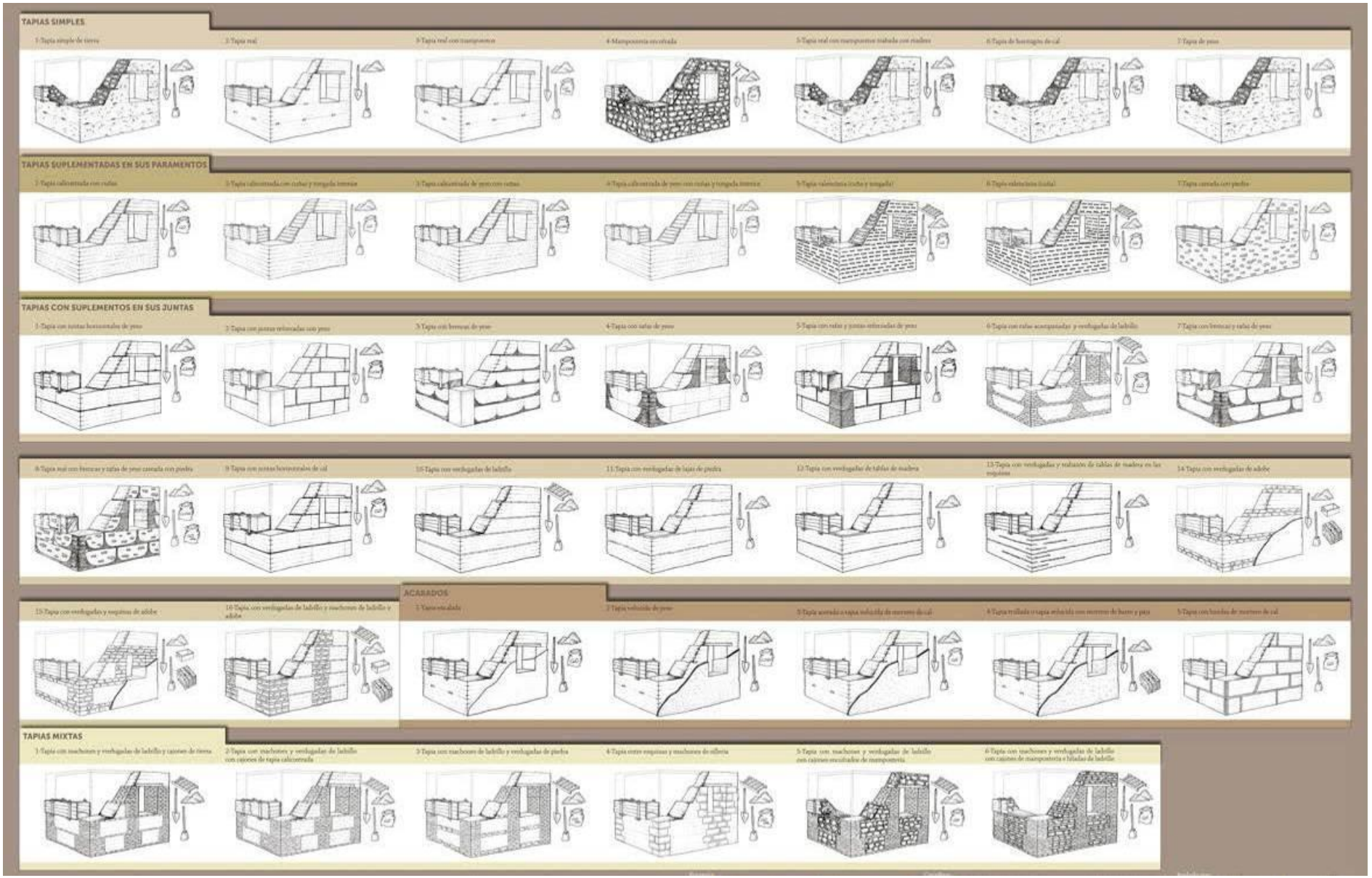
				stabilisé à la chaux.)				
	module	(0,80 à 0,90 m de hauteur, 3 m de longueur, remplie de 2/3 aux 3/4, la hauteur des assises varie de 60 cm à 80 cm. Des banches de 20 cm de largeur auxquelles en applique un cordon de chaux appliqué à chaque côté de parement.	1 m. de largeur, et 30 cm de hauteur.	Les dimensions les plus fréquemment rencontrées sont (L. – l. – h) : 1.70 à 2.00 m 0,50 à 0.60 m 0.50 à 0.60 m	la hauteur d'une phase de banchage est de 50 cm.	le module de banchage varie en longueur entre 2 et 2,5 mètres. La hauteur peut mesurer entre 80 cm et un mètre. L'épaisseur du mur en terre banchée est comprise entre 40 et 50 cm.		 Espagne  France 

Aspect de finition	systématiquement enduit à l 'aide d'un mortier de chaux pour les façades principales des habitations. Contrairement au reste de l'habitation (mur pignon) ou bâtiment agricole en peut marquer l'absence de l'enduit.	les murs en terre banchée sont protégés avec un enduit de terre.	Les zones schisteuses les murs ne sont pas revêtues. La particularité de l'enduit utilisé est un enduit en deux couches. (la première étant constituée de terre tamisée de 3 mm d'épaisseur. Après séchage de la première couche, une seconde couche est appliquée, constituée d'un mélange de chaux et de sable, et lissée à la truelle en épaisseur de 4 mm. L'ensemble	Traditionnellement les murs sont protégés par une peinture à la chaux. Les murs nus sont également rencontrés.	Le gravier de la terre banchée et les joints entre les assises donnent l'aspect extérieur de cette surface. Ces surfaces sont enduites d'une couche à base de terre. Des graviers apparents à la surface assurent l'adhérence de l'enduit sur le mur.		`  Portugal

			est enfin blanchi à la chaux.				
Épaisseur et dimension	l'épaisseur varie entre 60 et 40 cm, elle est généralement légèrement décroissante avec la hauteur	épaisseur approximative de 60 cm. Les murs de clôture ont une épaisseur de 40 cm.	L'épaisseur comprise entre 45 et 90 cm. Les parois du rez-de-chaussée ont une épaisseur de 90 cm. Aux étages, les parois sont de moindre épaisseur, avec un maximum de 50 cm. Pour les murs intérieurs, les épaisseurs courantes sont de 45 et 60 cm.	les épaisseurs des murs varient 30 à 50 cm. (Pour une épaisseur de 50 cm, la hauteur du mur peut mesurer jusqu'à 5 m.)	les épaisseurs des murs varient en général entre 50 et 60 cm.	L'épaisseur du mur varie de 40 à 50 cm. Mais peut atteindre 120 cm d'épaisseur pour des ouvrages tels que les enceintes des villes.	 Maroc

Quant à la péninsule ibérique, les travaux réalisés par l'organisme Reastapia propose l'identification suivante des murs en pisé qui sont :

- Les murs en pisé simple
- Les murs en pisé renforcés par des parements
- Les murs en pisé renforcés aves joints et harpage
- Murs en pisé avec finitions extérieurs
- Les murs en pisé mixtes.


TAPIAS SIMPLES
TAPIAS SUPLEMENTADAS EN SUS PARAMENTOS
TAPIAS CON SUPLEMENTOS EN SUS JUNTAS
ACABADOS
TAPIAS MIXTAS

Les mises en œuvre les plus répondues sont :

II.4.1. les murs en pisé de terre

Le mur en pisé de terre est réalisé à l'aide d'un coffrage en bois dans lequel la terre est mélangée à de la chaux, versée puis tassée. Le mur est ainsi réalisé par une répétition successive de cette opération par la création d'unités (les banches)[65].

Les murs portent les marques des planches qui forment ce coffrage, l'application d'enduits comme protection contre les agressions climatiques est fréquemment utilisée.

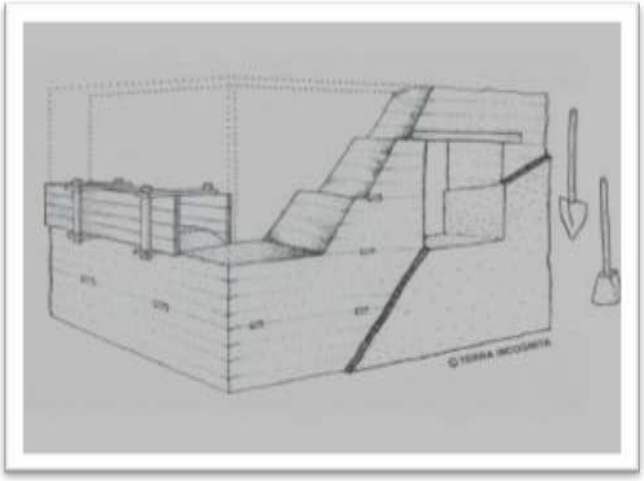


Figure II.14: mur en pisé de terre
Source: Restapia.

II.4.2. les murs calicastrada

Le coffrage reste le même que celui du mur en pisé de terre, la différence reste dans la mise en œuvre car elle consiste à « couler » un mortier de chaux le long du coffrage avant la mise en œuvre de la terre et de son damage. La répétition de cette opération forme un aspect fini du mur .Les couches de mortiers se rejoignent sur la surface extérieure et forment une couche continue de calcaire qui protège le mur.

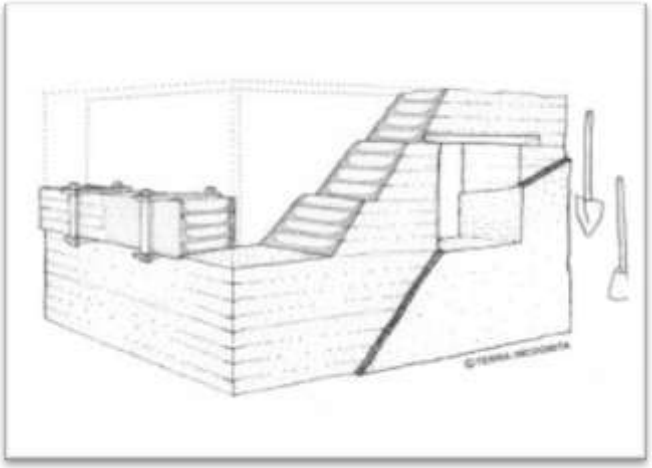


Figure II.15: Mur calicastrada « avec finition extérieure »
Source: Restapia

II.4.3. Les murs valenciens

Cette technique est un procédé issu d'une longue évolution des murs en pisé en Espagne[66]. Elle consiste à placer les briques de terre cuites contre le coffrage et de remplir le cœur avec un

[65] MEDAcorpus, Architecture traditionnelle mediteranieenne,A8-mur en terre banchée(pisé) Espagne, www.medacorpus.net.
[66] MEDAcorpus, Architecture traditionnelle mediteranieenne,A8-mur en terre banchée(pisé) Espagne, www.medacorpus.net.

béton de terre.Cette technique est très répandue depuis le XIIIème siècle à Valence d'où le nom *tapia valencia*[67].

Le mur de *Tapia* de valence, reprend le principe de mise en œuvre avec un coffrage de 90cm de hauteur et de 270 cm de largeur. Les briques utilisées pour ces murs ont les dimensions suivantes 34x17x4cm déposées le long du coffrage en boutisse espacées et liées avec un mortier de chaux puis recouvertes d'une couche de terre de 10cm d'épaisseur[68]. L'aspect extérieur du mur laisse apparaitre les briques en terre cuite légèrement en retrait ; résultat du dépassement du mortier de chaux qui recouvre les bords des briques.

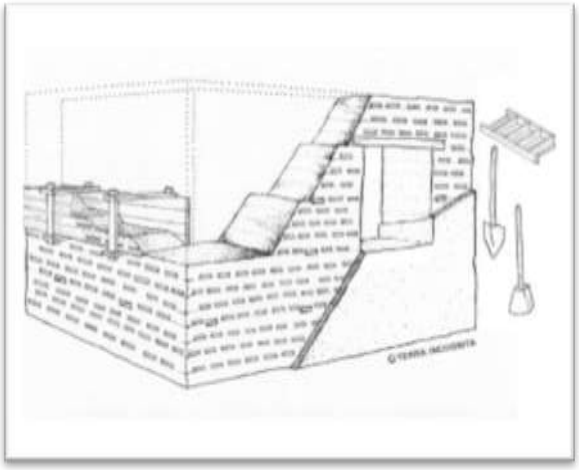


Figure II.16: mur en pisé valencien
Source: restapia.



Photo II.17: photos de l'aspect du mur en pisé valencien
Source: restapia.

Toutefois, les détails de mise en œuvre présentent bien des divergences, car selon le document présenté par *Tortajada,* les briques sont déposées non seulement à plat en boutisse le long du coffrage mais aussi certaines briques sont déposées à l'intérieur du coffrage, au centre du mur[69].Le compactage commence à partir du centre vers les côtés, perçant dans le mortier de chaux ayant comme effet la coulée partielle de ce dernier sur les briques ce qui explique le léger retrait. Quant aux trous des clés, ils sont comblés par des briques ou du mortier[70].

La présentation développée par *Tortajada* est contredite par les travaux de *Cristini* et *Checa,* qui expliquent que le compactage à partir du centre induirait systématiquement le mouvement

[67]Cristini.v,ruizcheca. J.r, « tapiavalenciana :caracteristiche di muri in terra crudarinforzati con mattoni », in mediterra 200, proceedings, edicomedizione, monfalcone, Italie,p 285-294.
[68]Allich.S, la formalisation comme outil d'identification d'un procédé constructif, cas d'etude : le tabiya(pisé) de cherchell. mémoire de magistère, sous la direction de chenaoui y. EPAU. Avril 2012. P 114.
[69]GalarzaTortajada.M, « La Tapia Valenciana :UnaTécnicaconstructiva Poco Conocida »,In Actas Del Primer Congreso National De Historia De La Construccion, Madrid,1996,P 211-215
[70]Idem.

des briques ce qui donnerait une finition contraire à celle observée ; les briques seraient en saillie par rapport au mortier qui serait en arrière-plan[71].

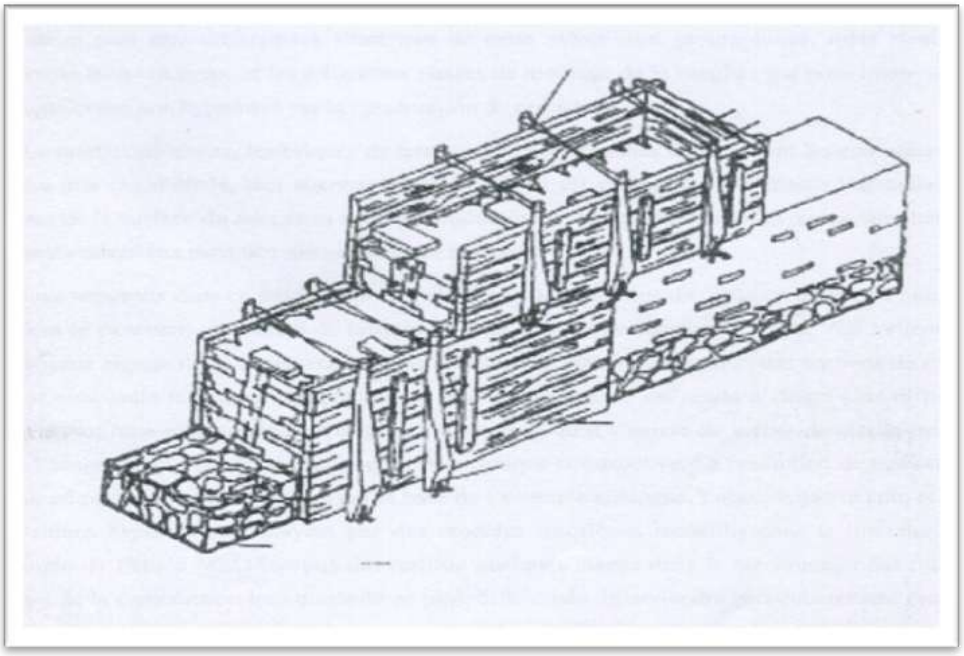


Figure II.17:procéder de la mise en œuvre de la variante valencienne.
Source: Galarza Tortajada.

La technique de la *Tapia* de valence présente plusieurs avantages:

 Les briques en terre cuite permettent une bonne répartition des efforts horizontaux et verticaux dans la section des murs ;

 Les briques augmentent l'adhérence entre les couches de terre ;

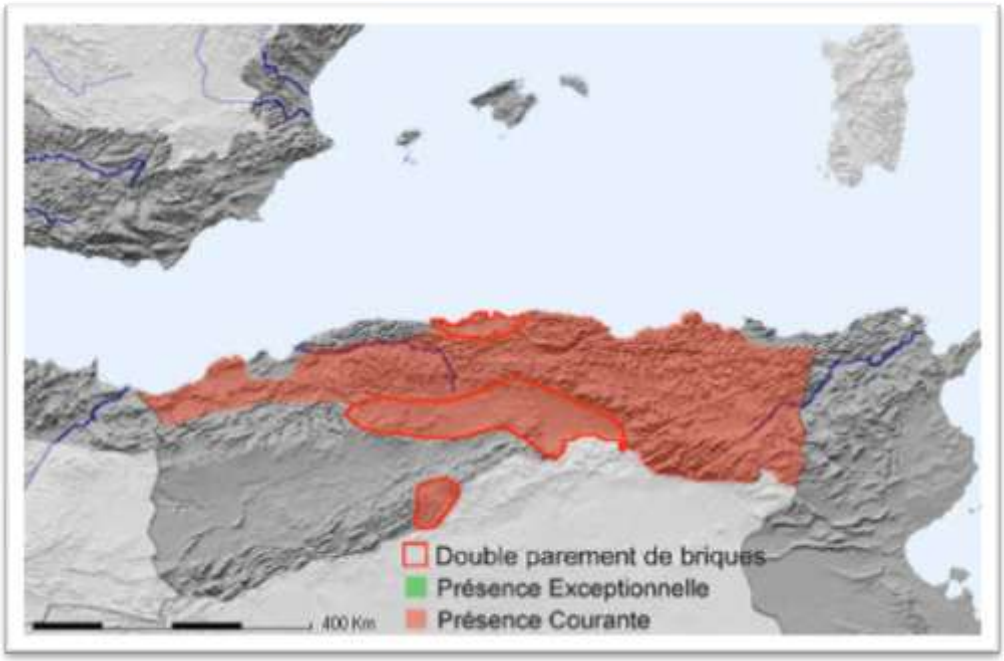
 Le débordement du mortier de chaux constitue une double protection des murs contre les agents climatiques ;

 L'économie, qui permet d'admettre une bonne résistance suite au renforcement avec les briques cuites mais d'un nombre réduit contrairement à un mur maçonné entièrement en briques cuites.

II.5 Identification des procédés de mise en œuvre du pisé en Algérie

[71]Cristini.V,RuizCheca. J.R, « Tapia Valenciana :Caracteristiche Di Muri In Terra Crudarinforzati Con Mattoni », op cité. P285-294.

L'usage de la technique du pisé en Algérie remonterait à la période Almohade au XIIème siècle[72]. *« L'utilisation de cette technique s'est généralisée aux habitations durant les époques ultérieures, sous l'influence des andalous »*[73]. Sa présence sur toutes la bande littorale jusqu'à l'atlas saharien en passant par les haut plateaux en se combinant avec les pratiques sociales de l'espace pour produire une architecture locale, dénote des spécificités propres à chaque région.



Carte II.18: Localisation des différentes variantes du pisé en Algérie.
Source: Meda corpus.

Généralement, le cadre de coffrage est constitué de planchettes (*matera*) mesurant de 1 à 1,80 m de longueur et munies de huit perforations pour assurer la liaison des planchettes entre elles grâce à des baguettes. Le damage de la terre est réalisé à l'aide d'une dame (*rekkàl*) et une batte (*sawàtta*). Les murs en pisé se dressent sur des fondations d'une épaisseur de 80 à 120 cm. Quant à la hauteur des banches, elles peuvent mesurer jusqu'à 1.50m de hauteur. La terre est mélangée à des débris de briques, de tuiles, de paille hachée des galets et de la chaux en bloc.

En Algérie, l'épaisseur des murs en pisé varie de 40 à 120cm, en fonction de la hauteur des constructions (la hauteur maximale est de 9m). Selon la classification faite par MEDA Corpus, il existe trois variantes, résumé dans le tableau suivant.

[72]MEDAcorpus, Architecture traditionnelle mediteranieenne,A8-mur en terre banchée(pisé) Algerie, www.medacorpus.net.
[73]Idem.

	Murs en Pisé traditionnel	Murs Pisé alterné de lit de pierre	Murs Pisé a double parement en brique
fondation	La largeur des fondations ont la même dimension des murs à édifier et d'une profondeur de 0.50 à 1.10m. les fondations sont comblées avec de grosses pierres nettement taillées de 40 cm de côté. On commence toujours par un angle.	La largeur des fondations ont la même dimension des murs à édifier et d'une profondeur de 0.50 à 1.10m. les fondations sont comblées avec de grosses pierres nettement taillées de 40 cm de côté. On commence toujours par un angle.	les fondations peuvent avoir une profondeur de 0.50 à 1.10m sont comblées avec de grosses pierres nettement taillées de 40 cm de côté. Comme mortier on utilise de la glaise sans addition de chaux.
Composition du béton de terre.	Le mélange de la terre, de la paille, de galets, de chaux et des débris de briques ou de tuiles.	La terre glaise est trie des cailloux puis en procède au gâchage et trituration de la terre additionnée a la paille, de fragment de pierre et mêlée d'eau en piétinant rythmiquement la terre.	Pour la confection de la brique on utilise de l'argile de qualité variable de couleur rosâtre et rarement jaunâtre façonnée à la main et cuites au four artisanal. Le mortier de chaux dosé a deux mesure de d'agrégats (sable fin et galets fin) pour trois mesure de liant, l'ensemble est mêlé a de l'eau et de l'huile végétale à des intervalle de temps déterminé, le battage

			se fait à l'aide d'un maillet en bois pendant trois nuit et 3 jour consécutifs. Pour le béton de terre on mélange de la terre, de la paille, de galets, de chaux et des débris de briques ou de tuiles
Dimension du coffrage	La longueur de banches varie de 1 à 1.80cm percées de 4 trous opposés dans lesquels on enfile 8 baguettes qui fixe le cadre et règle l'épaisseur des murs.	La longueur de banches est d'environ 2.50m et d'une largeur de 0.75 m fixés sur la base du mur et étayés chacun par trois madriers équarris plantés dans le mur. Les six madriers soutenant les planches sont assemblés deux à deux par leur sommet au moyen de poutrelle transversales percées à leurs extrémités de trous carrés. Le coffrage se ferme au deux extrémité l'aide de portes. L'ensemble est serre à l'aide de cordes.	Pas de coffrage. Les parements de brique constituent le coffrage des murs. la verticalité et l'horizontalité est contrôlé a l'aide de fil à plomb, règle en bois et tuyau.
Mise en œuvre	Apres la mise en ouvre des fondations les mus sont confectionné a l'aide du coffrage dans le quel en verse le mélange de terre préalablement	En commence par la mise en place d'un lit de petites pierres au fond du coffrage à l'aide d'une massue en bois menie d'une manche langue, puis en verse sur cette	La mise œuvre se partages en phases, celle de la préparation des briques cuite confectionne à la main et la préparation du béton de terre puis en passe a

	confectionné, le damage se fait a l'aide d'une dame en bois. L'homogénéité du pisé est assure en frappant régulièrement les parois à l'aide d'une batte en bois.	couche le mortier de terre additionnée de paille et de fragments de pierre sur une hauteur de 40 à 50 cm et pilonner . en alterne la pose du pisé et de pierre à l'intervalle régulier. L'homogénéité du pisé est assure en frappant régulièrement les parois à l'aide d'une batte en bois.	l'édification du mur en aliénants les briques qui sont liaisonnés avec mortier de chaux d'une épaisseur appréciable de 10 à 15 cm une fois le mortier durcie il résiste autant que la brique a la compression grâce a la chaux. Lorsque le mur attint une hauteur de 1m le béton de terre est coulée dans le moule préalablement confectionnée de briques maçonnées qu'on dame avec une longue dame en bois.
Temps de construction et de séchage	Pour un maçon unique le temps d'édification du mur est de deux jours de travail en moyenne. Le temps de séchage du mur avant pose du planché est évalué de 10 à 15 jours.	le temps d'édification du mur est de deux jours de travail en moyenne. temps de séchage du mur avant pose du planché est évalué de 10 à 15 jours.	La confection des briques de mortier de chaux ajouté au béton de terre dure de deux a trois semaines. Le temps de séchage dure de 2 à 10 jours selon le mortier utilisé.
	La finition consiste à un enduit de chaux mêlé de cendre de bois en première couche et en surface un	Le joint de tous ces blocs sont très visibles, les surfaces du mur ressemblent à un	Le mortier de hourdage est utilisé comme couche d'accrochage. La finition consiste à un enduit de chaux mêlé de cendre de

enduit	badigeonnage au lait de chaux.	damier unicolore à teinte gris brunâtre. L'enduit utilisé est en terre glaise, de bouse de vache et de paille finement hachée, la finition est faite à l'aide d'un dressage en terre blanche (temlilith)	bois en première couche et en surface un badigeonnage au lait de chaux.

Conclusion :

L'étude des différentes variantes de la technique du pisé notamment dans le bassin méditerranéenet en Algérie, nous a permis de faire ressortir en plus desdivergences, les points commun dans l'utilisation des matériaux et leurs mises en œuvre.Le fond documentaire sur le thème du pisé et les investigationssur terrain nous ont permis en premier lieu d'actualisé la carte de sa localisation (en terme de technique) mais aussi d'identifier sa mise en œuvre jusqu'à l'enduit fait à base de chaux d'argile ou de ciment, en passant par le temps de construction et du séchage. Leur compréhension à contribuer à la stabilisation physico chimique du matériau terre et à l'industrialisation de la technique du pisé en réduisant la main d'œuvre et le temps de la construction.

Ce présent chapitre nous a aidés d'établir un premier diagnostic sur les problèmes pouvant affecter les différents éléments constructifs en particulier les terres des murs, les pierres des fondations et soubassements quand ils existent, ainsi que le bois très présent dans les structures horizontales et les encadrements des ouvertures.

Les murs des constructions en pisé sont des murs porteurs réalisés en terre crue, alterner ou pas de lits de pierre. Ils présentent des faiblesses essentiellement au niveau de la partie basse des murs, causés par des intempéries, à l'abandon et au choix de l'enduit (le ciment). Les pathologies et les remèdes liés à ces éléments seront le sujet du chapitre suivant.

Chapitre III :

Les pathologies et recommandations dans les constructions en pisé

Introduction

Le diagnostic des pathologies susceptibles d'affectées les constructions en pisé nécessite une approche différente de celle que nous pouvons rencontrer dans les constructions contemporaines construites avec des matériaux nouveaux. Les désordres ne sont pas uniquement liés aux caractéristiques du matériau, mais relèvent aussi de la conception, la technique de mise en œuvre (perte des savoir-faire), l'usage et l'entretien des bâtisses.

Les désordres que nous pouvons relever peuvent être le résultat d'une dégradation très lente spécifique aux techniques constructives ainsi qu'à la qualité de la terre utilisée.

III.1.Les cause de dégradation des constructions en pisé

Les principales causes de dégradations des constructions en pisé sont dues, particulièrement, à la présence excessive de l'eau [107], dans les murs en particulier. Le pisé , particulièrement, sensible aux actions de l'eau présente à proximité du bâtiment ; elle devient un agent actif très nuisible. L'action de l'eau[108] sur l'édifice se résume d'une part par la goutte d'eau ; impact, ruissellement, stagnation, absorption, infiltration et rejaillissement, d'autre part l'action de l'humidité constitue une autre forme d'action de l'eau et ce par la perméabilité et la capillarité.

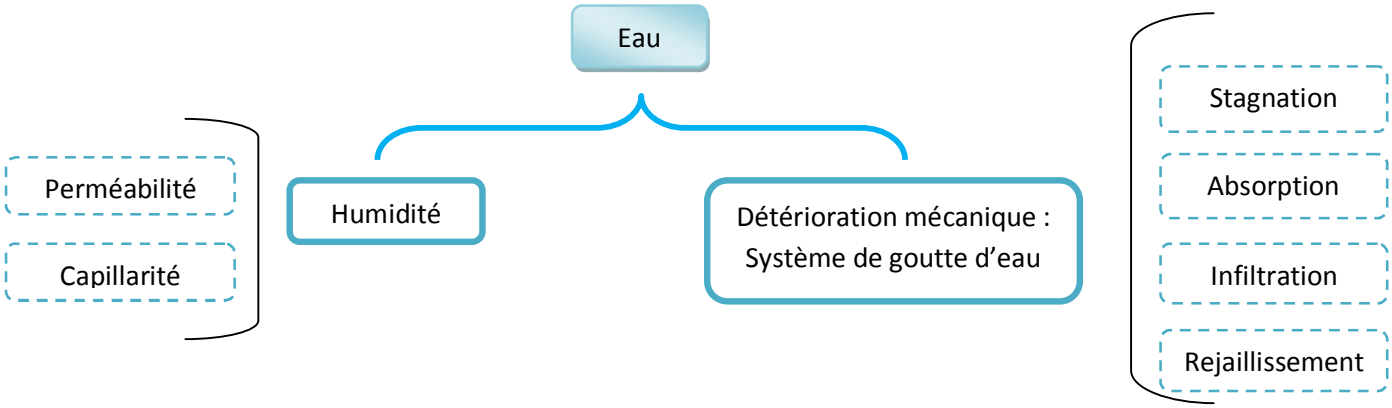


Figure III.1: Action de l'eau sur les murs en pisé.

