



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT GÉNIE CIVIL

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Génie Civil

Option : matériaux et structures

Présenté par :

GUIDOUM YUCEF

BOUZIANE YUCEF

Sujet du mémoire

**Restauration et conservation des constructions de
terre.**

Soutenu publiquement le 22/06/2017 devant le jury composé de :

H.BEKKI
N.KERROUM
A.DRAOUI
Z.RENNAK
H.SERBAH

Président
Encadreur
Examineur
Examineur
Examineur

PROMOTION : 2016/2017

Remerciements

Nous tenons à remercier notre encadreur : NADIR KERROUM, d'avoir nous soutenus, aidé et nous donné de ses connaissances, son expérience et ses orientations importantes et perçues.

Ainsi nous tenons à remercier l'équipage du laboratoire LTPO- Tiaret.

Nos gratitudes sont dirigées également vers nos enseignants et toute personne ayant aidé à l'élaboration de ce travail.

A tous nos collègues de promotion.

GUIDOUM YUCEF

BOUZIANE YUCEF

Résumé

La conservation des architectures en terre étant comme une tradition et un patrimoine impose d'abord la rigueur dans leur entretien et leur contrôle vis-à-vis leurs vulnérabilité, mais non seulement ça, car l'architecture en terre n'est plus des vestiges qu'on doit sauver, ni une expression des affections nostalgiques vers l'héritage de nos ancêtres. L'architecture en terre est maintenant devenue aussi contemporaine, elle a mérité cette place grâce aux qualités offertes par le matériau terre lui-même, cette architecture prendre d'avantage chaque jours pas au détriment des autres matériaux et techniques mais en associant ces matériaux et ces savoirs pour en produire de bonne architecture qui répond aux différentes exigences structurelles, économiques, esthétique, etc...

Cette situation actuelle a suggéré d'orienter les recherches vers l'amélioration des qualités du matériau terre. Les recherches actuelles sur les constructions en terre crue s'avèrent indispensables, car elles en répondant aux principes du développement durable elle offre des solutions techniques à des problèmes souvent rencontrés dans la construction en terre crue. Pour cela toute opération de conception, de construction, d'entretien, ou de conservation doit se faire de manière scientifique et non plus empirique, mais bien entendu dans le respect des traditions et des savoir-faire anciens.

Les enjeux dans l'intérêt qu'on porte aujourd'hui au matériau terre, résident dans le fait de conserver et de valoriser ses techniques, qu'on a su adapter, comme l'attestent de nombreux projets à travers le monde, aux besoins d'aujourd'hui. Le renouveau du matériau terre va permettre de lier les savoir-faire passés et présents grâce à une valorisation qui peut tout à fait s'envisager, dans les quatre côtés de la planète, par le biais de projets structurants et rayonnants.

Mots clés :

Architecture en terre, matériau terre, revalorisation et conservation, savoir-faire, constructions en terre crue.

Abstract

The conservation of earthen architectures as a tradition and as a heritage imposes first of all the rigor in their maintenance and the control of their vulnerability, but not only this, because the earthen architecture is no longer vestiges which must be saved, nor an expression of the nostalgic affections towards the heritage of our ancestors. Earthen architecture has now become as contemporary, it has earned this place due to the qualities offered by the earth material itself, this architecture take more advantages every day not to the detriment of other materials and techniques, but by combining these materials and this knowledge to produce good architecture that meets the different requirements such as structural, economic, aesthetic requirements, etc...

This present situation has suggested redirecting the research towards the improvement of the qualities of the earth material. Current research on earthen structures is essential because, by responding to the principles of sustainable development, it offers also technical solutions to problems often encountered in the construction of raw earth material. For this reason, any design, construction, maintenance or conservation's operation must be carried out in a scientific rather than an empirical manner, but of course in accordance with ancient traditions and know-how.

The challenges in today's interest in earth material lies in the fact of conserve and enhance its techniques, which have been already adapted to the Needs of today, as many projects throughout the world show. The renewal of the earth material will make it possible to link the past and present know-how in order of a valorization that can be considered in all four sides of the planet, through structuring and shiny projects.

Keywords:

Earthen architecture, earth material, valorization and conservation, know-how, constructions in raw earth.

ملخص

إن سبل الحفاظ على العمارة الطينية على أنها جزء من التقاليد والتراث يتطلب أولاً الصرامة في صيانة المنشآت وكذا الصرامة في المراقبة الدورية لنسبة تضرر هاته المباني، ولكن لا يتوقف الأمر على هذا فحسب، إذ أن العمارة الطينية لا تقتصر فقط على بعض الآثار التي يتوجب علينا الحفاظ عليها، وليست تعتبر تعبيراً فقط عن المودة والحنين إلى إرث أجداننا بل قد أصبحت العمارة الطينية الآن عمارة معاصرة، وذلك أنها قد كسبت هذه المكانة بفضل الصفات التي تتوفر عليها التربة بحد ذاتها، هذه العمارة أضحت تحتل نطاقاً أوسع كل يوم لكن بطبيعة الحال ليس على حساب المواد والتقنيات الأخرى ولكن عن طريق الجمع بين هذه المواد وهذه المعارف من أجل التوصل إلى عمارة قيمة تلبي جملة المتطلبات المختلفة الهيكلية، الاقتصادية، والجمالية.

إن الوضعية الراهنة تتطلب إعادة توجيه جملة الأبحاث نحو تحسين نوعية التربة المستعملة. إذ أن الأبحاث حول المنشآت والهيكل الترابية أصبحت أكثر من ضرورة لأنها إضافة إلى احترامها لمبادئ التنمية المستدامة فأنها توفر الحلول التقنية للعديد من المشاكل التي قد نواجهها في كثير من الأحيان في البناء بالتربة في هذا الإطار فإن كل عملية تصميم، بناء أو صيانة لمباني ترابية لا بد أن تتم وفق أسس علمية وليست تقليدية، ولكن بالطبع مع احترام التقاليد والمهارات القديمة.

إن الرهانات المفروضة والكامنة في الاهتمام بمواد البناء الترابية في أيامنا هاته تعتمد في الأساس على التثمين والمحافظة و رد الاعتبار لتقنيات البناء بهذه المواد، وقد يكون من الممكن إننا نجحنا إلى حد ما في تكييف هذه التقنيات من جديد حسب مستلزمات الوقت الراهن، وذلك حسب ما تؤكد عدة مشاريع قد أنجزت حول العالم. إن التجديد في التربة كمادة للبناء سيأتيه الجمع بين المعارف وربط المهارات السابقة بالحديثة وهذا بفضل محاولات رد الاعتبار وإضفاء القيمة عليها والتي يمكن تصورها والعمل بها في جميع أنحاء العالم وذلك عن طريق تصميم مشاريع و بنى ذات قيمة كبرى.

كلمات البحث:

العمارة بالتربة، مادة بناء من التربة، التثمين والمحافظة، المهارات و المعارف البناء بالتربة الخام.

Introduction : La terre matériau d'hier et de demain

La terre a été utilisée dans la construction depuis des temps très anciens au fil des millénaires et reste encore aujourd'hui l'un des matériaux les plus répandus. À l'heure actuelle, un tiers de la population mondiale vit dans un habitat en terre. Le succès de ce mode de construction s'explique par la disponibilité de la matière première. Matériau bio-sourcé, universel, abondant et facilement accessible, il est doté d'atouts écologiques et économiques indéniables. Il présente également l'avantage de pouvoir être mis en œuvre de manière extrêmement diversifiée (briques, torchis appliqué sur une armature en bois, pisé, bauge, etc.) offrant ainsi une grande palette de possibilités aussi bien architectoniques, techniques qu'esthétiques. Cette polyvalence de la terre à bâtir lui permet d'être employée dans des contextes variés (ruraux ou urbains) et à des fins différentes (maisons, silos, construction de prestige, etc.).

Problématique :

Dans ces derniers temps, Il y a eu une réelle prise de conscience par la communauté internationale à la fois de la richesse et de la dégradation de l'architecture en terre. Ce patrimoine fragile est menacé par des causes naturelles (tremblements de terre, inondations, etc.) et humaines (destruction volontaire, urbanisation, perte des techniques de constructions traditionnelles, désaffection pour la construction en terre). Dans certaines régions, le matériau « terre » est aujourd'hui progressivement abandonné au profit de matériaux dits « modernes », Pour lutter contre ces phénomènes, plusieurs programmes internationaux d'études et de conservation de l'architecture en terre ont été créés pour la protection et à la mise en valeur de l'architecture en terre.

La revalorisation de l'architecture en terre nécessite au-delà des pensées esthétiques des architectes, au-delà de la curiosité des archéologues, ou même l'affection nostalgique des chargés du patrimoine ; nécessite une normalisation appuyée par des expérimentations techniques pour consolider ce matériau et lui rendre à la hauteur des aspirations des bâtisseurs. Cette inquiétude n'a pas échappée du tout des tentatives des chercheurs à travers leurs recherches scientifiques et études de comportements de ce matériau vis-à-vis les diverses sollicitations, et les diverses exigences. Mais le comble réside dans la grande variété des terres disponibles pour la construction, de fait que chaque région à ses caractéristiques pédologiques et ses propres conditions climatologiques, ce qui rend la vulgarisation des normes et des techniques plus difficiles et moins pertinentes, ceci induit le besoin d'étudier de façon plus approfondie les caractéristiques physiques et mécaniques, voir aussi chimiques de la terre là où on envisage de l'utiliser pour construire.

De ces besoins vient notre perspective d'étudier une terre locale pour des fins architecturales, de prendre connaissance au laboratoire de cette terre, de vérifier son aptitude à répondre aux exigences techniques et esthétiques, de stabiliser et améliorer ses caractéristiques pour en fin mettre à la disposition des bâtisseurs ayant tendance de construire avec cette terre ; une normalisation et un savoir-faire digne de les satisfaire.

Objectifs de la recherche :

En quête de connaître le matériau terre et son apport dans le domaine de la construction, nous avons fixé un ensemble d'objectifs qui servent à nous jalonner dans ce travail, tout en empreignant notre travail d'un aspect local afin de mettre un pas vers la revalorisation du matériau terre dans notre région, ce parcours est accompagnée d'une approche scientifique quantitative en privilégiant de se faire repères à des références chiffrées tel que les valeurs de retrait, résistance mécanique et portions granulaires, etc....

Nos objectifs s'appuient sur les actes suivant :

- Connaitre l'état de fait du matériau terre dans le domaine de la construction à travers les temps et les régions.
- sélectionner et choisir une terre destinée à construire sur le territoire de la wilaya, cette terre doit être localement disponible, facile à extraire, ayant les qualités demandées pour remplir les conditions d'aptitude à être utilisé dans les travaux de construction, en tenant en compte l'aspect économique.
- connaître cette terre choisie à travers des essais au laboratoire, en mettant en exergue ses qualités mécaniques, ses points forts. Et de décerner ses inconvénients.
- choisir le type de construction qui convient aux savoirs ancestraux de la région, mais aussi le type qui correspond aux moyens disponibles pour instaurer une certaine admissibilité chez les bâtisseurs afin d'inciter une reconvention vers ce matériau.
- rechercher à améliorer les qualités de la terre à travers la correction et la stabilisation dans une démarche scientifique qui tend à affirmer ou défrimer certaines pratiques traditionnelles.

Notre travail s'organise donc autour des axes suivants :

- Recherche bibliographique ; en revue de la bibliographie disponible relative aux recherches faites dans ce domaine
- Sélection et identification d'une terre : Identifier une terre, définir ces caractéristiques suivant les paramètres les plus importants et juger si elle répond aux exigences techniques recommandées.
- Correction et stabilisation de la terre: procéder à une correction et une stabilisation de la terre si nécessaire pour une utilisation suivant une technique dument justifiée (pisé, torché, bague, adobe, blocs comprimés, etc. ...).

Chapitre 1
La terre crue dans l'architecture

Chapitre 1: la terre crue dans l'architecture

Au commencement c'était la terre¹

La terre crue est l'un des plus anciens matériaux naturels de construction du monde avec le bois et la pierre. Était appliquée en premiers temps comme enduits sur les huttes de bois, puis était travaillée par des nombreuses civilisations antiques pour devenir des blocs de brique crue connus d'Adobe, dont les premiers villages et villes de l'humanité en Mésopotamie et Egypte antique le témoignent.

Certaines civilisations ont l'habitude de construire avec de la terre crue pas par nécessité ou l'indisponibilité des matériaux, plusieurs témoignages ont démontré que pourtant la présence d'autres matériaux de construction et notamment la pierre ; ces civilisations ont choisi la terre crue pour ses qualités thermiques constatés², car la terre résiste au changement de température où elle met un long temps à atteindre la température extérieure grâce à son inertie thermique, ce qui conserve le bon climat à l'intérieure des bâtisses.

En citant les atouts de ce matériau, il semble qu'on ne peut pas s'arrêter juste là, le matériau et grâce à sa plasticité remarquable permet de procéder facilement à des ajouts ou des modifications ou démolitions, ce qui était pratique pour des sociétés ayant des structures sociales et des besoins en constante évolution.

La fabrication et la manipulation des briques de terre crue ne demandaient pas un long temps d'apprentissage, de plus elles permettaient un travail plus rapide et moins pénible que la taille de la pierre ce qui rend ce matériau le plus préféré pour les constructions simples mais aussi parfois les plus monumentales « figure ci-dessus », ainsi étaient les raisons de la propagation de l'utilisation de la terre crue à travers les autres continents³.

¹ *Des architectures de terre ou l'avenir d'une tradition millénaire. Jean Dethier. Édition du centre Pompidou 1981*

² *Francois Vigouroux, dictionnaire de la bible.*

³ *Le renouveau de l'architecture de terre crue dans les années 80 – mémoire d'initiation à la recherche. Jessica ADJOUA. Ecole nationale d'architecture et de paysage de Lille. 2013*

Histoire de la construction en terre crue

La terre crue est sans doute le matériau de construction le plus vieux du monde. 30 % de la population mondiale vit dans un habitat en terre. L'histoire de la construction en terre est mal connue. L'intérêt pour ce matériau jugé antique et médiocre était éclipsé par celui accordé à la pierre ou au bois, matériaux considérés plus "nobles". C'est pourtant bien la terre qui fut associée aux époques décisives de la révolution urbaine et qui servait la quotidienneté autant que le prestige des plus glorieuses civilisations de l'Antiquité.

En Afrique ;

Le rôle joué par le continent africain dans l'évolution humaine fut considérable. C'est en Afrique que l'on situe l'apparition même de l'homme. C'est aussi en Afrique que s'est épanouie la civilisation égyptienne durant près de trois millénaires. Aux premiers établissements humains des sites de Merimdé et du Fayoum (delta du Nil), datés du V^e millénaire av. J.-C., correspond un habitat de clayonnages de roseaux et de branchages enduits d'argile ou remplis de mottes de terre. Le matériau est modelé puis moulé en briques crues qui sèchent sous le soleil.

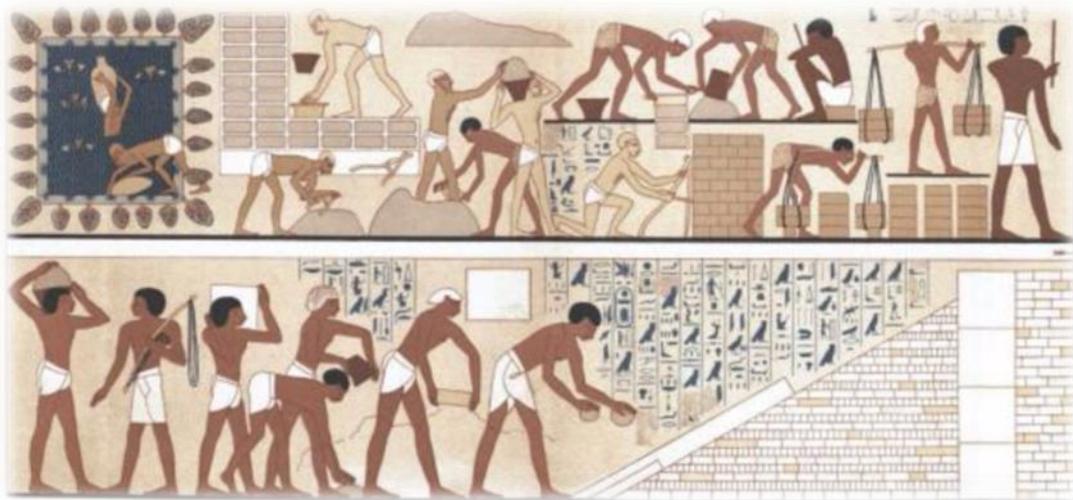


Figure 1 : captifs fabriquant des blocs d'adobe pour la construction de temple d'Ammon. Thèbes, Egypte.

Le développement de la construction en terre crue s'étend sur tout le continent africain, produisant une diversité et une richesse architecturales exceptionnelles. On peut citer l'architecture des mosquées soudanaises (mosquées de Tombouctou, XIII^e siècle apr. J.-C., de Djenné). La terre crue reste en Afrique un matériau de construction majeur, même si son image est souvent fortement dégradée¹

¹Traité de construction en terre crue. CRAterre

Figure 2 : Mosquée de Djenné, construite en briques de terre crue, enduite de terre lissée à la main



Figure 3 : Touareg

En moyen orient

La terre crue a été employée dans toutes les zones géographiques, par la plupart des civilisations : les plus anciennes traces remontent à 10 000 ans à Jéricho et Mureybet (Syrie). La technique utilisée est alors l'empilement de pains de terre façonnés à la main. Il y a 8 500 ans, la brique de terre apparaît (site de Çatal Höyük, en Anatolie). Puis il y a 7 000 ans, une architecture de terre fait son apparition avec les ouvrages de fortification, suivent l'apparition des coupoles il y a 6 500 ans, les temples monumentaux et les villes-temple il y a 5 000 ans avec Sumer².



Figure 4 : Jéricho et Mureybet (Syrie)



Figure 5 : site de Çatal Höyük, en Anatolie

En Asie

Dans l'architecture chinoise, les premières constructions en terre crue n'étaient autres que des habitats troglodytes, creusés dans la terre (il y a 7 000 ans). Puis l'habitat sort un petit peu de terre, et les fortifications en terre battue font leur apparition (il y a 3 500 ans). Avec la dynastie des Han apparaissent les premières fortifications en pisé. Cette tradition du pisé perdure, on connaît en particulier les tulous, habitats des Hakkas, constitués d'une enceinte massive de pisé à l'intérieur de laquelle une vraie petite ville s'installe, et dont quelques exemples sont encore habités. Le pisé est toujours utilisé pour la construction.

En Arabie, la ville du Yémen de Shibam et son architecture en immeubles de briques terre crue lui vaut l'inscription au patrimoine mondial de l'Unesco en tant que « plus ancienne cité gratte-ciel du monde »

En Afghanistan, un centre de recherche sur le matériau terre ouvrira bientôt ses portes. Né d'un partenariat réussi entre l'ambassade de France et l'association Darah Afghanistan, il se situe sur le site de l'Université Polytechnique de Kaboul.