Source: auteur

III.2. Action mécanique de l'eau sur la construction en pisé

L'eau constitue un agent trés actif notamment dans la dégradation des surfaces exterieures des murs. Son impact direct sous l'effet des gouttes d'eau de pluie, forment le plus souvent des rigoles qui coulent sur les murs ; une déterioration directe du materiau sous effet de l'action

[107] Jannet J, Pignal B, Scarato P. Le bâti ancien : analyse, pathologie, remède. Pisé terre d'avenir. Cahier technique N°2, 1996.p10.
[108] Agence Nationale pour l'Amélioration de l'Habitat, Collombert R. L'humidité des bâtiments anciens : causes et effets, diagnostic et remèdes. Editions Moniteur. Paris. 1989. p 30.

mécanique des gouttes d'eau[109]. L'argile est complétement detruite, ce qui effrite le materiau en liberant les autres fractions.

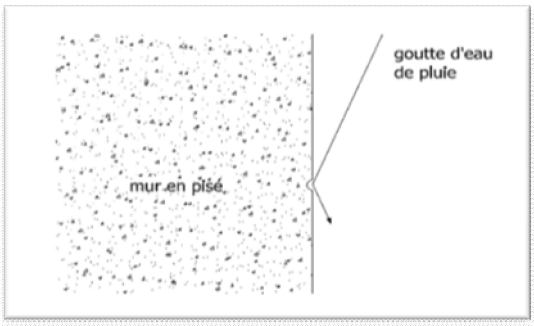


Figure III.2: Action mécanique de l'eau sur les murs en pisé.
Source: Craterre.

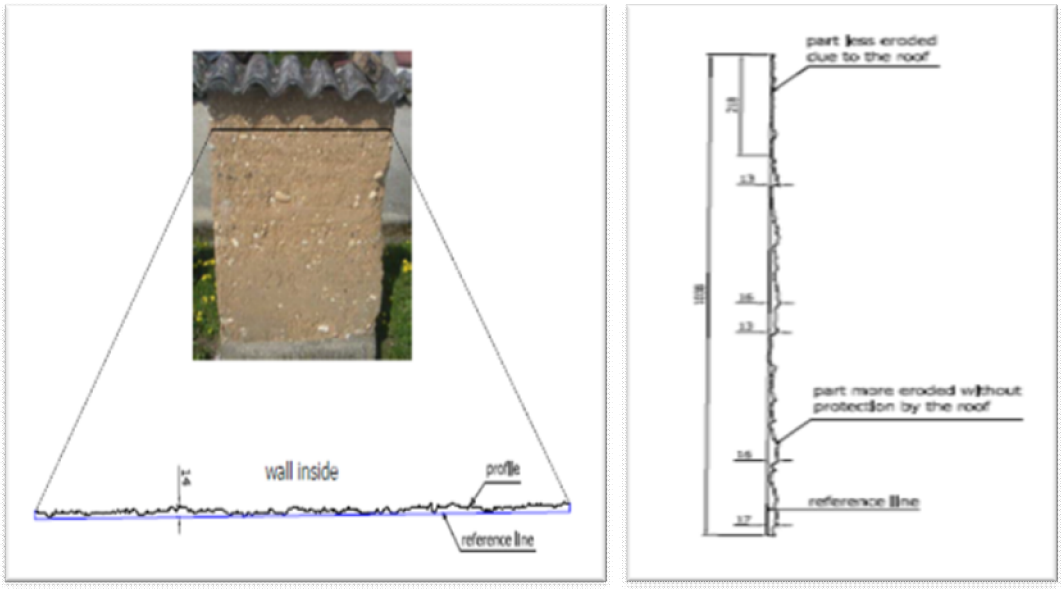


Figure III.3:détérioration des murs en pisé sous l'action mécanique de l'eau.
Source: Minke (BUI.Q.B, 2008).

III.2.1. Humidité d'origine occasionnelle

En général, localisée dans la partie supérieure du mur, est facilement reconnaissable grâce au type de désordre généré[110], particulièrement dû au manque ou à l'absense d'entretien de la troiture et à des problemes liés à la gouttière[111] (chapeau).

[109] Yves Baret.Traiter l'humidité. Chantier pratique.Edition : Eyrolles.Février 2011.p40
[110] Yves Baret.Traiter l'humidité.op.cite p47
111 idem



Photo III.1.2 : Exemple des désordres Humidité d'origine occasionnelle à Maatkas.
Source : Auteur

III.2.2.Le rejaillissement

Le rejaillissement d'eau provenant des toitures, jet des gargouilles, arrosage ou causé par le passage des véhicules au pied des murs, non protégés, provoque l'érosion des petites particules de terre formant des creusements dans la partie inférieure du mur[112], cette action répétée fragilise,considérablement, la structure[113].

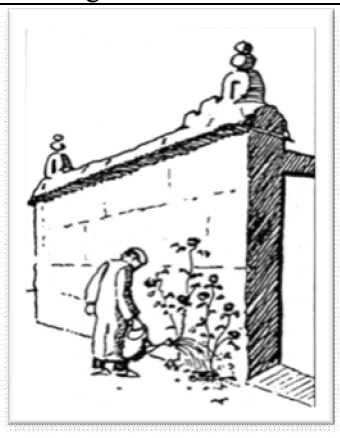
Action de l'eau sur le bas du mur par rejaillissement dû aux jets de gargouilles.	Action de l'eau sur le bas du mur par rejaillissement dû à l'arrosage.	Schéma de l'action de l'eau sur le bas du mur par rejaillissement dû au passage des
		

Figure III.4: Les différentes causes du rejaillissement.
Source: Craterre.

[112] Agence Nationale pour l'Amélioration de l'Habitat, Collombert R. op. Cite. p 40.
[113] Baret Y, Traiter l'humidité, op. Cite. P41



Photo III.3.4 : Exemple des désordres dûs aux rejaillissementsà Maatkas.
Source : Auter

III.2.3. Ruissellement

La mauvaise prise en charge de l'écoulement des eaux extérieures provoque une action dynamique qui entraine une érosion d'une autre forme[114]. En l'absence de drain ou de canalisation pour la recolte des eaux de ruisselement, ou toute autre solution, il se forme des creusements le long du mur ce qui accélere la déterioration du mur et fragilise la structure de la bâtisse[115].

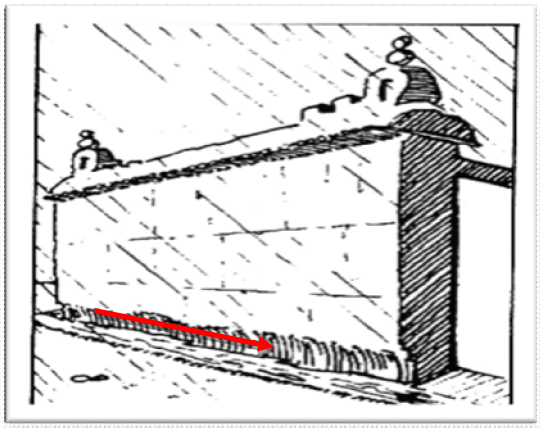


Figure III.5: Schéma de l'action de l'eau sur le bas du mur par ruissellent.
Source: Craterre.



Photo III.5 : Exemple des désordres dûs aux rejaillissementà Maatkas.
Source : Auteur

[114] Baret Y, Traiter l'humidité, op. Cite. P47
115 Idem

III.3.Action de l'humidité

L'action indirecte de l'eau sur le mur en pisé se manifeste dans le bas du mur, consideré comme la partie la plus exposée à l'action de l'humidité de toutes provenance et provoquant l'érosion sous different actions comme les remontées capilaires[116]. Cepandant la partie haute du mur n'est pour autant pas épargner sous l'éffet des infiltrations et des condensations.

L'effet de l'humidité sur les murs en pisé peut générer les dégradations suivantes[117] :

- La perte de la resistance du materiau en modifiant sa tenneur en eau.
- La rupture de la matrice cohesive de l'argile sous l'effet des depôts de sels.
- La colonisation de la flore parasite (mousse) qui retient l'humidité.

III.3.1.Les remontées capilaires

Le phénomène des remontées capillaires est engendré par l'humidité provenant du sol[118]. Les murs transformés en "éponges" absorbent l'eau souterraine ou l'humidité du sol. En remontant dans les murs, sans soubassement (bottes) , l'eau humidifie leur base jusqu'à une hauteur variable. De ce fait, le mur gonfle et perd de sa résistance mécanique[119]. Ce phénomène est relativement facile à diagnostiquer, il se caractérise par des tâches d'humidité au pied de mur[120].

Les goutelettes d'eau qui remonte par capilarité contiennent des sels minéraux notamment les nitrates, les sulfates ou les chlores selon la nature de sols[121] qui se cristalisesnt en surface et forment des traces brunes

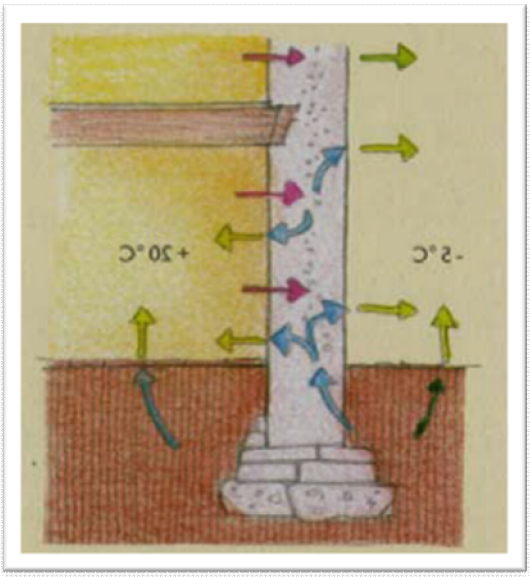


Figure III.6: Remontée capillaire.
Source: Humidité dans le bâtiment origines et solutions.
Bleu : remontée capillaire
Jaune : évaporation
Rouge : condensation

[116]Creous J, Humidité dans la maison, Lutter contre les remontées capillaires, futura- science, 2014 .p1-14
[117]Houben. G, Guillaud. H, traité de la construction en terre, Op. Cite, p250.
[118]Coignet J. la maison ancienne : construction, diagnostique, interventions, Edition Eyrolles. Paris ,2006 p112.
[119]J, Jeannet, P,Scarato,cahier d'expert bati en pisé conaissance, analyse traitement des pathologies en pisé. Feverier 2015. Fiche N°18
[120] Idem
[121] Traitement de l'humidité ascensionnelle. TechniCHEM. P 3.

ou blanchatres hydrophiles qui laissent le mur en pisé constament humide.



Photo III.6.7 : Exemple des désordres dûs aux rementees capilaires à Maatkas.
Source : Auter

Les facteurs à l'origine des remontées capillaires[122] sont :

- l'absence de barrière étanche au niveau des fondations.
- la porosité caractérisant le materiau terre.
- la présence d'une nappe phréatique.
- mauvais ou absence de drainage.
- l'étanchéification par betonnage ou bitummage.

III.3.2. L' infiltration

L'eau de pluie infiltrée, à travers les parois des murs, le toit de la construction et/ou par n'importe quelle ouverture, imprègne d'abord l'exterieur des murs et envahit peu à peu l'interieur[123]. Ce phénomène est accentué par la nature poreuse du pisé ainsi que les fissures qui peuvent y exister. Les principales causes d'infiltration des eaux de pluie sont :

• les fissures : elles peuvent avoir des origines diverses (tassement différentiel, mise en charge, défaut de conception du gros-oeuvre, etc.).

• les points de jointure entre les différents matériaux .

[122] Baret Y, Traiter l'humidité, op. Cite. P47
[123] Duquoc, B. entretenir sa maison en 10 lecons, Edition Eyrolles .2007

• le vieillissement des enduits[124].

• les défauts des menuiseries.



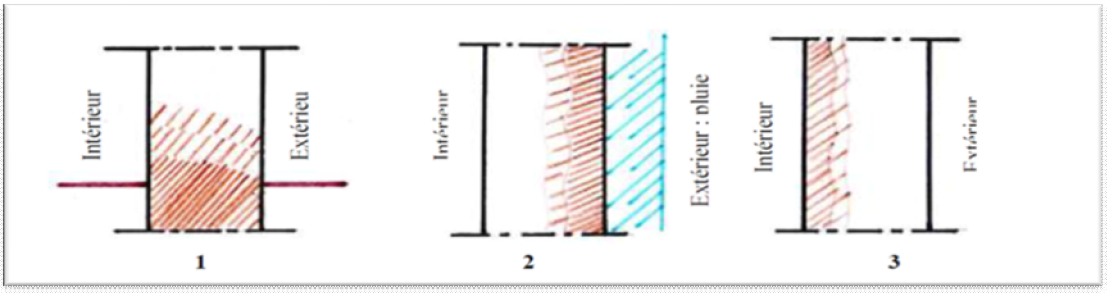
Photo III.8 : Effet des infiltrations.
Source: Marie Châtel conservation de l'architecture en pisé d'Isère.



Photo III.9 : Effet des infiltrations a Maatkas.
Source: auteur

III.3.3.La condensation

Le transfert de vapeur à travers les murs est dû au changement climatique et à la différence des températures intérieur/extérieur. En se déplaçant à travers l'épaisseur du mur, la vapeur d'eau se condense lorsque la température correspond à son point de rosée et charge le mur d'humidité[125]. Ce phénomène s'aggrave sur les parois extérieures lorsque l'enduit constitue une barrière étanche(enduit en ciment) au passage de la vapeur d'eau.



Les trois modes de transfert d'humidité dans les parois en pisé :
1/ capillarité. 2/ infiltration. 3/condensation
Source : coignet

[124]Les enduits étanches peuvent avoir un effet inverse ,l'eau infiltrée dans le mur par une fissure ou par des remontées capillaires se trouve emprisonnée à l'intérieur de celui-ci et ne peut plus s'évaporer.
[125]Heitz, p, Pathologie humide du pisé, Qualité construction, Architecture en terre, avril 2014, N°143. p62-69

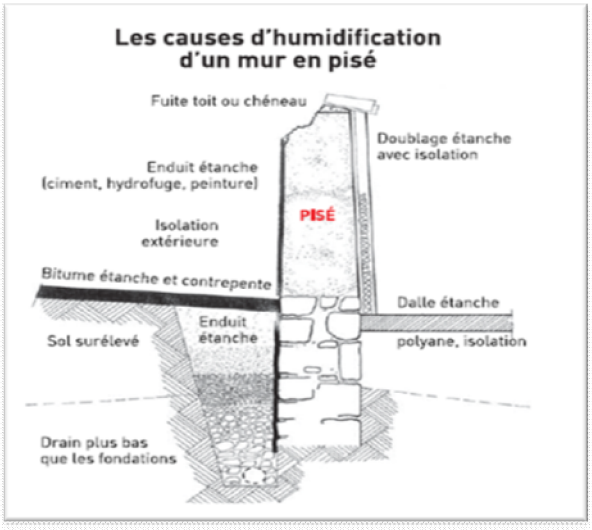


Figure III.7: Pathologies liées à l'humide.
Source: Scarato.PAbiterre.

III.4. Pathologies affectant les autres matériaux

III.4.1.Pathologies affectant les éléments en bois

Le bois est un matériau que l'on retrouve dans les constructions en pisé sous des formes variées tels que les solives, les voliges pour planchers et les pièces de bois et planchettes...etc. En charpenterie ou en menuiserie, ce matériau forme l'ossature du plancher, ainsi que la plupart des éléments ouvrés (portes, fenêtres)[126].

Les causes de dégradation du bois sont essentiellement dues aux[127] :

- ✓ **Agents abiotiques**: variations de température
- ✓ **Pluie** variation d'humidité
- ✓ **Agents biotiques** les insectes et les champignons
- ✓ **Vieillissement du matériau** (effet du temps)



Photo III. 10.11 : Pourrissement du bois à Maatkas
Source : auteur

[126]MONTÓN Joaquín, Agents de dégradation du bois,Outil 6, Comprendre les processus de dégradation des matériaux, p245.
[127]Fiches Meda corpus,Traiter la dégradation et l'affaiblissement du bois, Fiche N°1-21.

III.4.2.Pathologies affectant les éléments structurels en maçonnerie en pierre

La pierre grossièrement équarrie est particulièrement utilisée en fondations, soubassement et renforcement des murs en pisé. L'altération de la pierre est provoquée par les interactions des composants de la pierre avec les conditions atmosphériques, environnementales et sous l'action des facteurs physiques[128]. Par conséquent, les principales causes de dégradation de ces parties du mur en pisé sont[129] :

- Humidité provenant de la pluie, des infiltrations d'eau, des condensations d'humidité par endroit, (la cristallisation des sels dans sa microstructure et de ce fait peuvent provoquer des contraintes internes) ;
- Les causes chimiques et l'influences des facteurs biologiques entrainant l'altération des éléments composants la pierre ;
- Les causes mécaniques (charges et pression) affectant la stabilité et la solidité de la pierre.



Photo III.12.13 : l'altération de la pierre des murs en pisé à Maatkas
Source : auteur :

III.5.Pathologies lies à la structure

Les désordres structurels se manifestent de façon « typique » par des fissures[130] observables sur le bâtiment. Les principaux problèmes liés à la structure dans les constructions en pisé sont généralement dû au tassement différentiel affectant les fondations superficielles ou souvent inexistantes. Ces tassements différentiels ont pour origine à la fois le poids important de la construction en pisé relative à l'épaisseur de ses murs et le comportement du sol.

[128]Pellizzer et Sabatini, 1976 ; Amoroso et fassina, 1983 ; Karpuz et Pasamethouglou 1992;
[129] GARCÍA MORALES Soledad. Outil 6, Comprendre les processus de dégradation des matériaux. Op. Cite. P236-241.
[130]Chatel, M. Conservation de l'architecture vernaculaire en pisé d'Isère, p 3.

Il existe plusieurs types de fissures dans les constructions en pisé selon la profondeur, l'importance et la position de ces derniers.

III.5.1. Fissures structurelles

Elles apparaissent suite à des erreurs d'exécution ou d'origines accidentelles[131]. Elles désignent la résistance insuffisante des murs en pisé face aux contraintes de charge et surcharge mécaniques, ou le problème lié au tassement différentiel du sol qui a pour origine une mauvaise exécution des fondations et/ou la nature du sol de l'assiette de construction[132]. Elles se localisent :

- Dans les endroits de liaisons entre deux matériaux différents (terre/matériau durs).
- Le long des axes des descentes des charges.
- Le long des ouvertures.



Photo III.14 : Exemple des fissures structurelles.
Source: Marie Châtel



Photo III.15 : Exemple des fissures structurelles à Maatkas.
Source: auteur

Ce phénomène est dû aux sollicitations des contraintes mécaniques[133], le mur en pisé non chainé peut présenter des déformations (ventre extérieur) accompagnées de fissures, selon les caractéristiques de la terre (fluage trop important)[134].

[131] Chatel, M. Conservation de l'architecture vernaculaire en pisé d'Isère.Op cite. P10.
[132] Idem
[133] Manuel de sensibilisation et de la restauration de la maçonnerie, ministère de la culture, direction de l'architecture et du patrimoine, p51.
134 Fiches Meda corpus, Réparer une fissure sur un mur en pierre. Fiche N° 1.07.



Photo III.16 : Fissure structurelle dû probablement au tassement différentiel du pisé à Maatkas
Source: auteur

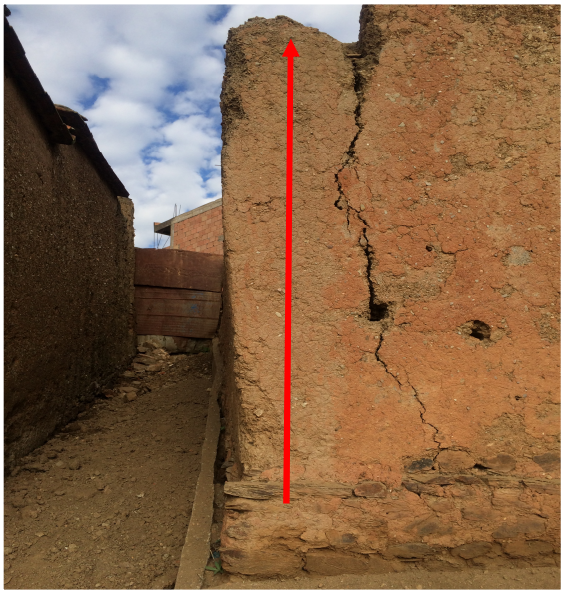


Photo III.17 : Ventre avec fissure du mur non chainé à Maatkas
Source: auteur

III.5.3. La décomposition du matériau pisé

L'hétérogénéité du matériau pisé due à la granulométrie[135] variée sous l'action des facteurs climatologiques comme l'humidité, la chaleur, le gel et le dégel, sa structure minéralogique et chimique en pâtît en perdant de sa cohésion provoquant ainsi sa dégradation[136].



Photo III.18.19 : Décomposition des murs en pisé sous l'action climatologique à Maatkas
Source: auteur

[135] Bernard Abraham, Jean-Luc Salagnac, José Fontan, Daniel Quenard, Stéphane Gilliot, Claude Pompéo, Transfert d'humidité à travers les parois, Évaluer les risques de condensation, CSTB, le future en construction, septembre 2009, p11.
[136] Heitz, p, Pathologie humide du pisé, Op cite, N°143. P70

III.6. Illustration des pathologies structurelles et recommandations

Ajouté au problème de l'humidité, la nature des sollicitations est un élément non négligeable.Le mur en pisé ne travaille bien qu'en compression[137] contrairement la traction et/ou la flexion. L'utilisation des autres matériaux comme le bois, l'acier, et le béton est nécessaire pour les chainages et les tableaux des ouvertures. Nous distinguons :

- Le phénomène de l'humidité qui fragilise les murs en pisé.
- Le tassement différentiel lié aux caractéristiques du sol ; existence de nappe phréatique.
- Problème lié à la conception.
- Problème lié à la mise en œuvre et à la qualité du matériau.
- Problème lié aux fondations.

III.6.1.Pathologies des structures verticales

III.6.1.1.Au niveau des fondations

Les pathologies structurelles liées au niveau des fondations apparaissent lorsqu'elles sont établies sur des terrains instables ou peu résistants, les risques s'accentuent d'une part lorsque les fondations sont sous dimensionnées, parfois inexistantes ou présentant des problèmes d'exécution[138] et d'autre part, en la présence à proximité des constructions de la végétation ou des animaux pouvant affecter les fondations tels que les rongeurs.



Photo III.20 : Profondeur des excavations pour fondation des constructions en pisé.

a) Recommandations pour une bonne conception des fondations

[137] La descente des charge dans la construction en pisé peuvent attendre 1 bar mais beaucoup de sols ont des résistances similaire voir inferieur d'ordre (0.5bar – 1.5 bar).
[138] Une mauvaise mise en œuvre des fondations ou l'absence de drain pour les sols humide provoque des coups de sabre dans les fondations en pierre.

Dans les constructions en pisé (élément monolithique) et contrairement aux murs massifs à éléments, elles se caractérisent par des fondations superficielles ou semi profondes[139]. Leurs exécution est semblable à celle des maçonneries classiques répondant aux règles de calcul connues[140] (selon le poids du pisé). De ce fait, les fondations des constructions en pisé doivent être :

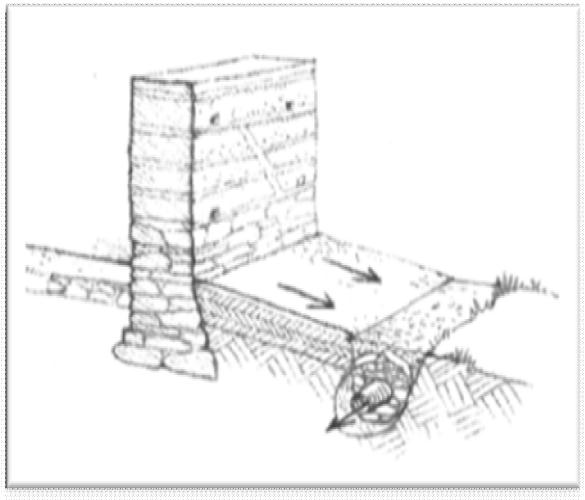


Figure III.9 : Système de drainage pour ancien mur en pisé.
Source : Marie châtel.

- Suffisamment profondes pour atteindre le bon sol.
- Prendre en charge la nature du sol et les tassements éventuels.
- Protection contre l'humidité.
- Protection contre les racines végétales ou des animaux affectant la résistance des fondations.
- Mettre les fondations hors de l'eau et ce par :
  - ✓ Une bonne évacuation des eaux de surface
  - ✓ Réalisation des drains le long des fondations.
  - ✓ Empêcher les infiltrations tout en assurant une évaporation.

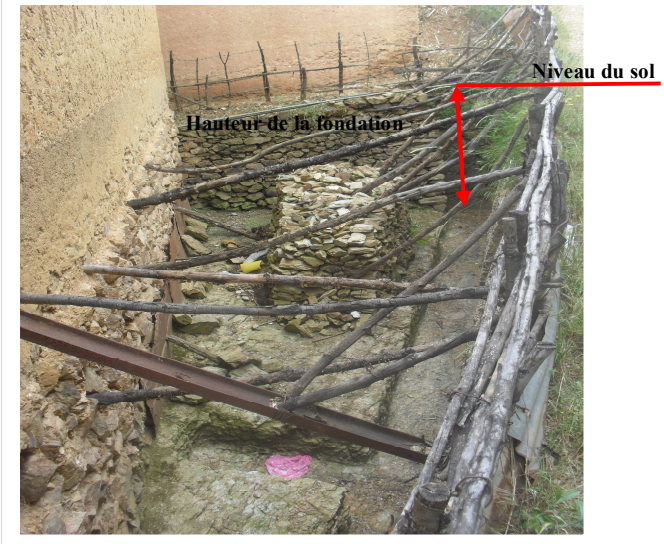


Photo III.21 : Hauteur des fondations en pierre à Maatkas
Source : auteur



Photo III. 22: Reprise des fondations en béton à Maatkas
Source : auteur

[139]Houben,H. Guillaud H, op cite. P248.
[140]Jannet J, Pignal B, Scarato P. Le bâti ancien : analyse, pathologie, remède. Pisé terre d'avenir.op. Cite .p10.

Face à ces désordres des recommandations ont été proposées :

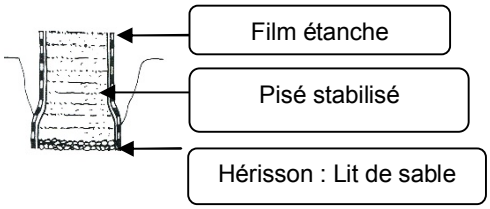
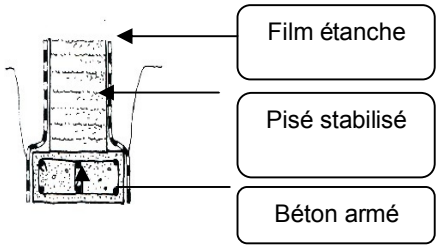
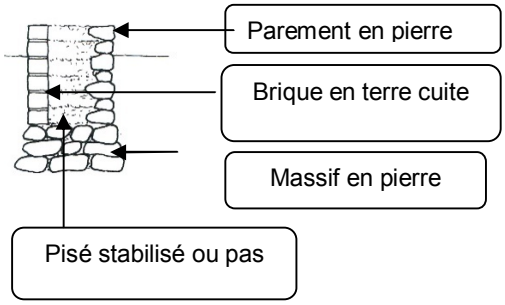
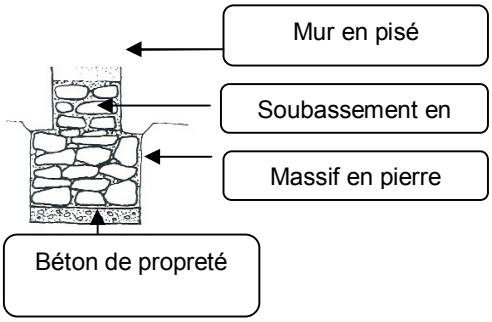
	Illustrations	observations
Terre stabilisée	 	Exclusivement utilisé dans les terrains secs
Autre matériau	 	Dans les terrains humides

Tableau III.1: Récapitulatif des recommandations pour la réalisation des fondations pour construction en pisé

III.6.1.2.Au niveau du soubassement

Très exposé à l'action des eaux superficielles ou profondes, les différentes pathologies liées à l'humidité, au vent, à la végétation, aux parasites (mousse, lichens)[141] et le dépôt des sels nuisent à la résistance de cette partie des murs. Cet affaiblissement s'aggrave par l'action volontaire ou involontaire de l'Homme**.**



Photo III.23 : Hauteur des soubassements en pierre à Maatkas
Source : auteur



Photo III.24 : Parasites affectant la partie basse du mur a l'absence d'une protection à Maatkas

a) Recommandations pour une bonne mise en œuvre des soubassements

Afin de pallier et de prévenir contre ces dégradations un ensemble de mesures peut être pris à savoir ;

- **La masse d'usure**

Ce principe est très simple, répandu au Maroc et au Mali, il consiste à réaliser une masse au pied du mur avec le même matériau et de préférence renforcé par un système d'évacuation des eaux[142]. Cette masse doit être volumineuse, elle a l'avantage d'être facile et très économique mais exige un entretien régulier.