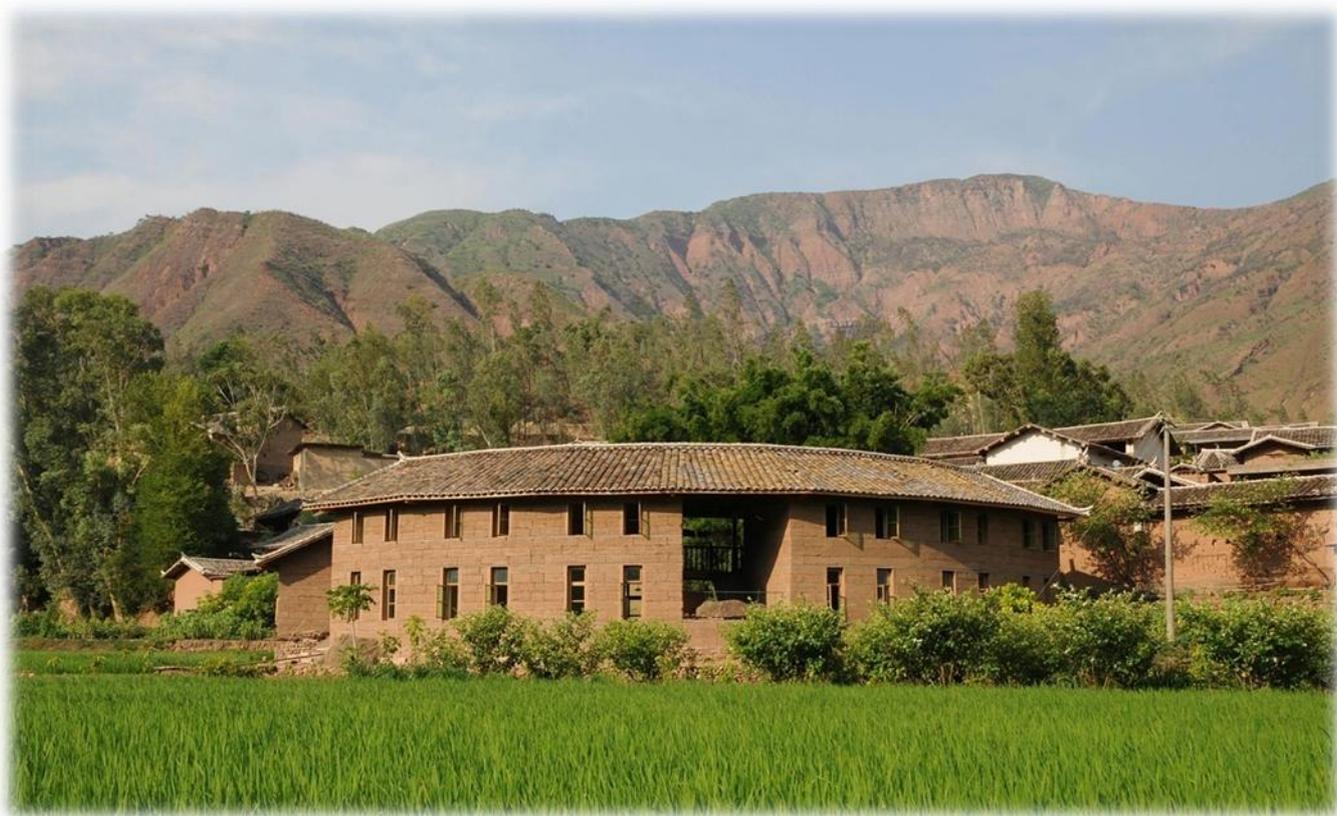


Figure 6: Reconstruction d'un village après séisme (Ma'anqiao, Chine, 2008)



Figure 7 : ville du Yémen de Shibam

En Europe

Les plus anciens établissements d'Europe sont datés du VI^e millénaire. L'habitat primitif en Thessalie est en de clayonnage de bois et d'argile puis évolue vers des groupements de constructions carrées en briques crues. Il faudra attendre le Siècle des Lumières pour observer un retour progressif à des habitats massifs en terre crue (pisé, bauge). Ce renouveau est sans aucun doute dû à François Cointeraux, qui écrira plus de 70 fascicules sur le sujet du pisé. Ce retour en force de la terre crue concerne donc non seulement l'Europe mais le monde entier. La terre crue continuera à être utilisée jusqu'au lendemain de la Seconde Guerre mondiale puis sera abandonnée pour des solutions plus rapides à mettre en œuvre, dans l'urgence de la reconstruction. Toutefois, le patrimoine constitué jusqu'alors représente aujourd'hui un nombre considérable de bâtiments, surtout ruraux, dans certaines zones (en France : vallées de la Saône et du Rhône, Dauphiné, Auvergne, Bourgogne, Bretagne, Normandie, Midi toulousain).

L'intérêt porté aujourd'hui au matériau dans certains pays européens (Allemagne, Pays-Bas, Danemark, France depuis peu) date du début des années 1980. La terre crue est une alternative à une industrie briquetier énergivore. Les coûts d'approvisionnements énergétiques des fours à brique poussent d'ailleurs certaines briqueteries à une inévitable reconversion dans la fabrication de briques en terre crue.

En Amérique

Sur le continent américain, la vie nomade des groupes de chasseurs-collecteurs dure plusieurs milliers d'années avant que ne soit expérimentée l'agriculture. C'est en Amérique Centrale que la culture du maïs permet la création des premiers villages et d'un urbanisme autour de centres religieux. L'habitat semble avoir été un système ouvert de petites maisons quadrangulaires élevées en matériaux légers : bois et torchis ou boules de terre, couvertures en palme. L'emploi de la brique crue apparaît entre 500 av. J.-C. et 600 ap. J.-C. Les civilisations précolombiennes ont également utilisé la terre crue. Un des exemples les plus connus est Chan Chan, au Pérou, grand ensemble de douze palais construits sur une surface de 20 km² en bordure de l'océan. À Taos, les habitations empilées configurent une forme pyramidale à degrés. Les murs d'adobe sont enduits de terre mêlée de paille finement hachée, boules de terre jetées et lissées à la main. Les toitures à "vigas" couvertes de brindilles sont recouvertes de terre damée. Cet habitat très élaboré a servi de modèle à l'architecture hispano-mexicaine en adobe qui fut depuis lors réalisée dans ces régions au Sud-Ouest des États-Unis. Aujourd'hui, la brique d'adobe et le pisé sont associés au fantastique développement que connaît l'architecture solaire, dans l'ensemble de ces contrées².

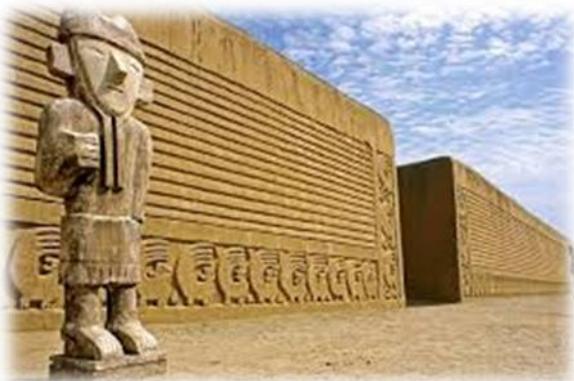


Figure 8 : palais du Chan Chan, au Pérou

Chapitre 2

Actualités de la terre crue dans l'architecture contemporaine

Chapitre 2 : Actualités de la terre crue dans l'architecture contemporaine

Dans le monde

Premiers étincelles vers une renaissance

A notre époque, nous sommes dans un monde où le secteur industrialisé du bâtiment consomme à lui seul près de 45 % de l'énergie finale de production et émet près de 25 % du CO₂. Ce même monde d'aujourd'hui laisse pour compte environ de deux milliards de personnes ; une partie de ces hommes, femmes et enfants sont sans abri, d'autres parties sont mal logées qui vivent dans un habitat de grande précarité¹. Face à cet état de fait et cette situation antagoniste aux valeurs du développement durable ; nous sommes plus que jamais « au pied du mur » pour apporter d'autres réponses, des réponses qui doivent fournir la solution idéale raisonnée bien que raisonnable pour lutter contre la consommation excessive de nos richesses et de nos énergies mais qui ; encore pire participe, fortement à l'émission des gaz à effet de serre.

Pour répondre aux soucis climatiques, Depuis près de soixante ans déjà, l'architecte égyptien Hassan Fathi a été parmi les premiers architectes qui ont démontré à l'échelle de l'architecture, que les réponses à ces problématiques tenaient dans la valorisation des ressources des territoires, son travail sert à mobiliser les ressources cognitives disponibles sur site, les savoirs et savoir-faire ainsi que les matériaux locaux. En s'inspirant de ces intelligences constructives, il a utilisé notamment la brique de terre crue, matériau de construction séculaire de l'Égypte depuis les établissements humains originels de l'oasis du Fayoum, sur ce cheminement de pensée afin de créer une qualité d'espaces architecturaux, offrant ainsi aux plus démunis une grande qualité de vie, il s'est lancé dans la construction du village de New Gourna^{FIGURE 2} sur la rive ouest du Nil, à Louxor. Tout en réactualisant cette magnifique culture de l'architecture de terre en arcs, voûtes et coupoles. En proposant ainsi des solutions de confort thermique, pour cela il a mobilisé simplement la masse et l'inertie des murs lourds et les solutions de ventilation naturelle.

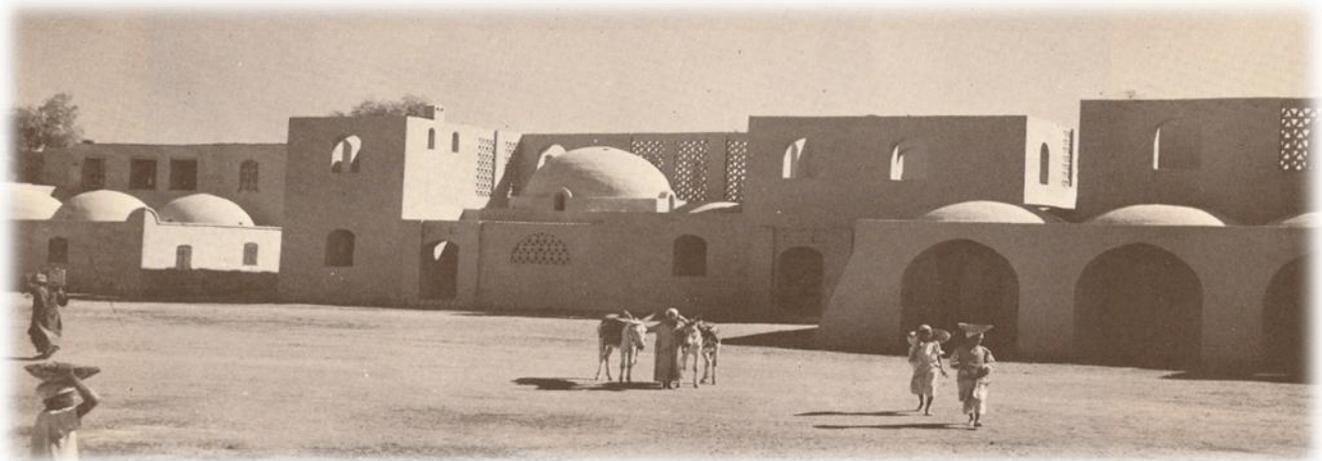


Figure 9: vue sur le village de nouvelle Gourna . Par l'architecte HASAN Fethi

¹ Statistiques présentées dans: Actes du Colloque international de l'UNESCO sur la conservation de l'architecture de terre du patrimoine mondial (Earthen architecture in today's world). Intervention de : Thierry Joffroy, Hubert Guillaud, Jean-Marie Le Tiec / Architectures contemporaines en terre crue : sur les traces de Hassan Fathi . UNESCO Headquarters, Room XI – Paris, France 17 – 18 Décembre 2012

Renaissance de l'architecture en terre en France :

La crise de l'énergie de 1973, avait suscité la recherche des alternatives à la forte consommation des ressources et énergies non renouvelables, y compris dans le secteur du bâtiment. La recherche en matière de réponse bioclimatique fut naitre dans les décennies 1970 et 1980 formant un des volées primordiales vers une solution, on note dans le sens de notre recherche que les recherches bioclimatiques exploitaient principalement les caractéristiques et performances thermiques avantageuses du matériau terre.

Dans ce contexte, le début des années 1980 va offrir des conditions favorables au renouveau de la construction en terre apportant plusieurs actions suscitant un enthousiasme d'ampleur internationale. En cite parmi ces actions l'exposition « Architecture de terre ou l'avenir d'une tradition millénaire » de 1981 organisée par le Centre Georges Pompidou.

À la même époque, plusieurs programmes furent lancés et la propagation de l'expérience a touché plusieurs endroits, comme sur l'île de Mayotte, le programme d'habitat social lance l'emploi de blocs de terre comprimée pour la réalisation d'un programme exemplaire d'habitat et d'édifices publics qui a débouché sur la construction de milliers de logements ^{FIGURE 2}.

La réussite de ce programme est due principalement au fait que ces expériences ont été porteuses d'un véritable développement social et économique local, et d'un marché profitable aux entreprises comme à la population.

Ces expériences ont montré que la construction en terre exige une concertation entre professionnels dès l'esquisse des projets, et sur le chantier pour optimiser sa faisabilité technico-économique. Elles ont aussi montré que la formation professionnelle est indispensable. Des engagements difficiles à tenir mais qui ont été relayés par des initiatives privées.

La réussite des premiers exemples a engendré systématiquement leurs reproductions dans d'autres territoires au cours des années 90 et jusqu'à présent, où plusieurs entreprises s'engagent sur la voie d'innovation technique avec des éléments préfabriqués, des blocs d'adobe, pisé ou même blocs de bague, le travail se structure de plus en plus grâce aux initiative des associations d'ordre régional et même national qui exploite les résultats de ces expériences dans l'amélioration des techniques de restauration des bâtisses historiques et biens patrimoniales, ainsi qu'avec la poursuite des initiatives de plusieurs laboratoires de recherche et avec un développement significatif de la formation dans ce domaine.

Figure 10 : *Habitat locatif à Mayotte construit*

par la SIM., CRAterre et T. Joffroy



La dynamique allemande pour la relance d'architecture en matériau terre :

En Allemagne, l'architecture de terre valorise la tradition du torchis¹ ou des « pains de terre » bâtis à l'état plastique en hourdage de pans de bois ^{FIGURE 3}, mais aussi celle du pisé, dont la réutilisation de ce matériau terre n'était plus une pratique nouvelle ou intrusive dans les villages et les agglomérations allemandes, mais la masse de nouvelles constructions par ces techniques vernaculaires demeure de plus en plus en augmentation remarquable en cours du XXe siècle, entre les années 1920 à 1950, où plusieurs dizaines de milliers de logements ont été construits en pisé à l'instigation pressante des autorités successives de l'État allemand et plus particulièrement des régions de Prusse et de la Saxe pour répondre au besoin de relogement issu de la destruction du cadre bâti en première guerre mondiale. La compagnie des chemins de fer a développé des programmes exemplaires de logements pour ses employés, de gares avec leurs baraquements et locaux de stockage. Après la Seconde Guerre mondiale, ce mouvement s'est perpétué en RDA jusque dans les années 1950, puis a périéclité.

Comme en France, la crise de l'énergie de 1973 a contribué à relancer cet intérêt pour l'architecture de terre. Un marché important de la restauration du patrimoine en pans de bois et torchis s'est développé et la redécouverte du procédé de construction en terre-paille a donné lieu à de nouvelles applications.

Dès lors, un réseau de constructeurs en terre allemands s'organisait, multipliait les événements de sensibilisation et promotion d'une architecture de terre écologique qui répond aux attentes d'une plus grande part de la société civile allemande. Des entreprises à cet objectif furent installées et qui profitent désormais de cette compagnie de sensibilisation pour faire divulguer leurs produits. désormais des produits prêts à l'emploi, briques de terre (adobe-machine), terres pour enduits ou mélanges de terre et paille, ou de terre et copeaux bois livrés en sac, panneaux préfabriqués en roseau et terre, qui contribuent au développement d'une filière de construction en terre « sèche » mieux adaptée au marché actuel.

¹ Le torchis : un matériau de remplissage non-porteur. C'est un béton naturel. Il est utilisé pour les murs et les cloisons dans les constructions à ossature en bois. Il est aussi utilisé pour faire des plafonds.

La viabilité du développement technique de cette architecture est aujourd'hui validée par l'existence de nouvelles normes DIN de la construction en terre qui ont été éditées ces dernières années, effet de la pression civile et professionnelle en Allemagne.

Figure 11 :
technique en torchis
mise en œuvre pour
le remplissage



L'Autriche à L'avant-garde :

Les regards sont aujourd'hui réorientés vers ce pays comme étant un des pays à l'avant-garde de la nouvelle architecture de terre européenne avec les réalisations de nombreux architectes tel que Martin Rauch, constructeur en pisé à qui l'on doit des réalisations remarquables. Celles-ci participent à l'enrichissement du cadre bâti en terre, quoique ses projets s'inscrivent dans un courant d'architecture de terre qualifié de « brutaliste » inscrit dans l'expression formelle de l'architecture, désignant en cela la mise en valeur de la matière et du matériau terre à leur état « brut », ses contributions demeurent des chefs d'œuvre de l'architecture contemporaine, le pisé mis en œuvre par Martin Rauch expose délibérément les richesses d'expression des grains de la terre, sa texture, ses couleurs, faisant ainsi une incarnation d'un véritable « béton de terre ».



Figure 12 : construction moderne en murs de pisé. Autriche

En Angleterre :



Figure 13: Visitors Centre, Eden Project, Cornwall



Figure 14 : Woodley Park Centre for Sports & Arts, Lancashire

Nouveaux actes entrepris pour la remise en valeur de l'architecture terre

L'architecture de terre est l'une des expressions les plus originales et les plus puissantes de notre capacité à créer un environnement construit avec des ressources locales facilement disponibles.

Elle inclut une grande variété de structures, allant des mosquées, palais et greniers aux centres villes historiques, paysages culturels et sites archéologiques. Son importance culturelle dans le monde entier est évidente et a conduit à la considérer comme patrimoine commun de l'humanité, et par conséquent méritant d'être protégée et préservée par la communauté internationale. En 2011, plus de 10% des biens culturels inscrits sur la Liste du patrimoine mondial incluaient des structures en terre. La disponibilité et la qualité économique du matériel contribuent à la lutte contre la pauvreté et au développement durable.

Toutefois, ces architectures de terre sont de plus en plus menacés par des impacts naturels et humains (inondations et séismes, industrialisation, urbanisation, technologies modernes de construction, disparition des pratiques traditionnelles de conservation...), et méritent donc une attention particulière en termes de conservation et d'entretien ; environ ¼ des sites inscrits sur la Liste du patrimoine mondial en danger sont des sites en terre.

Le **Programme du patrimoine mondial pour l'architecture de terre** (WHEAP) vise à l'amélioration de l'état de conservation et de gestion des sites architecturaux en terre à travers le monde. Des projets pilotes menés sur des sites en terre inscrits sur la Liste du patrimoine mondial ou inclus dans les Listes indicatives d'Etats parties à la Convention aideront à identifier les meilleures pratiques. Ils fourniront des exemples pour le développement et la diffusion de méthodes et de techniques appropriées dans la conservation et la gestion, et ils permettront de renforcer les capacités locales. La recherche scientifique permettra en outre de promouvoir et d'améliorer le savoir-faire dans ce domaine. Les résultats attendus visent à une meilleure compréhension des problèmes auxquels est confrontée l'architecture de terre, au développement de politiques de conservation, à la définition de lignes directrices pratiques et à l'organisation d'activités de formation et de sensibilisation, en particulier auprès des communautés locales, à travers des ateliers, des expositions, des conférences et des publications techniques. Le programme cherche à accroître la reconnaissance de l'architecture de terre et à créer un réseau mondial actif pour l'échange d'informations et d'expériences.

Lors de sa 31^{ème} session (Nouvelle-Zélande, 2007), le Comité du patrimoine mondial a approuvé le lancement du Programme intégré du patrimoine mondial pour l'architecture de terre (2007-2017), (Décision 31 COM 21C, document de travail 31 COM 21C). Donateurs et Etats parties ont été invités à fournir un soutien financier pour la mise en œuvre d'activités structurées en quatre phases et s'étendant progressivement dans le monde entier. La phase préparatoire, achevée en 2008, a été suivie de trois phases, chacune se concentrant sur deux régions ou sous-régions : la phase 2 (2009-2011) se concentre sur l'Afrique et les Etats arabes, la phase 3 (2012-2014) sur l'Amérique latine et l'Asie centrale et la phase 4 (2015-2017) sur l'Europe et l'Asie.

Phase 1 (2007-2008) : activités mises en œuvre

- Une réunion de consultation d'experts internationaux renommés dans la conservation de l'architecture de terre s'est tenue en novembre 2007 au Siège de l'UNESCO, permettant de définir des orientations finales du cadre opérationnel et de la stratégie du programme ;
- Le Programme du patrimoine mondial pour l'architecture de terre (WHEAP) a été officiellement lancé à l'occasion de la 10^{ème} Conférence internationale sur l'étude et la conservation de l'architecture de terre, Terra 2008 (1-5 février 2008, Bamako, Mali), organisée par le Getty Conservation Institute et le ministère de la culture du Mali ;
- Le projet d'inventaire des sites d'architecture de terre a été lancé, avec le soutien de l'Accord de coopération France-UNESCO (en cours).

Phase 2 (2009-2011) : activités mises en œuvre

Afrique

- Le projet de conservation de quatre années pour l'Afrique (2008-2012) a mis en place une série d'activités sur les sites du patrimoine mondial en terre en Afrique : étude sur les bâtiments traditionnels en terre pour la conservation durable des Eglises creusées dans la pierre de Lalibela en Ethiopie ; développement d'un projet de réglementation de la construction pour les villes anciennes de Djenné et de Tombouctou au Mali avec la publication de spécifications techniques illustrées ; réhabilitation et rénovation de la Maison des jeunes de Djenné au Mali ; ateliers de responsables de sites régionaux et réunion de guides touristiques, développement de matériel didactique pour les établissements de formation régionaux EPA (Ecole du patrimoine africain, Porto-Novo, Bénin) et CHDA (Centre pour le développement du patrimoine en Afrique, Kenya), avec le soutien du fonds-en-dépôt italien.

États arabes

- La réunion de consultation de l'UNESCO sur la mise en œuvre du Programme du patrimoine mondial pour l'architecture de terre dans les États arabes - stratégies et approches (11 janvier 2010) a été soutenue par l'initiative privée conjointe du Centre pour la culture et la recherche Shaikh Ebrahim Bin Mohammad Al-Kalifa / ARCAPITA Bank B.S.C du Bahreïn ;
- Le Projet de sauvegarde du village de Hassan Fathy Nouveau Gournia, en Egypte a été financé par le compte spécial pour la sauvegarde du patrimoine culturel de l'Egypte.

Phase 3 (2012-2014) : activités mises en œuvre

Amérique latine et Asie centrale

- La phase 3 a été lancée à Terra 2012, 11ème Conférence internationale sur l'étude et la conservation du patrimoine d'architecture de terre (22-27 avril 2012, Lima, Pérou) ;
- La planification stratégique a été réalisée avec le Centre UNESCO Lúcio Costa de Catégorie II au Brésil pour la mise en œuvre du programme dans la région (2011) ;
- Un atelier sur les artisans de terre en Amérique latine et dans les Caraïbes à Tlaxcala, au Mexique (2009), a été soutenu par le fonds-en-dépôt espagnol.

Autres régions

- La 1ère Conférence méditerranéenne sur l'architecture de terre, Mediterra 2009 sous l'égide du Centre du patrimoine mondial de l'UNESCO, l'ICCROM, l'ICOMOS-ISCEAH Comité scientifique international sur le patrimoine architectural en terre et le Getty Conservation Institute (13-16 mars 2009) ;
- Projet de restauration de Bam et son paysage culturel (pris en charge par le fonds-en-dépôt italien).

Le Programme du patrimoine mondial pour l'architecture de terre (WHEAP) implique l'assistance technique des principales institutions internationales de conservation : le Centre international d'études pour la conservation et la restauration des biens culturels (ICCROM), le Conseil international des monuments et des sites (ICOMOS) et l'Institut pour la conservation de la construction en terre (CRAterre-ENSAG), ainsi que des institutions régionales l'Ecole du Patrimoine Africain (EPA, Bénin), le Centre pour le développement du patrimoine en Afrique (CHDA, Kenya), et le Centre de restauration et de conservation de l'architecture de terre (CERKAS, Maroc). En 2009, l'Université d'Udine (Italie) est également devenue un partenaire du programme. Dans le cadre des activités, le programme cherche une coopération et des partenariats avec d'autres institutions spécialisées ainsi qu'avec des autorités gouvernementales nationales et locales.

Les activités du programme sont rendues possibles grâce au soutien financier accordé par le Comité du patrimoine mondial par l'intermédiaire du Fonds du patrimoine mondial, le compte spécial UNESCO pour la sauvegarde du patrimoine culturel de l'Egypte, l'Accord de coopération Convention France-UNESCO, le fonds-en-dépôt italien, le fonds-en-dépôt espagnol et le Centre pour la culture et la recherche Shaikh Ebrahim Mohammad Al-Kalifa / ARCAPITA Bank B.S.C du Bahreïn.

En Algérie

Introduction

Au fil du temps et; se faire un abri était tout simplement subordonné aux matériaux locaux disponible sur l'entourage des êtres humains, la terre crue fut le matériau le plus présent, le plus disponible, ainsi que le plus privilège et le plus facile à manipuler par l'homme

Ce matériau était baptisé par l'homme, non seulement pour sa disponibilité mais grâce à ses caractéristiques dument recherchées par les anciens constructeurs, car il assure le confort thermique, phonique et hygrométrique et présente une commodité économique avantageuse, recyclable aussi ce qui lui rend un matériau inépuisable. Au sillage des anciens, le parc bâti en terre crue abrite aujourd'hui plus d'un tiers de la population du globe¹, les peuples bâtissent encore en terre, en apportant à chaque fois des améliorations à cet usage naturel.

L'Algérie, quant à elle, cette vaste étendue territoriale a connu une architecture de terre diversifiée selon la diversité de ses zones climatiques. La typologie de l'habitat ainsi que la diversité des modes d'utilisation de ce matériau sont variées du au sud-ouest du Sahara à la vallée de M'zab à Ghardaia, du nord du pays aux extrêmes zones du sud saharien. Mais Malheureusement depuis les inondations de 2009 de Béchar, l'utilisation de ce matériau est bannie, pour être remplacée par le ciment, vu comme symbole de sécurité et de solidité voir même un symbole de modernité et de promotion sociale.

Ce présent titre dévoilera les spécificités spatiales et la diversification de l'architecture terre à travers l'étendu paysage de l'Algérie, ainsi qu'il va mettre en exergue les différents procédés de constructions ancestraux en terre, les causes qui ont conduit à leurs déclin ainsi que les tentatives de leur mise en valeur.

Exemple de la ville d'Oulef

Située en bordure du plateau du Tademaït et faisant partie de la rue des palmiers cet étroit ruban de verdure des oasis du Sahara occidental algérien qui s'étend sur 1200 Km depuis l'atlas saharien jusqu'à Ain Salah,. Elle est située à 1411 Km au sud de la capitale Alger. Administrativement, Elle fait partie de la willaya d'Adrar comme chef-lieu de commune. Elle englobe, depuis le découpage administratif de 1984, neuf localités. Elle s'étend sur une superficie de 2420 Km² pour une population estimée en 2008 à 21723 habitants soit une densité de 9 ha/km²

Vue sa situation dans la zone saharienne hyperaride, au cœur du plus grand désert chaud de notre planète, la ville d'Aoulef se caractérise d'un climat chaud et sec (Classification de Koppen BWh) dont les températures estivales maximales atteignent les 46 °C alors que les températures minimales avoisinent les 30 °C. Des pics de chaleurs sont nombreux et peuvent atteindre 54 °C à l'ombre. Quant aux précipitations, quand elles auront lieu, elles avoisinent 15 mm au maximum et il peut facilement passer plusieurs années sans aucunes précipitations du tout. L'aridité y est extrême. Elle est due aux vents de sables desséchants qui balayent fréquemment la région. La fixation de la population dans cette contrée revient à l'existence d'une nappe phréatique et artésienne très importante.

¹ (Zerhouni & Guillaud, 2001)

Actuellement la ville d'Aoulef est composée de trois agglomérations principales: Aoulef Chorfa au centre; Aloulef el-Arab à 5 kilomètres au sud, siège du centre administratif ainsi que l'oasis créée par les almoravides de l'oued Draa Maroc); Timokten qui forme l'ensemble des jardins, de drains et de constructions plus récentes (Figure 15).

Figure 15 : la construction en terre crue à la ville d'Aoulef



Traditions de construction en terre et savoir technique:

Le savoir technique et traditions de construction portent sur la production des matériaux et éléments propres à la construction, sur leur principe de mise en œuvre. Souvent, les techniques de construction employées sont considérées comme des réponses directes aux contraintes du milieu. La technique de construction de l'adobe est due au savoir et habitudes des artisans. Elle témoigne, à l'échelle du sud algérien, d'un consensus des artisans et des habitants sur un style dominant porteur d'une identité à laquelle on adhère, le savoir technique est autant culturel qu'il obéit aux rigueurs de la construction.

Production des briques d'adobe :

La fabrication du Toub¹, est l'opération la plus importante du processus de construction traditionnel, car la durabilité et la solidité de la structure entière de la future bâtisse en dépendait. Ceci commence par l'extraction de la terre, suit trois phases: transport, préparation de la boue, puis le moulage, L'extraction de la terre se faisait à proximité du bon sol, propice à la construction, autrement dit là où la dune de sable est la moins haute. La terre est composée de sable, de limon et d'argile.

A Aoulef, il faut généralement creuser à 12 jusqu'au 150 cm de la surface pour trouver la terre utile à la construction, dont la différence de terre est notée par un changement de couleur. Pour s'assurer d'avoir une bonne terre, les autochtones utilisaient un récipient qu'ils remplissaient d'un tiers de terre, et qu'ils complétaient avec de l'eau. Après mélange et deux périodes de repos (dont la première est moins longue que la deuxième, qui dure une nuitée complète), la première couche qui se déposera dans le récipient est le sable, la deuxième est le limon alors que la troisième et dernière est l'argile. Pour réussir la fabrication de l'adobe, le taux d'argile dans la terre doit être compris entre 20 à 30%. Le volume de terre foisonné est fonction du nombre de briques à fabriquer. A la différence des autres techniques de construction, la terre extraite pour la fabrication de l'adobe n'est jamais tamisée.

¹ Mot berbero-arabe assimilé en espagnol pour prendre la nomination d'adobe

Elévation des murs¹

L'élévation des murs commence par la creusée des tranchées. La largeur des fondations (sous forme de longrine) suit celles des murs tout en le dépassent de quelques centimètres des deux côtés. Généralement, elles sont de 70cm de large sur 70cm de profondeur. Cette fondation est réalisée par empilement de pierres, stabilisées entre elles par un mortier de gypse, récemment remplacé par la chaux hydraulique. La nature géologique rocheuse de la région de Tademaït a permis l'exploitation de la roche Debdaba pour l'extraction des morceaux de pierre. La surélévation des fondations sert de soubassement pour éviter les remontées capillaires. Cependant l'extraction de ce matériau dans la région est très coûteuse.

Une fois les travaux de fondations terminés, commence l'édification des murs. Toute la construction repose sur des murs épais et porteurs, généralement de 60 cm en rez-de-chaussée et de 40cm à l'étage, quant à leur niveau, il n'excède usuellement pas les 3 mètres. Si les briques sont trop sèches, elles sont trempées avant leur pose, elles sont ensuite jointées par un mortier composé uniquement de terre, dont la proportion est de deux volumes de sable pour un volume de terre. Une fois la longueur de 160 à 180 cm est obtenue on y place des linteaux en bois. De l'intérieur, les murs sont badigeonnés à l'aide d'un enduit à base d'argile. De l'extérieur, les murs sont striés à la main c'est ce qui est connu par Etesbagh. Aucune structure particulière n'est associée avec le mur sauf parfois des raidisseurs dépendant de l'épaisseur, de la longueur et de la hauteur du mur. Ce raidisseur appelé Tibak ou Rekiza est un demi-mur de soutènement en adobe aussi (Figure 17).



Figure 17 : Tibak et Etesbagh des murs extérieurs

¹ L'architecture domestique en terre entre préservation et modernité: cas d'une ville oasienne d'Algérie "Aoulef". H. Boutabba, M. Mili, S.D. Boutabba

Construction des planchers

Conçu avec une simplicité étonnante, le plancher, à terrasse accessible, ou non, nécessite deux matériaux principaux: la terre et les différentes composantes du palmier: stipe khechab enekhal, palmes Djerid, Kornaf, Ziouane. Parfois on fait recours aussi, quoi que rarement, à la pierre. Comme tout arbre destiné à la construction, le palmier, seule source de bois à Aoulef, est cherché parmi ceux qui sont improductifs ou trop vieux. Une fois trouvé, il est abattu puis coupé longitudinalement en deux, afin de servir comme poutre principale. Toujours disposés dans le sens de la petite portée, La longueur maximale autorisée est de 2.5 m, et ce, dans le but d'éviter le fléchissement de celle-ci. Deux principaux procédés de couvertures sont observés :

Le premier, le plus stable et le plus solide, généralement conçu pour les habitations des gens aisés, consiste en un empilement contigu des poutres sans aucun espacement, couvert de palmes, djerid, alignées côte à côte, sur lesquelles est coulée une couche de mortier de terre. Afin d'assurer une bonne étanchéité et limiter les fissures de la toiture, une couche légère de sable fin ou de cendre lui est ajoutée comme couche finale.

Le deuxième procédé, moins couteux, consiste en, pratiquement les mêmes couches, à la différence de la pose de poutres qui sont régulièrement espacées de 50cm d'intervalle. Ce vide est latéralement, rempli soit par des Kornaf disposés l'une à l'inverse de l'autre, soit par des ziouane, soit par des petits morceaux de pierre.

L'habitat Ksourien et tentatives de restauration :

Etymologiquement, le Ksar signifie palais, mais localement le Ksar est un ensemble de maisons entassées, accolées les unes aux autres pour former un habitat compact, répondant à la fois à une organisation politique d'autodéfense et à une organisation sociale.

Les constatations faites ont montré que ce type d'habitat est confronté aujourd'hui à la dégradation et dans un futur proche à la disparition, si des mesures ne sont pas prises dans l'immédiat pour sa réhabilitation, sa protection et sa sauvegarde. Le système constructif Ksourien se caractérise par une grande simplicité : des murs porteurs, parfois suppléés par des éléments verticaux porteurs du type poteau en brique de terre, sur lesquels sont posés des troncs de palmier et des branchages de palmier recouverts d'une couche d'argile. Les fondations sont du type filant en rigole, avec parfois un soubassement en pierres qui permet de protéger les murs de la remontée capillaire et des eaux de pluie.

Etat et causes de dégradation

Plusieurs facteurs se sont combinés pour accélérer la dégradation des Ksour, et d'après les constatations faites par les spécialistes, le degré de chaque facteur varie d'une région à une autre et d'un Ksar à un autre. Mais l'abandon consommé et l'inexistence d'entretien dans ces structures reste la cause principale des dégradations, et on peut citer parmi les autres facteurs : - la terre crue qui représente le matériau de base, constitue le talon d'Achille pour ces habitations du fait qu'elle nécessite des entretiens périodiques ; - Le vent altère aussi très fortement les constructions en terre. Il cause des dégradations plus ou moins aggravées par l'impact des objets transportés et par l'impact du sable (vents de sables) ; - l'eau sous

toutes ses formes, contribue au dépérissement des Ksour (remontées capillaires, les eaux pluviales sous forme d'averses, des fuites des canalisations mal conçues) ; - nouvelles pratiques apportées par les habitants, auxquelles les Ksour n'étaient pas conçus (insertion des climatiseurs) ; - Les fortes précipitations enregistrées durant les dernières années notamment en 2008 dans les régions d'Aoulef (wilaya d'Adrar) et de Ghardaïa sont les conséquences du phénomène des changements climatiques, dû au réchauffement planétaire. Il est fort possible que les précipitations enregistrées se reproduiront à l'avenir et probablement avec une intensité plus forte.

Pathologie et désordres

Il a été constaté que les pathologies et les désordres, dont souffrent les Ksour sont en général ceux propres aux constructions en terre. Ces pathologies peuvent être classées en deux grandes catégories à savoir : les pathologies humides et les pathologies structurelles.

Pathologies humides

- Erosion des murs, - Présence de coloration foncée de terre mouillée sur les murs, - Présence d'eau en bas des murs (remontées capillaires), - Gonflement et décollement des enduits, - Remontée du niveau du sol extérieur.

Pathologies structurelles

- Ecartement des murs, - Déchaussement des briques, - Fléchissement des murs (formation des creux et ventres), - Présence de fissures aux liaisons et sur la hauteur des murs, - Fléchissement des linteaux (insuffisance d'ancrage), - Absence de linteaux, - Fléchissement et dégradation des bois des planchers.

Réhabilitation des Ksour pour l'habitat¹

L'originalité des Ksour s'exprime dans l'utilisation des matériaux, les formes et l'agencement des espaces, mais aussi à travers l'utilité et le rôle de chaque espace bâti. Cependant la connaissance des matériaux utilisés, les techniques de mise en œuvre et le fonctionnement de la vie dans les Ksour sont nécessaires pour mener à bien le projet de leur réhabilitation. Par réhabilitation, on entend la valorisation et la sauvegarde, qui situent les Ksour dans leur réalité socio- économique, historique et culturelle, pour prévoir leur mise à niveau et la relance de leur dynamisme. Pour réintégrer ces constructions dans la vie courante, la méthodologie doit être axée sur les étapes suivantes :

- Confortement de l'assise des murs d'enceinte
- Le renforcement des bases des murs par la maçonnerie de pierres ;
- la reprise et la consolidation des points névralgiques et des effondrements de la maçonnerie en élévation
- La mise en place des revêtements du sol et des revêtements des ruelles par le matériau adéquat

¹ Terre crue : techniques de construction et de restauration.

- Travaux permanents d'entretien et de maintenance
- Amélioration des caractéristiques mécaniques du matériau terre (par les procédés de stabilisation) et utilisation des enduits compatibles aux constructions en terre
- Utilisation des systèmes pour reprendre les efforts de traction. Ces différentes actions sont développées ci-après¹ :

. **Traitement des soubassements** : Si la nécessité de réaliser des soubassements pour lutter contre les effets des remontées capillaires est justifiée, ceux-ci seront réalisés selon l'importance des cas de figure qui pourront se présenter soit en maçonnerie de pierres ou en tout type de matériau inaltérable ou encore en confinant à l'aide d'un grillage, une carapace en pierre comme renforcement contre les premières assises de la maçonnerie en toub déjà existante. Le choix de la solution à préconiser découlera de l'analyse de la situation particulière du site dans lequel se trouve le ksar.