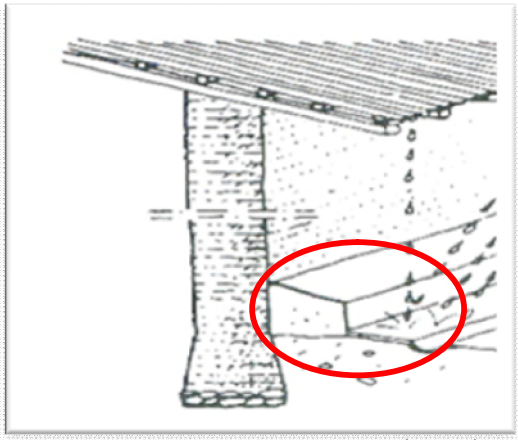


Figure III.10 : exemple de protection avec la masse d'usure.
Source: Craterre.

[141]Louvigné. M, Humidité dans les bâtiments prévention et traitement Centre d'assistance technique et de documentationCATED.2000
[142]Houben,H. Guillaud H, op cite. P209.

- **Le Parement à la base**

Construit avec différents matériaux durs tels que la pierre, la brique, le bois et même la tuile.Ils peuvent être accolés contre le mur ou bien intégrés à la base du mur[143].

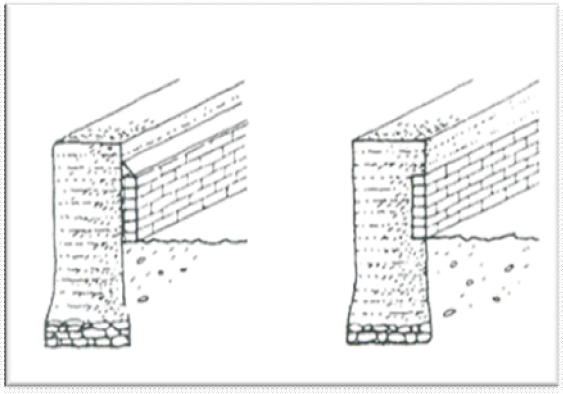


Figure III.11 : Exemple de parement de protection
Source: Craterre.

- **Le soubassement**

Construit avec différents matériaux comme la pierre, la brique ou plus récemment en béton ou enpisé stabilisé[144]. Ce soubassement en maçonnerie peut avoir différentes hauteurs mais la même épaisseur que le mur en pisé. Les hauteurs varient selon les régions[145], nous distinguons ainsi :

- 0,25 m en région sèche.
- 0,40 m en région à pluviométrie moyenne.
- 0,60 m ou plus en région à pluviométrie élevé avec toit peu débordant
- 0,80 à 1,00 m en région inondable.

Le point le plus important pour la réussite des soubassements est d'assurer l'évaporation des eaux des remontées capillaires absorbées du sol[146].

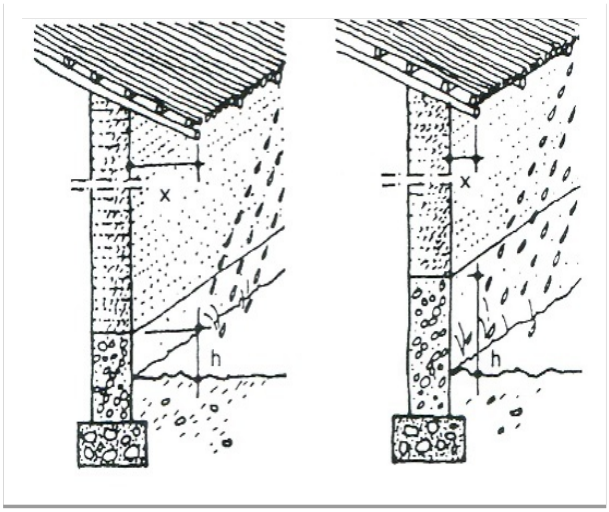


Figure III.12 : relation de la hauteur du soubassement avec le débord de la toiture.
Source: Craterre.

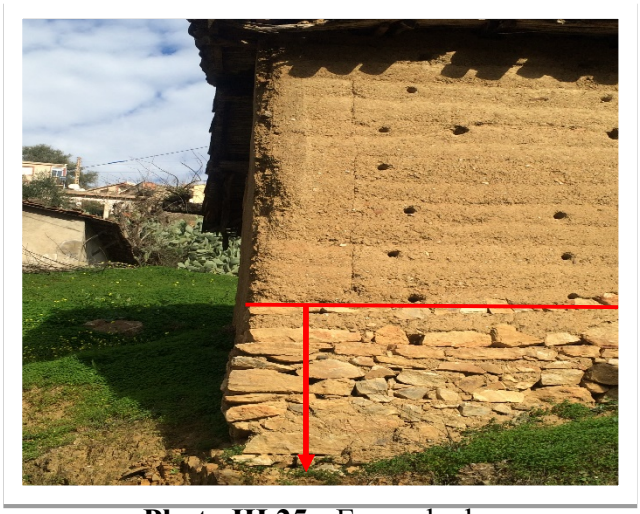


Photo III.25 : Exemple de soubassement en pierre à Maatkas.
Source : auteur

[143] Houben,H. Guillaud H, op cite. P209.
[144] Idem
[145] Idem
[146] Idem

III.6.1.3.Au niveau des murs en pisé

Les murs en pisé constitués en blocs monolithiques de terre comprimée, exigent un appareillage basé sur l'écartement des joints verticaux[147]d'une assise à une autre d'au moins ¼ de la longueur de la banchée d'une part, et d'autre part sur un parfait harpage des angles et des liaisons des murs. Le non-respect de cette règle peut être à l'origine d'une pathologie structurale dite « coups de sabre »[148].

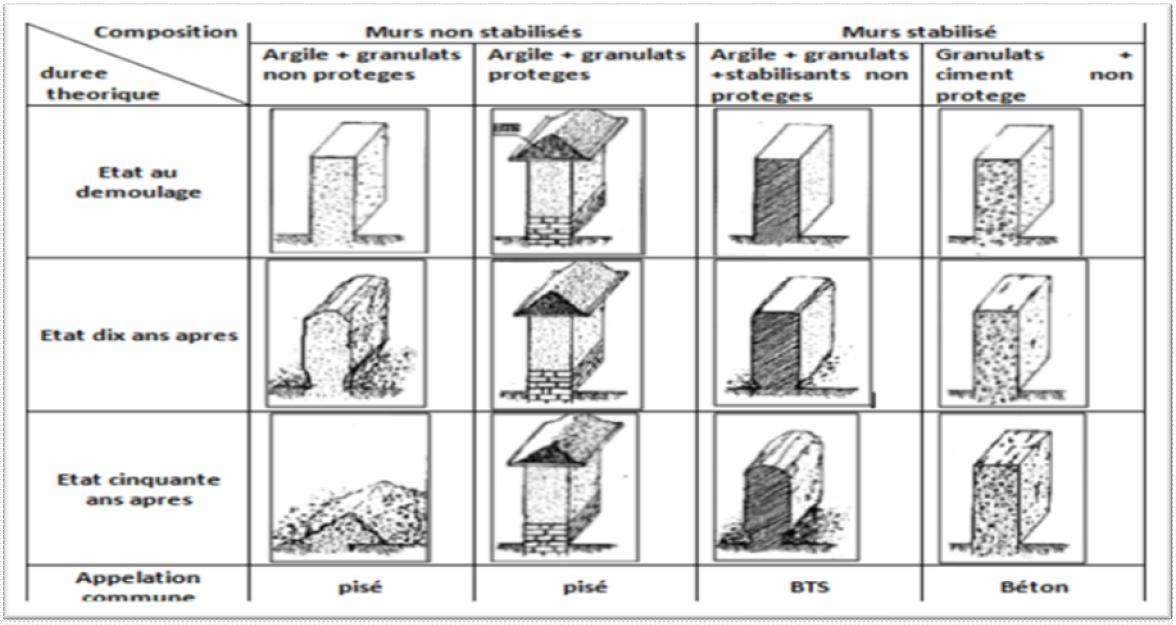


Figure III.13 : Effet du temps sue un mur en pisé non protégé et le pisé protégé
Source: Craterre.

a) Les recommandations pour une bonne mise en œuvre de ces derniers

Il est toutefois recommandé d'utiliser des banchées aux dimensions, préalablement, définies dès la conception du projet tout en protégeant les murs contre les agressions extérieures.

✓ Liaison des murs en pisé

La liaison des murs (murs extérieurs et murs de refend) constitue un point important afind'assurer une stabilité structurelle de l'ensemble de la construction. Il existe deux façons pour réaliser les liaisons des murs selon le type de matériaux[149] :

[147]Doat P, Hays A, Houben H, Matuk S, Vitoux F. construire en terre. Op cite. P22
[148]Houben, H. Guillaud H, op cite.
[149] Idem.



Photo III.26 : exemple de liaison des murs en pisé à Maatkas
Source : auteur.

✓ **Des matériaux différents**

Quand les murs extérieurs et les murs de refend sont construits avec deux matériaux différents, on prévoit des saignées dans les murs extérieurs tout en évitant la liaison par harpage[150].

✓ **Du même matériau**

Quand les murs extérieurs et les murs de refends sont du même matériau, la liaison de ces dernier s'effectue[151]:

- Soit par un simple harpage des banchées en deux directions.
- Soit une banchés sur deux (1/2) des murs de refend recouvrent les murs extérieurs.
- soit par l'utilisation d'un coffrage spécifique en T qui assure la liaison du mur en une seule pièce.

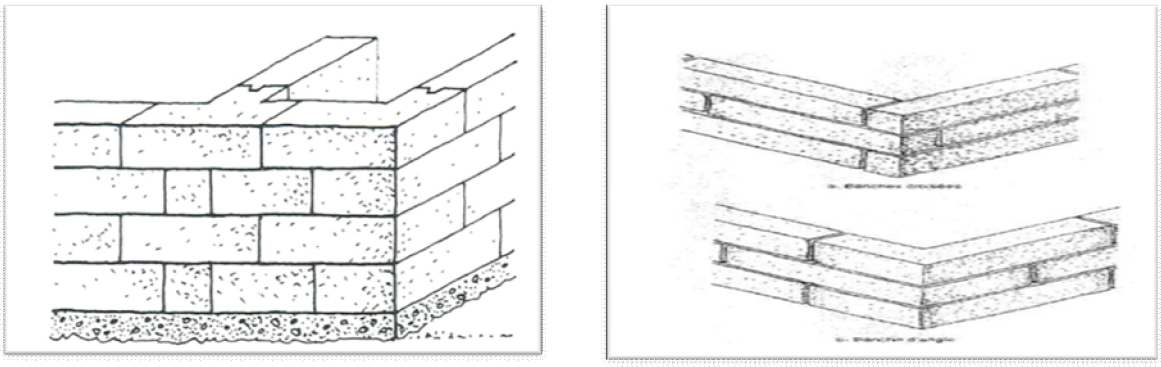


Figure III.14 : Exemple de liaison avec le même matériau.
Source: Craterre.

[150] Les matériaux ne travaillent pas des mêmes façons face au contraintes, deux comportements différent face à la même contrainte ce qui provoque des désordres structurels.
[151] Doat. P, Hays.A, Matuk.S, Houben.H, Vitoux.F, Construire en terre. Op. Cite. p 69 et 70

- **Au niveau des angles**

La plupart des fissures structurelles qui mettent en péril la construction en pisé, se localise au niveau de la liaison des murs située au niveau des angles dont la stabilité constitue l'ossature de toute la construction[152].

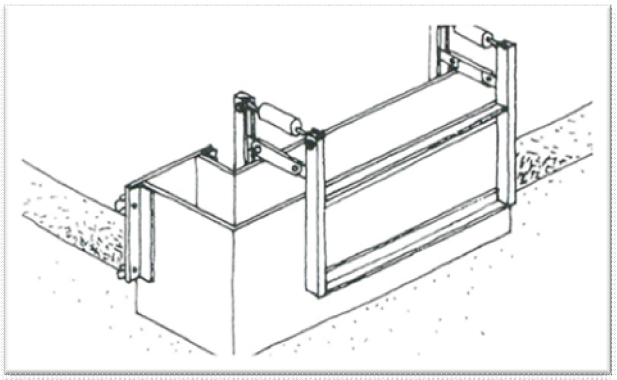


Figure III.16 : exemple de traitement d'angle par un coffrage spécial en L.
Source: Craterre.

Les dispositions de prise en charge des angles qui sont utilisées se résume, soit en se basant sur un harpage dans les deux directions des murs, soit par un coffrage spécial en forme(L), en une seule pièce tout en respectant la règle concernant le décalage des joints verticaux[153].

En outre, on peut aussi procéder au renforcement des angles par des matériaux durs appliqués à la face extérieure des murs afin d'atténuer l'effet de l'érosion[154].

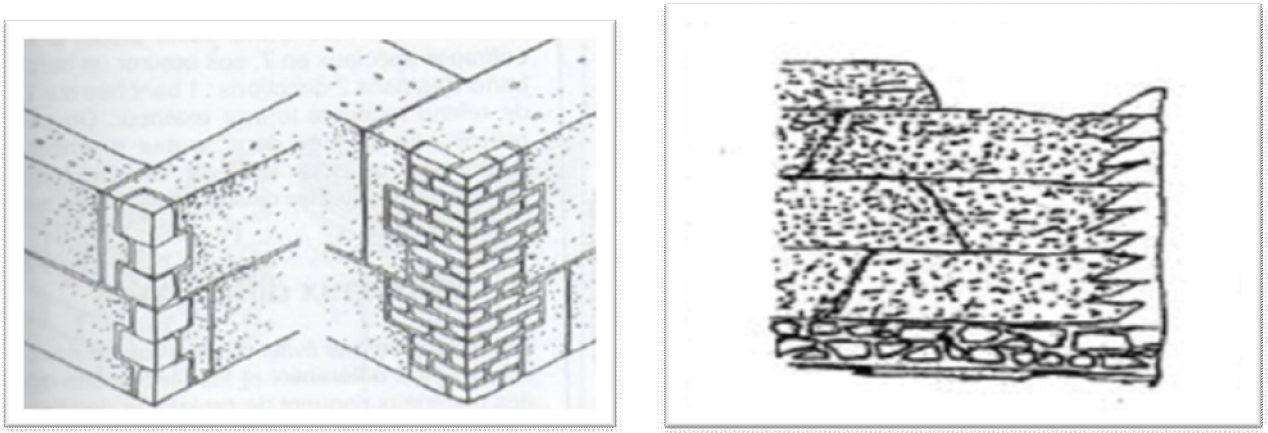


Figure III.17 et 18 : Traitement d'angle avec des matériaux durs à gauche et mortier de ciment ou à la chaux à droite. Réduisant l'effet de l'érosion.

[152]Doat. P, Hays.A, Matuk.S, Houben.H, Vitoux.F, Construire en terre. Op. Cite. p 26
[153]Houben, H. Guillaud H, op cite. P 200
[154] Idem.

- **Le renforcement des murs en pisé**

Partant du principe que les murs en pisé travaillent plus en compression qu'en traction ce qui suscite l'utilisation d'un système de renforcement appliqué à ces murs. Ces derniers sont totalement intégrés dans leur l'épaisseur[155].

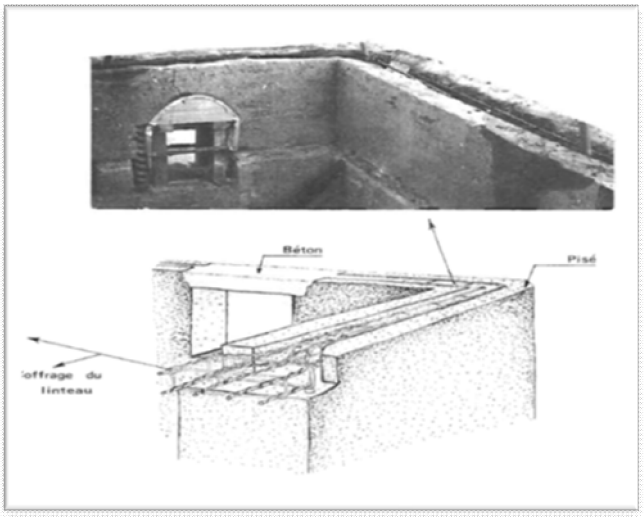


Figure III.19 : système de renforcement des murs en pisé avec un chainage en fer.
Source : craterre.

Ce système de renforcement des murs en pisé est une réponse aux :

- Tassement différentiel.
- Retrait et le gonflement des sols.
- Efforts de tension, de rotation et de cisaillement (ouvertures…).
- Efforts produits par les appuis des planchers et le poids de la toiture.

Les chainages sont réalisés soit en bois ou en fer[156] disposés sur le long des murs ou localisé au niveau des parties les plus sollicitées.

III.6.1.4.Les ouvertures :

Dans les constructions en pisé, les ouvertures constituent un vecteur fragilisant la stabilité structurelle de la construction, d'une part en raison des sollicitations et des efforts de cisaillement très important aux niveau des appuis des ouvertures, d'autre part dues aux dimensions des ouvertures ou à l'effet de retrait après séchage des murs en pisé. Il est donc recommander d'éviter un certain nombre d'erreurs lors de la conception à savoir[157] :

- Le surdimensionnement des ouvertures.
- Une mauvaise répartition des ouvertures dans le mur.
- La proximité de l'ouverture de l'angle.
- L'encrage insuffisant du linteau.
- L'humidité pour éviter le pourrissement du bois.

[155]Houben, H. Guillaud H, op cite. P 200.
[156] Pour le renforcement en fer il faut s'assurer de l'enrobage des armatures dans du béton, il est recommandé de coulé le chainage en béton armé sur du pisé stabilisé afin d'assurer une bonne adhérence.
[157]J, Jeannet, P,Scarato,cahier d'expert bati en pisé conaissance, analyse traitement des pathologies en pisé. Feverier 2015. Fiche N°9

a) Le linteau

Réalisé, le plus souvent, en bois. Il est très sollicité par les efforts de descente des charges. Par conséquent, un bon ancrage de 20 cm minimum[158] doit être assuré au niveau du mur, permettant ainsi une répartition uniforme des charges. Il est aussi recommandé de renforcer la stabilité des jambages par de la maçonnerie. Les gonflements du bois dus à l'humidité, alternés avec les retraits, contribuent à défaire les assemblages. Les linteaux en bois sous dimensionnés présentent des flèches importantes sous l'effet des charges et surcharges.

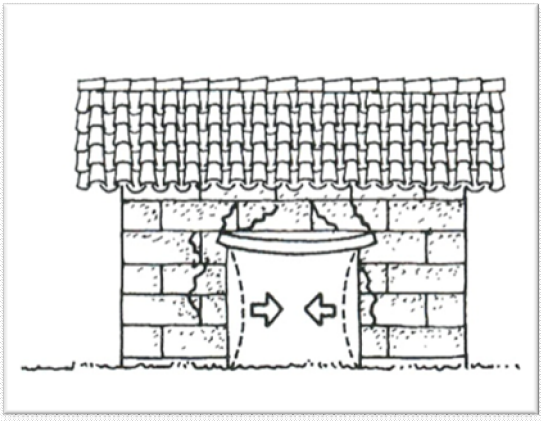




Figure III.20 et Photo III. 27 : Effet de déformation du linteau.

b) Les appuis

La transmission des charges par les jambes sont reprises par les appuis de fenêtres, et pour assurer une bonne reprise, il est important de prolonger les appuis et d'utiliser des armatures sous l'appui. Par ailleurs, Il est recommandé d'utiliser des joints secs entre l'allège et les murs ou un remplissage indépendant (en maçonnerie)[159].

En outre, certaines recommandations sont à prendre en charge afin de parvenir à une meilleure conception d'un mur[160] :

- Le rapport plein / vide ne doit pas être inférieur au 1/3 de la surface du mur ;
- Assurer une bonne répartition des ouvertures ;
- Assurer le bon dimensionnement du linteau et de l'appui ;
- Assurer la distance minimale de 1 mètre entre l'ouverture et l'angle ;
- Renforcer les appuis par des armatures ;

[158] Doat. P, Hays.A, Matuk.S, Houben.H, Vitoux.F, Construire en terre. Op. Cite. p 27
[159] Houben, H. Guillaud H, op cite. P
[160] Idem.

- Traiter les tableaux d'ouverture avec des matériaux durs.

III.6.2. Pathologies des structures horizontales

Associés aux éléments verticaux, abordés précédemment, les structures horizontales présentent des dégradations et pathologies tantôt similaires aux autres composants de la construction en pisé et tantôt spécificités qui leur sont propres.

III.6.2.1.Les planchers

Dans les constructions traditionnelles en pisé, les planchers sont aussi construits en terre et en bois, ce qui leur confère une résistance limitée face aux efforts de traction et de flexion[161]. Un sous dimensionnement, une mauvaise transmission des efforts, et/ou une surcharge, peuvent entrainer une baisse de résistance de la structure en bois. Cette structure soumise à des niveaux de contrainte dépassant sa résistance, occasionnent une défaillance structurelle par une sollicitation excessive du bois[162]. Ces désordres peuvent être accentués par des déformations liées à un sous dimensionnement de ses structures ou liées à l'humidité.



Photo III.28 : plancher en en terre à structure bois à Maatkas
Source : auteur

Il est important de soulever le problème du poids des planchers en terre, notamment dans les zones à forte sismicité. Face à cette contrainte il est recommandé de réduire la distance des appuis des poutres de structure des planchers en terre pour assurer une répartition uniforme des charges le long des murs.Toutefois, le renforcement des planchers en terre par des armatures métalliques constitue une des réponses susceptibles de répondre à ces sollicitations.

La structure des planchers, s'altère au niveau de ces points d'appui à cause des moisissures, des parasites ou des insectes; sa dégradation peut être due aussi à une cause extérieure d'origine

[161]Houben, H. Guillaud H, traiter de la construction en terre op cite. P
[162] Idem

accidentelle à savoir : des infiltrations d'eau de pluie aux niveaux des toitures[163].

Sur un autre registre, certains désordres sont particulièrement caractéristiques aux liaisons des planchers avec leur support (mur) ;

a) Le poinçonnement

Observé lorsque l'appui est sous-dimensionné et ne peut répartir les charges de façon uniforme, ce qui provoque des fissures et des tassements différentiels. Pour éviter ce type de désordre, il est recommandé d'augmenter la surface d'appui et de ramener les charges au centre de gravité du mur.

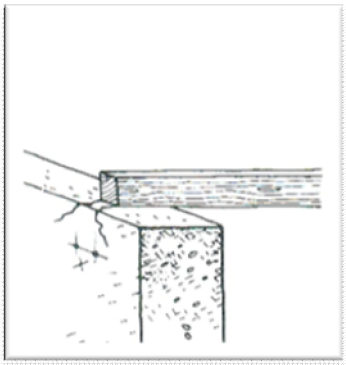


Figure III.21 : effet du poinçonnement dans les murs en pisé

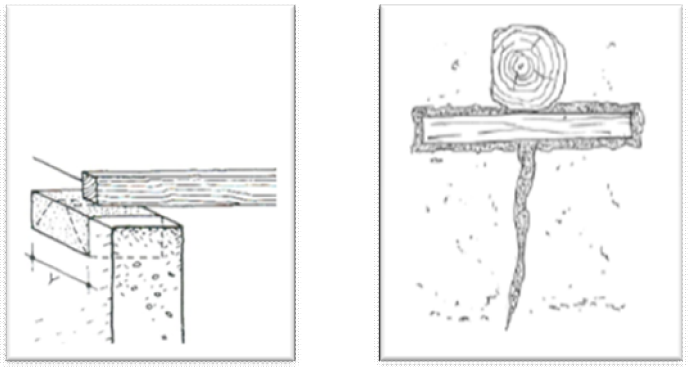


Figure III.22 : solution pour éviter effet du poinçonnement dans les murs en pisé
à gauche : avec un support en béton
à droite : avec un support en bois

b) La rotation

Les planchers subissent une rotation qui provoque des fissures sous l'effet du soulèvement et du décentrement des charges. Pour éviter ce phénomène il y a lieu d'assurer une bonne répartition des charges et assurer un renforcement par un chainage.

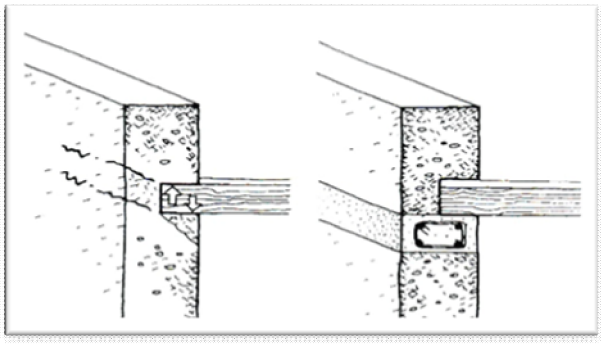


Figure III.23: Rotation des appuis dans les murs en pisé.

[163][163]Philkyprou M.la dégradation des matériaux de construction (pierre,terre,bois).section de la conservation des bâtiments du service ministériel d'urbanisme et de logement.Méthode RehabiMed pour la réhabilitation de l'architecture traditionnelle méditerranéenne.Aoute 2005.p.239.

c) La condensation

Due aux variations des températures cette défaillance dans l'isolation produit l'humidification des planchers qui les désagrège par des attaques biotiques ainsi que les déformations dues à l'effet du retrait.

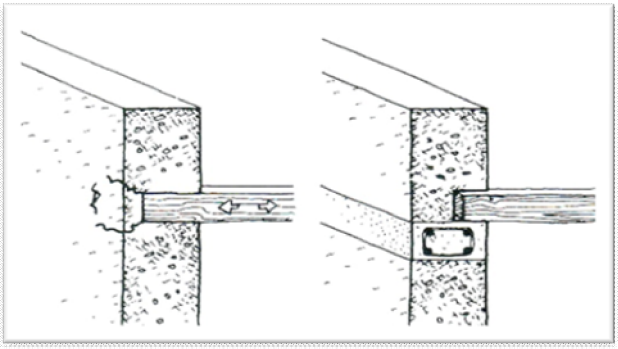


Figure III.24 : La condensation dans les murs en pisé.

III.6.2.2Les toitures

Les toitures traditionnelles des constructions en pisé sont basées sur une ossature en bois que l'on couvre avec du roseau sur lequel on applique une couche d'argile, puis on procède à la pose des tuiles. Ce procédé rend le poids de la toiture non négligeable.

Il existe deux typologies de couverture caractérisant les constructions en pisé. Les couvertures plates répandues au Maroc et les couvertures inclinées particulièrement efficaces pour l'évacuation des eaux de pluies. Les dégradations que présentent ces structures de couverture se résument comme suit ;

- Le fléchissement des éléments de structure de la couverture à cause des surcharges (neige) ;
- L'affaissement de la couverture ;
- Le pourrissement des éléments de structure en bois due à l'humidité.
- La végétation

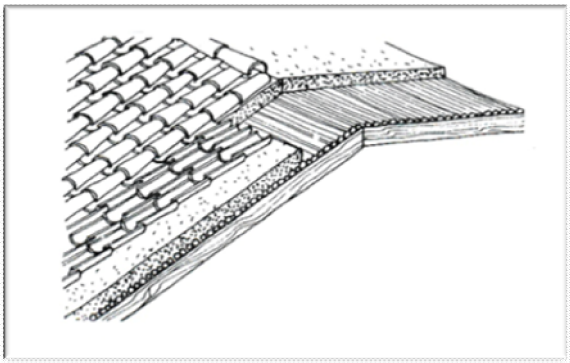


Figure III.25: couverture traditionnelle a deux versants.
Source: Craterre.



Photo III.29 : Toiture des constructions en pisé à Màatkas
Source: auteur





Photo III.30.31 : dégradation des toitures des constructions en pisé sous effet de la végétation à Màatkas Source: auteur

III.7.I. Illustration des pathologies non structurelles et recommandations

III.7.1 Au niveau des enduits

Les enduits traditionnels utilisés dans les constructions en pisé sont soit à base de terre ou de chaux, le ciment comme enduit est plus récent, il est déconseillé car il rend les parois plus étanches empêchant ainsi le mur de respirer[164]. Les désordres se manifestent par une apparition des fissures dites superficielles liées à la nature de l'enduit[165] ou bien, carrément, par le décollement de ce dernier.