. **Renforcement des angles** : Les angles des murs extérieurs seront repris selon le cas soit en reconstruisant les murs tout en assurant une liaison entre eux conformément aux recommandations pour la production et la mise en œuvre des bétons de terre stabilisée édition 1993-CNERIB, soit en réalisant des renforcements des angles à l'aide de contreforts, à réaliser en bloc de toub sur toute la hauteur du mur.

. **Réfection des toitures** : Toutes les toitures doivent être reprises en utilisant des blocs de terre (thoub) placés en entrevous et s'appuyant sur des quarts de palmier. Les blocs de toub à préconiser seront des blocs sur stabilisés et ce, à l'effet de minimiser leur sensibilité à l'eau. Les troncs de palmiers à utiliser seront ceux issus de la dépose des toitures.

. **Réfection des enduits intérieurs et extérieurs** : Pour des raisons d'adaptation et de compatibilité, les enduits à base de terre sont les mieux adaptés. Ces derniers, peuvent être exécutés en trois couches ou en deux couches en respectant la règle de la dégression du dosage entre les couches depuis le support jusqu'à la dernière couche. Les recettes doivent tenir compte du contexte et du savoir faire local (pas de recette universelle). Les meilleurs enduits sont les enduits en terre et à la chaux aérienne (plus mou, plus doux et moins résistant possible). Aussi, on évite d'appliquer l'enduit jusqu'au niveau du sol.

. **Réfection des étanchéités** : Il est proposé de réaliser des étanchéités sahariennes dites « étanchéité locale ». Les travaux seront menés conformément aux recommandations de conception et mise en œuvre de l'étanchéité saharienne, édition- 2006, CNERIB. Cela consiste à réaliser une chape en mortier bâtard de 2 cm, badigeonnée à la chaux. Comme la terrasse étant la partie de l'édifice la plus exposée au soleil, son isolation est donc nécessaire pour, d'une part, éviter les désordres dans les planchers hauts et d'autre part assurer un confort thermique à l'intérieur des logements. Pour ce faire, celle-ci (l'isolation thermique) sera réalisée à l'aide de produits locaux par exemple à l'aide de la « terre battue » ou à l'aide d'une couche de sable stabilisé par un lait de chaux (inertie thermique). Aussi, un soin particulier sera accordé à la réfection des gargouilles ainsi qu'à leur nombre. Il est proposé désormais de réaliser les revêtements de sol et des ruelles en chape de terre damée.

¹ Rapports de recherche - CNERIB 2008.

Ce revêtement en « terre battue », est constitué d'un mélange de sable, d'argile et d'eau, avec adjonction de fibre végétale et des déchets d'animaux pour augmenter la cohésion du mélange. En plus de toutes ces étapes, la stratégie de réhabilitation doit être accompagnée de la mise en place des voiries et réseaux divers (l'électricité, l'eau potable et le réseau d'assainissement) pour avoir un minimum de confort pour les habitants.

. **Reconstruction Le remplacement progressif du bâti** ancien saharien doit se faire en tenant compte des spécificités locales à travers la construction de nouveaux programmes adaptés. Le système constructif en maçonnerie porteuse chaînée, à base de matériaux localement disponibles, est proposé. Les matériaux dits locaux sont ceux utilisés (ou à utiliser) localement depuis longtemps par les populations en place sans avoir recours à de moyens importants, onéreux ou mécaniques pour leur exploitation ou leur mise en œuvre. Ces matériaux sont directement mis en œuvre à partir de gisements naturels, sans subir de transformations industrielles significatives.

Chapitre 3

Aperçus généraux sur le matériau terre

-un matériau de construction-

Chapitre 3 : Aperçus généraux sur le matériau terre

-un matériau de construction-

3.1 Généralités

3.1.1 Introduction

Terre crue, banco ou adobe sont les termes utilisés pour désigner la terre, utilisée avec le moins de transformations possible en tant que matériau de construction.

Le terme terre crue permet surtout de marquer la différence avec la terre cuite : en effet, dans la construction occidentale contemporaine, le matériau terre se trouve le plus couramment sous sa forme cuite (briques de terre cuite, tuiles). Plusieurs techniques de construction utilisant la terre crue comme matériau structurel existent : le pisé, la bauge, l'adobe, la brique de terre compressée.

La terre crue est un matériau économique : l'extraction ne nécessite pas de moyens technologiques importants ; l'utilisation est réalisée sans transformation ; l'acheminement est réduit. Tous ces facteurs limitent les coûts. Sur le plan technique c'est un matériau très isolant aussi bien phoniquement que thermiquement.

Sans s'étendre sur les aspects techniques, déconstruisons quelques idées reçues : la terre crue n'est pas le matériau des pauvres, elle permet de se loger dans des conditions très confortables et durables, en témoigne les architectures du passé comme le Palais de l'Alhambra à Grenade (Classée patrimoine mondial par l'Unesco depuis 1984) ou comme les constructions contemporaines allant des logements sociaux jusqu'à la maison d'architecte.

Elle n'est pas réservée à l'habitat individuel: elle peut répondre au besoin de densité par des constructions collectives qui peuvent atteindre 6 étages comme par exemple la ville de Shibam dans le Yémen surnommé « la Manhatan du désert » (XVI^{ème} siècle) ou ce que l'on peut considérer comme les premiers logements collectifs de l'histoire construit par les Chinois au XII^{ème} siècle rassemblant près de 800 personnes d'un seul tenant: c'est dire à quel point cette technique, réactualisée avec nos moyens modernes et notre force mécanique de 2010, présente un grand potentiel.

Par sa plasticité et plus encore lorsqu'elle est associée à une structure en bois, elle résiste bien au séisme pourvu que les dispositions constructives soient respectées. Enfin pour beaucoup de pays sans ressource pétrolière c'est un instrument d'indépendance économique, culturelle et l'occasion de créer de l'emploi en lançant des programmes de constructions. C'est le cas de l'expérience initiée en Egypte par l'architecte Hassan Fathy dans les années 50 qui a construit des milliers de logements en terre en revisitant et modernisant l'architecture traditionnelle, en formant une main d'œuvre locale et en divisant par 5 le coût par rapport au béton avec un confort accru: en effet dans ces pays chauds, la terre est un climatiseur naturel, le béton, une aberration.

3.1.2 Diversités

Construire en terre, c'est construire avec un matériau que l'on foule aux pieds tous les jours. Mais la terre ne peut être employée en construction que si elle offre une bonne cohésion propre, principalement due à la présence d'argile qui joue le rôle de liant naturel.

En maintes contrées dont les paysages familiers en sont très souvent richement marqués, l'architecture de terre est véritablement un témoignage vivant de l'histoire et de la culture des peuples. De la tradition de construire en terre, on dénombre de très nombreux modes de construction avec une infinité de variantes qui traduisent l'identité des lieux et des cultures. On connaît principalement douze modes d'utilisation de la terre en construction. Parmi ceux-ci, sept sont très couramment employés et constituent les genres techniques majeurs.

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

Pisé: la terre est comprimée en masse avec un pilon dans des banches, couche par couche, et banchée par banchée. Traditionnellement, ces outils sont en bols.

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

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

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

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

Bauge: ce procédé consiste à empiler des boules de terre les unes sur les autres et à les tasser légèrement à l'aide des mains ou des pieds jusqu'à confectionner des murs monolithiques. Habituellement, la terre est amendée de fibres de natures diverses.

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

3.1.3 Champs d'applications divers

Les techniques de construction en terre évoquées sont d'une grande souplesse d'emploi et permettent la construction d'une grande variété de composants et de systèmes constructifs :

- Fondations
- Soubassement
- Murs et piliers
- Ouvertures
- Planchers et pavements
- Toitures plates et inclinées
- Voûtes et coupoles
- Couvertures en tuiles
- Éléments d'isolation
- Escaliers
- Cheminées
- Mobilier intégré
- Claustres
- etc.

Ces éléments ne sont pas les seuls à pouvoir être réalisés en terre. On connaît aussi de très nombreuses applications autres que celles qui relèvent du seul domaine de l'habitat:

- Caniveaux
- Canaux et réservoirs
- Ponts et aqueducs
- Parkings et pistes d'atterrissage
- Routes
- Barrages
- etc.

3.1.4 Avantages et inconvénients :

Avantages	La terre absorbe et restitue l'humidité. La terre régule la température par inertie thermique. La terre est un très bon isolant phonique.
Avantages-écologiques	La terre utilise peu d'eau en phase de transformation. La terre est une ressource locale abondante et renouvelable. La terre a des vertus thérapeutiques, soigne les affections de la peau, détruit les bactéries et les acariens. La construction en terre crue n'utilise que 3% de l'énergie employée dans une construction en béton.
Inconvénients	La main d'œuvre nécessaire à toute construction en terre est souvent importante : même une petite structure représente 15 tonnes de terre à travailler. Il faut aussi bien avoir conscience que le financement de ce type de maison n'est pas conventionnel, en effet il vous sera difficile d'obtenir un prêt hypothécaire pour ce genre d'habitation. Maudits banquiers !

3.1.5 Les qualités de la terre crue

Les préoccupations environnementales permettent de redécouvrir les nombreuses qualités du matériau terre crue. Son utilisation ne participe pas à l'épuisement des ressources ni à l'augmentation des pollutions (eau, air, sol) et des déchets, ni aux modifications biologiques. Ce matériau est :

- **écologique**, il nécessite peu d'énergie et d'eau pour sa mise en œuvre et son élimination. Issu d'une ressource locale, abondante et inépuisable, il réduit les problèmes liés aux transports. Il est également réutilisable à l'infini,
- **économique et local**, il ne demande pas de transformation coûteuse. Pour une maison individuelle, la terre des fondations et du terrassement peuvent suffire pour construire le bâtiment.

Il est un prolongement du sol et, à ce titre, participe à l'identité paysagère et architecturale du territoire dont il est issu. Il est mis en œuvre par des savoir-faire et emplois locaux,

- **sain**, il n'est pas nocif à la réalisation, ni à l'usage du bâtiment. Il participe à rendre l'air ambiant sain, en régulant l'hydrothermie, en absorbant les odeurs et en filtrant certains polluants,
- **allié du confort**, il apporte une inertie nécessaire au bâtiment sous nos climats, l'affranchit des variations des températures extérieures notamment en été. Utilisé en mur et en plancher, il participe à l'isolation phonique. En enduit, il ajoute au confort acoustique en diminuant la réverbération sonore.

Maison construite en terre Seule ou utilisée avec d'autres matériaux (verre, bois, béton, ...), la terre crue offre une grande liberté de création architecturale en mobilisant diverses techniques ou en les adaptant. L'architecture contemporaine utilise la terre, soit en structure visible à l'extérieur, soit protégée à l'intérieur. De l'observation des réalisations actuelles se dégagent certaines spécificités architecturales liées au matériau terre :

- **sa plasticité** permet d'obtenir des formes douces et sensibles, qui mettent en éveil les sens, mais aussi des effets décoratifs intéressants,

• **l'alternance** de couches lors de sa mise en œuvre (pisé, adobe) est l'occasion de créer des jeux de couleurs, de matière, d'ombres, d'horizontalité, ...

La terre permet une insertion paysagère prononcée. Par sa nature même et par sa couleur, on peut parler d'"architecture organique". Le bâtiment, tel un organisme vivant, peut se fondre dans le paysage et répondre aux besoins de ses usagers en accord avec son environnement.

3.1.6 Quelle terre utiliser ?

- C'est, avant tout, un matériau naturel, meuble, extrait sur le site ou à proximité du site de construction.
- C'est un mélange, en proportions très différentes d'éléments (graviers, sables, limons -silts et argile-) auxquels s'ajoutent, éventuellement, d'autres matériaux tels que sels, oxydes... et matières organiques.
- Le matériau Terre, utilisé en construction, est donc un matériau extrêmement hétérogène, dont les caractéristiques sont très diverses d'une région à une autre.
- Le matériau terre à l'extraction, peut avoir des caractéristiques très différentes de par sa composition et la nature de ses constituants.
- Certains sols sont composés essentiellement d'éléments fins argileux. On doit y ajouter beaucoup d'eau pour l'humidifier et l'homogénéiser. Ces matériaux ainsi humidifiés (état proche de saturation), contiennent peu d'air. Par conséquent, ils ne peuvent être que modelés et non pas compactés. Les techniques adaptées sont alors l'adobe, la bauge, et le torchis.
- D'autres terres contiennent essentiellement des gros éléments et peu de fines argileuses.
- Dans ce cas, il faut utiliser la terre en adoptant la technique de la terre compressée : le pisé ou les blocs de terre compactée (BTC). Pour certains matériaux se trouvant entre ces deux sols, il est possible de les utiliser en les modelant et/ou en les compactant.
- Le matériau terre, que l'on trouve selon des épaisseurs variables, résulte d'un processus de transformation complexe : la pédogenèse. Sa nature est conditionnée par de nombreux facteurs de nature physique, chimique et biologique, par des conditions climatiques et la vie végétale et animale. La nature d'une terre repose sur la structure de la roche mère (calcaire, granite), hydrologie, le degré de transformation du sol par les humains (agriculture, travaux publics).
- Dans la construction en terre, la terre à bâtir est toujours prélevée sous la couche de terre arable, en éliminant la couche végétale et les matières organiques qui ont une activité biologique trop importante pour être employées. On trouve ainsi les composants stables tels que les graviers, les sables, le limon et les argiles.
- Le matériau terre rassemble différents constituants (eau, air, matières organiques et les matières solides) dont les proportions respectives caractérisent la structure et la texture de la terre. Il est formé d'un mélange d'agrégats aux éléments, natures, et proportions variables (graviers, sables, limons, argiles).

3.1.7 Identification du matériau terre

La qualité des produits (de la construction) dépend en grande partie de la texture de la terre ainsi que de la qualité de ses composants. Cette qualité est directement liée à la proportion de chaque élément et à la nature des argiles présentes.

La terre est principalement caractérisée par :

- 1) **Sa granulométrie** : la quantité et les dimensions des agrégats
- 2) **Sa plasticité** : la propriété d'absorption c'est-à-dire son pouvoir d'absorber et retenir l'eau. Ce qui peut se traduire par le gonflement, retrait et donnant lieu à des fissures de retrait.
- 3) **Sa compressibilité** : sa capacité de densification et de réduction de volume et de porosité, variable selon le taux d'humidité, et l'énergie ou la force de compactage utilisée.
- 4) **Sa cohésion** : capacité des particules à se maintenir lorsqu'on exerce une force de traction.

La reconnaissance de ces propriétés peut se faire en laboratoire suivant les processus et normes existant. Il peut faire appel à des matériels simples ou sophistiqués. Cette reconnaissance peut également se réaliser de manière simple et empirique sur le terrain. Dans ce cas elle se fait de façon sensoriel et est basée sur l'expérience de la personne (le maçon).

✓ **La granulométrie et la sédimentométrie**

La courbe granulométrique et sédimentométrique nous permet de savoir si le matériau peut être utilisé à l'état naturel ou, s'il faut le cribler pour éliminer une partie des gros éléments. Elle peut aussi nous permettre de faire une classification de ce matériau suivant la classification existant du pays dans lequel on est situé.

En laboratoire, elle se fait par voie sèche et/ou humide à l'aide de tamis et de balances. Sur le terrain, elle est estimée visuellement en touchant le matériau et en mesurant les tailles des gros éléments et éventuellement en estimant leurs proportions (terre sableuse, graveleuse ou terre fine...).

✓ **La sensibilité à l'eau**

La consistance d'un sol peut varier suivant la quantité d'eau interstitielle que contiennent ses pores et l'épaisseur des couches d'eau adsorbées, qui enrobent les éléments fins (les argiles).

L'argile contenue dans le matériau est de nature et de sensibilité variable suivant leurs surfaces accessibles à l'eau (qui peut varier de 1 à 4 m² par gramme pour les moins sensibles et de plusieurs centaines de m² par gramme, pour les plus sensibles). La structure cristalline des particules d'argile leur confère un ensemble de propriétés de comportement : cohésion, plasticité, adsorption d'eau, gonflement, retrait,...

Il y a des constantes physiques conventionnelles qui mesurent la sensibilité des sols appelées

« Limites d'Atterberg », ainsi qu'une valeur mesurée à l'aide du bleu de méthylène appelée valeur de bleu.

Un échantillon de la terre peut se trouver dans plusieurs états :

- **État liquide** s'il contient beaucoup d'eau. Dans ce cas, il prend la forme du contenant dans lequel il se trouve. Si l'on diminue peu à peu son humidité, à moment donné, bien qu'il reste très humide, l'échantillon garde sa forme et non pas la forme du contenant : il est alors à sa limite de liquidité soit W_l .
- **État plastique** s'il contient un peu moins d'eau que le précédent. Dans ce cas, il est encore à l'état très humide, il ne change pas sa forme mais reste modelable à la main.

Si l'on continue à diminuer son taux d'humidité tout en le modelant, il arrive un stade où l'échantillon se fissure. L'échantillon est à sa limite plastique W_p .

En diminuant son taux d'humidité, il dépassera sa limite de plasticité, où il est encore humide mais se fissure en le modelant (limite de plasticité) soit W_p .

- **État sec** s'il contient très peu et/ou pas d'eau.

La différence W_l et de W_p est un paramètre important, appelé l'indice de plasticité I_p , qui montre la plage dans laquelle le matériau reste à l'état plastique.

Plus I_p est grande, plus la terre peut contenir des argiles très actives, ce qui implique une plus grande vigilance au moment de son utilisation ainsi que l'entretien de structures en terre.

✓ **L'adsorption**

Ce phénomène est caractérisé par l'augmentation de la masse d'un élément (mur en terre) si l'on augmente le taux d'humidité relative. Ceci correspond en réalité à la fixation par le milieu poreux d'une certaine quantité d'eau attribuée aux forces intermoléculaires (force de Van Der Waals) agissant sur les molécules de vapeur au voisinage de l'interface solide-fluide dans les pores.

✓ **Condensation**

Le phénomène de condensation (passage de l'état vapeur à l'état liquide) apparaît sur une paroi, avec formation de masse d'eau liquide provenant, d'une part de la condensation de la vapeur initialement en place dans le corps, d'autre part de la condensation du flux d'humidité en phase vapeur s'écoulent vers les zones froides.

Si on empêche que la vapeur puisse traverser librement la structure (avec un enduit imperméable par exemple), elle se condense derrière cet écran imperméable et crée des désordres importants dans la structure. D'où la nécessité d'appliquer des enduits à la chaux sur des murs en pisé.

3.2 Construire en terre crue

3.2.1 Les types de constructions en terre crue



Le pisé

Le pisé est un mur de terre argileuse compressée dans des coffrages, à l'aide des pieds ou à l'aide d'une dameuse. On utilise généralement un mélange constitué de 30% d'argile et 70% de sable. On tasse la terre par couche de 6 pouces environ, la largeur du mur étant de 20 pouces.

On obtient donc un mur constitué de couches compressées, un mur massif d'apparence et porteur d'une charge de 30 à 90 psi (2 à 6 bars) lorsqu'il est encore frais, pouvant atteindre de 450 à 800 psi (31 à 55 bars) et plus encore avec l'ajout de ciment.

Dans le contexte québécois où les températures sont extrêmement froides il existe une solution qui consiste à intégrer entre 2 épaisseurs de pisé de 10 pouces chacune, une couche de mousse isolante rigide d'environ 4 pouces.



La bauge (terre-paille)

Un mur de bauge se façonne en déposant de la terre crue mêlée à de la paille, cette dernière permettant d'améliorer sa cohésion et sa résistance. C'est un mur porteur.



Le torchis

C'est un mélange terre-paille ou terre-chanvre coulé entre des banches. La pâte obtenue doit être montée entre les éléments d'une structure en bois ou en brique (à la main ou à la truelle) et doté d'une armature interne (planchettes, branches).

Cette technique est surtout utilisée pour les maisons à colombage.



La brique de terre crue compressée (BTC)

La brique de terre compressée est un béton de terre composé de graviers, sables, et d'éléments fins (limons et argiles). On utilise ensuite des presses pour comprimer la brique : manuelles ou motorisées, à transmission mécanique, hydraulique ou pneumatique. Le joint que l'on utilise pour assembler les briques est généralement constitué d'un mortier de chaux, sable et terre (argile). La capacité de charge de ce type de mur est d'environ 700 psi (48 bars) lorsqu'il est juste fini, peut atteindre 1000 psi (68 bars) une fois séché, et entre 2500 à 3900 psi (172 à 268 bars) mélangé à du ciment, sachant que les normes recommandent une capacité de charge de 300 psi (20,6 bars).



La brique d'adobe

La brique d'adobe est un mélange d'argile, d'eau et de débris végétaux comme de la paille, des copeaux de bois, de la sciure, du chanvre ou encore des poils d'animaux. On remplit des moules en bois de cette pâte, que l'on enlève après quelques jours, puis que l'on laisse sécher au soleil pendant environ 15 jours.



Les sacs de terre

La construction en sacs de terre s'inspire de la construction en pisé : on remplit de terre compactée, des sacs de polyéthylène ou polypropylène (utilisés notamment pour le conditionnement des grains). Le mélange peut être constitué de divers matériaux comme de l'argile, du sable, du béton etc.

On obtient ainsi une structure porteuse où les rangées de sacs sont fixées entre elles grâce à du fil barbelé, et à laquelle on applique n'importe quel type d'enduit. Cette technique a été développée par un architecte américain, Nader K.

3.2.2 Avantage et inconvénient de chaque type :

	AVANTAGES	INCONVENIENTS
Le pisé	<ul style="list-style-type: none"> • mur solide et autoporteur • très bon isolant phonique 	<ul style="list-style-type: none"> • très sensible à la pluie, à l'humidité, et au mécanisme gel-dégel • formation pratique indispensable pour les auto constructeurs • mauvais isolant pour les rebords de fenêtre
La bauge	<ul style="list-style-type: none"> • qualité plastique du matériau • pas besoin de coffrage (pisé), ni d'armature (torchis) 	<ul style="list-style-type: none"> • nécessite beaucoup de main d'œuvre • installation des murs très longue
Le torchis	<ul style="list-style-type: none"> • plus solide que la terre crue seule • séchage rapide • financièrement plus économe que les autres types de terre crue 	
La Brique de Terre Comprimée (BTC)	<ul style="list-style-type: none"> • mur facile à mettre en œuvre • qualités d'inertie thermique et d'assainissement 	<ul style="list-style-type: none"> • fabrication des briques longue et fatigante • fragilité : au moindre choc la brique se brise ou s'effrite • se détériore sous l'effet du gel
La brique d'adobe	<ul style="list-style-type: none"> • recommandé et plus adapté pour des cloisons, murs intérieurs 	<ul style="list-style-type: none"> • la fabrication exige beaucoup de terre et de main d'œuvre
Les sacs de terre	<ul style="list-style-type: none"> • résiste à toutes sortes de temps, intempéries • mur massif très solide 	<ul style="list-style-type: none"> • peu recommandé pour des régions froides

1. La terre creusée

Cette technique est répandue sous les climats chauds et secs ou le sol présente une croûte tendre, en l'occurrence du tuf, du lœss ou de la lave poreuse. Ce procédé permet une protection contre la chaleur diurne et amortit la différence de températures entre le jour et la nuit grâce à l'effet de volant thermique¹ et de masse de la terre. Ce procédé présente deux variantes ; le troglodyte horizontal ou les cavités sont creusées sur des parois verticales et troglodyte vertical creusé dans des sites plats de plateaux ou de plaines. Le site de Matmata en Tunisie et les gorges du Roufi en Algérie sont des exemples dans les pays du Maghreb². En chine, il ne s'agit pas seulement d'habitations creusées autour d'un patio mais aussi d'écoles, de bureaux, d'hôtels et d'ateliers pour les petites industries.

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

¹ C'est la réserve d'énergie thermique emmagasinée le jour et restituée la nuit

² Les gorges du Roufi dans les Aurès correspondent bien à cette description mais restent malheureusement peu connues

2. La terre couvrante

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

- La maison enterrée : la terre ne rentre pas dans la structure de la construction mais elle couvre la bâtisse.

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

3. La terre remplissante

A l'état sec, la terre remplit toutes sortes de matériaux creux. C'est avec ce procédé que la Muraille de Chine fut construite ainsi que de nombreux ouvrages romains. Le village de Guir Lotfi à Béchar¹ était réalisé grâce à cette technique. Les blocs de parpaings creux étaient remplis de terre crue avant leur pose dans les murs.

4. La terre découpée

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



Figure 19: presse hydraulique



Figure 20: Presse manuelle

¹ Nouredine KEBAILI, l'architecture de terre contemporaine en Algérie ; évaluation post-occupation d'habitations rurales dans la région centre des hauts plateaux ; mémoire de magistère 2006

5. La terre comprimée

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

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

C'est l'invention de la presse manuelle « CINVA-RAM » en 1952 par l'ingénieur Raul Ramirez au centre CINVA de Bogota en Colombie qui marque le regain d'intérêt pour la construction en blocs de terre comprimée qui peut être stabilisée ou non¹

- Les blocs monolithiques ou le Pisé : il est réalisé grâce à une banche dans laquelle la terre est remplie et damée. C'est la technique la plus connue. Le développement des pressoirs à vibreur permet une meilleure qualité des ouvrages

- La forme prismatique : c'est la plus connue, elle est produite selon deux techniques ; la goutte d'eau et le coup de sabre. Depuis les années 1970, des milliers de logements ont été construits selon cette technique au sud-ouest des USA. Partout dans le monde, l'adobe est en rivalité avec le bloc de terre comprimée².

6. La terre façonnée

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



Figure 21 : Séchage de brique en adobe. Source: Encyclopédie interactive Wikipédia

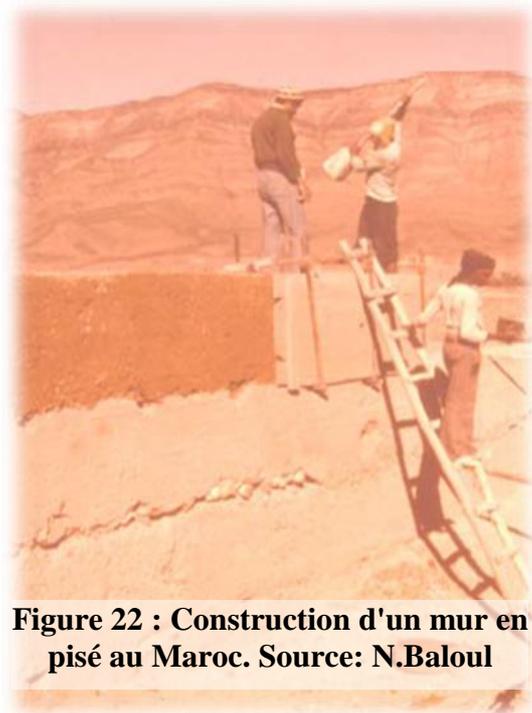


Figure 22 : Construction d'un mur en pisé au Maroc. Source: N.Baloul

¹ H. Guillaud T.Joffroy P. Odul, CRATerre, Compressed earth blocks manual of design and construction, Ed. Eschborn, 1995

² <http://www.inti.be/ecotopie>

7. La terre empilée

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

- Les boules empilées
- Les boules de terres jetées.

8. La terre moulée

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

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

- La brique cylindrique : le cylindre moulé de terre fraîche est utilisé comme remplissage pour une ossature en bois.

- La forme prismatique : c'est la plus connue, elle est produite selon deux techniques ; la goutte d'eau et le coup de sabre.

Depuis les années 1970, des milliers de logements ont été construits selon cette technique au sud-ouest des USA. Partout dans le monde, l'adobe est en rivalité avec le bloc de terre comprimé¹

9. La terre extrudée

La terre est extrudée par une puissante machine

10. La terre coulée

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

Figure 23: Montage d'un mur en adobe.
Source: Encyclopédie interactive Wikipédia



Figure 24: Mur en adobe déjà monté. Source: Encyclopédie interactive Wikipédia



¹ <http://www.inti.be/ecotopie>

11. La terre paille

La terre débarrassée de ses gros grains, est dispersée dans des futs pleins d'eau et remuée jusqu'à l'obtention d'une barbotine, la paille (blé, orge, seigle, froment...) est ajoutée (le dosage étant de 70kg de paille pour 600kg de terre pour une masse volumique de 700kg/m³)¹ et malaxée jusqu'à l'obtention d'un mélange paillé qui sera utilisé, à l'aide d'un coffrage, comme remplissage à une ossature en bois. Cette technique présente plusieurs avantages dont la résistance au feu, aux intempéries et une bonne durabilité.

12. La terre garnissage

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

- Le bauge entre claies : l'ossature est entièrement en matière végétale, le recouvrement en terre fait entre 10 et 15 cm d'épaisseur. Cette technique reste utilisée dans les pays tropicaux.
- Les boules de paille : c'est une technique localisée en Allemagne. Une corbeille en paille est remplie de boules de terre. La mise en œuvre se fait sur une charpente en bois.

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

- Le torchis : l'une des plus anciennes et des plus utilisées dans le monde.

C'est une technique de hourdage qui consiste en l'application d'une terre mélangée à de la paille sur un clayonnage maintenu dans une ossature porteuse en bois².

¹ Noureddine KEBAILI, l'architecture de terre contemporaine en Algérie ; évaluation post-occupation d'habitations rurales dans la région centre des hauts plateaux ; mémoire de magistère 2006

² Bruno Pignal, Terre crue : Techniques de construction et de restauration, édition EYROLLES, 2005

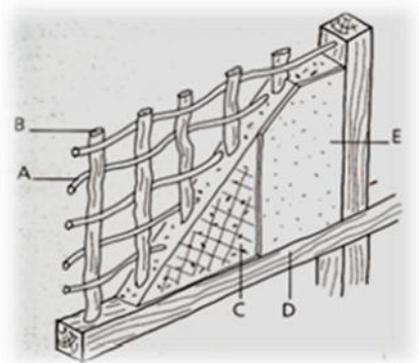


Figure 26: Torchis sur clayonnage

Source: N.Baloul

A: latte, **B:** palançon, **C:** terre paille, **D:** ossature en bois,
E: enduit

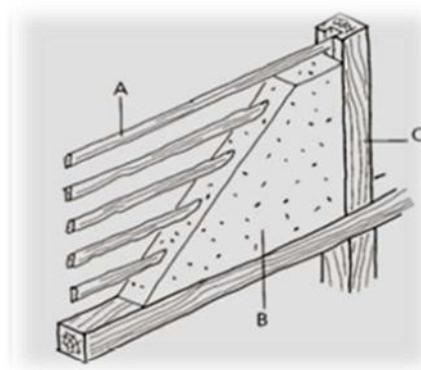


Figure 25: Torchis sur barreau.

source: N. Baloul

A: Barreau, **B:** remplissage terre paille
C: ossature en bois

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

3.3 Les avantages et inconvénients de l'architecture en terre

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

Les architectures en terre se sont intégrées aussi bien dans les sites ruraux (en Afrique, Asie, Moyen Orient, Amérique latine, en Europe et aux Etats-Unis), sous forme de groupements, compacts, parfois défensifs ou dispersés, que dans les sites urbains (Lyon en France, Santa Fe au nouveau Mexique, Bogota en Colombie, les villes en terre de l'Afrique et du moyen Orient). Le génie de la terre a permis aussi de réaliser des constructions très hautes telles que les immeubles de la ville de Shibam au Yemen entièrement construits en terre et qui atteignent une hauteur de 30 m et des constructions vastes telles que la mosquée de Mopti au Mali, et l'église San Xavier au Nouveau Mexique. Enfin le génie de la terre a permis de doter les architectures en terre d'un confort tout aussi thermique que spirituel émanant sans doute de l'aspect naturel du matériau et dont la plasticité permet toutes les expressions artistiques et tous les décors¹.

¹ J. Dethier, Des architectures de terre ou l'avenir d'une tradition millénaire, centre George Pompidou, Paris 1982, P. 27-132.

En plus de ses qualités de régulateur hygrométrique et d'isolant phonique, la terre crue présente de gros avantages aussi bien sur le plan environnemental qu'économique. On peut situer principalement les qualités de la terre crue avant et après la phase de construction :

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

3.3.1 Les avantages du matériau terre

Le matériau terre, partout et largement disponible, présente beaucoup d'avantages parmi eux on peut citer¹:

- La terre est prélevée et exploitée sur site. Contrairement à d'autres matériaux, elle ne consomme aucune énergie non renouvelable et polluante.
- De grandes quantités de terre extraites au cours de grands travaux d'utilité publique, comme les routes, les travaux des fondations des constructions peuvent être recyclées et utilisées comme matériau de construction ;
- Le matériau terre n'utilise que très peu d'eau de gâchage, ressource essentielle pour la vie des populations ;
- Les coûts, des blocs comprimé en terre crue, en comparaison avec ceux de la maçonnerie en parpaing de ciment, de pierre ou même de brique de terre cuite, sont de 20 à 30 % inférieurs²;
- Pendant sa fabrication ce matériau ne produit aucun rejet de déchets, Son utilisation garantit aussi l'absence d'effets nocifs dans le cadre de la vie quotidienne, il a en plus l'avantage d'être presque entièrement recyclable après son utilisation initiale;
- Le mode ainsi que les outils nécessaires à la production du matériau terre sont simples et accessibles à tous ;
- Il possède en outre des propriétés, telles qu'une grande capacité d'absorption d'eau, une masse volumique élevée, une bonne capacité à laisser transiter la vapeur, une bonne inertie thermique, des qualités phoniques et une longévité avérée³

¹ A. Aguarwal, bâtir en terre, Ed. Earscan, Londres 1981, P. 44-54.

² H. Benouali, Proposition pour la relance des constructions en terre en Algérie, CNERIB, décembre 2004, p.4

³ Kur.F, l'habitat écologique : quels matériaux choisir, Edit. Terre vivante, France, juillet 2001, P.139.

3.3.2 Les inconvénients du matériau terre

Malgré tous les avantages que peut présenter le matériau terre cependant, il présente aussi des inconvénients majeurs¹:

- Il s'érode facilement, ce qui rend son emploi délicat dans les régions à forte pluviométrie ;
- Utilisée en couverture elle peut prendre l'eau, s'alourdir et provoquer des affaissements ;
- n'adhérant pas au bois, cela fait apparaître des décollements autour des ouvertures ;
- Il ne résiste pas à la flexion et à la traction ;
- Les liaisons entre les particules du matériau terre sont d'ordre physique, en contact avec l'eau elles se fragilisent et même se neutralisent ce qui détériore le matériau et diminue sensiblement ces caractéristiques mécaniques et sa durabilité dans le temps.

¹ 36A. Aguarwal, bâtir en terre, Ed. Earscan, Londres 1981, P. 50

Ces inconvénients sont principalement liés à la solubilité à l'eau de la terre crue, qui cause des désordres dans les constructions qu'on désigne par pathologies de vieillissement qui varient selon les climats et dont la maîtrise peut être assurée grâce à des mesures préventives (Voir tableau) ¹

Climat /précipitations	Inconvénients courants	Mesures préventives
Désertique (aride) et semi-aride moins de 250 mm	<ul style="list-style-type: none"> -Erosion des murs par le sable -Tassement et fissures de retrait peu graves -Dégâts mécaniques 	<ul style="list-style-type: none"> -Enduit anti-érosion en béton maigre - Bon choix de la terre - Agencement soigneusement pensé - Meilleure réalisation
Humide 700 à 1270 mm	<ul style="list-style-type: none"> - Erosion des murs et fondations - Erosion par les eaux de ruissellement -Tassement et fissures de retrait très importants -Dégâts Mécaniques 	<ul style="list-style-type: none"> -Bon agencement, bon écoulement -Dallage en béton autour de la construction -Gouttières et tuyaux -Bonne couverture, toit en surplomb -Enduit anti-érosion, imperméable -Bon choix de la terre -Meilleure réalisation
Très humide plus de 1270 mm	Idem	Idem

Tableau 1 : Mesures préventives pour la maîtrise des pathologies des constructions en terre (source : Aguarwal.A, bâtir en terre, p.51)

¹ A. Aguarwal, bâtir en terre, Edit. Earscan, Londres 1981, P. 51

3.4 Quelques pathologies des constructions en terre

Afin de mieux profiter des avantages des constructions en terre, il est nécessaire de se prémunir contre certaines pathologies. Les constructions en terre sont en effet très sensibles à l'eau. Ses dégradations peuvent être localisées :

- A la base du mur à cause des remontées capillaires ;
- Au haut du mur à cause du rejaillissement ou du ruissellement des eaux pluviales ;
- A des endroits précis tels que les ouvertures, acrotères de nature du terrain, terrasses saillies, gorge ou saignée¹ etc.

3.4.1 Les principales causes de désordre

Les désordres sont principalement causés par la sollicitation du matériau ou du système à l'encontre des propriétés mécaniques. Le matériau terre ne doit pas être soumis aux efforts de traction ou de flexion car il ne résiste qu'à la compression. Nous pouvons dénombrer plusieurs causes de désordre²;

- La forte pathologie humide
- Les mauvais terrains sur lesquels sont bâties les constructions : sol instable, de résistance trop faible, sol gonflant etc. ;
- La mauvaise conception du bâtiment : des fondations sous dimensionnées ou excentrées, mur non chaînés, trop élancés, trop percés d'ouvertures, des tableaux de baies trop lourds, des charges de toitures non reprises par le chaînage etc. ;
- La mauvaise mise en œuvre : le choix d'une mauvaise terre, des systèmes constructifs mal exécutés (mauvais appareillage des blocs, mauvais ancrage des poutres de planchers, des évacuations des eaux pluviales mal soignées, etc. ;
- L'action du vent : Nous signalons que le vent altère aussi très fortement les constructions en terre. Il cause des dégradations au sommet et à la base du mur (schémas 26 et 27)³, plus ou aggravées par l'impact d'objets transportés, ainsi que par l'impact du sable (caractéristique du sud Algérien).
- Les autres causes annexes : les influences climatiques et actions des êtres vivants tels que les insectes et les rongeurs. CRATerre a défini deux types de pathologies, les pathologies humides et structurelles.⁴

1 Uniquement dans les pathologies humides

2 Encyclopédie du bâtiment, V3, P. 3-21-35

3 40CRATerre, Marrakech 87, Habitat en terre

4 41CRATerre, Traité de construction en terre, Op. Cit,

3.4.2 Les pathologies humides

Les pathologies liées à l'eau sont relativement bien connues, elles sont dues à¹:

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

On révèle les effets de ruissellement, rejaillissement, stagnation, absorption, impact et infiltration, qu'on désigne généralement par le système de la goutte d'eau. Ce sont les principales actions, accentuées très souvent par des actions tels que l'absence d'entretien, la non protection des gargouilles, les tableaux d'ouverture, l'arrosage etc. Les pathologies humides entraînent aussi des pathologies structurelles par l'effet des remontées capillaires et des rejaillissements de l'eau sur les murs, ce qui accentue le risque de creusement et affaiblit la structure porteuse.