Photo III.32 : exemple de salissure dans la partie haute du mur en pisé à Màatkas Source: auteur

Ajouté à cela, d'autres pathologies peuvent caractériser les enduits des constructions en pisé notamment[166] ;

a) L'effritement

[164] J, Jeannet, P,Scarato, cahier d'expert bati en pisé. Op cite. Fiche N°29

[165] En effet, le pourcentage de l'argile influe considérablement sur la qualité des enduits, ainsi que l'humidification non maitrisée lors de la mise en œuvre.

[166] Chatel, M. Conservation de l'architecture vernaculaire en pisé d'Isère, Op cite. p 14.

Face aux variations climatiques l'enduit se désagrège notamment aux endroits de liaisons entre deux matériaux différents (le cas des tableaux d'ouverture), cette action répétée provoque l'érosion du matériau.

b) L'infiltration

L'infiltration des eaux provoque l'une des pathologies les plus dangereuses pour les murs en pisé, mais aussi pour les enduits. L'action de l'humidification et du séchage produit des fissures et des décollements de ce dernier.

c) Les salissures

On les reconnaît à travers les taches noirâtres ou brunâtres sur les murs, elles proviennent des matières organiques ou causées par un ruissellement accidentel localisé.

d) Les efflorescences

Elles apparaissent sous forme de taches blanchâtres ou grisâtres causées par des dépôts de sels (sulfates, carbonates, nitrates), ces derniers accélèrent le décollement des enduits.



Photo III.33 : exemple des efflorescences dans la partie haute du mur en pisé à Màatkas
Source: auteur

e) Les fissures

On distingue deux types de fissures relatives aux enduits en terre produites sous l'effet du retrait : les microfissures observées sur la surface de l'enduit et les macro-fissures beaucoup plus importantes dues et aggravées par les actions du climat.

Il est important d'assurer un bon accrochage des enduits sur les murs en pisé. Il existe plusieurs façons de l'assurer, tout en se basant sur le même principe qui consiste à rendre la surface du mur plus rugueuse.



Photo III.34.35 : type de fissures, microfissures à gauche et macro-fissures à droite
Source : auteur.

III.8. Les sollicitations parasismiques

La terre constitue un matériau indésirable, voir non recommandé pour la construction parasismique, pour cause de l'importance de poids de la construction, particulièrement en pisé, due à l'épaisseur des murs. La construction en pisé est jugée trop lourde, rigide et peu résistante face au séisme, contrairement à la construction industrielle,

Le matériau terre est souvent visé lors des séismes comme le principal coupable des pertes humaines et la cause des désordres. Paradoxalement, on trouve une concentration des constructions en terre dans les zones sismiquement présentant une contrainte non négligeable[167]. Les constructions en pisé véhiculent donc l'idée d'un matériau non résistant au séisme, pourtant de nombreux constats des désordres causés par le séisme révèlent que ces derniers ne sont points liés au choix du matériau ou au type de structure mais bien à une mise en œuvre erronée et à une mauvaise qualité d'exécution.

Les études existantes[168]traitant du parasismique des constructions en pisé sont fondées sur deux approches :

- **L'approche théorique**

[167] Exemple de la France ou la carte des concentrations des constructions en pisé coïncide avec la carte de la zone des risques sismiques.
[168]Thèse De Doctorat Présenté Par BuiQuoc Bao, Stabilité Des Structures En Pise : Durabilité, Caractéristiques Mécaniques, Lyon, 13/10/2008. P 163.

Cette approche se base sur des simulations. Les constructions en pisé sont modélisées par des modèles théoriques. Toutefois, les réponses acquises doivent être vérifiées sur terrain et une maitrise du comportement du pisé.

- **L'approche expérimentale**

Partant du principe que le comportement n'est toujours pas maitrisé, les études expérimentales en laboratoire sont nécessaires, le test le plus courant dans les recherches parasismiques est celui de la table de vibration, elle nous renseigne sur les performances du modèle et des solutions appropriées à la nécessité.

Pour l'heure, les recherches scientifiques[169] ont deux objectifs concernant le parasismique des constructions en pisé.

- Le premier consiste en l'actualisation des connaissances sur la performance parasismique des constructions en pisé.
- Le second est consacré à la recherche des solutions techniques pour renforcer les anciennes constructions et assurer une résistance parasismique satisfaisante pour les constructions neuves.

III.8.1.Renforcement des maisons en pisé

Les solutions de renforcement que les études théoriques ou expérimentales proposent[170], et qui pourraient servir dans les nouvelles constructions se regroupent en :

III.8.1.1. Ossature en béton arme :

Le recours à cette solution est très fréquent due essentiellement au manque de connaissance du matériau, mais controversé par les nouvelles recherches scientifiques en démontrant l'incompatibilité de raideur entre les deux matériaux (terre/ béton).

III.8.1.2. Renforcement des murs en pisé par des armatures en acier

Cette technique consiste à armer les murs par un renforcement utilisant des armatures en acier, la disposition, le nombre et le type d'armatures dépend de la zone sismique. Toutefois, l'adhérence de ces dernières est problématique.

169 Les recherches sur le parasismique des constructions en terre sont plus évoluer dans les constructions en adobe en comparaison avec le reste des technique et terre crue.
170 Thèse De Doctorat Présenté Par BuiQuoc Bao, Stabilité Des Structures En Pise. Op Cite.

III.8.1.3. Renforcement par un grillage souple à l'extérieur du mur

Ce type de renforcement est surtout testé sur les constructions en adobe qui révèle que malgré les dommages engendrés, la destruction totale est évitée, cependant pour le pisé ce type de renforcement n'a toujours pas été testé car il présente un surcoût dans la réalisation



Photo III.36: Renforcement de construction par grillage souple.
Source: Minke (BUI.Q.B, 2008).

III.8.1.4. Les tirants (verticaux)

L'utilisation des barres de renforcement verticales en acier ou en bambou est conseillée, contrairement aux barres horizontales en raison du mauvais transfert des forces de cisaillement, ajoutée à la difficulté d'assurer un bon damage en présence de ces derniers. La technique des tirants en acier est applicable pour le pisé stabilisé, ces derniers sont placés dans des tubes mis dans des coffrages comme une protection contre la corrosion due à l'humidité de la terre à pisé.

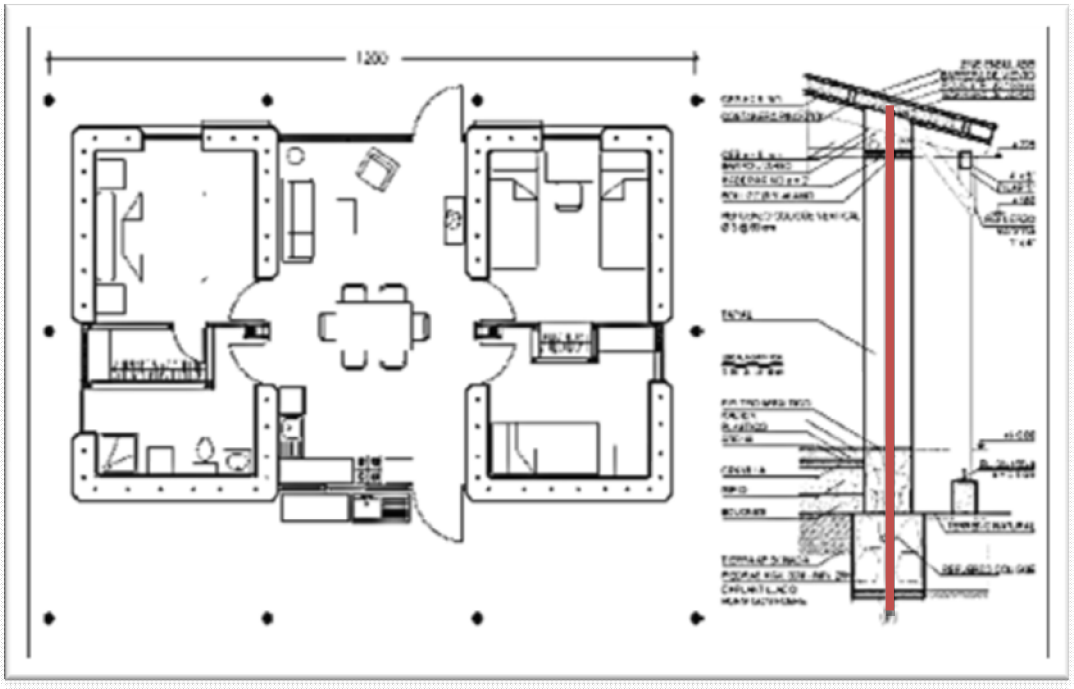


Figure III. 26 : Renforcement des mures en pisé par des tirants verticaux.
Source : Minke (BUI.Q.B. 2008)

localisation	pathologie	Solutions proposées
Les murs	Fissures profondes	• les fissures sont nettoyées. • humidification des lacunes • remplissage, rebouchage de la fissure avec du pisé coulé[171] • pose d'armature (grillage galvanisé, en fibre végétal ou synthétique) afin de consolider les fissures rebouchées. • application de l'enduit en terre[172]pour homogénéiser la surface du mur.
	Fissures superficielle	Un traitement léger par badigeonnage soit en terre ou à l'eau. Badigeons en terre: une finition permettant l'homogénéisation des murs. Le badigeon de terre est composé de terre à pisé tamisée à 4 mm mélangée avec du sable pour éviter les fissures de retrait au séchage. Il s'applique au pinceau en plusieurs couches. Une fois le mur sec, on y passe une éponge mouillée pour boucher les petites fissures de retrait. Badigeon à l'eau: s'utilise pour stopper l'érosion en surface. L'eau est appliquée au pinceau sur le mur et permet une répartition plus régulière des plaquettes d'argile.
Les angles		• Étaiement des murs de part et d'autre formant l'angle pour stabiliser la déformation. • Débarrasser des parties désolidarisées de l'intérieur du mur puis en passe au nettoyage et à l'humidification. • Rebouchage avec du pisé coulé et renforcement avec des matériaux durs.
Partie supérieure du mur	Tache noire	Il faut se débarrasser de la source d'humidité. Et procéder au remplacement des tuiles qui se sont altérées et laissent passer l'eau.
	érosion	• La création d'une pente de drainage qui empêche l'eau de stagner à proximité des structures

[171]**Pisé coulé:** Le pisé coulé est une terre à pisé dans laquelle sont ajoutés du sable et des graviers pour stabiliser la terre. La fraction de terre argileuse est réduite pour limiter la formation de fissures de retrait. La teneur en eau est également plus importante pour que le mélange soit plus plastique.
[172]**Enduit de terre** : utilise de la terre à pisé tamisée à 10 mm à laquelle on ajoute la même quantité de sable. On mouille le tout et une fois que l'on a obtenu une bonne plasticité, on applique l'enduit avec une truelle. L'enduit de terre peut être stabilisé avec un liant hydraulique, par exemple du ciment blanc afin de mieux conserver la couleur de la terre. De plus, les enduits en terre auxquels on rajoute un liant hydraulique accrochent bien sur le béton ce qui permet de récupérer certaines façades en pisé.

partie inferieure du mur		• mise en place des soubassements le long du mur
	Marque d'humidité	• Il faut se débarrasser de la cause de l'humidité. Dans la plupart des cas, il suffit de rajouter un système de drainage. • Il faut se débarrasser de l'humidité imprégnée dans le mur en le laissant sécher à l'air libre • Éviter les enduits ou les traitements qui empêchent l'évaporation de l'eau
Toiture		• Éviter l'érosion due à la différence des matériaux par un entretien régulier • Enduire le mur avec un enduit de terre contenant un liant hydraulique, pour qu'il puisse bien s'accrocher au béton ou au ciment.
Enduit	Enduit étanche	
	Enduit respirant	• Le mur est décroûté, c'est-à-dire qu'on enlève l'intégralité des enduits étanches présent sur la façade. • Le mur est laissé à l'air libre pendant plusieurs jours voir plusieurs semaines pour qu'il puisse s'assécher en profondeur. • Le mur est recouvert d'un enduit perspirant par exemple un enduit de terre.
végétation		Les arbres proches du bâtiment doivent être coupés. La végétation en bas du mur doit être enlevée pour permettre à l'humidité de s'évaporer.

Tableau III.2: Récapitulatif des pathologies et les solutions proposées pour une construction en pisé.

Conclusion

Le diagnostic des pathologies des constructions en pisé est un élément très important, notamment pour déterminer les causes engendrant les désordres affectant ces dernières. Leurs analyses permettent d'apporter les solutions et les remèdes nécessaires, selon la partie affectée, pour prolonger leurs pérennités dans le temps. Elles permettent aussi de déduire que les

pathologies affectant les constructions en pisé ne sont pas spécifiques à une région mais plutôt au matériau, sa mise en œuvre et aux erreurs d'exécution.

La présence de l'eau dans le pisé est paradoxale ; élément indispensable à la cohésion du matériau mais aussi un danger menaçant sa stabilité. Parallèlement, d'autres pathologies ont été traitées comme les désordres structurels et non structurels. Notre approche dans ce chapitre cherche, à travers les illustrations présentées, non seulement les pathologies mais aussi à donner des recommandations pour une meilleure mise en œuvre du procédé en pisé.

Nous avons aussi abordé les sollicitations sismiques pour les constructions en pisé et des désordres que peut causer ce risque naturel majeur Les études effectuées ont mis au point des solutions partant des solutions traditionnelles à nouvelles performances technologiques telles que les tirants.

Chapitre IV :

Maatkas entre diagnostic et promotion

Introduction

En Algérie, les constructions traditionnelles en terre crue représentent un patrimoine des plus riche en expression architectural, le pisé en est le plus représentatif En Kabylie il constitue aussi l'un des traits dominants du paysage. Il porte l'identité d'un aménagement aujourd'hui menacé par des pratiques nouvelles de l'urbanisation qui gomment l'évidence physique de cette culture constructive en pisé.

Maatkas, fait partie d'un ensemble de centres urbains du massif central de la Kabylie qui partage un passé et une histoire plus au moins commune. L'étude de ces centres relève des points communs notamment les cultures constructives. La technique du pisé, a fait objet d'un usage courant dans toute la région kabyle pour ne citer que : Tizi-Ouzou, Bejaïa et Bouia [173], mais toutefois présentant des particularités de mise en œuvre locale.



Figure IV.1: localisation du technique pisé en région Kabyle

Contrairement aux grandes villes, comme Alger, à Maatkas la technique est plutôt relevée dans les constructions civiles[174]. La reconquête de cette technique ainsi que sa promotion reste un point très difficile à atteindre. Face aux nouvelles techniques de construction basées sur des matériaux moins coûteux en termes de mise en œuvre, comme le béton et la brique, cela sans se soucier du paysage typique caractérisant la région.

[173]Wilaya visitées.
[174] S Allich, la formalisation comme outil d'identification d'un procédé constructif, cas d'étude : le *Tabiya* de Cherchell op cite p 200.

De ce fait, le présent chapitre abordera les différents aspects liés à au processus de patrimonialisation et de sauvegarde de ce patrimoine en pisé il sera question d'appréhender les spécificités constructives des bâtisses en pisé de la région de Maatkas. Ensuite, nous proposerons des remèdes aux pathologies relevées, et ce dans le but de promouvoir cette technique ancestrale

IV.1. Présentation de l'aire d'étude

Maatkas est la « capitale » de l'Aarch des Maatkas, située sur le massif kabyle entre la vallée du sebaou et la chaine de Djurdjura[175], cette agglomération est d'aspect linéaire longeant le long de la crête[176] avec une densité démographique des plus forte de la wilaya de Tizi-Ouzou avec 714 habitant/ km² en 2010 sachant que la densité moyenne de la wilaya est de 385 habitant/ km². Le facteur de localisation dominant est la présence de la zaouïa de Sidi Ali Moussa et les deux marchés hebdomadaires (lundi et jeudi). Le chef-lieu dit souk el khemis lui aussi est un ensemble de villages adjacents[177].



Figure IV. 2 : Localisation de la technique du pisé dans la wilaya de Tizi-Ouzou.
Source : Auteur

L'agglomération de Maatkas regroupe un ensemble de village juxtaposé, contiguës dont les extensions se confondent, elle compte près de 60 villages et hameaux, le plus dense en terme des villages reste l'agglomération secondaire dite Berkouka avec 5391 habitants/km^2, classée comme

[175]Pos Maatkas
[176]L'occupation des sols actuelle longe les routes, des directive prise par le PDAU en privilégiant les axes routiers ce qui renforce cet aspect linéaire.
[177]Rgph 2008

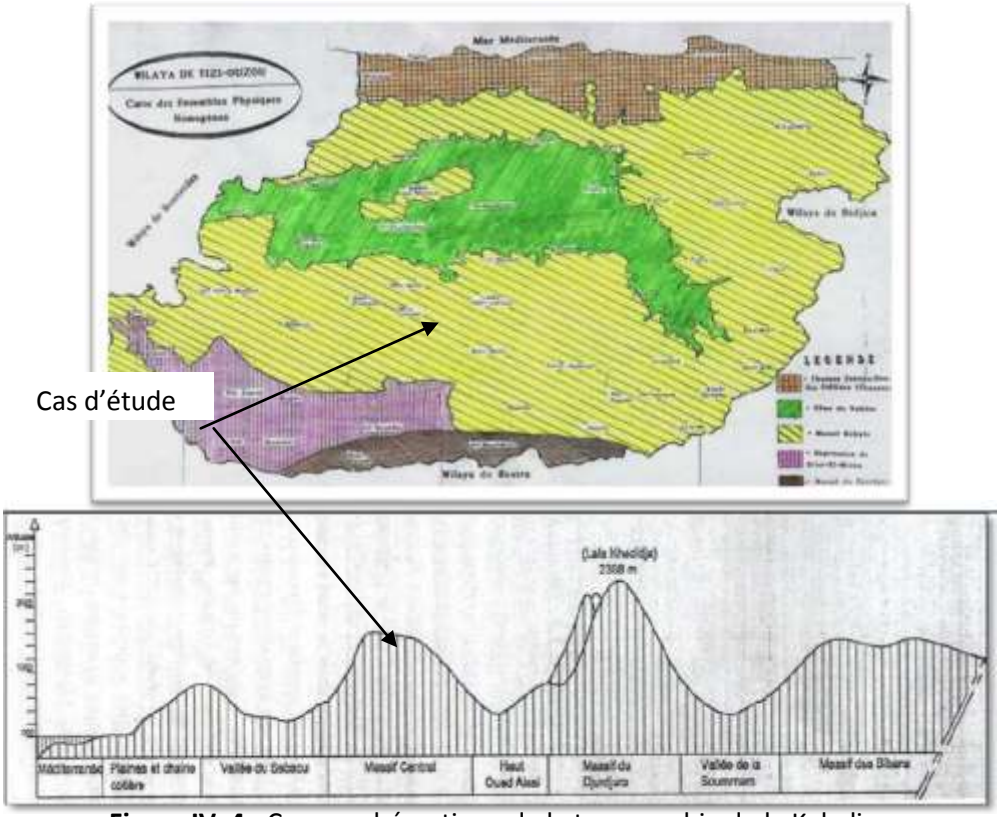


Figure IV. 4 : Coupe schématique de la topographie de la Kabylie

zone urbaine en 2008, ce classement « zone urbaine » est dû certainement aux taux des populations urbaine de l'ordre de 81.39% pour Maatkas un taux qui dépasse largement celui de Tizi-Ouzou et de Draa Ben Khedda.

Deux importants secteurs pour le développement de l'agglomération d'une part l'artisanat à travers la poterie, spécificité de la région, d'autre par le commerce. Toute fois la vocation principale reste la production oléicole.



Figure IV. 3 : Vue aérienne indiquant en rouge l'axe de développement de la commune de Maatkas.
Source : Auteur

IV.2. Limites géographiques

La commune de Maatkas se situe à 20 km dans la partie Sud – Ouest de la wilaya de Tizi-Ouzou. Elle se compose d'une agglomération Chef – lieu (Souk – El – Khmis), et d'une agglomération secondaire (Berkouka) et d'une zone éparse qui regroupe plusieurs hameaux. Elle s'étend sur une superficie de 4529 Ha et abrite une population de 32.121 habitants selon les données du RGPH 2008. Elle est issue du découpage administratif de 1977 et de 1987, elle a été promue au rang de daïra une année plus tard. Elle est délimitée :

- Au Nord – Est par la commune de Tizi-Ouzou
- Au Nord – Ouest Par les communes Tirmitine et Ait Yahia Moussa
- * A l'Est _ Par la commune de Souk El-Tenine
- Au Sud Par les communes Boghni et Mechtras
- À l'Ouest Par la commune d'AinZaouia

IV.3.Analyse du milieu physique de la commune de Maatkas

IV.3.1. Le relief

L'analyse de la carte des altitudes de la commune de Maatkas, révèle que le relief se caractérise par son aspect montagneux dominant, du fait qu'elle fasse partie du grand massif de la Kabylie. L'altitude moyenne est comprise entre 600 et 700 m.

Le relief est ponctué par des replats formants les sommets sur lesquels sont implantées la majorité des établissements humains (villages). Les pentes sont moyennement fortes, allant de 0 jusqu'à 25 % et parfois dépassent les 25 %.

La commune de Maâtkas est traversée par un réseau hydrographique dense constitué par des Oueds et les cours d'eau dont la majorité est temporaires. Il est à signaler que les Oueds permanents dans la commune en question, présentent les limites Sud et Ouest qui sont respectivement Oued Mechtras et Oued Ahlou Agouni (l'un des principaux affluents de l'Oued Sébaou). La nature de la topographie très accidentée des terrains joue un rôle important dans la mobilisation et la densification du réseau hydrographique.

IV.3.2. Climatologie

Le climat est typiquement méditerranéen, il est sec et chaud en été, froid et pluvieux en hiver. Toute fois il est conditionné par la situation géographique et la nature du relief, caractérisé par une morphologie nuancée voire contrastée, influent considérablement sur le climat.

IV.3.3.La pluviométrie

Les pluies sont moyennement abondantes et se concentrent pendant quelques mois de l'année. En fait, la commune en question se situe dans la séquence bioclimatique humide dont la pluviométrie moyenne est de plus de 1000 mm.

Les précipitations se caractérisent par leur torrentialité et leur irrégularité qui engendrent un fort écoulement de surface induisant une très forte érosion. Tandis que, la neige n'y est pas très abondante étant donné que les altitudes ne dépassent pas 700 m et que la tombée de neige ne dure que moins de cinq (5) jours/an.

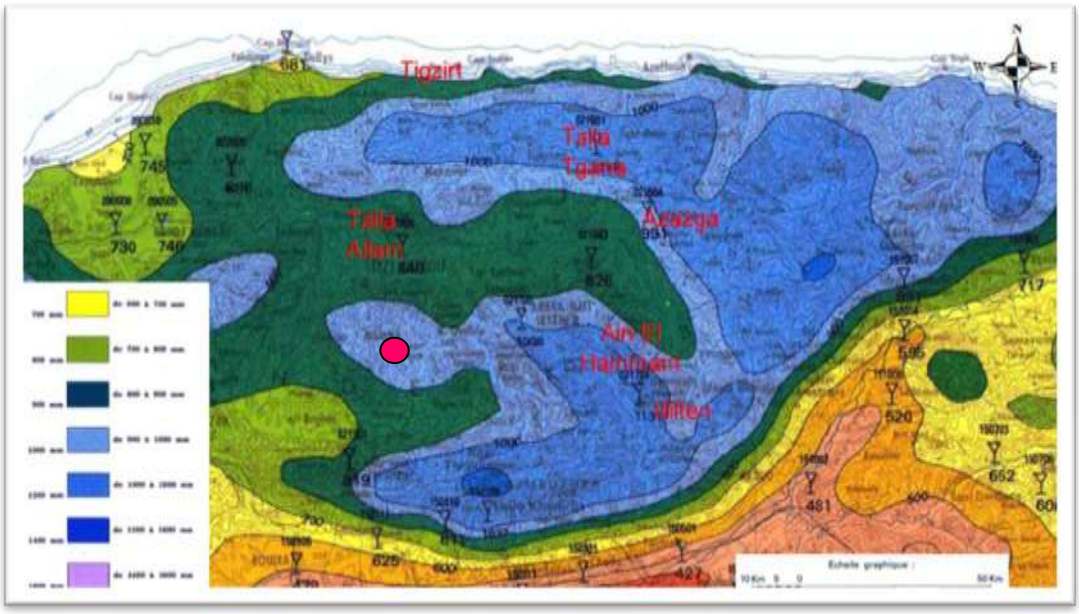


Figure IV.5: Extrait de la carte pluviométrique de l'Algérie du Nord moyenne annuelle, 1993, INCT. Source: INCT.

IV.3.4 Les températures

Les températures moyennes saisies à partir des stations de Tizi-Ouzou et de Larbaâ – Nath – Irathen varient entre 14 et 20 °c, leurs fluctuations dépendent de la morphologie des terrains. Les températures minimales varient entre 3 et 8 °c au mois de Janvier, tandis que les températures maximales dépassent 35 °c au mois d'Août.

IV.4. Géologie et géotechnique

La constitution géologique du massif Kabyle est essentiellement formée de roches cristallophylliennes. Une puissante assise de schistes micacés se situe à la périphérie avec un affleurement gréseux et conglomératique.

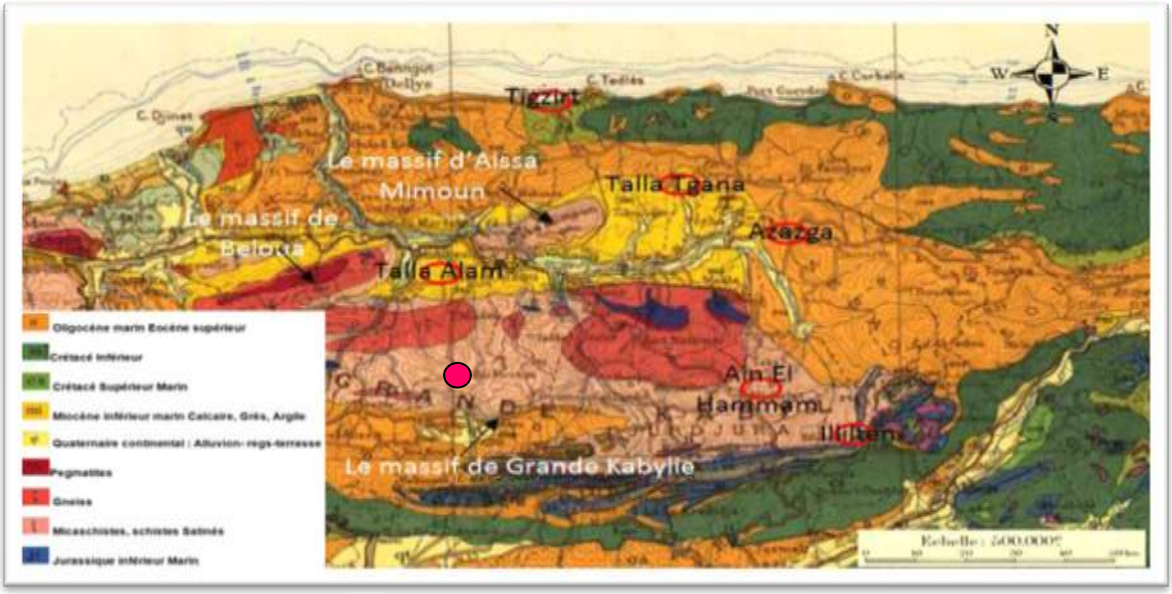


Figure IV.6 : Extrait de la carte géologique de l'Algérie 1/ 500 000 édition 1951/ 1952 M. G. Bétier. Source: INCI.

IV.5. Typologie de l'architecture traditionnelle en pisé à Maatkas :

« Axxam » est l'unité de base de la structure villageoise sur lequel s'articule l'organisation spatiale des villages, elle constitue un modèle traditionnel en termes de fonctionnement et de construction. La maison kabyle à Maatkas, tout comme les constructions vernaculaires de la région Kabyle, est constituée d'une seule pièce de forme géométrique carré « *sensiblement carrée sans fenêtre et sans cheminée, ou se creuse le foyer dans un sol de terre battue…* »[178], Cette pièce se partage en deux partie, la plus grande occupe une surface

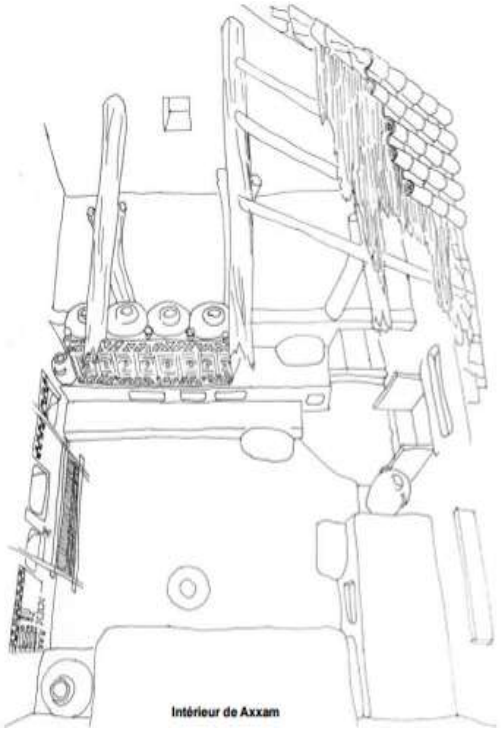


Figure IV.7 : intérieur de la maison kabyle traditionnelle.