3.4.3 Les pathologies structurelles

CRATerre identifie cinq types de pathologies², elles sont typiquement identifiées par l'apparition de fissures ou de décomposition du matériau, elles peuvent aller à partir de l'apparition de simples fissurations, puis des bombements (ventres), des écartements, de faux aplombs, jusqu'à engendrer à long terme, un déséquilibre causant l'effondrement des constructions³.

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

•Les fissures :

Elles sont souvent le résultat des erreurs constructives ou des modifications ultérieures. La forte compression, due aux surcharges propre ou à l'exploitation, peut mettre le matériau en situation de dépassement de contrainte mécanique. Cette forte sollicitation qui est soit localisée (ouvertures, planchers) ou exercée sur la masse, (mauvaise fondation et tassement différentiel) crée des fissures qui peuvent favoriser l'infiltration de l'eau voir déstabiliser le bâtiment.

•Les fissures de retrait :

Elles sont dues au mauvais contrôle de qualité de la terre employée et de la teneur en eau lors de la mise en œuvre.

¹ Encyclopédie du bâtiment, V3.

² CRATerre, Construire en terre Op. Cit, P. 244-245.

³ N. Baloul, Conservation et valorisation du patrimoine architectural en terre de la région du Twat-Gourara : cas du ksar de Tmassekht, mémoire de magister 2007

•Les flambements :

Un mur élancé non chîné ou une charge importante, peuvent induire des déformations structurelles, les flambements ou ventres extérieurs provoquent alors des fissurations.

•Les effondrements :

Ils peuvent être partiels ou totaux et sont induits par l'application de contraintes occasionnelles ou accidentelles ou bien le résultat d'une pathologie humide.

•La décomposition du matériau :

La structure minéralogique et physico-chimique du matériau peut évoluer et se désagréger sous l'action de l'eau, du gel et dégel cyclique et de la forte chaleur. Cette pathologie est accélérée par la fixation des sels et des parasites organiques. La maîtrise des performances du matériau terre et de ses techniques constructives permet aussi de surmonter certains de ses inconvénients structureaux, il faut signaler que l'entretien des enduits extérieurs est essentiel, car lorsqu'ils se désagrègent, la maçonnerie de terre crue subit directement l'attaque des eaux pluviales, qui altèrent les joints puis les briques elles-mêmes.

3.4.4 Les principes de bonne conception d'une architecture de terre

L'art de construire en terre obéit à des règles très strictes qui demandent un savoir-faire propre. Mal conçues, les constructions peuvent être l'objet de grave désordres, les principes constructifs indiqués plus bas exploitent les performances et les caractéristiques du matériau terre pour réduire ou même éliminer les risques de pathologie, elles garantissent la durabilité des œuvres en terre¹

✓ Protection des terrasses et toiture :

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

✓ Protection des parois :

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

✓ Protection des ouvertures :

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

¹ CRATerre, Marrakech 87, Habitat en terre, P. 18-19

✓ Protection de la base du bâtiment :

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

3.5 La nature d'un matériau terre¹ :

Le matériau terre est constitué de plusieurs éléments :

- Les constituants gazeux : principalement de l'air ;
- Les constituants liquides: principalement de l'eau ;
- Les constituants solides: la matière minérale et matière organique.

3.5.1 Constituants gazeux

C'est l'atmosphère de la terre : ils sont localisés dans les cavités et proviennent de l'air extérieur, de la vie des organismes et de la décomposition des matières organiques. Les constituants de l'air sont l'azote,

l'oxygène, le gaz carbonique. On trouve aussi des gaz issus de la décomposition organique et de la respiration des êtres vivants: le gaz carbonique, l'hydrogène, le méthane ...

3.5.2 Constituants liquides

C'est la solution de la terre: ils sont solubles dans l'eau et proviennent à la fois de la pluie et des conditions atmosphériques (brouillard, humidité relative), des apports de l'homme et de la décomposition de la roche et des matières organiques. Les constituants liquides sont: l'eau, les éléments solubles dissous dans cette eau tels que corps organiques (sucres, alcools, acides organiques), et corps minéraux (acides, bases et sels en partie dissociés en ions Ca^{**} ; Mg^* ; K^* ; Na^* ; PO_4^{***} ; SO_4^{**} ; CO_3^{**} ; NO_3^{**} ; etc..).

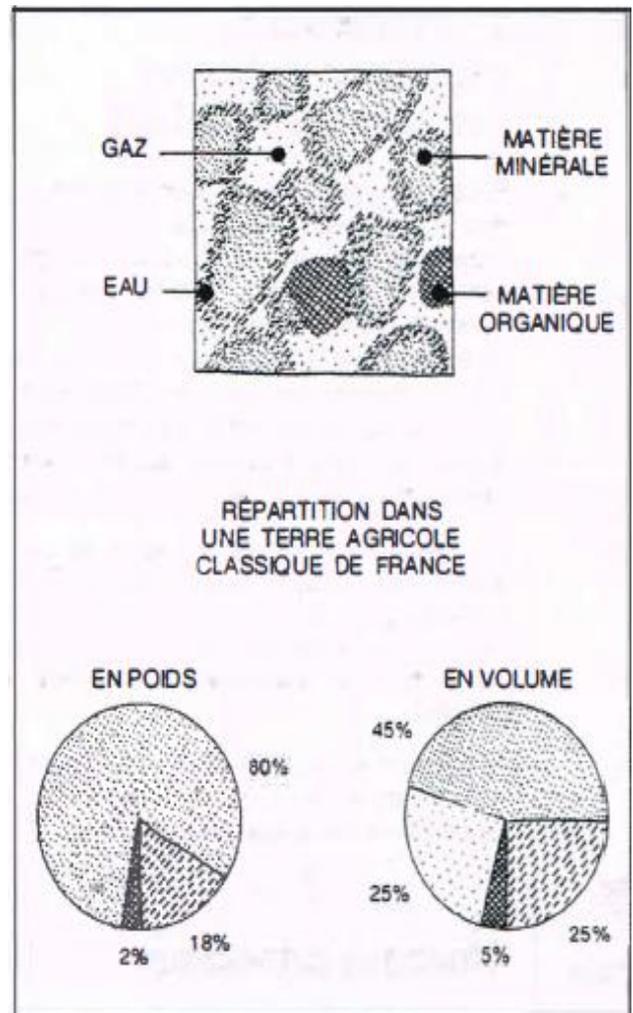


Figure 27: constituant d'un matériau terre

Source : CRAterre, TRAITÉ DE CONSTRUCTION EN TERRE

¹ CRAterre, TRAITÉ DE CONSTRUCTION EN TERRE Copyright© 2006, Éditions Parenthèses - 72 cours Julien, 13006 Marseille

3.5.3 Constituent solides

Ils sont insolubles dans l'eau.

- **Les constituants organiques** ou matières organiques, provenant des organismes végétaux ou animaux du sol ou apportés au **sol**. On distingue quatre groupes:

- Les végétaux et animaux vivants: bactéries, champignons, algues, végétaux supérieurs, protozoaires, vers, insectes ...
- Les déjections animales, les végétaux et animaux morts mais non encore décomposés .
- Les matières organiques en décomposition, attaquées par les microbes du sol ou "produits transitoires".
- L'humus, fraction colloïdale et stable des matières organiques dont la décomposition est très lente.

3.5.4 Les constituants minéraux

Où constituants mécaniques, provenant de la désagrégation de la roche mère ou apportés par l'homme. Issus de la désagrégation des roches, "les éléments sableux" sont soit des fragments de roche (pierres et graviers), soit des minéraux qui constituent ces roches (sables et limons). Ils sont de même composition que ces minéraux et peuvent être siliceux, silicatés ou calcaires.

3.6 Matières organiques et minérales du matériau terre :

La fraction solide de la terre est composée de matières minérales, résultant de la désagrégation physique et de l'altération chimique de la roche mère sous-jacente, et de matières organiques, qui sont essentiellement des résidus plus ou moins décomposés d'organismes végétaux et animaux.

3.6.1 Matières organiques

Pour des conditions normales, les matières organiques sont concentrées dans l'horizon de surface des sols sur une épaisseur de l'ordre de 5 à 35 cm. Parfois, les matières organiques peuvent contenir des composants végétaux visibles. D'autres fois, la décomposition de la structure végétale originelle est si avancée que l'on se trouve en présence d'un matériau de couleur noire: l'humus.

Les matières organiques récemment décomposées ont des caractéristiques différentes de l'humus: elles consistent en macro-particules ou fibres relativement inertes du point de vue physique ou chimique.

L'humus est de nature colloïdale et acide, doté d'une forte capacité d'échange basique (ions) et d'absorption de l'eau qui augmente son volume.

Les matières organiques ont une structure ouverte et spongieuse et sont dotées d'une faible résistance mécanique. La teneur en eau peut être très élevée (de 100 à 500 %) supprimant toute stabilité mécanique.

La nature acide des composants organiques tend à provoquer des réactions acides avec l'eau du sol qui peuvent avoir des effets corrosifs sur les matériaux en contact. La concentration et le type de matières organiques affectent fortement les caractéristiques d'une terre naturelle au-dessus de teneurs en eau de l'ordre de 2 à 4 %.

3.6.2 Matières minérales

Les composants minéraux d'un sel, ou non organiques, constituent généralement la plus grande partie d'un sol.

On distingue deux groupes de minéraux.

- **Les minéraux inaltérés** ou incomplètement altérés: ils sont de composition identique à la roche mère dont ils sont issus ; ce sont les cailloux et graviers, les sables et les silts.
- Les minéraux altérés: ils résultent d'une altération chimique des minéraux de la roche mère et sont marqués par une réduction extrême de leur taille (moins de 2μ). De par leur finesse, ces particules minérales altérées ont la forme d'une pâte collante si elles sont humidifiées. On leur a donné le nom de colloïde, "sorte de colle", car elles forment le liant de la terre. Les principaux colloïdes sont les argiles et c'est pour cette raison que l'on parle plus souvent en géotechnique de la fraction argileuse plutôt que de la fraction colloïdale.

3.6.3 Eléments sableux

Ils peuvent être siliceux, silicatés ou calcaires.

- **Les éléments siliceux**: ils résistent à l'altération chimique. Ce sont des grains de quartz issus de la désagrégation des grès et des roches cristallines. On les rencontre aussi bien dans les fractions grossières que fines.
- **Les éléments silicates** : leur altération chimique est continue mais très lente. Ils sont formés de grains de mica, de feldspath et d'autres minéraux libérés par la désagrégation des roches cristallines: granite, roches volcaniques. L'altération de ces éléments est d'autant plus efficace qu'ils sont fins.
- **Les éléments calcaires**: c'est la fraction des éléments sableux constitués de carbonate de calcium.

Il faut bien distinguer les terres formées sur une roche mère calcaire des terres formées sur une roche mère non calcaire. Le calcaire n'est pas toujours présent dans le sol mais tous les sols contiennent du calcium fixé sur les argiles en ions calciques ou en solution du sol sous forme de sels solubles de calcium.

Pour faciliter leur identification, les composants minéraux ont été divisés en fractions granulaires qui sont situées entre des limites dont la définition est arbitraire.

1 -Cailloux

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

2 - Gravier

Leur taille se situe entre 20 mm et 2 mm. Ce sont des particules de matériau grossier, de petite taille, résultant de la désagrégation de la roche mère et des cailloux. Ils peuvent également avoir été apportés par les cours d'eau et présentent alors des formes rondes.

Mais ils peuvent aussi être anguleux. Les graviers constituent le squelette de la terre et limitent sa capillarité et son retrait

3-Sables

Leur taille se situe entre 2 mm et 0,06 mm. Ils sont souvent composés de particules de silice ou de quartz.

Certains sables de plage contiennent du carbonate de calcium (fragments de coquillages).

Les sables glaciaires contiennent des minéraux rocheux pulvérisés.

La fraction sableuse d'un sol est caractérisée par sa grande friction interne. Les particules sableuses manquent de cohésion du fait de la faible influence des films d'eau au voisinage de leur surface dont l'absorption très réduite limite le gonflement et le retrait.

Les sables sont caractérisés par leur structure ouverte et leur perméabilité.

4-Silt

La taille des particules de silt se situe entre 0,06 mm et 0,002 mm (2μ). Du point de vue physique et chimique, la fraction silteuse est presque identique à la fraction sableuse avec pour seule différence l'écart de taille. La contribution du silt à la stabilité d'une terre est due à sa friction interne. Les films d'eau inter-particules confèrent un certain degré de cohésion aux terres silteuses. Du fait de leur perméabilité élevée, les terre silteuses sont très sensibles au gel. Le gonflement et le retrait sont notoires à petite échelle.

Note: Le terme « silt » est réservé à la fraction granulaire, tandis que le terme "limon" détermine une famille de terre spécifique.

5-Argiles

La taille des particules d'argile est inférieure à 0,002 mm (2μ). Les particules d'argile diffèrent de celles des autres fractions de la terre par leur constitution chimique et leurs propriétés physiques.

Chimiquement, ce sont des aluminosilicates hydratés formés au cours du processus de lessivage des particules grossières de minéraux rocheux primaires.

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

6-Colloïdes

Les éléments sableux sont souvent enrobés dans une sorte de pâte collante qui les réunit en agrégats. Cette pâte collante est constituée de "colloïdes", dont les dimensions sont inférieures à 2μ . Parmi ceux-ci, certains proviennent de l'altération de la roche mère.

Ce sont les colloïdes minéraux, dont le principal est l'argile. L'argile n'est pas le seul colloïde minéral. Elle est souvent mélangée à des particules de quartz très fines (1 à 2μ), à de la silice plus ou moins hydratée, à des cristaux de calcaire très fins et des colloïdes magnésiens et à des oxydes de fer et d'alumine colloïdaux appelés sesquioxydes (ses qui signifie: un demi de plus. En effet, dans le Fe_2O_3 chaque Fe a un demi O de plus que dans FeO). D'autres colloïdes proviennent de la décomposition des matières organiques.

Ce sont les colloïdes organiques: l'humus et les colles bactériennes.

3.7 Argiles¹

3.7.1 Origine

C'est l'altération chimique des roches et plus exactement des minéraux silicatés (feldspath, micas, amphibole, pyroxène ...) qui est à l'origine des argiles.

3.7.2 Structure

Les grosses molécules d'argile (ou micelles) sont de fins cristaux de forme irrégulière ou hexagonale. Cette dernière forme est la plus banale mais il en existe d'autres: des plaquettes hexagonales ou pseudo-hexagonales, des fibres cylindriques ou tubulaires creuses, des tablettes épaisses ou des disques.

Les micelles d'argile sont constituées de feuillets, d'où le nom de phyllite donné aux minéraux argileux; comme les micas, ils font partie du groupe des phyllosilicates.

Chaque micelle est composée de plusieurs dizaines ou centaines de feuillets dont la structure détermine celle des minéraux ainsi que les propriétés proches de celles du cristal, entre autres les propriétés absorbantes analogues à celles des colloïdes.

Ces feuillets ont une constitution chimique qui varie selon le type d'argile et l'état d'hydratation ainsi que leur épaisseur et leur écartement: de 7 à 20 Angstréim ($1 \text{ \AA} = 1$ millionième de mm). Leur dimension s'étage de 0,01 à 1 micron.

Certains feuillets sont constitués de silice (atomes de silicium entourés d'atomes d'oxygène), d'autres d'alumine (atomes d'aluminium entourés d'atomes d'oxygène et de groupements OH).

Mais il existe d'autres argiles dont la base n'est pas Si et Al mais Si et Mg ou Si et Fe. Toutefois les silicoalumineux représentent 74 % de l'écorce terrestre et l'on s'en tiendra à ceux-ci.

C'est l'arrangement des oxygènes et des hydroxyles qui détermine la structure des minéraux argileux, à l'instar de la plupart des silicates. Ceux-ci peuvent être situés dans des cavités tétraédriques ou octaédriques.

La physique et la chimie des argiles sont très complexes car les minéraux argileux sont notamment sujets à d'innombrables phénomènes électriques

3.7.3 Principales espèces

Il existe plusieurs familles de minéraux argileux qui rassemblent des dizaines d'espèces. Mais ce sont trois grands types d'argiles dont la présence dans les sols est la plus fréquente: la kaolinite, l'illite et la montmorillonite.

¹ Pour la science. *Les phénomènes naturels*. Paris, Belin, 1981.

1 - Kaolinite

Les feuillets ont une structure composée d'une couche de tétraèdres d'oxygène à cœur de silicium et d'une couche d'octaèdres d'oxygène (ou hydroxyde) à cœur d'aluminium. La kaolinite ne présente des charges négatives qu'en bordure des feuillets et sa capacité de fixation d'ions est faible. La distance interfoliaire est fixe, elle est de 7 Å. L'épaisseur des cristaux est de 0,005 à 2 μ . La surface externe SE est de 10 à 30 m²/g; la surface interne SI = 0. La kaolinite est plutôt stable au contact de l'eau.

2- Illite

C'est une structure à trois couches: une couche octaédrique, principalement alumineuse entre deux couches tétraédriques principalement siliceuses. Des ions Mg ou Fe peuvent remplacer en partie Al dans la couche alumineuse, des ions Al se substituent à Si dans la couche siliceuse; ainsi le feuillet est non saturé, les charges négatives sont équilibrées par des ions K qui unissent les feuillets.

La distance interfoliaire est de 10 Å. l'épaisseur des cristaux de 0,005 à 0,05 μ . SE est de 80 m²/g et SI de 800m²/g. L'illite n'est pas très stable au contact de l'eau: gonflement

3- Montmorillonite

La structure est similaire à celle de l'illite, mais on observe des substitutions dans la couche octaédrique d'alumine: les ions Al peuvent être permutés par Mg, Fe, Mn, Ni... Les feuillets ne sont pas électriquement neutres et faiblement liés et les ions interfoliaires ne sont pas des ions K Ce sont des cations échangeables (Na, Ca) et des molécules d'eau. Les feuillets peuvent s'écarter de 14 à 20 Å. L'épaisseur des cristaux est de 0,001 à 0,02 μ ; SE est de 80 m²/g et SI de 800 m²/g.

Les montmorillonites ne sont pas stables au contact de l'eau: très gonflantes.

4 -Autres

Il existe un grand nombre d'autres argiles, comme chlorite, muscovite, halloysite, vermiculite, sepiolite, attapulgit, etc., et les interstratifiés, qui sont des combinaisons complexes de plusieurs argiles.