[178] R.Maunier,la construction collective de la maison en Kabylie, étude sur la coopération économique chez les berbères du Djurdjura, institue d'entérologie,paris 1926,p 49

importante environ 2/3 de la surface globale[179] appelé *Takaat, Tigergert* ou *Aguns,* pièce où se déroule l'ensemble des activités domestique, la deuxième partie occupe le 1/3 de la surface globale[180] et légèrement plus bas que la première partie est réservée aux animaux appelé *Addaynin.* Au-dessus duquel se dresse un troisième espace en soupente, appelé *Thakana,* aliments appelé *Akkoufi* d'une part et d'autre part sert de pièce pour dormir quand la pièce principale ne suffit plus au membre de la famille.

Produit de la solidarité villageoise et parfois œuvre d'un même maçon qualifié et héritier d'un savoir-faire ancestral. Cette cellule, est construite avec un seul matériau de base, la terre mélangée par fois avec de la pierre de schiste provenant d'un gisement locale, constitue les murs en pisé, la couverture se fait en tuile à deux versants.

IV.6. Les Dimensions

Les relevés métriques effectués sur les maisons traditionnelles, révèlent que les dimensions varient. Elles répondent aux besoins socio-économiques des occupants mais aussi de leur rang social, cette différence s'exprime dans la production architecturale des maisons traditionnelles (des maisons plus grandes ou plus petites) « *ce sont les facultés et les besoins des occupants. Richesse et pauvreté qui y mettent leur empreinte* »[181], selon la même source les dimensions varient entre 7 et 7,5 m de longueur sur 5m de largeur pour une hauteur n'excédant pas les 4 m[182], toute fois cette différence dans les dimensions ne s'applique pas sur la forme qui reste une donnée constante ainsi que la technique



Photo IV.1 : Typologie de la maison kabyle à Maatkas. Source: Auteur



Photo IV.2 : Vue de la Toiture a Ait Zaim. Source: Auteur

[179]O.Alliane, patrimoine bâti et savoir-faire vernaculaires cas d'Ait el Kaid, mémoire de magistère, UMMTO, 2009, p 92
[180]M.Khellil, l'exil kabyle, paris, Edition, le harmattan, 1992, p44
[181]R.Maunier,op cite,P46
[182]R.Maunier,op cite,P45

constructive basé sur un coffrage en bois.

La maison kabyle à Màatkas est de forme régulière rectangulaire, les dimensions, face extérieur sont d'environ de 7 à 8m de longueur et de 5 à 6m de largeur pour une hauteur d'environ 3,5m avec une épaisseur moyenne des murs de 40cm.

Nous avons aussi relevé une évolution dans les techniques constructives notamment dans les éléments structurants, passant de simples branches à des madriers parfaitement équarris, permettant de réaliser des dimensions importantes principalement en hauteur tout en gardant l'organisation originelle de « Axxam ». L'évolution de la technique en question a été observée dansle village d'Ait Zain où ces dernières présentaient des dimensions importantes en longueur, largeur et hauteurprobablement relative à une époque plus récente.

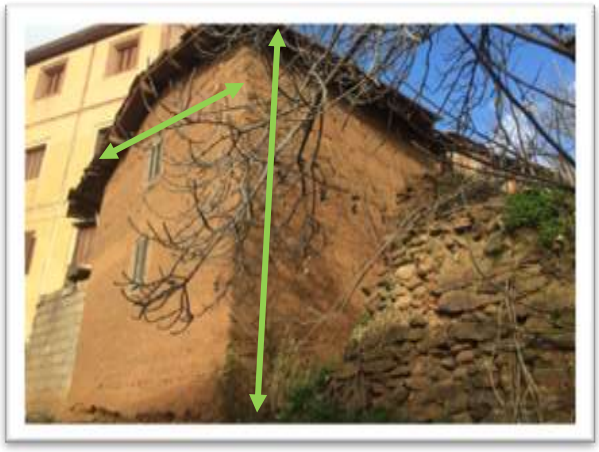


Photo IV.3 : La hauteur des maisons en pisé au village Cherfa.
Source: Auteur



Photo IV.4 : Vue intérieur d'une maison en pisé a Ait Zaim.
Source: Auteur

IV.7. Typologie de cellules relevées à Maatkas

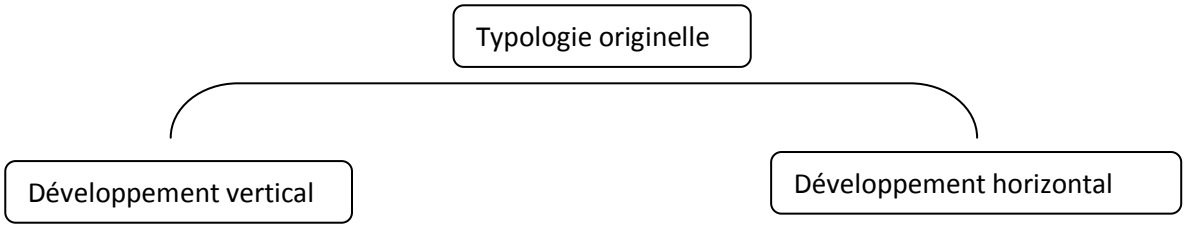
Nous avons relevés lord de nos investigations sur le terrain àMaatkas différentes variantes de la maison kabyle, probablement résultant des mutations de la cellule originelle sous l'influence de différents facteurs que nous allons essayer de résumer dans le développement de la présentation de ces variantes.



Photo IV.5 : Etat des constructions en pisé à Maatkas.
Source: Auteur

IV.7.1 La typologie originelle

À partir de la typologie originelle, des évolutions prennent forme, cette dernière obéit à une organisation traditionnelle de la maison kabyle, une organisation dite tripartie. Cette cellule originelle subit des transformations qui selon le cas, le besoin et la disponibilité foncière peuvent être horizontale ou verticale.



IV.7.2 Le développement vertical

Cette évolution s'est faite progressivement pour répondre probablement aux besoins immédiats de l'époque avec les moyens dont dispose la population. On dénombre trois variantes.



Photo IV.6:Vue d'intérieur de *Thaghorfet.*
Source: Auteur

IV.7.2.a. Introduction de l'espace « *taghorfet* »

Cette évolution de la maison traditionnelle s'est faite par l'introduction d'un nouvel espace superposé sur l'espace originelle appelé « *Thaghorfet* ». Un espace totalement indépendant

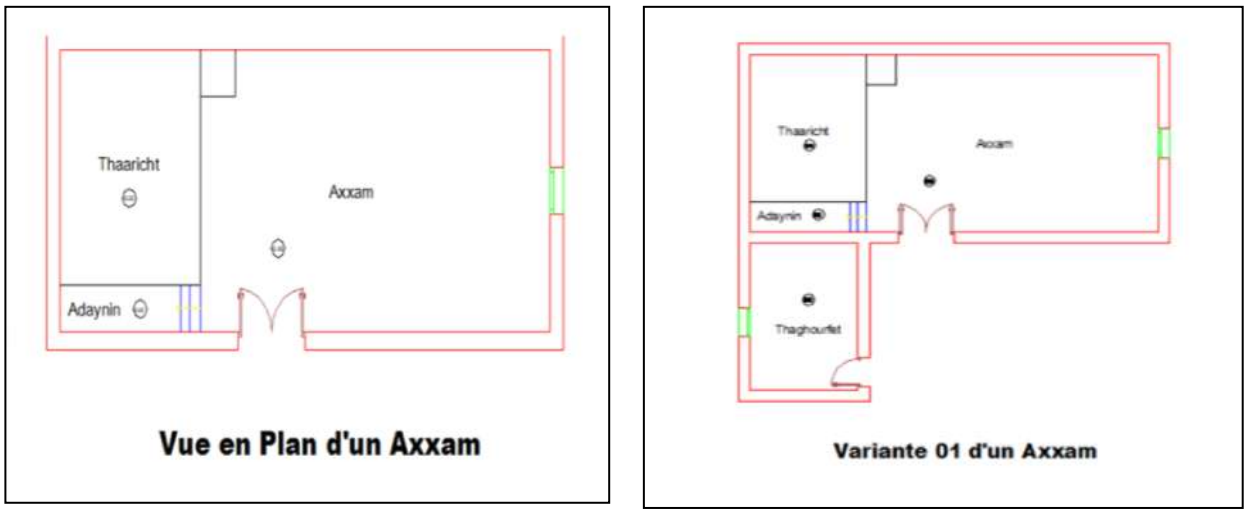


Schéma IV. 1: vue en plan d'une maison kabyle et la première variante de l'extension
Source: auteur

du reste grâce à son dispositif d'accès totalement individuel. Ce développement dépend principalement de la structure familiale, elle permet à la structure familiale de conserver ses liens tout en étant dans un espace privé et indépendant.

IV.7.2.b. Introduction du l'espace groupé à base de « *Theghorfetine* »

Elle constitue l'évolution de la première variante, basé sur l'ajout de « *Thaghorfet* », en un véritable espace familiale agrandit, on retrouve l'introduction de l'escalier en terre ayant accès sur deux espaces privés et de deux portes dont l'une est la principale, la première donnant sur l'entrée du hall et la seconde est celle donnant sur l'espace originelle « *Taqaaet* ».



Photo IV.7 : Escalier intérieur donnant a *Thaghorfet* gauche.
Source: Auteur



Photo IV.8 : Escalier intérieur donnant à*Thaghorfet* droite.
Source: Auteur

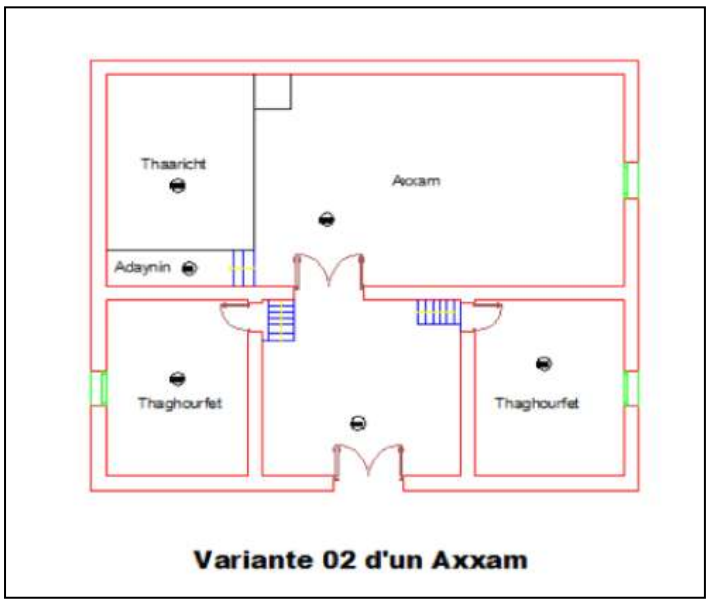


Schéma IV.2: deuxième variante pour une extension de thighoufthin
Source: auteur

IV.7.2.c. Surélévation par ajout d'un niveau avec escalier extérieur

Elle constitue la dernière évolution verticale de la typologie dite originelle, par la création d'un étage supplémentaire et d'une coursive longeant la façade principale et ce grâce à l'articulation extérieur verticale (escalier extérieur) en bois ou en ciment.



Photo IV.9 : Évolution verticale avec coursive en bois.
Source: Auteur

Nous avons remarqué deux types d'élévations verticales dans la maison kabyle:

La première consiste en une évolution qui a gardé les caractéristiques traditionnelles de la maison kabyle et la technique constructive du pisé. La deuxième est plus récente et consiste en la superposition du mode nouveau sur l'ancien et l'utilisation de nouveaux matériaux comme la brique et le béton.

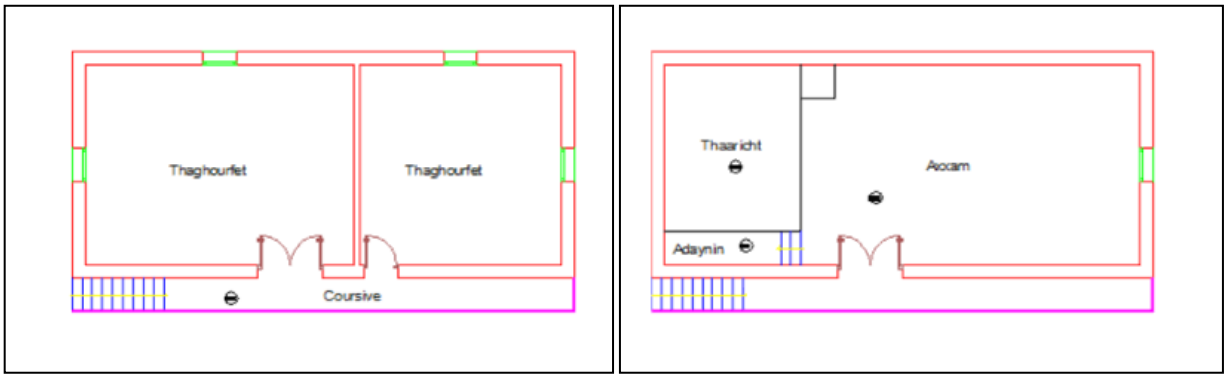


Schéma IV.3: troisième variante de Axxam de l'extension avec une coursive.
Source: auteur

IV.7.3. Le développement horizontal

C'est un développement qui se base sur un ajout de pièce de vie, généralement de dimension inferieure à la typologie originelle collée à la cellule principale quand la parcelle foncière le permet. Cette juxtaposition des pièces définissent un espace commun d'une même famille appelé *el hara*, pour répondre à l'agrandissement de la famille.

IV.8. Les éléments associés des constructions en pisé à Maatkas entre diagnostic et remèdes

IV.8.1. Structure verticale

IV.8.1.1. Lesfondations

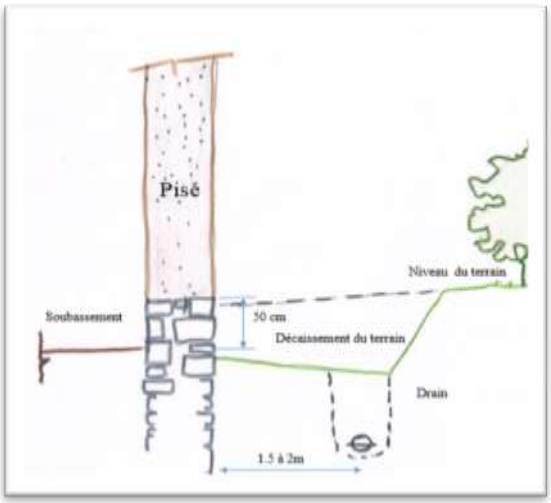


Schéma IV.4: Traitement de l'humidité avec drain à proximité
Source : auteur

Généralement superficielles ou peu profondes[183] « *Les murs sont très épais et reposant sur des fondations atteignant 1,20 m de profondeur* »[184] Les désordres qui peuvent affecter ces éléments important de structure, sont de différentes origines, tassement différentiel, dissociations d'éléments en pierre, les remontées capillaires, et/ou suite aux sollicitations trop importantes (voir chap. 3). Toutefois la première recommandation consiste à exécuter un drain périphérique ou à proximité[185], selon la faisabilité, pour évacuer l'eau et permettre au pied du mur de séché[186].

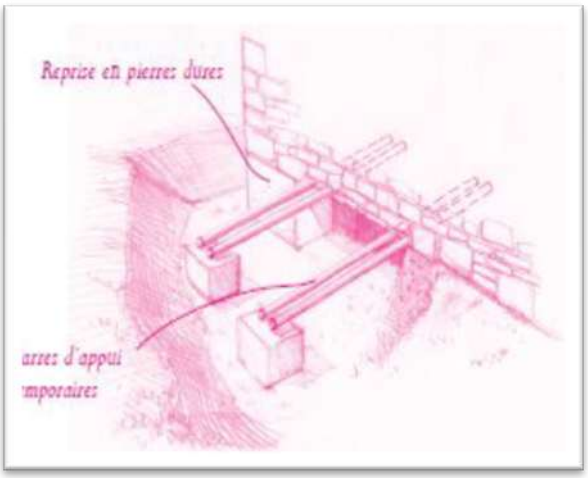


Figure IV.8: Reprises-en sous œuvre des fondations

La reprise sous œuvre est aussi à préconiser, et cela, après étayement du mur, on notera que les maisons à Maatkas ont une organisation groupées de ce fait, cette opération est parfois impossible à réaliser. L'opération en question, débutera par l'excavation des terres sous le mur sur de petites largeurs en évitant de coïncider avec les joints des banches, pour une profondeur suffisante (atteindre le bon sol), les massifs de fondation sont réalisés avec de différents matériaux durs mais insensibles à l'eau, ces semelles seront exécutées en deux temps[187]. Le processus est reproduit tout le long du mur.

[183] On ne peut donner de chiffre faute d'autorisation d'excavation.
[184] Germaine Laoustchantreaux op cit 34
[185] Bruno Duquoc Op Cite p10
[186] Yevs Baret Op Cite p41
[187] G. Houben,H, Guillaud, op cite, p247

IV.8.1.2. Les soubassements

Les soubassements sont des éléments importants dans les constructions en pisé, ces derniers protègentla partie inferieur des murs contre l'érosion qui peut fragiliser considérablement la structure des maisons en pisé. A Maàtkas la hauteur des soubassements relevés peuvent atteindre les 2m selon le contexte donné. Ils sont en pierre ou en moellons de pierre, quand ils existent.

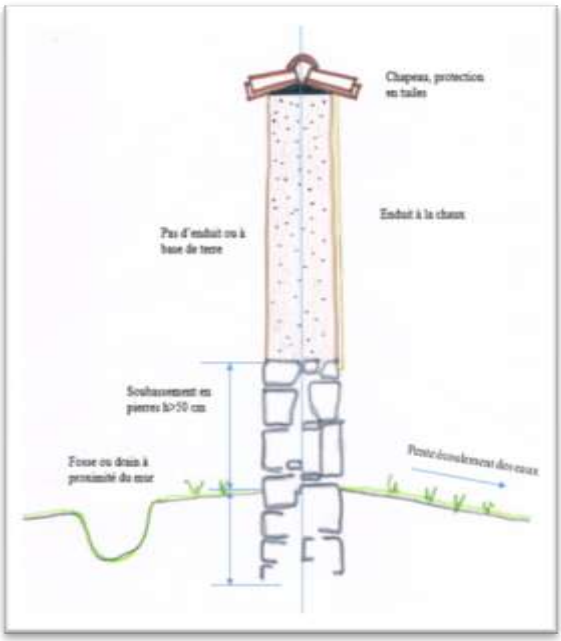


Schéma IV.5: Hauteurs des soubassements.
Source: auteur

Les désordres observés à leur niveau ont différentes origines, notamment celle liées à l'humidité de différente nature. Il est vrai, que cette partie est la plus exposée aux pathologies et que le meilleur remède consiste à sa mise hors d'eau dès la conception, toutefois il est possible d'arrêter la détérioration de cette partie en[188] :

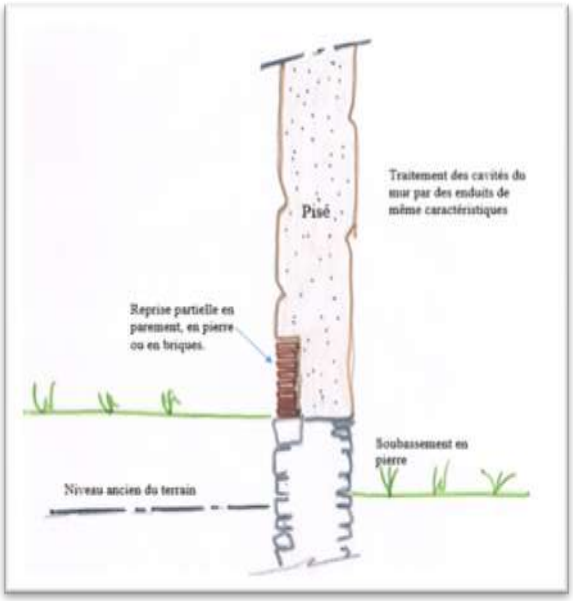


Schéma IV.6: Reprise des parties défectueuse au niveau du soubassement
Source: auteur

- La rapportant avec des matériaux durs plaqués ou intégrés dans le mur et prévoir des zones étanches (filmétanche)[189] ;
- Réaliser une pente pour éviter le ruissèlement et la stagnation ;
- Éviter le rehaussement du niveau de terrain ;
- Éviter les revêtements étanche comme le bitume ;
- Supprimer la végétation.

[188] P. Scarato, J. Jeannet Cahier d'expert bâti en pise fiche n°2
[189] Idem

IV.8.1.3. Les murs en pisé

Édifiés avec la technique du coffrage[190] en bois coulé sur place (pisé) en utilisant comme matériaux la terre extraite du site, avec une épaisseur moyenne de 30 cm de largeur pour une hauteur n'excédant pas les 80 cm pour la banche, exécutés par petite couche de 10 à 12cm. La hauteur des murs est généralement de 3m mais le travail d'investigation nous a permis de relevé des hauteurs allant jusqu'à 6 ou 7m pour les extensions verticale.





Photos IV.10 et 11 : Présentation du modèle reproduit en atelier avec le directeur du mémoire
Source: Auteur

À partir du travail sur terrain nous avons identifié différentes typologies des murs en pisé, on en compte :

IV.8.1.3.a. Les murs en pisé de terre

C'est la technique la plus observée à Maatkas, facilement reconnaissable, la section du mur apparente permet de constater la terre schisteuse, riche en cailloux de divers diamètre, utilisée pour améliorer les caractéristiques mécaniques de la terre, extraite sur les lieux, de couleur grise ou rouge selon les pigments de la terre.

[190] Nous avons pu retrouver un échantillon de coffrage datant des années 60 chez un Mr. Saïd à partir duquel nous avons pu reconstituer notre propre coffrage.

Semblable au pisé « classique » sans addition d'autres matériaux ni parement spécifique, sa mise en œuvre est réalisée à base d'un coffrage en bois, le mur est ainsi réalisé par le développent horizontale de ce dernier. La lecture globale des murs laisse apparaitre les trous laissés par les clés de coffrage en bois, ce qui nous permet de déterminer la limite des banchées, cette lecture générale nous permet aussi de souligner que les trous des clés ne s'alignent forcement pas.

Les soubassements sont le plus souvent en pierre, de différentes hauteurs allant de 0.50cm à 2m de hauteur selon le contexte, pour une épaisseur moyenne des murs de 30cm.



Photos IV.12 et 13 : Murs en pisé représentant l'épaisseur des couches et l'irrégularité des trous.
Source: auteur

Certains murs ne sont pas en très bon état de conservation, ce qui rend la lecture des phases de coffrage difficile, toute fois nous avons relevé des banchées de 1.70m de longueur sur 70cm de hauteur, les lits de damage des couches de terre n'apparaissent peu ou pas du tout sur le mur, nous avons pu les mesurer, quand cela était possible, leurs hauteurs moyenne est de 10 à 12cm ce qui laisse supposer que leurs hauteusr avant compactage ne dépassent pas les 15cm.




Photos IV.13 et 14: Murs en pisé de terre.
Source: auteur

Les investigations nous ont aussi permis de souligner l'absence de tout traitement au niveau des angles (chainage ou harpage), la finition des murs extérieurs est exclusivement faite à partir d'un enduit à base de terre mélangée à de la bouse de vache et de la paille hachée, néanmoins d'autre enduits à base de ciment ont été relevés ce qui complique le diagnostic.

IV.8.1.3.b. Les murs en pisé mélangés avec des fragments de pierre de schiste

C'est un mur en terre banchée coulé sur place, le parement est composé d'un moellon à base de gros fragments de pierre liés avec un mortier de terre, le tout placé sur un soubassement pas très haut, la hauteur maximale relevée est de 1m pour 40 cm d'épaisseur du mur.

L'aspect générale du mur peut être confondu avec un mur en pierre, la hauteur des limites des banches ainsi que les lits de couches de compactage est quasiment impossible a relever. Les trous laissés par les clés de coffrage ont été rebouchés pour un soucis de finition.

La pierre utilisée est de nature schisteuse prélevée du gisement présent dans la région, concassée grossièrement liée à base de mortier en terre. Tout comme le premier exemple nous n'avons relevé aucun traitement au niveau des angles, et l'enduit est à base de terre mélangé à de la bouse de vache et de la paille hachée.



Photos IV.15 et 16: Murs en pisé avec fragment de pierre de schiste.
Source: auteur

IV.8.1.3.c. Les murs en pisé avec lit de pierre en schiste

C'est une technique intermédiaire entre le premier et le deuxième exemple, il s'agit de mur en terre banchée avec un lit de pierre, il est facilement identifiable notamment par l'absence des revêtements qui laissent apparaitre l'ensemble des détails. Le travail sur le site permet de souligner que les lits de pierres parallèles horizontales peuvent être ou pas à un intervalle égale, nous pouvons ainsi distinguer deux sous types de murs en pisé avec lit de pierre :

Le premier est basé sur l'alternance d'une couche de lit de terre d'une épaisseur n'excédant pas les 20 cm et d'un lit en pierre, grossièrement équarris ou en forme de petite dalle en pierre d'une épaisseur variant de 3 à 5cm. Le second est basé sur le même principe du précédent, la différence réside dans la couche de terre qui est nettement plus importante, il est constitué à partir de plusieurs couches de terre alternées avec un seul lit en pierre.

Il est difficile de donner des dimensions exactes des pierres utilisées, car on trouve des pierres grossièrement équarris avec des épaisseurs assez prononcées allant jusqu'à 10cm, d'autres plus fines en forme de dalle n'excédant pas les 5cm pour une largeur moyenne de 10 à 15 cm selon l'épaisseur du mur, pour une langueur n'excédant rarement les 15cm.

Le tout posé sur un soubassement de hauteurs différentes. Pour cet exemple il n'existe aucun traitement particulier au niveau des angles, ni par croisement de banche ni par application de chainage permettant une meilleure fixation des murs.



Photos IV.17, 18 et 19: Murs en pisé en alternance de couche terre et de lit de pierre en schiste.

Source:auteur

Les désordres relevés sur les murs en pisé, se localisent au niveau de plusieurs endroits et sont dus à plusieurs facteurs (voir chapitre 3), Toutefois les fissures observées peuvent être traitées selon leur importance et ce après avoir posé des clés et repris la partie défectueuse du mur par des potelets[191] afin d'arrêter la dégradation[192]:

- Fissures superficielles : pour traiter ce type de fissures il suffit de nettoyer le mur de toutes les impuretéspouvant s'accrocher dans la cavité, puis passer au rafistolage de la fissure avec un mortier en terre pour fermer la fissure. Cependant un entretien régulier est recommandé.



Photo IV.20 : Figure : témoin en plâtre et reprise de fissure
Source : Sébastien Moris et Arnaud misse.

[191] P Scarato , J Jeannet Cahier D'expert bâti en Pisé Fiche N°16
[192] Sébastien Moriset et Arnaud misse op cite p12

Fissures profondes : elles sont de différentes origines du au sol ou à des charges, passives ou non, leur traitement reste une opération délicate, vu la particularité du matériau pisé, il est recommandé de les traiter avec des matériaux ayant les mêmes caractéristiques mécaniques et le même comportement face à l'humidité. Quand les parties du mur sont trop affectées il est recommandé de procéder à une reprise de ces dernières.

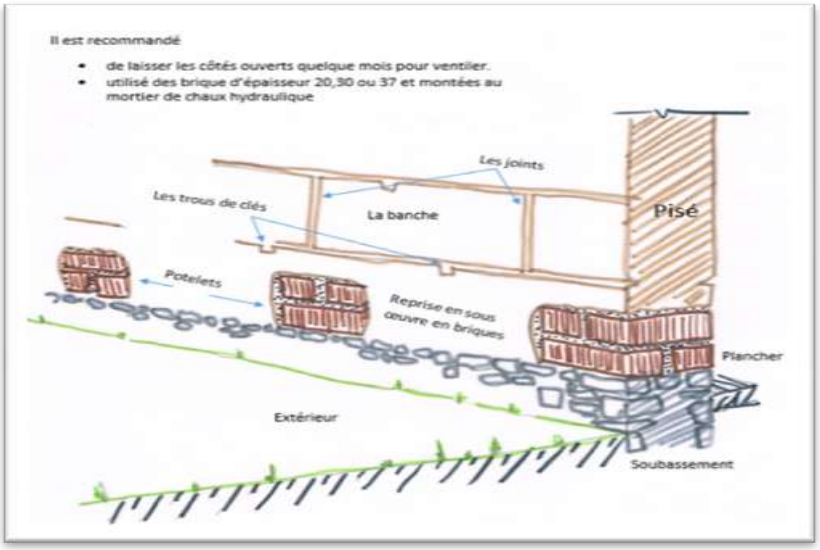


Schéma IV:7reprises sous œuvre d'un mur en pisé
Source : auteur

IV.8.1.4. Ouvertures

La porte constitue la principale ouverture principale dans la maison traditionnelle kabyle, elle assure la fonction de porte d'entrée et une ouverture pour l'aération car elle est constamment laissée ouverte. Porte à deux ouvrants en bois. Leurs dimensions varient rarement et sont de 1.5m de hauteur sur une largeur près de 2m. Leur réalisation se base sur le linteau en bois ou en pierre qui assure la stabilité de l'ensemble[193].



Photos IV.21 : Exemple de porte de maisons traditionnelles en pisé a MAATKAS.

Nous avons aussi relevé l'existence de petites ouvertures généralement placées sur les murs pignons, à la hauteur de « *Thakana* » ou de « *Thghorfet* » elles sont réalisées grâce à un cadre en bois.

[193]Germaine Laoustchantreaux mémoire de Kabylie, scène de la vie traditionnelle 1937-1939 p39

Les désordres que nous avons relevé sont liés à la différence des matériaux bois/terre, la déperdition de la matière autour des cadres en bois est dû à l'humidité, et /ou au charge fléchissantles linteaux en bois. Pour y remédier il est recommandé de reprendre les cadres des ouvertures avec des matériaux durs assurant ainsi un bon jambage de ces dernières. Le changement ou la consolidation du linteau ne se fera qu'après avoir assuré la stabilité de la partie supérieure[194] selon les étapes suivantes.

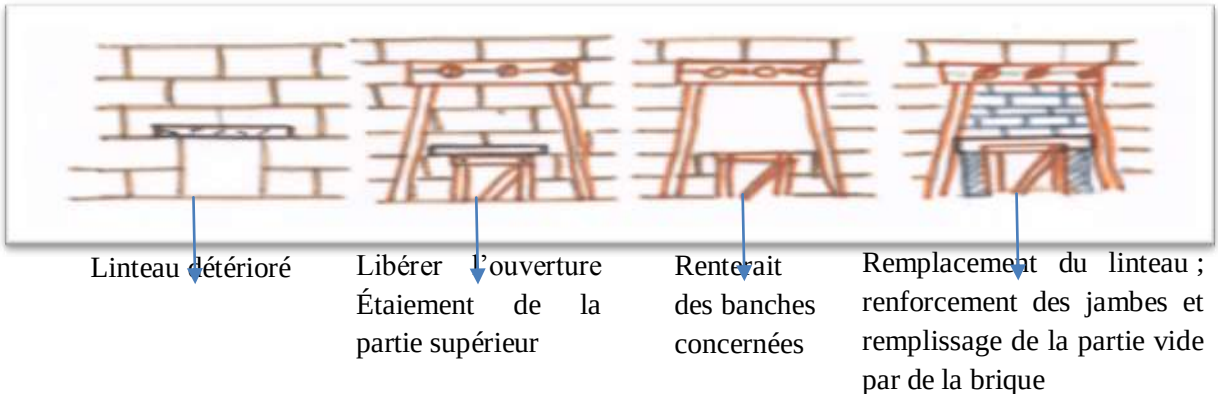


Schéma IV.8 : remplacement du linteau en bois dans les constructions en pisé

IV.8.1.5. Les poutres et les piliers

Traditionnellement les poutres est les piliers sont en bois d'arbre grossièrement équarri à la hache (l'utilisation du frêne est plus répondue en comparaison avec le chaine qui est moins résistant).

La maison traditionnelle est constituée de trois poutres longitudinales reposant sur l'épaisseur du mur pignon, ainsi que les poutres formant la sous pente « *Thakana* », généralement au nombre de trois, l'une de leur extrémité traverse le mur en pisé et l'autre repose sur une pièce en bois transversale « aigu » soutenue du coté interne de la maison par trois piliers verticaux.

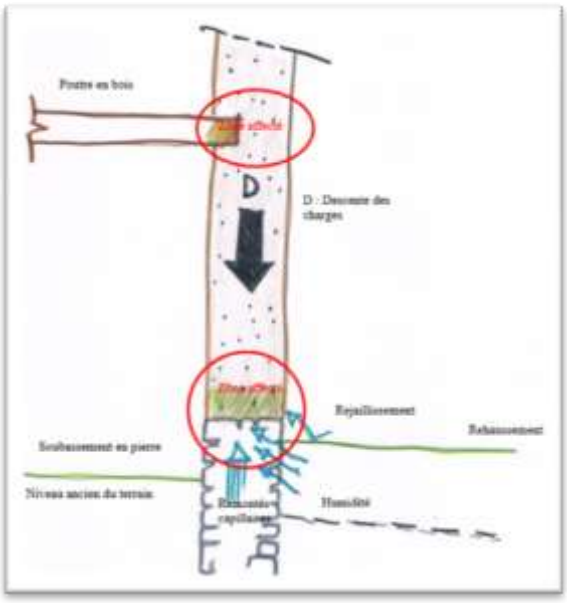


Schéma IV.9 : Effondrement du mur en pisé.
Source: auteur

[194] S'agissant du pisé la reprise de la partie retiré doit se reposé sur des éléments de même caractéristiques pour assurer la descente des charges ainsi que la stabilité de l'ensemble

Ces piliers qui traversent « *Addekkanne* » s'enracinent au sol. Nous en avons relevé avec plusieurs hauteurs, cette différence s'explique d'une part par la nature du bois utilisé, d'autre part l'époque qui introduit l'utilisation des poutres en bois parfaitement équarris ainsi que la hauteur choisie. Traditionnellement la hauteur des maisons ne dépasse pas les 3m mais nous avons constaté qu'au village d'*Ait Zaim* cette limite est largement dépassée[195].

Les pathologies qui affectent les poutres et piliers sont dues à l'utilisation du bois sans traitement au préalable, présence de l'humidité et variation des températures. Les désordres se localisent généralement au niveau des appuis, les remèdes préconisés sont les même avec les autres techniques constructives à savoir celles (pierre/bois, terre et pierre /bois), il existe deux manières de les traiter

La première consiste à traiter des éléments isolés, et ce après étayement. La partie détériorée est nettoyée, traitée puis posée généralement sur un corbeau en pierre[196].



Étape 1 : étaiement du plancher

Étape 2: traitement de la partie détériorée de la poutre

Étape 3: Mise en place d'un corbeau en pierre

Figure IV.9: protection du mur en pisé
Source: auteur

Pour traiter une série d'appui on suit la première étape, la différence consiste à remplacer le corbeau par une poutre métallique ou en bois de section plus importante pour reprendre les charges et surcharges, en prévoyant un chainage au-dessus de cette poutre pour éviter les fissures ponctuelles[197].

- Étape 1 : étaiement du plancher pour traitement de la partie détériorée



Schéma IV.10 : Traitement d'une série de poutres

[195] On a constaté l'utilisation des poutres et des piliers en bois industrialisé ce qui a permis de dépassé la limite concernant la hauteur des maisons mais aussi sa largeur.
[196] Fiche technique 1.18 réparer un appui de plancher au niveau du mur, corpus levant, EuromedHiritage.
[197] Idem.

- Étape 2 : mise en place d'une poutre métallique.

IV.8.2. Structure horizontale

IV.8.2.1. Les planchers

On peut distinguer trois types de plancher:

*Takaats, Tigergert*ou *Aguns* : appliqué directement sur le sol de la pièce, il est constitué à base de mortier de terre et de chaux polie avec un galet « *Thimzit* » comme pour la poterie, ce mortier en terre est parfois mélangé à de la paille hachée et à la bouse de vache pour éviter l'effritement. Un travail réservé exclusivement à la femme, cet enduit est appliqué périodiquement après chaque hiver.



Photo IV.22 : Maison en ruine laissant apparaitre le plancher de *Thaaricht*
Source: auteur

Contrairement à « *Tigergert* », *Thakana* possède une structure en bois et des rondins sur lesquels on pose le roseau pour constituer les planchers ; on y applique le même mortier à base de terre et de bouse de vache mélangée à de la paille hachée et polie avec un galet.

Addynin : le plancher de cette partie de l'espace est largement décalé vers le bas par rapport à la pièce principale, en raison de la fonction aucun traitement n'est préconisé juste de grosse dalle en pierre pour faciliter l'entretien et l'évacuation.

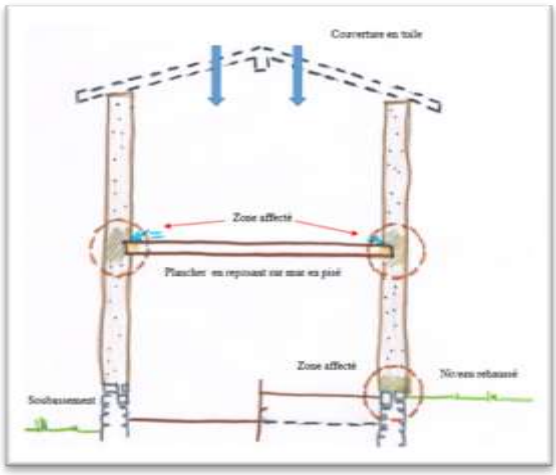


Schéma IV.11: Effet piscine dans les constructions en pisé.
Source: auteur

Les désordres enregistrés sont essentiellement dus aux poids des planchers en terre et/ ou à l'action de l'humidité sur les appuis en bois. Dans le cas où les planchers n'arrivent plus à soutenir leur propre poids il est recommandé d'ajouter des poutres placées à travers l'existante pour réduire la portée et mieux reprendre les charges.

La partie encastrée des poutres dans les murs doit aussiêtretraitée pour éviter toute possibilité de pourrissement.

IV.8.2.2. La toiture

Le toit appelé « *sqef* » est exclusivement réalisé en deux versants, avec de tuile ronde. Il repose sur trois poutres principales, la poutre maitresse appelée « *assalasalemas* », les deux autres appelées « *issoulas* », leurs poids est repris, d'une part par les murs à leur extrémités, et d'autre part soutenue par trois piliers dont le central s'appelle « *tigujdit* »

Les roseaux comme assise, sont placés et attachés avec du fil végétal « *el halfa* » tissés , sur les chevrons qui reposent sur les trois poutres, on y applique un mortier de terre qui aide a fixer les tuiles traditionnellement de forme ronde, disposées en deux rangées, l'une sur la face courbée pour récupérer l'eau et l'autre dans l'autre face comme couverture et éviter les infiltrations.



Photos IV.23 : Système structurelle de la toiture (pilier, poutre et poutrelles).
Source: auteur



Photos IV. 24 : Detaille de la couverture.
Source: auteur

La toiture déborde de près de 50cm à 1m pour protéger les murs en pisé, l'intersection des versants est protégée par une rangée de tuile faitière.

Les désordres enregistrés dans les toitures sont dus aux surcharges (neige, végétations), leur traitement consiste à son élimination, par pulvérisation d'herbicide ou autre produit adéquat à chaque végétale. Selon l'état de détérioration de la toiture on peut y remédier soit par le remplacement d'éléments isolés pouvant être à l'origine des infiltrations d'eau, ou procéder à son remplacement par décomposition de tous ses éléments puis passer à sa reconstitution.

IV.8.3. Les revêtements

La construction de la maison kabyle est exclusivement une tache masculine, les revêtements et leurs entretiens quant à eux sont une tache réservée aux femmes.

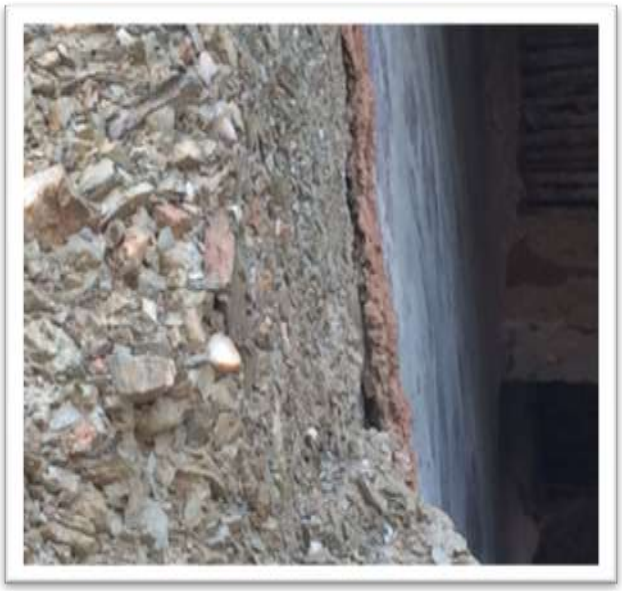


Photo IV. 25 : Épaisseur de l'enduit en terre.
Source: auteur

Le revêtement consiste en un mélange de terre rouge et de bouse de vache avec de la paille hachée appelée « *Thixmirt* » ou « *Thakourt* » appliquée sur les planchers mais aussi comme enduit sur les murs intérieurs et extérieurs. La finition du revêtement des murs intérieurs se fait par un enduit à base d'argile blanche « *Themlilt* » diluée dans de l'eau et laissée pendant toute la nuit.

L'ornementation des maisons à Maatkas est une tradition propre aux kabyles (pas aux marabouts). Ces dessins sont appliqués exceptionnellement sur les murs donnant face à la porte d'entrée ou recouvrant d'autres espaces comme « *Thaaricht* »ou « *Thaghofet* ».

Cette ornementation est un processus assez long à faire. on doit d'abord préparer les murs recevant les dessins par l'application de deux couches de terre rouge tamisée très fin puis polies par un galet pour éliminer les pores qui peuvent être formés, cette phase étant finalisée on procède à l'application d'une couche d'argile rouge appelée « ouzouigh » donnant cette couleur rouge.

Le mur étant prêt à recevoir les dessins, on applique « *Themlilt* » mélangée à de l'huile avec de la peau de mouton en guise de pinceau. Enfin le vernissage se fait grâce à des plantes appelées « *Ouarouri* » « *Oukthoun* » ou « *Thochnin* » donnant cet effet vernis.



Photo IV. 26 :Dégradation des enduits intérieurs en terre.
Source: auteur

L'entretien régulier des revêtements est la seule façon d'éviter les pathologies qui y sont liés. Le

décollement[198] est une pathologie due à la nature de l'enduit appliqué sur les murs extérieurs (enduit ciment) constituant une barrière étanche sous l'effet de la condensation[199]. Il est recommandé d'enlever le revêtent et laisser séché le mur pendant une période suffisante puis appliquer un enduit permettant au mur de respirer. Pour Les efflorissances la première action consiste à éliminer la source d'humidité puis procédé au brossage à sec.

IV.9. Transformations du model architectural vernaculaire kabyle à Maatkas

De nos jours, les transformations que subit et transforme l'architecture traditionnelle en Kabylie, est intimement liés aux changements constatés dans la société kabyle. Ce dernier est fortement soutenu par la promotion et l'industrialisation de nouveaux matériaux d'une part, et d'autre part, elle est liée au développement démographique des régions, mais surtout à la nouvelle manière de penser et de pratiquer l'espace, relatives aux nouveaux modes d'urbanisation.

C'est ainsi que les anciens noyaux villageois se trouvent peu à peu évidés de leur population (exode rurale, immigration), abandonné pour construire au bord des routes un moyen pour les villageois d'accéder aux nouvelles servitudes (gaz, électricité et eau) mais surtout facilité l'accessibilité, cette nouvelle organisation leur permet aussi de développer une activité économique en réservant le Rez de chaussée pour cet effet.

Il est tout à fait évident de dire que l'avènement de l'industrialisation et la standardisation des nouveaux matériaux a eu un impact sur le paysage villageois et ce dans la perpétuation des savoir-faire et des pratiques constructives traditionnelles. C'est ainsi le cas de la technique constructives en en pisé très répondue dans la région de Maatkas, s'est vu au fil du temps remplacé par les techniques modernes employant des matériaux nouveaux, notamment le béton et l'acier. Pour cette raison nous considérons que le patrimoine architectural en pisé est non seulement en péril mais en voie de disparition.

Le constat établi lors de notre travail sur le site nous a permis de situer non seulement le degré de dégradation mais aussi Les facteurs de transformation, que nous avons relevée et affectant de façon importante l'aspect et l'architecture typique de la région kabyle en générale et en particulier Maatkas.

IV.9.1.Le facteur psychologique :

[198] J Jeannet, B Pignal, G Polett, P Scarato op cite p62
[199] ANAU, réhabilité et entretenir un immeuble ancien point par point p 114.

Il important de signaler que les habitations en terre, en générale, sont mal perçues, méprisées dans leur représentation, elle incarne par tout ce qui est vieux, archaïque et inconfortable, contrairement à La nouvelle maison construite en parpaings et en ciment qui véhicule la sensation de la modernité même s'ils lui reconnaissent son niveau d'inconfort thermique.

Cette représentation est dû au fait que les matériaux traditionnels, en particulier la terre, sont associées à la pauvreté et la misère deux adjectifs qui résument l'état des constructions et de vie d'autrefois, contrairement aux nouvelles constructions qui incarnent une idée de richesse, de progrès, tout en définissant le statut social des individus.

Nous avons constaté la même attitude chez les maçons, qui ayant opté pour les nouvelles techniques de constructions et des nouveaux matériaux rejettent définitivement les techniques traditionnelles certainement par crainte du ridicule. De plus les ouvriers trouvent que l'effort physique fourni dans les constructions traditionnelles est très important ce qui a poussé à l'abandon de cette technique constructive, motivé certainement par la perte de certaines traditions sociales "twiza"

Nous avons aussi relevé certains facteurs psychologiques positifs relatifs à la symbolique et au besoin naissant d'enracinement qui poussent certains individus à s'investir dans l'entretien et la sauvegarde de la maison familiale traditionnelle.



Photo IV. 27 : Juxtaposition des constructions traditionnelles avec les nouvelles.
Source: auteur



Photo IV. 28 : Vue globale du village Thadjdiwth
Source: auteur

IV.9.2. Le facteur économique

Ce sont les facteurs liés à la situation économique, sociale, mais surtout à l'avènement de l'industrialisation, et des transports, qui ont provoqué des changements radicaux dans la société et des modes de vie. En effet, la généralisation du béton a relayé les matériaux locaux mais surtout des techniques constructives traditionnelles notamment le cas du pisé à Maatkas, l'abandon de cette technique constructive est nettement soutenue par la facilité de mise en œuvre des nouveaux matériaux.

Il est tout aussi important de souligner un autre facteur, tout aussi important, qui contribue à la dégradation du bâti traditionnel qui est lié à l'absence de professionnels spécialisés comme les architectes, les ingénieurs, les techniciens et maçons maitrisant la technique et capable de la transmettre.

IV.9.3. Le facteur administratif et législatif

Contrairement aux pays développées ou nous retrouvons une prise de conscience de l'habitat traditionnel et ce sur le plan administratif qu'au sein de la société, se manifestant d'une part dans l'aspect technique comme la prise en charge de toute opérations de réhabilitation ou dans le soutien technique pour les nouvelles constructions et d'autre part dans l'aspect financier pour aider les citoyens à se réapproprier ce système constructif (entreprendre les travaux).

En Algérie nous avons constaté l'absence d'une structure législative pouvons contribuer à la restauration de ce patrimoine ou à la sauvegarde des techniques constructive. Pire encore nous avons relevé un constat alarmant dans la prise en charge du patrimoine en général, une politique basée sur un classement du patrimoine sans procéder a la mise en place d'un programme pour sa protection et son financement, nous pouvons citer comme exemple les secteurs sauvegardes. Cette situation limite et réduit les démarches de réhabilitation et d'investissement dans le logement traditionnel.

Ajouter à cela la politique d'urbanisation nationale qui se base sur la densification des voies et routes développer dans tous les instruments d'urbanisme et de planification sans pour autant relevés les spécificités des régions, nous avons voulu cité le programme lancer par les autorités concernant les aides à l'auto construction qui ne fait qu'aggraver cette situation basée sur l'utilisation des matériaux industrialisés.

En effet le comportement des acteurs pénalisent le renouveau des constructions traditionnelles, les matériaux et surtout les techniques constructives, ils contribuent davantage à la défiguration de nos villages et le cas de Maatkas n'est pas une exception.

Conclusion

Les conclusions auxquelles nous sommes parvenus permettent d'affirmer que le village a connu des transformations radicales en terme de construction et d'occupation spatiale, pour remodelé définitivement le paysage que Maatkas offre aujourd'hui.

Nous avons pu mettre en lumière les pathologies tant endogènes qu'exogènes, et les mesures à prendre afin d'y remédier aux dégradations de ce patrimoine en péril. Toutefois, ce chapitre souligne les conséquences de la politique nationale en terme d'urbanisation, cherchant à uniformisé le territoire sans se préoccuper des spécificités régionales et en introduisant de nouveaux matériaux de construction moins coûteux abandonnant ainsi la technique constructive du pisé ainsi que les valeurs ancestrales.

Le travail effectuer sur terrain nous a fourni une lecture sur l'évolution de la typologie originelle de la maison kabyle, ainsi que les différentes variantes des murs en pisé. Cette étape est d'autant plus importante pour essayer de comprendre les vraies raisons de l'abandon de la technique et d'essayer de proposer des solutions pour la réadapter dans une nouvelle typologie qui répond aux attentes des populations.

Nous somme convaincus que cette démarche pour la promotion du pisé est un processus très compliqué basé sur le partenariat et sur la politique incitatif, mais nous sommes aussi convaincus que la reconquête de cette technique constructive favorise un développement local tout en gardant le cachet pittoresque des régions loin de la politique de la mondialisation.

Conclusion générale

Conclusion générale :

L'objectif assigné à notre travail de recherche devait reconnaitre le procédé constructif du pisé, à travers son identification et ces différentes variantes, l'approche analogique par l'étude des différentes typologies existantes dans le monde notamment en méditerranée a comme finalité de faire ressortir non seulement les points communs mais aussi les spécificités reconnaissables et identifiables de notre cas d'étude, le village de montagne de Maâtkas.

La reconnaissance de la technique du pisé nous a conduits, en premier lieu, à poser la question sur les conditions de son apparition, ces origines, ainsi que les facteurs de propagation et de transmission. Nous avons à ce sujet, souligné les deux hypothèses qui retracent cette question, à savoir celle qui lie son apparition à une évolution et à un développement technologique, en supposant que la technique du pisé n'est qu'une évolution de la technique de la terre comprimé en bloc; la deuxième hypothèse plaide pour l'influence des mouvements migratoires des populations, apportant avec eux tout leur savoir-faire et cultures constructives, ce qui justifie la diffusion et la généralisation de la technique constructive du pisé dans l'ensemble du bassin méditerranéen. Sur un autre registre, nous avons voulu soulevé la problématique lié à la terminologie utilisé pour désigner la technique du pisé, *tapia* en espagnole, *tapial* ou *taipa* en portugais *et tâbiya* en arabe ou même la technique du *lûh* dans certaines régions au Maroc. Cette mise au point contribue, non seulement, à la compréhension de la spécificité de la technique mais aussi aux conditions de son apparition et des analogies existantes entre chaque spécificité.

Partant du fait que la technique du pisé produit un matériau de construction en terre crue, et que la matière utilisé est la terre trouvée in situ, il nous a semblé important de nous pencher sur cette matière que constitue ce matériau, et ce par l'étude de ses caractéristiques physico-chimique en faisant référence à la texture (granulométrie), la cohésion et son adhérence. Ces dernières constituent les paramètres les plus importants dans la composition d'une terre à pisé. Elles sont définies par des analyses préliminaires sur site mais également affinés en laboratoire. Cette réflexion soutien fortement l'existence de la théorie de la terre à pisé, et que c'est à travers une connaissance approfondie de la matière et du matériau que nous pouvons apporter les corrections et les solutions adéquates aux défaillances diagnostiquées.

La relation paradoxale entre l'eau et la terre a été traitée afin de comprendre les différentes interactions entre ces deux éléments a prioris contradictoire mais complémentaires. L'étude de ces interactions nous a révélé que l'eau est un élément indispensable dans la composition du pisé

mais qu'il peut représenter un danger quand il se présente avec des pourcentages importants. L'analyse de paramètres et la connaissance du procédé de mise en œuvre nous ont permis de relever les différentes pathologies pouvant affecter les constructions en pisé et celles affectant le matériau. Les illustrations présentées nous ont permis d'établir un manuel définissant la conduite à tenir face aux pathologies préalablement diagnostiquées pour des actions de réhabilitation.

Les investigations sur terrain ont permis d'une part d'établir un constat sur l'état des constructions en pisé à Maatkas, jugé irréversible et que toute action de réhabilitation physique est inutile, et d'autre part, les spécificités appliquées dans cette production architecturale. Nous pouvant attester, suite à l'étude comparative, que les typologies relevées à Maatkas présentent des similitudes avec celles observées dans d'autres régions ou d'autre pays, et que les caractéristiques géologiques de cette région présentent les mêmes caractéristiques définissant une terre à pisé « *une terre granuleuse pas trop argileuse* ».

L'abandon de la technique constructive du pisé à Maatkas est fortement suivi de la perte de la typologie constructive caractéristique de la région. Ce qui a complètement transformé le paysage identitaire de Maatkas, lié à plusieurs facteurs de transformation. Nous pouvons, aujourd'hui, dire que le facteur qui a certainement stimuler cette transformation est la politique d'uniformisation appliquée à toutes constructions ou action de planification urbanistique nationale, et qui ne prend en aucun cas les particularités des régions, ajouter à cela cette politique a fortement favorisé l'introduction d'un nouveau mode de construction avec de nouveau matériaux pensant moins coûteux en terme de réalisation !

Au terme de notre recherche, nous avons proposé de développer la dualité ancien /nouveau pour recréer l'harmonie du paysage typique de la région de Maatkas, pour un développement local durable et de promouvoir une architecture identitaire nouvelle répondant aux besoins actuels des populations locales. Notre objectif cherche à répondre à cette double problématique qui ne peut se concrétiser que par la mise en place d'une politique incitative basée sur un vaste partenariat et de promotion de la technique constructive du pisé et ce à travers tous les chainons de ce réseau : les aspects scientifique et économique, diffusion et soutien institutionnel et le transfert de la technologie, proposant le pisé comme un matériau d'avenir plus qu'un élément du patrimoine bâti vernaculaire.

Références

sOuvrages généraux :

- Agence Nationale pour l'Amélioration de l'Habitat, Collombert R. L'humidité des bâtiments anciens : causes et effets, diagnostic et remèdes. Editions Moniteur. Paris. 1989.
- ANAU, réhabilité et entretenir un immeuble ancien point par point p 114.
- BARET Y, Traiter l'humidité, Chantier pratique. Edition Eyrolles, février 2011.
- BAZAGANA R, SAYAD A, habitat traditionnel et structure familiales en kabylie,1974.
- BERNARD ABRAHAM, JEAN-LUC SALAGNAC, JOSÉ FONTAN, DANIEL QUENARD, STÉPHANE GILLIOT, CLAUDE POMPÉO, Transfert d'humidité à travers les parois, Évaluer les risques de condensation, CSTB, le future en construction, septembre 2009.
- BORDIEU P, esquisse d'une théorie de la pratique précédée de trois étude d'entérologie kabyle, 1972.
- CAZANOVAS X, FIORI E, NOURISSIER G, méthode RehabiMED II, réhabilitation des bâtiments pour la réhabilitation de l'architecture traditionnelle méditerranéenne Rehabimed, 2007.
- CHOAY FRANCOISE, L'allegorie du patrimoine, Edition du seuil, paris, 1992.
- CNERIB, Conception de logements économiques à base de produits localement disponibles, Édition CNERIB, 2000.
- CREOUS J, Humidité dans la maison, Lutter contre les remontées capillaires, futura- science, 2014.
- COINET JEAN, réhabilitation : Art de bâtir traditionnel connaissance et techniques, Aix en Provence, Édition Edisud, 1987.
- COINTREAU FRANÇOIS, l'école d'architecture rurale, ou leçons ; second cahier, paris, 1791.
- COSTA ANIBAL, GUEDES JOAO MIRANDA, VARUM HUMBERTO, structural réhabilitation of old buildings, building pathology and rehabilitation, Édition springer Berlin, 2014.
- COIGNET J. la maison ancienne : construction, diagnostique, interventions, Edition Eyrolles. Paris ,2006.
- CRATerre, Doat Patrice, construire en terre, Édition alternative et parallèles, paris, 1985.
- CRATerre-EAG, enseigner l'architecture de terre dans le monde, Édition CRATerre-EAG, Grenoble, 2001.
- CRATerre Marrakech 87 habitat en terre, Édition CRATerre, Grenoble, 1987.