3.8 Propriétés et classification du matériau terre¹

D'une terre à une autre terre. Les propriétés peuvent être très variables. Elles dépendent de la nature du mélange complexe entre les différentes fractions granulaires. Selon la quantité de cailloux, de graviers, de sables, de silts, d'argiles, de colloïdes, de matières organiques, d'eau et de gaz, les propriétés de la terre sont changeantes. C'est souvent la fraction dominante d'une terre qui régit les propriétés fondamentales du matériau.

3.8.1 Propriétés à caractère chimique

Elles dépendent de la constitution chimique des composants de la terre. Parmi les éléments, les plus influents du point de vue chimique sont notamment les sels, qu'ils soient solubles ou insolubles. La salinité élevée d'une terre peut induire des propriétés chimiques très marquées.

¹ **CRAterre**, TRAITÉ DE CONSTRUCTION EN TERRE Copyright© 2006, Éditions Parenthèses - 72 cours Julien, 13006 Marseille

Ces propriétés sont également tributaires de la nature minéralogique des minéraux et de leur chimie constitutive, de la nature et de la quantité des matières organiques: ces composants instables. en cours d'évolution chimique et biochimique, peuvent faire évoluer la structure même de la terre en produisant des précipités de différente nature, des colloïdes et des sortes de pâtes collantes humifères et bactériennes.

De même, la quantité en oxydes de fer, de magnésium ou de calcium, en carbonates et en sulfates peut caractériser la terre d'un point de vue chimique. Le sulfate de calcium, particulièrement gonflant à l'hydratation peut être très néfaste; sa solubilité dans l'eau (eau sélitineuse) peut augmenter la sensibilité des argiles. Les oxydes métalliques peuvent être très influents. Par exemple, dans une terre latéritique, l'oxyde de fer peut accélérer certains procédés de solidification. De même, une abondance d'oxyde d'aluminium peut réduire la résistance avec l'âge.

A noter aussi l'importance de la mesure du pH d'une terre qui précise la concentration d'ions H⁺ ou OH⁻. Et sa nature acide ou basique.

3.8.2 Propriétés à caractère physique

Elles sont nombreuses et permettent de préciser la qualité d'une terre pour la construction.

- 1) **Couleur:** le spectre de couleur des terres est très large et peut aller du blanc au noir en passant par le beige, l'ocre jaune ou rouge, l'orangé, le rouge, le brun, le gris et même le bleu et le vert.
- 2) **Ameublissement:** c'est l'aptitude d'une terre à être facilement brisée. Les terres à fraction sableuse dominante se brisent facilement alors que les terres très argileuses s'ameublissent très difficilement.
- 3) **Stabilité structurale:** c'est la solidité de la structure de la terre qui précise sa résistance aux agents de dégradation.
- 4) **Adhérence:** c'est l'aptitude d'une terre, pour un certain degré d'humidité. à adhérer aux objets, notamment aux outils. Elle augmente avec l'humidité jusqu'à un maximum pour ensuite diminuer.
- 5) **Masse volumique apparente :** elle concerne la terre dans son ensemble et s'exprime en kg/m³.
- 6) **Masse volumique spécifique:** c'est la densité des constituants de la terre. Elle s'exprime en kg/m³; par exemple, les micas et les feldspaths ont une densité spécifique de 2600 à 2700 kg/m³. les sables de 2600 à 3000 kg/m³. les argiles. de 2500 kg/m³.
- 7) **Teneur en eau:** c'est la quantité d'eau contenue dans la terre. Soit à l'état naturel, soit après manipulation et séchage. Elle s'exprime en % pondéral et définit les différents états hydriques de la terre. Il s'agit d'eau que l'on peut éliminer par évaporation.

- 8) **Porosité:** ou indice des vides; c'est le volume des vides de la terre exprimé en % du volume total. Il y a une relation entre la porosité et la densité spécifique; par exemple, pour un limon de densité spécifique de 1600 à 1800 kg/m³, la porosité est inférieure à 40%.
- 9) **Pouvoir absorbant:** c'est la propriété que possèdent l'argile, l'humus et le complexe argile-humique de retenir à leur surface des ions électropositifs surtout, mais également électro négatifs, provenant de la solution de la terre. La fixation des ions s'explique par les charges négatives et positives entourant les feuillets d'argile et les micelles d'humus. Pour 100 g. le nombre de charges positives qui peuvent être absorbées par la kaolinite est de 20 à 90 x 10²⁰, de 120 à 240 x 10²⁰ pour l'illite et de 360 à 500 x 10²⁰ pour les montmorillonites.
- 10) **Potentiel capillaire:** ou pF qui mesure la force de succion de l'eau par la terre et qui s'exprime en g/cm³ ou en atmosphères, pF est le logarithme décimal de cette pression. Plus le sol est humide plus la succion est élevée et moins l'eau est retenue dans la terre. Plus la terre est sèche plus la succion augmente.
- 11) **Diffusion capillaire:** c'est le déplacement de l'eau retenue dans la terre.
- 12) **Perméabilité:** c'est la vitesse de percolation qui dépend de la texture mais surtout de la structure. Elle s'exprime en cm/heure; par exemple. un limon argileux peu perméable donne une mesure de 0.6 cm/h et une terre sableuse très perméable de 50 à 60 cm/heure (terres non remaniées).
- 13) **Chaleur spécifique:** c'est la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de masse de la terre de 1° C. Elle s'exprime en kcal/kg° C; par exemple l'eau a une chaleur de 1 kcal/kg° C. le sable de 0, 191. L'argile de 0,23.
- 14) **Surface spécifique:** c'est une mesure qui s'applique surtout aux argiles et qui permet d'apprécier l'activité chimique d'échange d'ions. Elle s'exprime en cm²/gramme; par exemple, les gros sables ont une surface spécifique de 23 cm²/g. les limons de 454 cm²/g et les argiles jusqu'à 800 m²/g.
- 15) **Capacité totale d'échange (T):** c'est la quantité maximale de cations de toutes sortes qu'une terre est capable de retenir. Cette mesure représente le total des charges négatives de la terre disponibles pour la fixation de cations métalliques ou d'ions H⁺. Elle s'exprime en milliéquivalent ou m.e.q. pour 100 g de terre. L'équivalent d'un corps est le rapport masse atomique/valence de ce corps; le m.e.q. en est le, millième. Exemple: une terre qui a une T de 30 m.e.q. pourrait retenir en Ca: 30 m.e.q. x 40/2 = 600 mg de Ca/ 100 g de terre. La valeur de T d'une terre est stable car elle dépend du taux et de la nature des colloïdes qui ne peut beaucoup varier. Test élevé pour les sols argileux et humifères et faible pour les sols sableux.

16) **Taux de saturation (V)**: c'est le rapport: somme des bases échangeables/ capacité totale d'échange. On l'exprime en%: $V = S/T \times 100$. Ce taux est très variable d'une terre à une autre. Il dépend de la richesse en cations de la roche mère, de la fréquence et de l'importance de l'apport de cations (surtout Ca) et de l'importance de lessivage. Les terres riches en calcaire actif ont un taux V voisin de 80 à 90 % et les terres formées sur roche mère sableuse ont un taux V souvent inférieur à 20 %.

17) **Retrait linéaire**: c'est la mesure de réduction de taille d'une masse de terre argileuse façonnée après séchage qui s'exprime souvent en % par rapport à la taille initiale. Les kaolinites ont un retrait linéaire au séchage de l'ordre de 3 à 10 %, les illites de 4 à 11 % et les montmorillonites de 12 à 23%.

18) **Résistance sèche** : la résistance à la rupture transversale à l'état sec peut atteindre des valeurs très variables selon les argiles et dépend de la distribution et de la taille des particules, de leur perfection et de leur cristallinité mais aussi de la nature des ions échangeables.

Les kaolinites ont une résistance de l'ordre de 0,7 à 50 bars. les illites de 15 à 70 bars et les montmorillonites de 20 à 60 bars.

3.8.3 Propriétés fondamentales

L'étude exhaustive des propriétés de la terre n'est pas toujours nécessaire. Il convient surtout de connaître quelques propriétés fondamentales qui sont:

1 - Granularité: ou texture de la terre qui est la quantité centésimale en cailloux. Gravier, sables, limons, argiles et colloïdes.

2 - Plasticité : ou aptitude de la terre à être modelée.

3 -Compressibilité : ou potentialité de la terre de réduire au maximum sa porosité.

4 - Cohésion : ou propriété des particules de la terre à rester associées.

✓ **Granularité** :

Encore nommée texture d'une terre, elle représente la teneur centésimale en fractions de grains différents mesurées en pourcentages. La texture d'une terre se mesure par analyse granulométrique pour les fractions de grains grossiers: cailloux, graviers, sables et limons et par sédimentométrie pour les fines argileuses. La classification des fractions de grains adoptée par un grand nombre de laboratoires et référent aux normes (A.S.T.M., AFNOR) est la suivante:

>V: CAILLOUX:	200 mm- 20 mm
V: GRAVIERS:	20 mm - 2 mm
IV: SABLES GROSSIERS:	2 mm- 0,2 mm
III: SABLES FINS:	0,2 mm - 0,06 mm
II: SILTS:	0,06 mm - 0,02 mm
IIA: SILTS FINS:	0,02 mm - 0,002 mm
I: ARGILES:	0,002 mm - 0 mm

La représentation de la granularité d'une terre est une courbe granulométrique portée sur le diagramme "G".

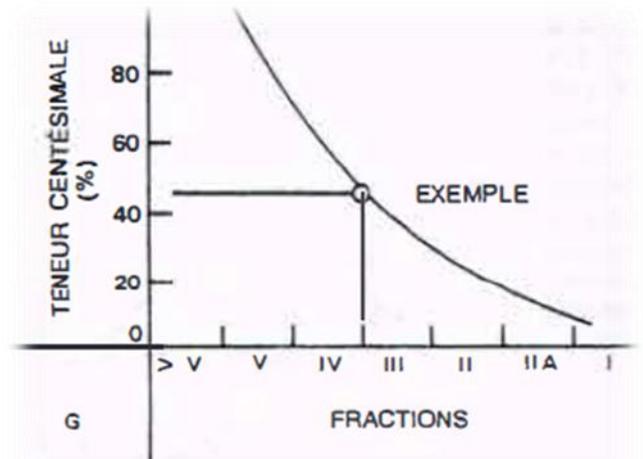


Figure 28: diagramme de granularité "G".

Source : CRAterre, TRAITÉ DE CONSTRUCTION EN TERRE

✓ Plasticité

La plasticité définit la propriété de la terre à subir des déformations sans réaction élastique notable caractérisée par une fissuration ou une pulvérisation.

La plasticité d'une terre ainsi que les limites entre différents états de consistance sont déterminées par les mesures des limites d'Atterberg.

Elles s'effectuent sur la fraction "mortier fin" de la terre (0 des particules < 0,4 mm). La quantité d'eau, exprimée en pourcentage, qui correspond à la limite de transition entre l'état de consistance fluide et l'état plastique est nommée Limite de liquidité (LI). Entre l'état plastique et l'état solide, la transition est nommée Limite de plasticité (Lp). A LI, le sol commence à manifester une certaine résistance au cisaillement. A Lp, la terre cesse d'être plastique et devient cassante.

L'indice de plasticité (Ip) égal à LI - Lp précise la plage de comportement plastique de la terre.

La combinaison de LI et de Lp précise la sensibilité de la terre aux variations d'humidité.

Les propriétés plastiques d'une terre sont représentées sur le diagramme de plasticité "P".

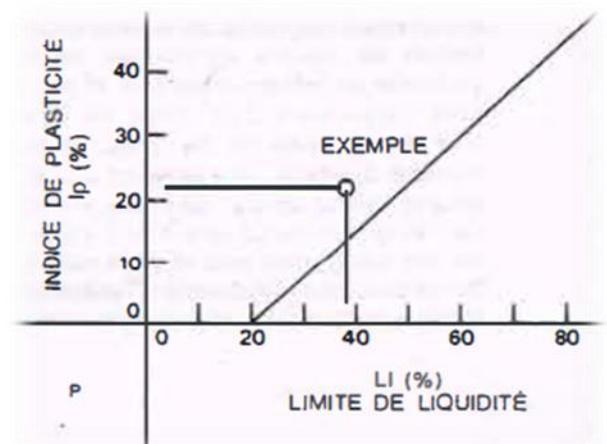


Figure 29 : diagramme de plasticité "P"

Source : CRAterre, TRAITÉ DE CONSTRUCTION EN TERRE

✓ 6.3.3 - Compressibilité

La compressibilité d'une terre définit son aptitude à se laisser comprimer au maximum pour une énergie de compactage et un taux d'humidité donnés (teneur en eau optimale ou T.E.O.). Lorsqu'un volume de terre est soumis à l'action d'une force, le matériau est comprimé et l'indice des vides décroît. Plus la densité d'une terre peut être augmentée, plus sa porosité est bloquée et moins l'eau peut avoir l'occasion d'y pénétrer. Cette propriété résulte de l'imbrication plus étroite des particules qui réduit les risques de perturbation de la structure sous l'action de l'eau. La compressibilité d'une terre est mesurée par l'Essai Proctor. On la représente sur le diagramme de compressibilité "C" où sont mis en relation la Teneur en Eau Optimale et la Densité Sèche Optimale, pour une énergie de compression donnée.

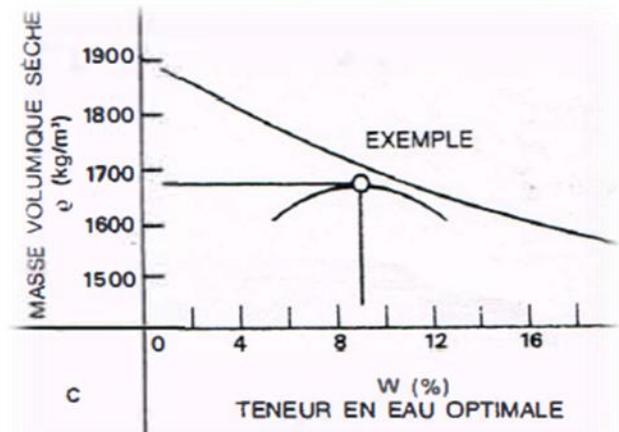


Figure 30 : diagramme de compressibilité "C"

Source : CRAterre, TRAITÉ DE CONSTRUCTION EN TERRE

✓ 6.3.4- Cohésion

La cohésion d'une terre exprime la capacité de ses particules à se maintenir ensemble lorsque l'on exerce sur le matériau une contrainte de traction. La cohésion d'une terre dépend des caractéristiques de collage ou de cimentation de son mortier grossier (fraction de grains de $0 < 2$ mm) qui lie les grains inertes entre eux.

Cette propriété est donc tributaire de la quantité et de la qualité collante des argiles.

On peut classer les mortiers grossiers de la façon suivante:

- A : Mortier Sableux
- B : Mortier Maigre
- C : Mortier Moyen
- D : Mortier Gras
- E : Argiles.

La cohésion se mesure par l'Essai de Traction à l'état humide ou encore dénommé à l'Essai du "8". La cohésion d'une terre est représentée sur un diagramme de résistance à la traction "T".

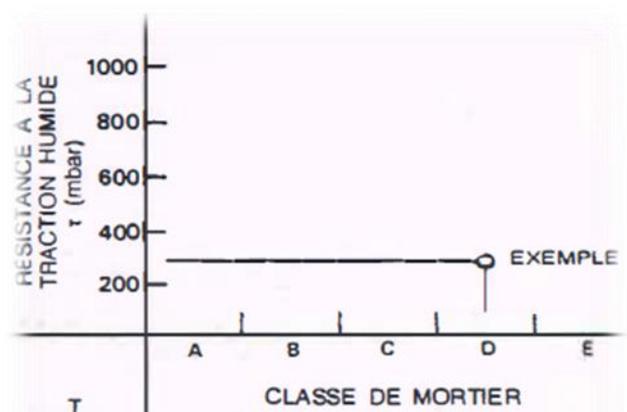


Figure 31: diagramme de résistance à la traction "T"

Source : CRAterre, TRAITÉ DE CONSTRUCTION EN TERRE

4.1.1 Classification géotechnique¹

La classification géotechnique est la mieux adaptée à la construction en terre. Elle dépend de :

- La granularité (directement);
- La plasticité (directement);
- La compressibilité (indirectement);
- La cohésion (indirectement) ;
- La quantité de matières organiques.

Elle est indépendante de:

- L'état hydrique de la terre;
- La densité de la terre in situ ;
- Les constituants gazeux et liquides.

Il existe de nombreux systèmes de classification géotechnique. Leurs variantes conduisent à des confusions. En principe, il est préférable de s'en référer aux classifications régionales adaptées aux conditions locales. Aucun système n'a été spécifiquement adapté à la construction en terre. Les systèmes qui sont reproduits ici sont parmi les plus intéressants. Ils ont été légèrement simplifiés et adaptés aux essais spécifiquement recommandés pour la construction en terre.

4.1.2 Classification pédologique²

La classification pédologique moderne prend en compte l'ensemble du profil d'un sol et met l'accent sur le processus de formation et d'évolution en s'appuyant sur:

- le degré d'évolution et de différenciation du profil ;
- le mode de formation et d'altération des argiles ;
- les processus physico-chimiques de base qui sont à l'origine du sol, souvent liés aux matières organiques.

La classification de Ph. Du chaufour (Centre de Pédologie du CNRS, France) traduit cette dernière tendance actuelle. On peut trouver des tableaux de correspondance entre cette classification et d'autres, notamment la classification FAO dans la littérature spécialisée.

¹ **CRAterre**, TRAITÉ DE CONSTRUCTION EN TERRE Copyright© 2006, Éditions Parenthèses - 72 cours Julien, 13006 Marseille

² **CRAterre**, TRAITÉ DE CONSTRUCTION EN TERRE Copyright© 2006, Éditions Parenthèses - 72 cours Julien, 13006 Marseille

Classification de Du chaufour ¹(présentation simplifiée)

Division 1 :

Sols dont la pédogenèse est très liée à l'évolution des matières organiques (généralement sous climats tempérés et froids).

Division 2 : Sols dont la pédogenèse:

- est assez indépendante de l'évolution des matières organiques ;
- est très liée au contraire au climat chaud, plus ou moins humide et au comportement particulier des oxydes de fer et d'alumine.

Division 3:

Sols dont la pédogenèse est liée à des conditions locales de station

4.1.3 Terres spécifiques

Il existe des terres particulières dont les dénominations sont spécifiques à chaque discipline: agriculture, géotechnique ou pédologie. Les appellations suivantes sont les plus fréquemment employées dans la littérature.

1 - Latérites²

Dans les régions tropicales et subtropicales humides, la désagrégation de la roche mère et l'altération chimique associée au lessivage et à l'évaporation conduisent à une accumulation de sesquioxides dans l'horizon B (surtout de fer). Les sols latéritiques sont caractérisés par une désagrégation très avancée et par une concentration de ces hydroxydes métalliques.

Certaines latérites sont plus riches en composés alumineux: ce sont les bauxites. Les sols latéritiques n'ont qu'une faible couche de matière organique.

Suivant leur situation, les latérites sont de consistance tendre, sableuse ou argileuse, ou au contraire dure et caillouteuse. Leur durcissement rapide à l'air est caractéristique. Au-delà de ces indications générales, les spécialistes n'ont pas encore donné une définition exacte et unique des latérites. Le rapport chimique

$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 1,33$ s'est longtemps imposé quoique souvent contesté. On admettait récemment que le rapport pouvait être voisin de 2, le plus souvent inférieur mais aussi parfois supérieur. En pédologie, le terme latérite, trop général, est remplacé par des dénominations multiples qui reflètent la spécificité des sols: sols fersiallitiques, ferrugineux ou ferralitiques.