- DE BRANDOIS PATRICE, BABICS FLORENCE, manuel de sensibilisation à la restauration de la maçonnerie, Édition ministère de la culture et de la communication, direction de l'architecture et du patrimoine, France, 2006.
- DETHIER JEAN, des architectures de terre, l'avenir d'une tradition millénaire, Édition centre Georges Pompidou, Lyon, 1982.
- DETHIER JEAN, des architectures de terre, atouts et enjeux d'une tradition millénaire de construction méconnu : Europe, tiers monde, états unis, Édition centre Georges Pompidou, paris, 1986.
- DOAT PATRICE, HAYS ALAIN, HOUBEN HUGO, MATUK SILVIA, VITOUX FRANÇOIS, construire en terre, CRATerre, Grenoble, 1979.
- DUQUOC B, entretenir sa maison en 10 leçons, Edition Eyrolles .2007.
- EASTON DAVID, WRIGHT CYNTHIA, the rammed earth house, Edition Chelsea green publishing, USA, 2007.
- FATHY HASSAN, construire avec le peuple, Edition Sindibad, paris, 1970.
- FONTAINE LAETITIA, ANGER ROMAIN, bâtir en terre, Edition Berlin, 2009.
- GARCÍA MORALES SOLEDAD. Outil 6, Comprendre les processus de dégradation des matériaux.
- HOUBEN HUGO, GUILLAUD HUBERT, traité de construction en terre, Edition parenthèses, Marseille, 1989.
- IBN KHALDOUN, les prolégomènes, T2, traduit en français par Mac Guckin De Slane, Edition numérique.
- JEANNET J, PIGNAL B, SCARATO P. Bâtir en pisé : technique, conception, réalisation. Pisé terre d'avenir. Cahier technique n°3, 1998.
- J. JEANNET P. SCARATO, Cahier d'expert bâti en pise fiche n°2.
- JEANNET J, PIGNAL B, SCARATO P. Le bâti ancien : analyse, pathologie, remède. Pisé terre d'avenir. Cahier technique N°2, 1996.
- LAOUST- CHATEREAUX GERMAINE, mémoire de kabylie, scène de la vie traditionnelle.
- Le Griel. A, « Les « terres à pisé » du Forez : étude d'une formation corrélative.
- LE TIEC .J.M, PACCOUD.G, Pisé H2O, « De l'eau et des grains pour un renouveau du pisé en Rhône-Alpes Année de publication », 2006.
- LOUVIGNÉ. M, Humidité dans les bâtiments prévention et traitement Centre d'assistance technique et de documentation CATED.2000.
- MAHMOUD KHELIL, l'exil kabyle, paris Edition le harmattan, 1992.

- MAUNIER RENÉ, la construction collective de la maison kabyle, Edition institut d'anthropologie, paris, 1926.
- MEDAcorpus, Architecture traditionnelle méditerranéenne, A8-mur en terre banchée (pisé) méditerranée.
- MEDAcorpus, Architecture traditionnelle méditerranéenne, A8-mur en terre banchée (pisé) Espagne.
- MEDAcorpus, Architecture traditionnelle méditerranéenne, A8-mur en terre banchée (pisé) Espagne.
- MEDAcorpus, Architecture traditionnelle méditerranéenne, A8-mur en terre banchée (pisé) Algérie.
- MEDACorpus, Traiter la dégradation et l'affaiblissement du bois, Fiche N°1-21.
- MEDACorpus, Réparer une fissure sur un mur en pierre. Fiche N° 1.07.
- MORISET SÉBASTIEN, conservation et réduction des risques à Ardakan, Édition CRATerre, 2010.
- MONTÓN JOAQUÍN, Agents de dégradation du bois, Outil 6, Comprendre les processus de dégradation des matériaux.
- ODUL PASCAL, des architectures de terre en Algérie, projet earth construction technologies appropriate to developing contrises, Belgique, 1983.
- OLIVIER M, évolution des recherches effectuées au CNERIB sur la construction en terre (rapport de mission) CNERIB, alger, 1988.
- PELLIZZER ET SABATINI, 1976 ; Amoroso et fassina, 1983 ; Karpuz et Pasamethouglou 1992.
- PIGNAL BRUNO, terre crue : technique de construction et de restauration, Édition Eyrolles, 2005.
- TOMAS. F. « Le relief et les sols de la plaine du forez », centre d'étude foreziennes, 1971.
- ZERHOUNI SELMA, GUILLAUD HUBERT, MOULAY ELIE, l'architecture de terre au Maroc, ACR Édition, paris, 2001.

Mémoire et thèses :

- ALILI S. Guide technique pour une réhabilitation du patrimoine architectural villageois en Kabylie. Mémoire de magistère, sous la direction du Mr Dahli. UMMTO 2013.

- ALLICH.S, la formalisation comme outil d'identification d'un procédé constructif, cas d'etude : le tabiya (pisé) de cherchell. mémoire de magistère, sous la direction de chenaoui y. EPAU. Avril 2012.
- BALOUL N. conservation et valorisation du patrimoine architectural en terre de la région du Twat- gourara : cas du ksar Tmassekht. Mémoire de magistère, sous la direction de Dahli M. UMMTO 2007.
- CHABANNE. JULIEN, mémoire de spécialisation et d'approfondissement, « une ossature bois spécifique aux remplissages » architecture de terre DSA terre soutenu le 29 septembre 2006.
- DALI. A. étude de valorisation du patrimoine architectural de terre, cas de ksour dans le sud algérien. Mémoire de magistère. Université Mohamed kheider, Biskra. 2001.
- KEBAILI N. L'architecture de terre contemporaine en Algérie, évaluation post-occupation d'habitations rurales dans la région du centre des hauts plateaux. Mémoire de magistère, sous la direction de Mr Bensalem. EPAU 2006.
- ILOK MUSTAPHA, habitat et patrimoine au Maroc présaharien, mémoire de fon d'études professionnelles approfondies, 1999- 2001, Égypte.

Article et revues :

- BAUDREAU DOMINIQUE, DE CHAZELLES CLAIRE- ANNE, GUYONNET FRANCOIS, Maison médiévale du sud de la France, bâties en terre massive : état de la question », in M.S.A.M.F. hors-série 2008.
- BAZZANA ANDRÉ, HUBERT ETIENNE, matériaux et techniques de construction, quelques réflexions à propos de l'habitat villageois dans al andalous, in castrum, volume 6 edition CASA de Velázquez, 2000.
- CRISTINI V, RUIZ CHECA. J.R, « *tapia valenciana* : caracteristiche di muri in terra crudarinforzati con mattoni », in mediterra 200, proceedings, edicom edizione, monfalcone, Italie.
- DE CHAZELLES.C.A, ". « 1ra Conferenza mediterranea sul l'architettura deTerra cruda »,1st mediterranean conference on earth architecture, Cagliari : Italie (2009)" MEDITERRA 2009.
- DE CHAZELLES.C.A, « stabilité, disparition et fluctuation des traditions constructive en terre dans les pays méditerranéens », in MEDITERRA 2009, proceedings, Edicom Edizione, Monfalcon, Italie.

- DE CHAZELLES.C.A, Manuscrit auteur, ". « 1ra Conferenza mediterranea sul l'architettura deTerra cruda »,1st mediterranean conference on earth architecture, Cagliari : Italie (2009)" MEDITERRA 2009.
- DE CHAZELLES.C.A, GUYONNET FRANCOIS « la construction en pisé du languedoc – roussillon et de la prevence, du moyen age à l'époque moderne (III – XIX), in echanges transdisiplinaires sur les construction en terre crue2, la construction en terre massive : pisé et bauge, edition l'esprou, monpeulier,2005.
- GALARZA TORTAJADA.M, « *La Tapia Valenciana* :una técnicaconstructiva poco conocida »,in actas del primer congreso national de historia de la construccion, madrid,1996.
- HEITZ. P, architecture en terre, isolation et préfabrication les nouveaux enjeux du pisé, qualité construction, N°144, mai/juin 2014.
- HEITZ, P, Pathologie humide du pisé, Qualité construction, Architecture en terre, avril 2014, N°143.
- JAQUIN P.A, AUGARDE C.E, GERRARD C.M, Historic rammed earth structures in spain, construction techniques and priliminary classification », in international symposium on earthen structures, Bangalore, 2007.
- La technique crue rentre dans le moule, technique & chantier, le moniteur, le 18 janvier 2013.
- MOLENAT JEAN PIERRE, PASSINI JEAN, l'emploi de la terre dans la construction en nouvelle castille à la fin du moyen age » in l'architecture de terre en méditerranée, rabat, 1999.
- OUAGUENNI Y, on se doit réhabiliter la pierre et le pisé », El Watan, 26 avril 2009.
- Sauvage. M, « les début de l'architecture en terre au proche orient », in MEDITERRA 2009, proceedings, Edicom Edizione, Monfalcone, Italie.
- STAEVEL J.P, « réflexion à propos de la nomenclature médiévale de l'architecture de terre en occident musulman : exemple de la tabiya » dans l'architecture de terre en méditerranée, de Mohammed Hammam.
- CRISTINI V, RUIZ CHECA. J.R, « *tapia valenciana* : caracteristiche di muri in terra crudarinforzati con mattoni », in mediterra 200, proceedings, edicom edizione, monfalcone, Italie.

Listes des figures et photos

Liste des figures

Figure I.1: Localisation et sens de propagation des architectures en terre crue.

Figure I.2: Les différents types de terres alluviales.

Figure I.3: Représentant Triangle Textural.

Figure I.4: Exemple de résultat d'essai granulométrique des tamis.

Figure I.5: Vue microscopique de la structure de sol (texture).

Figure I.6: Diagramme représentant les limites de la texture d'une terre a pisé.

Figure I.7: Diagramme représentant les limites de plasticité de la terre a pisé.

Figure I.8: Diagramme représentant les limites cohésion de la terre a pisé.

Figure I.9: Diagramme représentant les limites de compression de la terre a pisé.

Figure I.10: Schéma représentant l'interaction de l'argile et de l'eau.

Figure I.11: Les étapes constituant le procédé constructif.

Figure I.12: Profil de l'outil de la technique pise (banche lyonnaise).

Figure I.13: Panneau de banche.

Figure 1.14: Fond de banche

Figure I.15 : poteau en bois équarris.

Figure I.16: exemple de clé lyonnaise.

Figure I .17: Clé en forme de tronc de pyramide d'auvergne.

Figure I.18: Les différentes positions des clés pour une épaisseur définissent du mur.

Figure I.19: Les différents types de pisoir

Figure I.21 : Schéma représentant une progression horizontale.

Figure I.23: Schéma repesent la progression verticale

Figure I.24: Schéma représentant intégral horizontal

Figure I.25 : progression Intégrale verticale.

Figure II.1 : organigramme des étapes de mise en œuvre de la technique du pisé.

Figure II. 2 : Les différentes étapes de la mise en œuvre d'une construction en pisé.

Figure II.3 : Les différentes étapes de la construction en pisé.

Figure II.4 : Comparaison des volumes réalisés en fonction de la technique.

Figure II.5: processus de préfabrication du pisé

Figure II.6: processus de préfabrication des modules. Des échafaudages autour des banches permettent aux ouvriers d'accéder à l'intérieur du moule.

Figure II.7:Détail de préfabrication du pisé.

FigureII.8 : représentant la méthode bugeytrès répondu en chine

FigureII.9 : représentant la méthode lyonnaise

Figure II.10 : Pisé a joints en gradin.

Figure II.12 : Coffrage de l'angle par pose d'un ''Sabre'' dans l'angle extérieur de la banche.

Figure II. 13 : Les ouvertures dans les constructions en pisé

Figure II.14 : mur en pisé de terre

Figure II.15 : Mur calicastrada « avec finition extérieurs »

Figure II.16 : mur en pisé valencien

Figure II.17 : procéder de la mise en œuvre de la variante valencienne.

Carte II.18:Localisation des différentes variantes du pisé en Algérie.

Figure III.1: Action de l'eau sur les murs en pisé.

Figure III.2: Action mécanique de l'eau sur les murs en pisé.

Figure III.3 : détérioration des murs en pisé sous l'action mécanique de l'eau.

Figure III.4 : Les différentes causes du rejaillissement.

Figure III.5 : Schéma de l'action de l'eau sur le bas du mur par ruissellent.

Figure III.6 : Remontée capillaire.

Figure III.7 : Pathologies liées à l'humide.

Figure III. Les trois modes de transfert d'humidité dans les parois en pisé.

Figure III. : Système de drainage pour ancien mur en pisé.

Figure III. : Exemple de parement de protection.

Figure III.10 : exemple de protection avec la masse d'usure.

Figure III.12 : relation de la hauteur du soubassement avec le débord de la toiture.

Figure III.13 : Effet du temps sue un mur en pisé non protégé et le pisé protégé.

Figure III.14 : Exemple de liaison avec le même matériau.

Figure III.15 : liaison à base d'un harpage de banche.

Figure III.16 : exemple de traitement d'angle par un coffrage spécial en (L).

Figure III.17et 18 : Traitement d'angle avec des matériaux durs à gauche et mortier de ciment ou à la chaux à droite. Réduisant l'effet de l'érosion.

Figure III.18 : système de renforcement des murs en pisé avec un chainage en fer.

Figure III.19 : Effet de déformation du linteau.

Figure III.22: Rotation des appuis dans les murs en pisé.

Figure III.23 : La condensation dans les murs en pisé.

Figure III.21 : solution pour éviter effet du poinçonnement dans les murs en pisé

Figure III.20 : effet du poinçonnement dans les murs en pisé

Figure III.24 : couverture traditionnelle a deux versants.

Figure III.25 : Renforcement des murs en pisé par des tirants verticaux.

Figure IV.1: localisation du technique pisé en région Kabyle (wilayets visitées)

Figure IV.2: Localisation du technique pisé dans la wilaya de Tizi ouzou

Figure IV.3: Vue aérienne indiquant en rouge l'axe de développement de la commune de Maatkas.

FigureIV.4: coupe schématique de la topographie de la kabylie.

Figure IV.5: Extrait de la carte pluviométrique de l'Algérie du Nord moyenne annuelle, 1993, INCT.

Figure IV.6 : Extrait de la carte géologique de l'Algérie 1/ 500 000 édition 1951/ 1952 M. G. Bétier.

Figure IV.7 : intérieur de la maison kabyle traditionnelle.

Figure IV.8 : reprise sous œuvre des fondations

Figure IV.9: protection du mur en pisé

Photos

Photo I. 1.2: Les tamis pour l'Analyse granulométrique en laboratoire.

Photo I.3 : résultat du Teste de sédimentation

Photo I.4: représentant essai de la cohésion.

Photo I.5: Interaction de l'eau entre des particules.

Photo I.6: représentant la force capillaire.

Photo I.7 : Vue microscopique des plaques d'argiles.

Photo I.9.10 : Construction contemporaine en pisé au Maroc, région de Marrakech.

Photo I.11 Photo du coffrage traditionnel à Maatkas.

Photo I.12 : Panneau de banche au Maroc.

Photo I.13 : Fond de banche de Maatkas

Photo I.14 : exemple de poteau en fer à Maatkas

Photo I.15: Clé en fer à Maatkas

Photo I.16 : des jougs en fer à Maatkas

Photo I.17 : des jougs en cordeau Maroc

Photo I.18 : représentant le pisoiren bois à Maatkas

Photo I.19: représentant une progression horizontale.

Photo I.20 : Schéma repesent la progression verticale

Photo I.21: Schéma représentant intégral horizontal

Photo I.22 progression Intégrale verticale.

Photo II.1.2 : Transport et mise en place des blocs du pisé préfabriqués

Photo II.3 : mise en place du coffrage pour édification des fondations

Photo II.4 : édification des fondations en pierre

Photo II.5.6 : photo représentant l'exécution des murs en pisé avec soubassement à gauche et sans à droite

Photo II.7. : Reste d'un mur en pisé à Maatkas sans soubassement en pierre

Photo II.8 : Épaisseur du mur en pisé à Maatkas, à gauche épaisseur est de 40cm, à droite 60cm.

Photo II.9: Utilisation du bois dans le chainage des murs en pisé.

Photo II.10 : érosion de l'angle laissant apparaitre le chainage à Maatkas

Photo II.11 : Renforcement par la chaux au niveau des angles.

Photo II. 12: typologie d'ouvertures dans les constructions en pisé à maatkas.

Photo II.13 : poids du plancher posé sur l'épaisseur du mur à Maatkas

Photo II. 14 : poids du plancher supporter par des lambourdes posé sur corbeau à Maatkas

Photo II.15 : couvertures en tuiles à Maatkas

Photo II.16 : Protection des murs de clôtures a Maatkas, avec de la tuile

Photo II.17: photos de l'aspect du mur en pisé valencien

Photo III.1.2 : Exemple des désordres Humidité d'origine occasionnelle à Maatkas.

Photo III.5 : Exemple des désordres dûs aux rejaillissement à Maatkas.

Photo III.8 : Effet des infiltrations. Source: Marie Châtel conservation de l'architecture en pisé d'Isère.

Photo III.9 : Effet des infiltrations a Maatkas.

Photo III.6.7 : Exemple des désordres dûs aux rementees capilaires à Maatkas.

Photo III.12.13 : l'altération de la pierre des murs en pisé à Maatkas.

Photo III. 10.11 : Pourrissement du bois à Maatkas.

Photo III.19 : Ventre avec fissure du mur non chainé à Maatkas.

Photo III.18 : Fissure structurelle dû probablement au tassement différentiel du pisé à Maatkas.

Photo III.16.17 : Décomposition des murs en pisé sous l'action climatologique à Maatkas.

Photo III.20 : Profondeur des excavations pour fondation des constructions en pisé.

Photo III.21 : Hauteur des fondations en pierre à Maatkas.

Photo III. 22: Reprise des fondations en béton à Maatkas.

Photo III.24 : Parasites affectant la partie basse du mur a l'absence d'une protection à Maatkas

Photo III.23 : Hauteur des soubassements en pierre à Maatkas.

Photo III.25 : Exemple de soubassement en pierre à Maatkas.

Photo III.26 : exemple de liaison des murs en pisé à Maatkas.

Photo III. 27 : Effet de déformation du linteau à maatkas.

Photo III.28 : plancher en en terre à structure bois à Maatkas.

Photo III.30.31 : dégradation des toitures des constructions en pisé sous effet de la végétation à Maatkas.

Photo III.32 : exemple de salissure dans la partie haute du mur en pisé à Maatkas**.**

Photo III.33 : exemple des efflorescences dans la partie haute du mur en pisé à Maatkas.

Photo III.29 : exemple de toiture des constructions en pisé à Maatkas.

Photo III.34.35 : type de fissures, microfissures à gauche et macro-fissures à droite.

Photo III.36: Renforcement de construction par grillage souple.

Tableau:

Tableau III.1: récapitulatif des recommandations pour la réalisation des fondations pour construction en pisé.

Photo IV.1 : Typologie originelle de la maison kabyle à Maatkas.

Photo IV.2 : Vue de la Toiture a Ait Zaim.

Photo IV.3 : la hauteur des maisons en pisé au village Cherfa.

Photo IV.4 : Vue intérieur d'une maison en pisé a Ait Zaim.

Photo IV.5 : État des constructions en pisé à Maatkas.

Photo IV.6:Vue d'intérieur de *Thaghorfet.*

Photo IV.7 : Escalier intérieur donnant a *Thaghorfet* gauche.

Photo IV.8 : Escalier intérieur donnant à *Thaghorfet* droite.

Photo IV.9 : Évolution verticale avec coursive en bois.

Photos IV.10 et 11 : présentation du modèle reproduit en atelier avec le directeur du mémoire

Photos IV.12 et 13 : Murs en pisé représentant l'épaisseur des couches et l'irrégularité des trous.

Photos IV.13 et 14: Murs en pisé de terre.

Photos IV.15 et 16: Murs en pisé avec fragment de pierre de schiste.

Photos IV.17, 18 et 19: Murs en pisé en alternance de couche terre et de lit de pierre en schiste.

Photo IV.20 : Figure : témoin en plâtre et reprise de fissure

Photos IV.21 : Exemple de porte de maisons traditionnelles en pisé a MAATKAS.

Photo IV.22 : Maison en ruine laissant apparaitre le plancher de *Thaaricht*

Photos IV.23 : Système structurelle de la toiture (pilier, poutre et poutrelles).

Photos IV.24 : Detaille de la couverture.

Photo IV. 25 : Épaisseur de l'enduit en terre.

Photo IV. 26 : Dégradation des enduits intérieurs en terre.

Photo IV. 27 : juxtaposition Des constructions traditionnelles avec la nouvelles.

Photo IV. 28 : Vue globale du village Thadjdiwth

Schémas

Schéma IV. 1 : vue en plan d'une maison kabyle et la première variante de l'extension

Schéma IV.2 : deuxième variante pour une extension de thighoufthin

Schéma IV.3 : troisième variante de l'extension avec une coursive.

Schéma IV.4 : Traitement de l'humidité avec drain à proximité

Schéma IV.5 : Hauteurs des soubassements.

Schéma IV.6 : Reprise des parties défectueuse au niveau du soubassement

Schéma IV:7 reprises sous œuvre d'un mur en pisé

Schéma IV.8 : remplacement du linteau en bois dans les constructions en pisé

Schéma IV.9 : effondrement du mur en pisé

Schéma IV.10 : traitement d'une série de poutres

Schéma IV.11 : effet piscine dans les constructions en pisé

Proposition d'une fiche de diagnostic pour les constructions en pisé

Après études de la technique du pisé, à savoir, la mise en œuvre, la matière ainsi que les pathologies affectant les constructions en pisé, nous avons proposé une fiche de diagnostic qui se repartie en trois étape.

- **Première étape : la description**

Cette étape consiste à décrire le mur en pisé existant, l'époque de construction, les orientations des différents murs, les dimensions et les critères spécifiques comme les enduits utilisés en définissant toutes les parties qui constituent le mur à savoir

- La partie enterrée du mur
- Le corps du mur
- Le sommet du mur

- **Deuxième étape : la matière et le matériau**

En s'intéressant au matériau de construction. Des prélèvements d'échantillon de terre utilisée dans la construction du mur existant puis procéder a son identification au laboratoire en examinant :

- Sa texture : courbe granulométrique
- Sa plasticité : limite atterberg
- L'activité de sa fraction fine : valeur de bleu de méthylène
- Et sa composition chimique

Les dégâts observés : après avoir divisé le mur en deux parties face intérieur et face extérieur, une fiche de relevé des désordres identifier sera dressé selon les types de pathologie en compte :

- ELS : érosion localisée au sommet du mur
- ELB : érosion localisé à la base du mur
- EUS : érosion uniforme de surface du mur
- EP : érosion ponctuelle
- DUE : défaillance uniforme de l'enduit
- DLE : défaillance localisée de l'induit
- T : trous
- MAF : macro fissures
- MIF : microfissures
- EFF : effondrement
- FLA : flambement

❖ **Troisième étape : la synthèse**

Le tableau suivant constitue une synthèse de l'analyse de pathologies du mur puisque il permet d'apprécier l'état de ce dernier à travers la distribution des désordres relevés et identifier

Tronçon ou mur	**orientation**	**face**	**Désordres observes**										
			ELS	ELB	EUS	EP	DUE	DLE	T	MAF	MIF	EFF	FLA
		inter											
		ext											
		inter											
		ext											
		inter											
		ext											
		inter											
		ext											

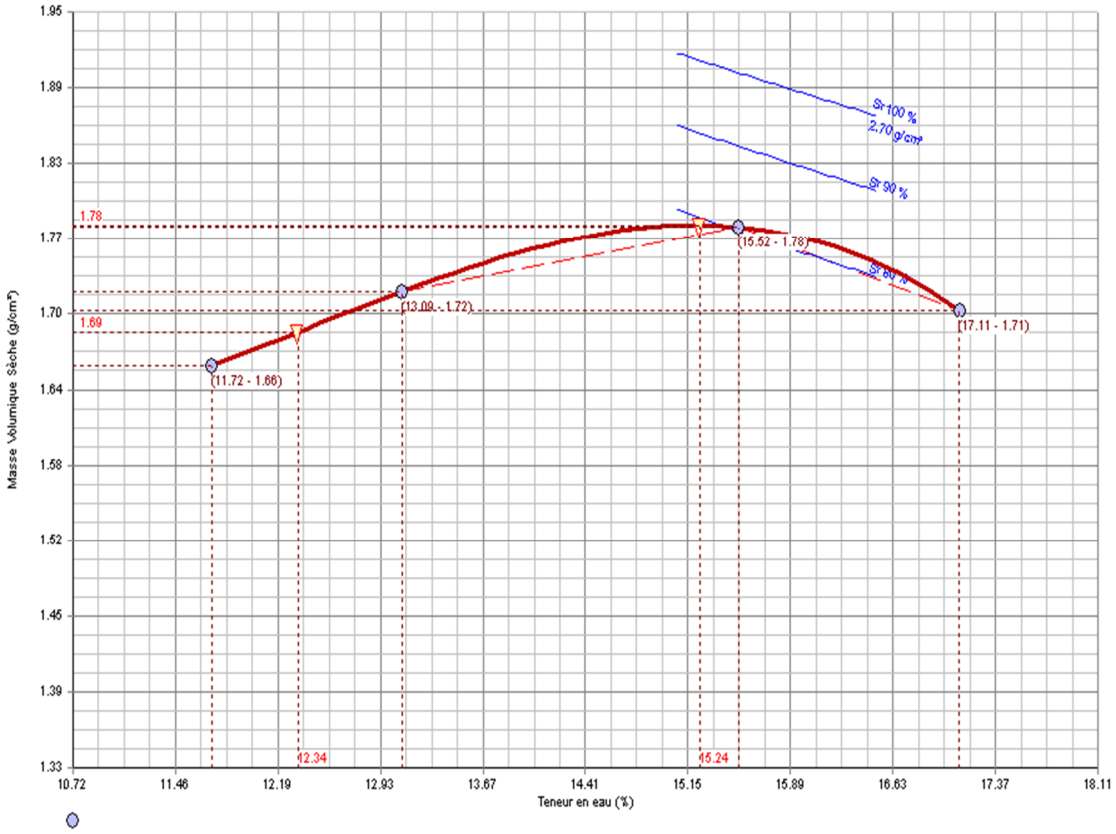
1. ANALYSE GRANULOMETRIQUE SUR SOL

Echantillon :				
Ouverture des tamis (mm)	Poids (g)		Pourcentage	
	Refus Partiels	Refus Cumulés	Refus Cumulés	Tamisats
10	86	86	8.6	93
5	82	168	16.8	83
2	73	241	24.1	76
1	76	317	31.7	68
0.400	87	404	40.4	60
0.200	40	444	44.4	56
0.100	26	470	47.0	53
0.080	26	496	49.6	50

2. Essai Proctor

2.1 Densité apparente sèche :

Echantillon								
Eau de mouillage %	10		12		14		16	
Masse totale humide	5129		5216		5214		5264	
Masse du moule	3380		3380		3380		3380	
Masse nette humide	1749		1836		1834		1884	
Volume du moule	943		943		943		943	
N° tare	1b		2b		3b		4b	
Masse totale humide	42.9	35.9	53.4	33.3	34.4	40.3	45.6	43.2
Masse totale sèche	40.7	34.7	49.9	31	31.8	37.9	41.2	40.1
Masse tare	23.4	23.5	23.2	13.4	13.4	23.7	13.3	23.3
Masse d'eau	2.2	1.2	3.5	2.3	2.6	2.4	4.4	3.1
Masse nette sèche	17.3	11.2	26.7	17.6	18.4	14.2	27.9	16.8
Teneur en eau [%]	12.72	10.71	13.11	13.07	14.13	16.9	15.77	18.45
W moyennes [%]	11.72		13.09		15.52		17.11	
MV humide [g/cm³]	1.85		1.95		2.05		2	
MV sèche [g/cm³]	1.66		1.72		1.78		1.71	
W corrigée [%]	11.72		13.09		15.52		17.11	
MV sèche cor. [g/cm³]	1.66		1.72		1.78		1.71	



Densité apparente sèche : 1.78	**Teneur en eau optimal : 15.24**

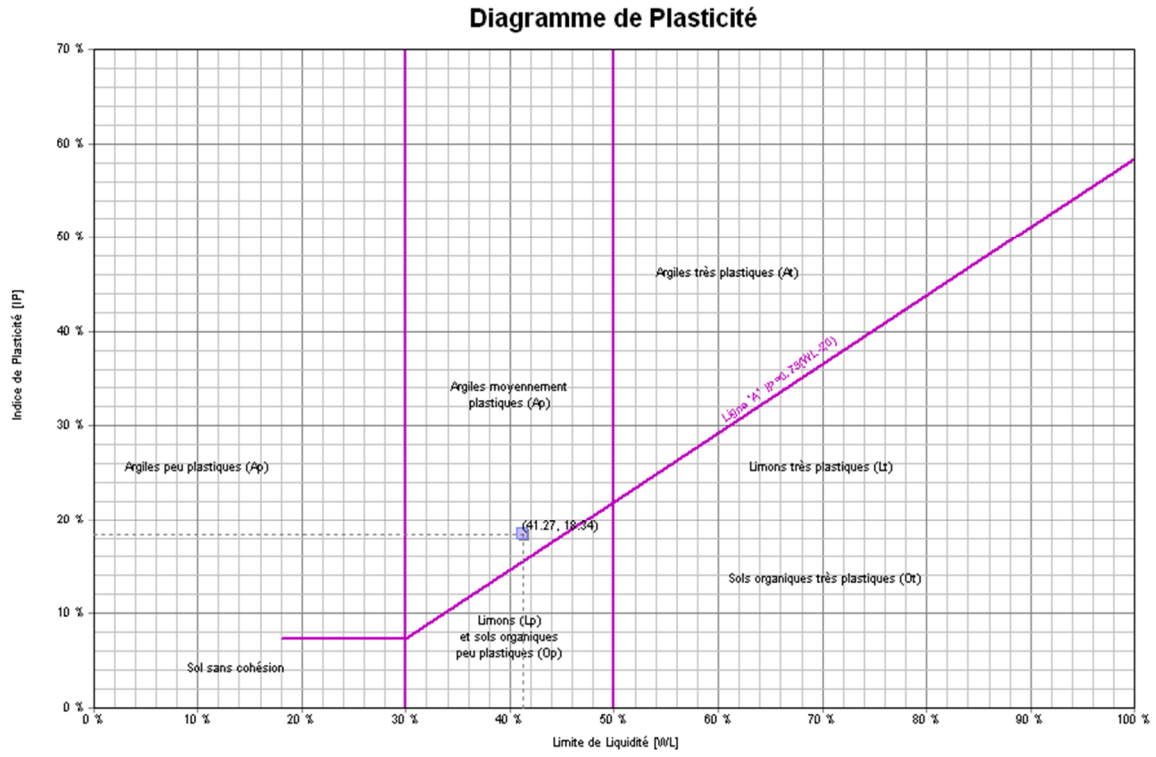
3.LIMITES D'ATTERBERG

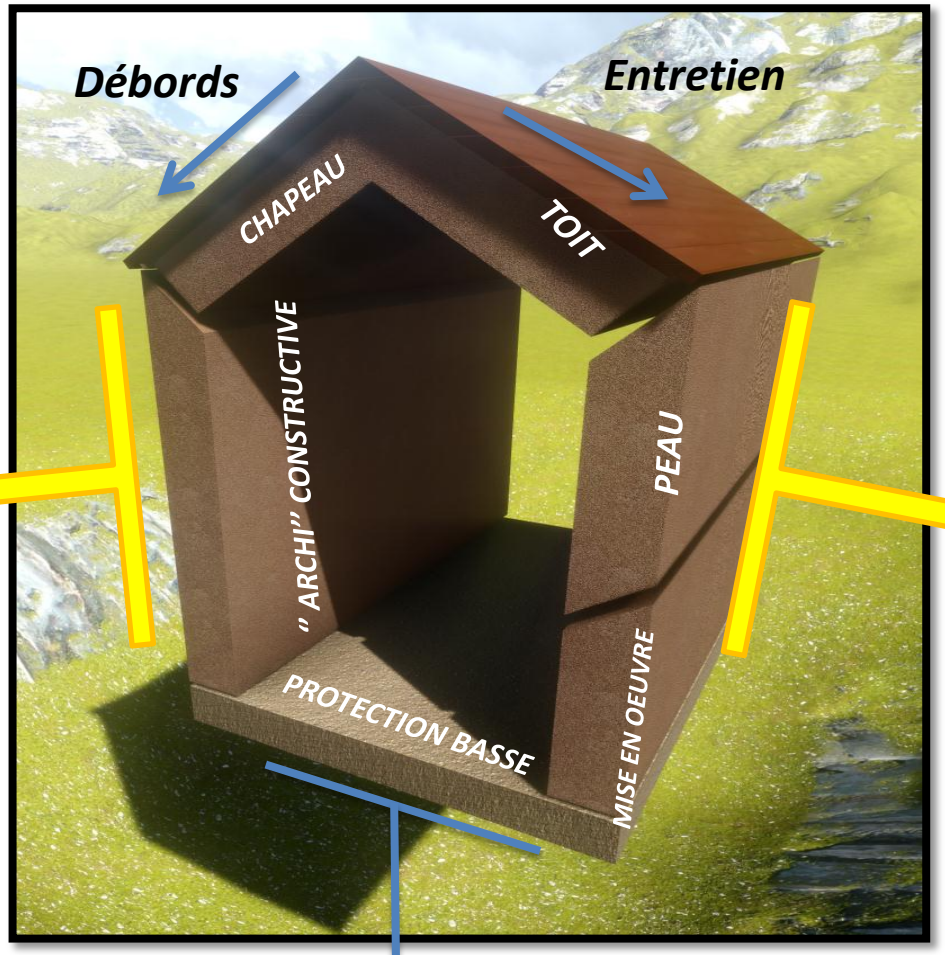
3.1 Limite de plasticité

	1er essai		2eme essai	
N°Tare	**1**	**2**	**3**	**4**
Poids total humide	218.2	216.6	195.6	196.6
Poids total sec	217.5	215.9	195	195.7
Poids de la tare	213.6	213.5	192.3	192.1
Poids de l'eau	0.7	0.6	0.6	0.9
Poids du sol sec	3.9	2.5	2.7	3.6
Teneur en eau (%)	17.95	24	22.22	25
Teneur en eau moyenne (%)	20.97		23.61	
Limite de plasticité Wp=22.29%				

3.2 Limite de liquidité

	1er essai		2eme essai		3eme essai		4eme essai		5eme essai	
Nbr de coups	16		21		26		31		36	
N°tare	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P_t humide	49.6	50.1	48.6	50.3	48.8	49.5	49.8	50.2	47.9	49.4
P_t sec	45.9	46.3	45.05	46.1	45.2	46.1	46.2	46.6	44.7	45.9
P tare	37.7	37.8	36.7	36.6	37.1	36.8	37.3	37.3	36.9	36.7
P de l'eau	3.7	3.8	3.55	4.2	3.6	3.4	3.6	3.6	3.2	3.5
P sol sec	8.2	8.5	8.35	9.5	8.1	9.3	8.9	9.3	7.8	9.2
Teneur eau W (%)	45.12	44.71	42.51	44.21	44.44	36.56	40.45	38.71	41.03	38.04
W_{moy} (%)	44.91		43.36		40.5		39.58		39.53	
Limite de liquidité W_L= 41.27%										





Pas d'éléments saillants ou sous avancée

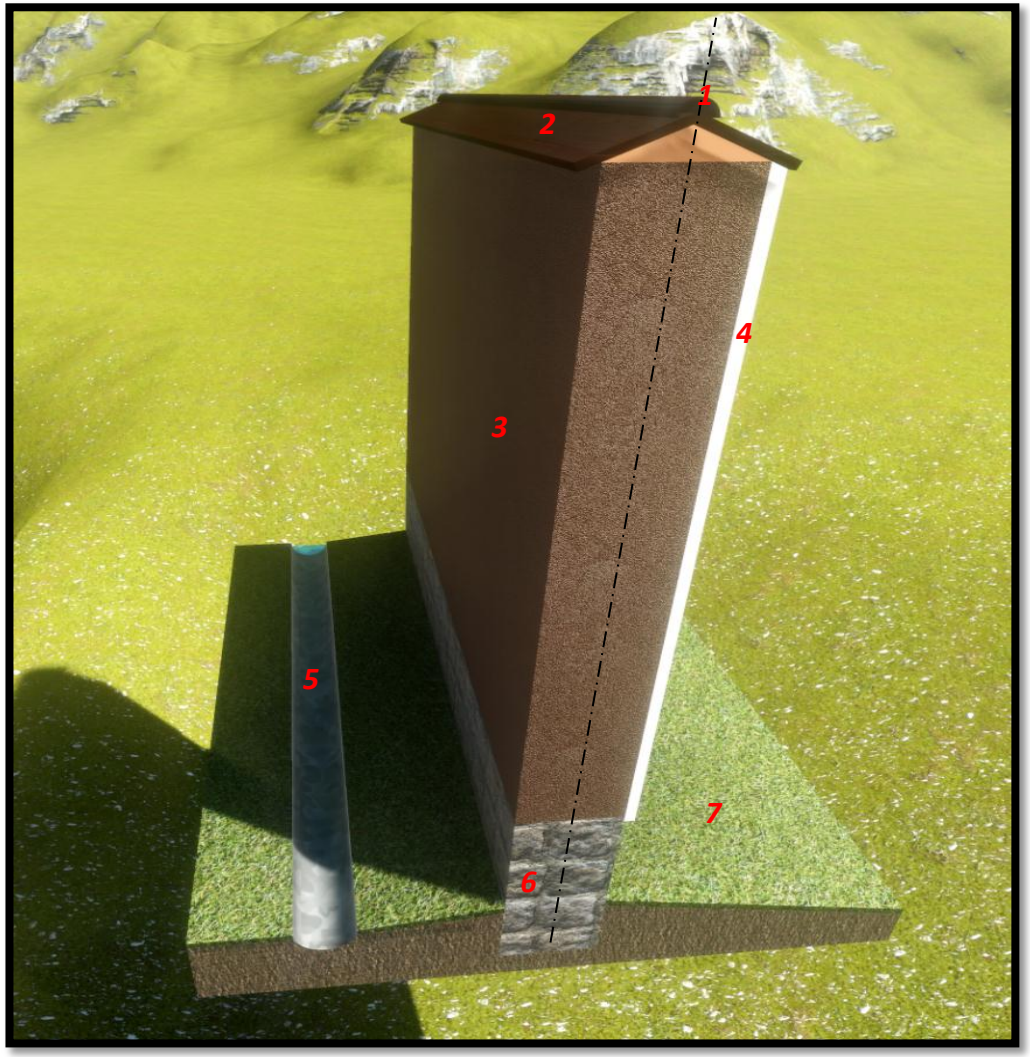
Semelles dois de séparations, chainage bois
Contreventement
Position des ouvertures.
Encadrement des ouvertures.

« Fleur de Pisé »
Enduit chaux
Enduit dans la masse
Cordon de chaux

Qualité de la mise en œuvre.
Choix de la terre.
Protection d'angles et d'ouvertures talus.

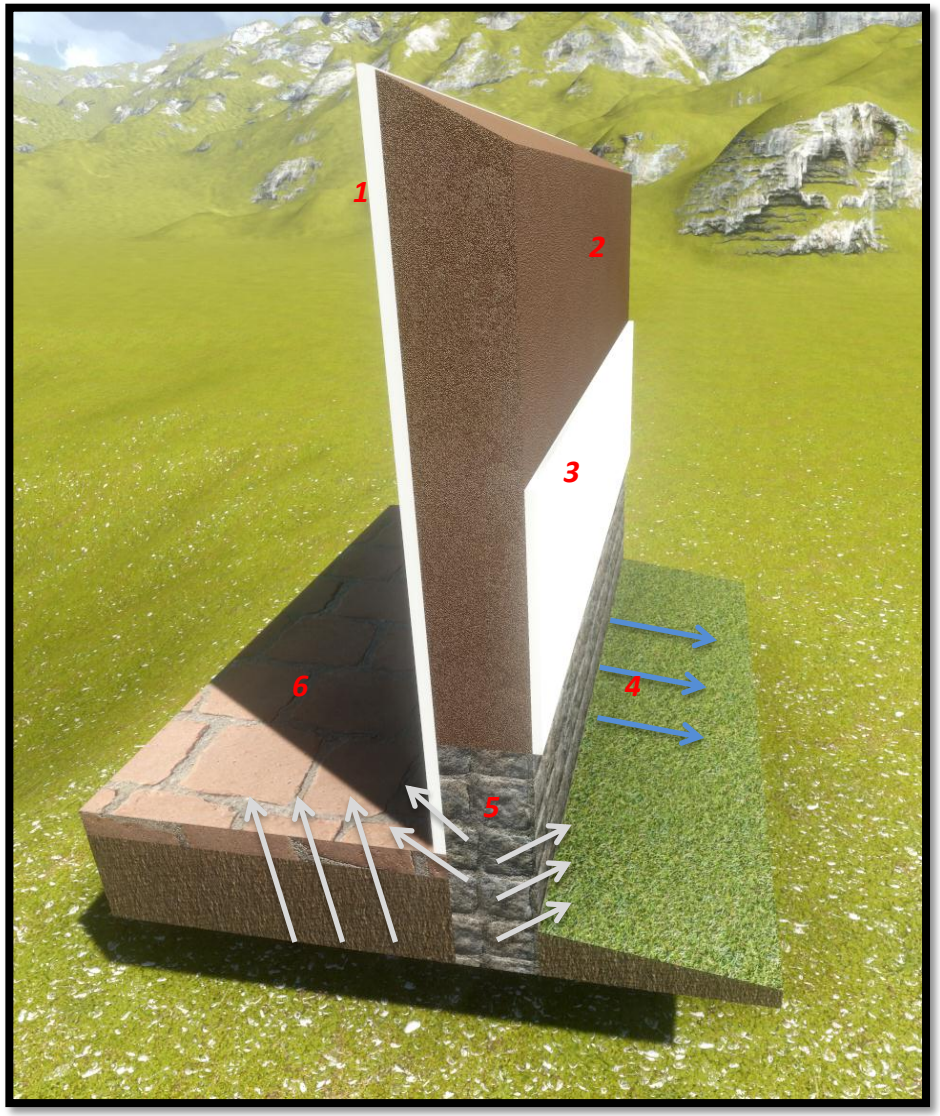
Soubassement, contrepentes, Fossés, Matériaux perméables, Caves, Drain, Vide sanitaire.

Schémas représentant les recommandations pour une bonne conception d'un mur en pisé



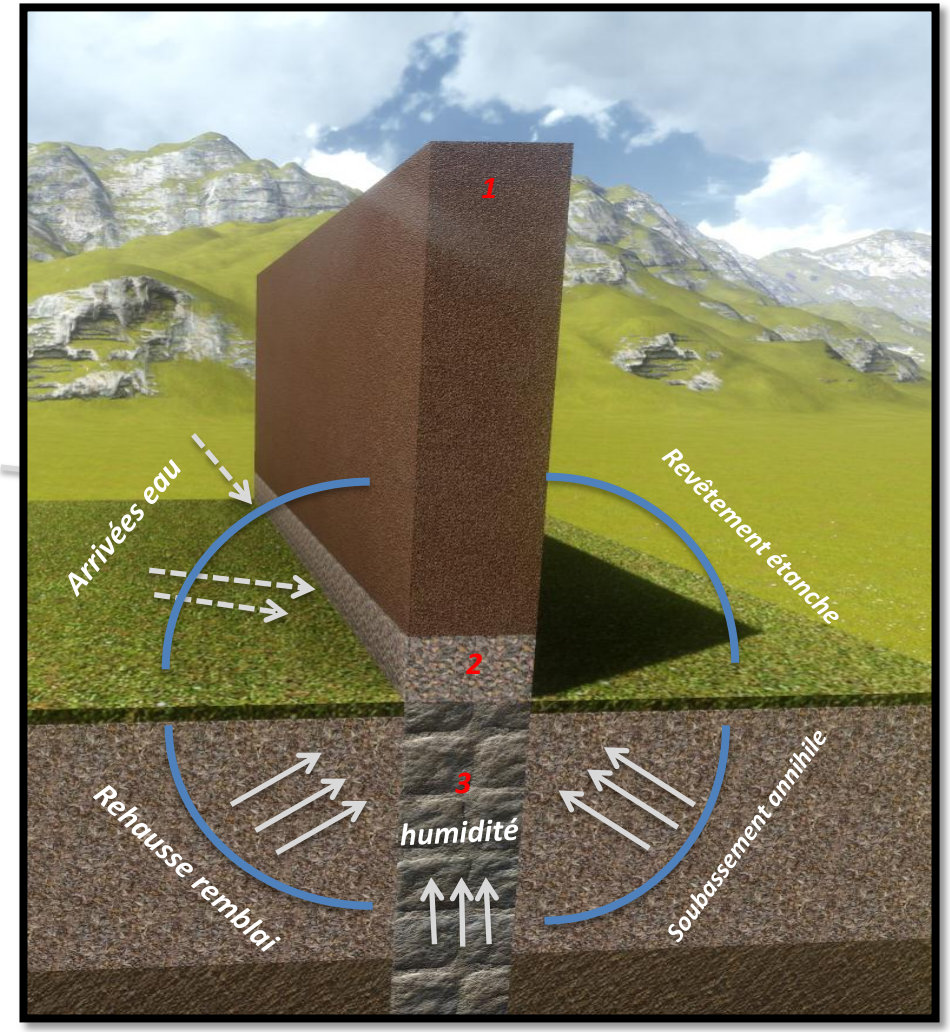
1- ***Chéneau éventuel***
2- Un chapeau
3- Pas d'enduit
4- Enduit à la chaux
5- Simple fosse éloigné du mur
6- Soubassement minimum 50 cm
7- Pente importante pour les eaux.

Schémas représentant un mur en pisé perméable



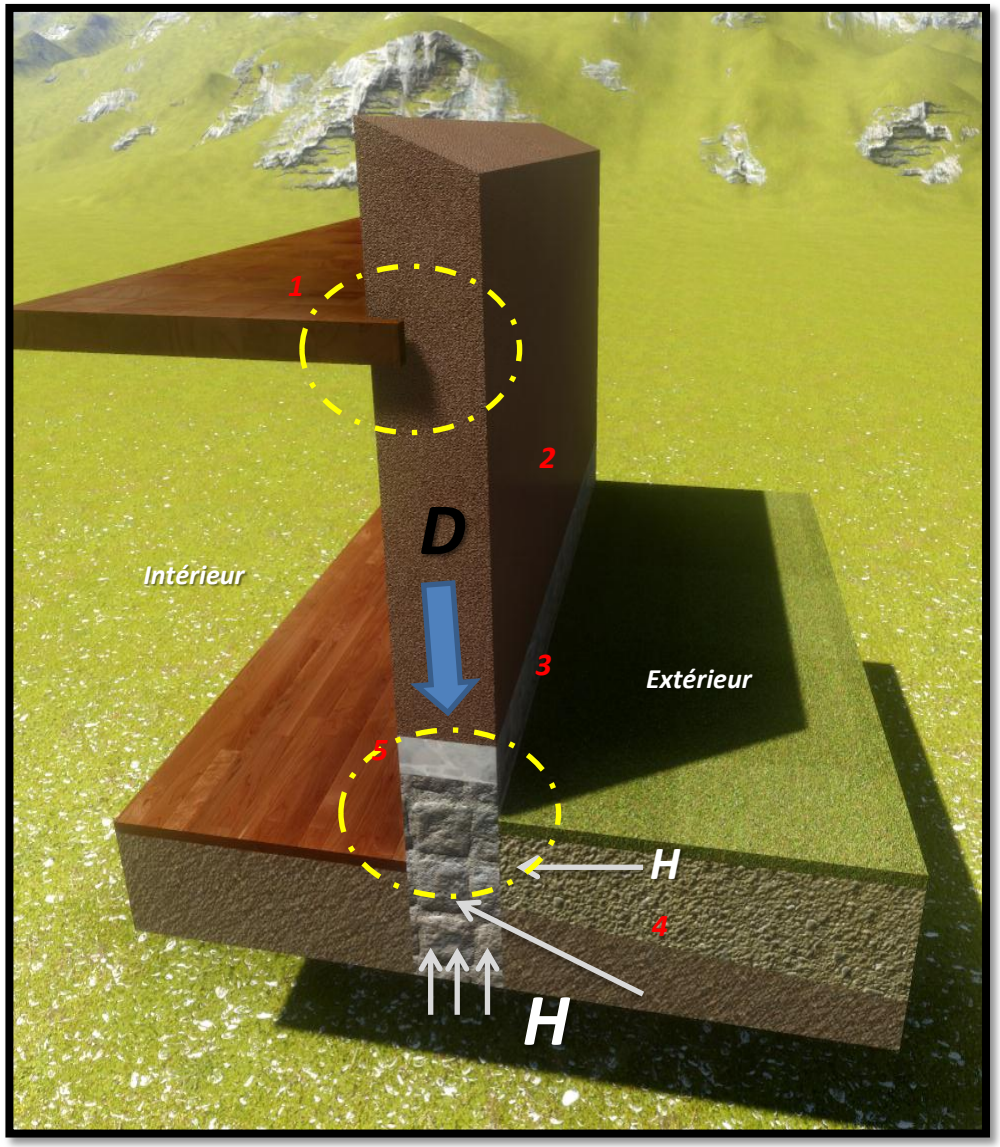
1- Enduit plâtre ou chaux
2- Pas d'enduit
3- Enduit chaux naturelle
4- Eau
5- Soubassement pierres et mortier chaux, sans enduit
6- Sol perspirants

Schémas représentant les sources d'humidité dans la partie basse du mur



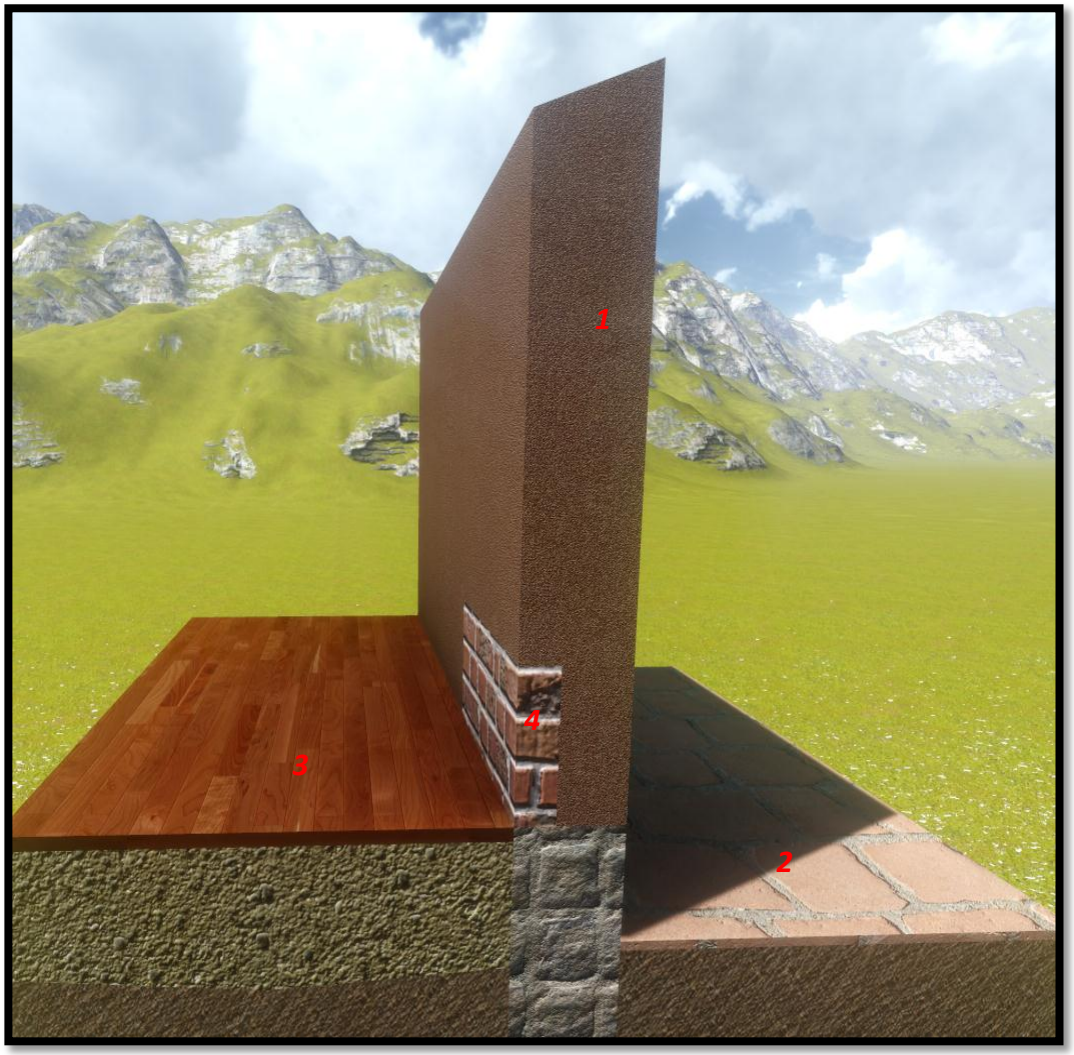
1- mur en pisé
2- soubassement
3- humidité par capillarité

Schéma représentant les zones affectées par l'humidité

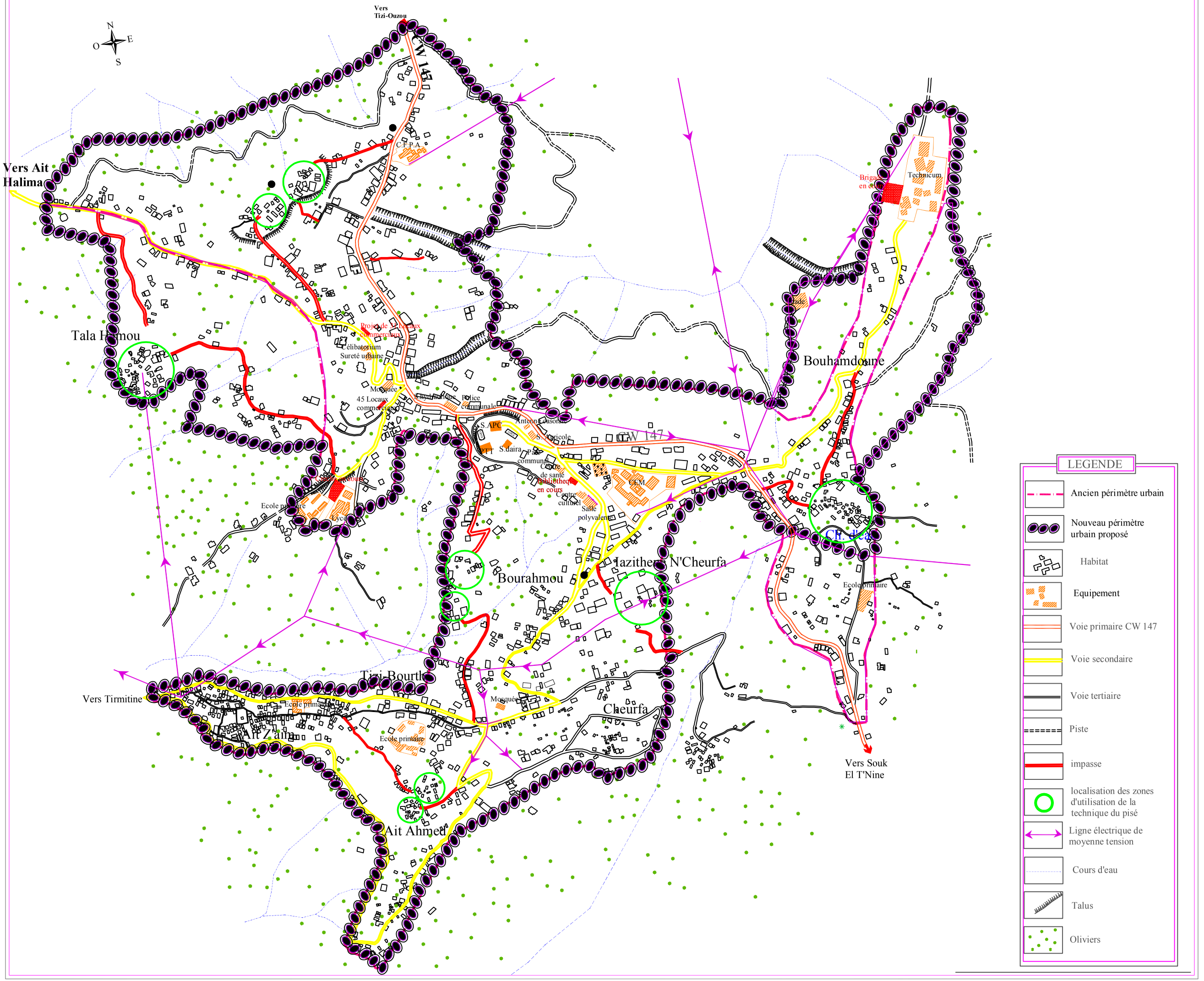


1- Plancher
2- Glissement de la partie supérieur du mur
3- Écrasement du bas du mur
4- Cas de rehausses
5- La zone la plus soumise à:
D: descente de charge
H: humidité.

Schémas représentant une proposition de reprise de la partie fragilisé par l'humidité



1- Mur en pisé
2- Niveau voisin
3- niveau normalisé
4- Reprise par des matériaux dur souvent accompagné par un enduit en ciment



N
O
E
S
Vers Tizi-Ouzou
CW 147
C.F.P.A.
Vers Ait Halima
Tala Hamou
Projet de 45 locaux commerciaux
Célibatorium
Sureté urbaine
Mosquée
45 Locaux commerciaux
S.hydraulique
Police communale
S.APC
Antenne casoisie
S.Agricole
PTT
S.daira
Parc communal
Centre de santé
Bibliothèque en cours
Centre culturel
Salle polyvalente
CEM
CW 147
Ecole primaire
Lycée
Bourahmou
Iazithem N'Cheurfa
Bouhamdoune
Technicum
Brigade en cours
Ecole primaire
Tizi-Bourth
Vers Tirmitine
Ecole primaire
Ait Z'aim
Ecole primaire
Mosquée
Cheurfa
Ait Ahmed
Vers Souk El T'Nine
LEGENDE
Ancien périmètre urbain
Nouveau périmètre urbain proposé
Habitat
Equipement
Voie primaire CW 147
Voie secondaire
Voie tertiaire
Piste
impasse
localisation des zones d'utilisation de la technique du pisé
Ligne électrique de moyenne tension
Cours d'eau
Talus
Oliviers