Encore aujourd'hui, la définition généralement retenue est celle de Buchanan (1807), qui a d'ailleurs suggéré le nom de latérite (du latin later: brique).

¹ Duchaufour, P. *Atlas écologique des sols du monde*. Paris, Masson, 1976.

² Maignien R. *Compte rendu de recherches sur les latérites*. Paris, UNESCO, 1966.

On retiendra cependant ici la définition présentée par Mukerji : "Les latérites sont des terres très altérées, qui contiennent des proportions importantes mais très variables d'oxydes de fer et d'aluminium, ainsi que du quartz et d'autres minéraux. On les trouve abondamment dans la ceinture tropicale et subtropicale, généralement juste en dessous de la surface des immenses plaines ou clairières, dans des régions avec une précipitation importante. Leur caractéristique d'ameublissement naturel varie du conglomérat compact à la terre friable. La couleur est très variable: ocre, rouge, brune, violette et noire. Le matériau est facile à découper, et il durcit très vite à l'air, et devient assez résistant aux agents météorologiques."

Ce sont donc les propriétés d'induration (durcissement rapide et important) qui sont essentielles. Pour la Plinthite, une variété de latérite, cette induration est rapide, forte et irréversible. Elle est assez rare (Inde, Burkina Faso par exemple). Selon la richesse en fer de la roche mère, l'humidité du climat et la topographie, le degré de rubéfaction (lente déshydratation des oxydes de fer et cristallisation sous forme de Fe_2O_3 : hématite), la couleur des latérites est variable : presque noire, rouille, rouge foncé et rouge en cas de dessèchement extrême (hématite, Fe_2O_3), ocre rouge si

Le dessèchement est plus modéré (goethite, Fe_2O_3 , H_2O). La stilpnosidérite (Fe_2O_3 , $2\text{H}_2\text{O}$) donne une couleur jaune ocre, en milieu humide. La présence prépondérante d'aluminium donne des couleurs rouge clair, rose-blanc et ocre. La gibbsite $\text{Al}(\text{OH})_3$, la boémite $\text{AlO}-\text{OH}$ et la diaspore AlO_2-H sont plus ou moins incolores ou grisâtres et transparentes. Les caractéristiques physiques des latérites sont très variables. La masse volumique varie de 2 500 à 3 600 kg/m^3 . Leur dureté s'élève avec la concentration d'oxydes de fer et va de pair avec une couleur de plus en plus foncée, et l'induration avancée peut conduire à la formation de carapaces. Ces cuirasses ferrugineuses peuvent être épaisses de quelques centimètres à plus d'un mètre.

2 - Terra rossa et terra fusca

Ce sont des argiles de très lente décarbonatation formées sur des couches épaisses de calcaire dur et pauvre en argile, avant la dernière glaciation, quand dominait le climat méditerranéen ou même tropical. La terra rossa, rouge, se distingue de la terra fusca, brune, par sa rubéfaction. La terra rossa se rencontre dans la plupart des régions méditerranéennes. Plus au Nord, ce sont des sols fossiles qui se brunifient (faire apparaître la couleur brune de l'association argile-fer) progressivement en surface. Ces sols brunifiés gardent leur teinte rouge en profondeur.

3 - Terres noires tropicales

Ces sols se rencontrent dans les régions tropicales humides et se développent sur des roches volcaniques (basalte). Leur nom plus connu est celui de "black cotton soils", dérivé de leur couleur sombre (noir ou gris et brun foncés) et du fait que ces sols sont souvent cultivés de coton (Inde). Ils sont riches en carbonate de calcium et très argileux. Les argiles dominantes sont des montmorillonites avec une capacité d'échange d'ions très élevée. Jusqu'à 90 o/o des argiles peuvent avoir un diamètre inférieur à 0,15 μ . Le gonflement impressionnant à l'humidité et un fort retrait au séchage sont notoires. A l'état sec, ces sols sont très durs. En Inde, ils couvrent près de 500 000 km^2 . On les rencontre aussi en Argentine du Nord et dans plusieurs pays d'Afrique. Au Maroc, ils sont nommés "tirs" (plaines du Gharb et du Loukkos). Les black cotton soils ont des limites de liquidité LI de l'ordre de 35 à 120 % et des indices de plasticité Ip de 10 à 80 % et plus. Leur retrait linéaire va classiquement de 8 à 18 %. A titre d'exemple, les "tirs" marocains ont une LI de 50 à 70 % et un Ip de 30 à 50 % ; leur retrait est de 10 à 12 %. Au Soudan, les "Badobe" ont une LI de 47 à 93 %, un Ip de 13 à 58 % et un retrait de 8 à 18 %.

4- Loess

C'est un dépôt éolien, fin et homogène, de texture silteuse, pauvre en sables, contenant 10 à 20 % de carbonate de calcium. Le matériau originel provient des régions désertiques (arraché au désert de Gobi pour la Chine) ou des régions périphériques des grands glaciers: dépôts morainiques (en Europe). Les couches de loess sont épaisses de quelques dizaines de cm à 1 ou 2 dizaines de m. Le loess est très friable.

On le creuse sans difficulté (habitat creusé en Chine du Nord).

5 - Roches argileuses

Elles forment la majorité des roches sédimentaires (80 %). Les argiles plastiques du groupe des phyllosilicates en sont le meilleur exemple. Mais ce sont aussi les Shales, roches silice-alumineuses plus connues sous le nom de schistes ou d'ardoises qui sont non plastiques à l'état humide. C'est encore le Mari, minéraux argileux mélangés à des particules carbonatées.

Quand le liant de ces roches est de l'argile, on est en présence de terre. Lorsque c'est un ciment naturel (tuf calcaire par exemple), il s'agit d'une roche. Cette distinction importe car un même terme régional peut désigner des matériaux très différents. Au Mexique, le terme "Tepetate" désigne autant le "Calcrete" (graviers cimentés par du tuf calcaire) que des terres ou des roches très calcaires, ou de la craie. De même aux U.S.A, avec les termes "Caliche" ou "Chalk" ou en Tunisie avec la "Torba". D'autres termes portent la même confusion : marne, tuf, craie, mergel, Bhata, Dhandla ... On observe souvent de fortes teneurs en carbonate de chaux (CaCO_3), de 50 à 75 % et des teintes variant de l'ocre au blanc. L'indice de plasticité diminue avec l'augmentation des carbonates. Par exemple, en Tunisie, on a des Ip de 20 % pour 75 % de CaCO_3 et de 13 o/o pour 90 % de CaCO_3 .

La granularité est difficile à déterminer car ces terres sont en induration et se désintègrent mal dans l'eau. Elles demeurent cependant assez friables à l'état sec.

6 - Terres salines

Elles sont riches en chlorure de sodium (NaCl) ou en sulfate de sodium (Na_2SO_4). On les rencontre surtout sous climat sec, semi-désertique, steppique ou tropical sec où la forte évaporation supprime tout drainage climatique. On les rencontre aussi sur un matériau enrichi en sel ou à proximité d'une nappe salée. Sous climat aride, ces sols sont proches des grandes dépressions salées subdésertiques ("Sebkhas" ou "Chotts" d'Afrique du Nord, "Playas" d'Amérique du Nord, "Takyr" d'Asie Centrale) et dans les grandes vallées irriguées: Egypte, Libye, Israël, Syrie, Irak, Turquie. Sous climat humide les terres salées n'existent qu'à proximité de la mer (polders des climats tempérés, mangroves en climat équatorial).

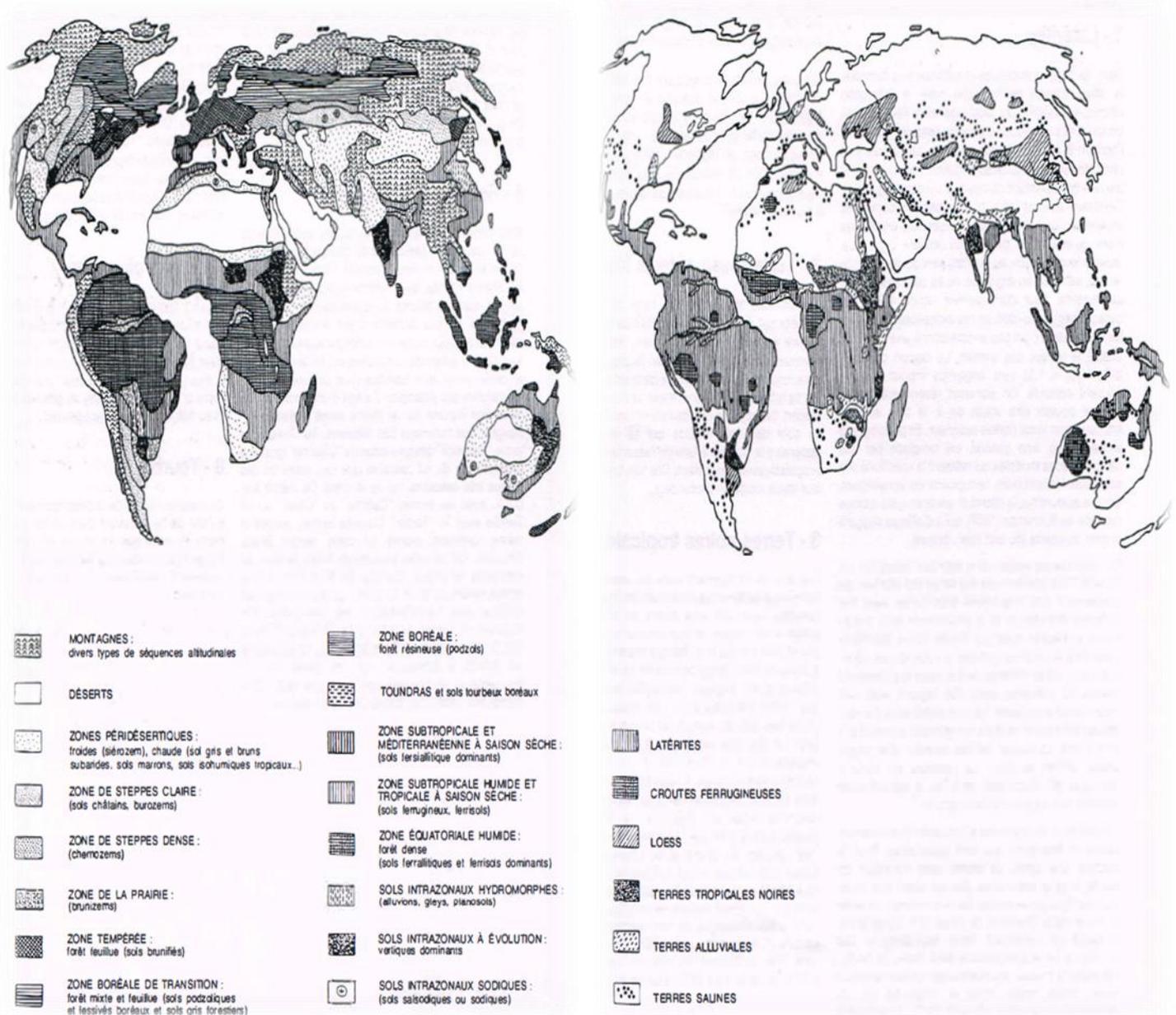
7 - Terres alluviales

Elles bordent les rivières et les fleuves dans des vallées plus ou moins larges. Ces terres riches en minéraux en cours d'altération sont de texture variable, généralement filtrante, fine en surface (sables fins, limons, silts) et plus grossière en profondeur. Leur couleur varie de l'ocre brun (sur bourrelets) au gris (en zone inondée) et au noir (en zone marécageuse).

8-Tourbe

Ce matériau résulte de la décomposition des végétaux à l'abri de l'air, souvent dans un lac peu profond ou dans un marécage. La tourbe est généralement de couleur brun foncé et contient des fragments végétaux, nettement identifiable, et très peu de matières minérales.

4.1.4 Localisation des terres



**Figure 32: Carte des principaux sols
- pédologique -**

Source: Bunnnett. R.B. *Physicat geography in diagrams*. London, Longman, 1977.

**Figure 33: Carte des terres
- spécifique -**

Source ; Bunnnett. R.B. *Physicat geography in diagrams*. London, Longman, 1977.

Partie II

Sélection et identification d'une terre

Chapitre 4

Prendre connaissance de la terre objet d'étude

Chapitre 4 : Prendre connaissance de la terre objet d'étude

4.1 Sélection d'une terre crue locale

La sélection d'une terre crue pour la construction ne se fait pas hasardement, il faut pour ceci inscrire notre recherche et nos critères de choix dans un ensemble de paramètres :

- 1) La teneur en argile doit être satisfaisante plus de 20% d'argile est requise pour assurer la matière liante.
- 2) La terre choisie doit prouver son utilisation au paravent dans un domaine de construction .
- 3) Cette terre doit être disponible dans notre territoire et facile à extraire.



Figure 34: djbel boughachoua ; frenda , source :auteur

A travers ces indications nous avons effectué une visite à la briqueterie de frenda en sachant que la provenance de la terre argileuse est localisée à la proximité de cette ville , cette terre est utilisée pour la fabrication de la brique creuse .

4.2 Pré-identification et analyses visuelles

4.2.1 La pré-identification de la composition granulométrique

Etant donné que la terre crue apportée pour notre étude émanant de la briqueterie de Frenda extraite du gisement de djebel BOUGHACHOUA, on sait préalablement qu'elle est de nature argileuse, néanmoins l'identification du sol reste une étape dument nécessaire avant toute confection et utilisation ; ces identifications vont certainement nous informer sur plusieurs paramètres tel que la maniabilité, le pourcentage des particules fines, les quantités d'eau nécessaires pour le gâchage, ainsi que les corrections éventuellement nécessaires à entreprendre.

Cette identification passe par trois étapes ; une analyse préliminaire ou pré identification de la composition granulométrique de la terre, l'analyse visuelle des caractéristiques mécaniques et l'identification expérimentale.

I. La pré-identification de la composition granulométrique : empirique ; elle nous permet de prendre connaissance de notre terre sur site, et permettre l'appréciation de certains paramètres pour confirmer ou infirmer l'aptitude de la terre pour l'emploi dans le domaine de la construction, cette identification ne nécessite aucun matériel expérimental, et qui nous met dans une position de simulation aux conditions d'extraction et de confection de l'adobe rencontrées lors des pratiques ancestrales traditionnelles.

A- Examen visuel¹

Objectif : l'objet de cet examen est d'apprécier l'importance de la fraction fine des particules de la terre et de conclure le comportement de cet échantillon qui reste subordonné à l'indice de vide minimum et le paramètre de porosité, et de connaître approximativement le degré de retrait d'une pate confectionné à base de ce matériau.

Procédures de le l'examen : on enlève les gros cailloux, les graviers et le gros sables, puis on évalue le pourcentage des fines, on note que les fractions fines sont constituées par des particules inférieures à 0,08 mm ce qui se trouve à la limite de visibilité de l'œil nu.

Constatations : présence de moyenne fraction de fines.

Interprétation : cette terre après concassage peut avoir un indice de vide plus ou moins modéré ce qui rend la pate moins maniable mais résistante, le retrait de la pate attendu peut être moyen à faible, un bon indice d'aptitude de notre terre à être utilisée.

B- Examen de l'odeur¹

Objectif : sentir la terre afin d'apprécier si elle est de nature organique. Ce paramètre est important car dans le sol, la matière organique assure de nombreuses fonctions (fourniture d'éléments minéraux nutritifs aux plantes, rétention d'eau, agrégation des particules du sol, nourriture d'une grande diversité d'organismes vivant dans le sol, etc.). Ce qui peut influencer sur le devenir des adobes produits par ce matériau, L'humus et l'argile sont associés en un complexe : le Complexe Argilo-Humique. L'humus protège l'argile : en retenant l'eau, il évite sa dispersion. L'argile protège l'humus de l'action des micro-organismes en ralentissant sa minéralisation. Le tout forme un colloïde qui permet de stabiliser un sol. Donc plus le matériau contient de matière organique plus son aptitude est augmentée.

Procédures de le l'examen : on sent la terre, si elle évoque le moisi elle est de nature organique.

Constatations : l'analyse visuelle et l'examen de l'odeur ne témoigne pas une présence mesurable d'une matière organique.

Interprétation : notre terre ne contient pas de matière organique du fait qu'elle est extraite sur une profondeur considérable.

¹ CRATerre traité de construction en terre. Édition juin 1995

C- Essai de morsure¹

Objectif : l'objet de cet essai est de déterminer si la terre est **sableuse 'siliceuse'** (Les sols sableux ou **siliceux**, formé de grains de silice plus ou moins grossiers, le sable ne s'agglomère pas et donne au sol une structure aérée. Ces sols contiennent entre 70 et 80% de sable, ils sont friables et souples.)², **silteuse** (Ces sols diffèrent des sols sableux par leur plus grande tendance à former une croûte, souvent très dure. S'ils sont trop travaillés, ils peuvent devenir compacts ce qui réduit leur capacité à laisser l'eau s'infiltrer lors des périodes humides. Et peuvent stocker des volumes considérables d'eau.) Ou **argileuse** (Les sols dits « argileux » comprennent les limons (silts) et les argiles qui sont par définition des sols à grains fins dont plus de 50 % de leur poids sec est constitué de particules inférieures à 0,075 mm. Leur consistance peut varier de très molle à dure. Ils sont caractérisés par des teneurs en eau habituellement élevées, ce qui les rend généralement compressibles, indépendamment de leur consistance. De plus, ils sont sensibles au gel et peuvent subir des variations de volume lors de modifications climatiques comme en période de sécheresse.)¹.

Procédures de le l'examen : on mord une pincée de terre et on l'écrase entre les dents, si la terre donne une sensation désagréable et si elle crisse elle est sableuse, si le crissement ne donne pas la sensation désagréable ; la terre est silteuse, par contre si on éprouve une sensation lisse et farineuse ou quand la pastille se colle quand on y applique la langue la terre est dans ce cas argileuse.

Constatations : la pincée est très collante et lisse.

Interprétation : la terre contient une très grande quantité d'argile

D- Essai de toucher¹

Objectif : l'objet de cet essai est de déterminer si la terre est sableuse, silteuse ou argileuse

Procédures de le l'examen : l'appréciation tactile de sol sur le terrain peut se faire en malaxant entre les doigts quelques 3 cm³ de terre fine en écartant au préalable toutes les particules grossières de l'échantillon prélevé, en sachant que :

- Les argiles peuvent se pétrir en pâte qui ne s'effrite pas, le pâte se colle un peu aux doigts, et qui peut même devenir très collant en y ajoutant de l'eau. A l'état sec, l'argile forme des blocs très durs et fortement cohérents, ne tachant pas les doigts, qu'il devient très difficile d'humecter au-delà de 40 % d'argile.
- Les sables grattent sous les doigts à partir de 0,1 mm. Si les sables sont dominants, il se peut que l'on n'arrive pas à confectionner une boulette ou un boudin. Les sables fins inférieurs à 0,1 mm ne grattent pas mais restent perceptibles par crissement à l'oreille (un limon humide sans sable ne crisse pas).
- Les sols riches en limons donnent, entre les doigts, des sensations d'onctuosité, le pâte est facilement malléable, s'écrasant par une pression faible. Les boudins se cassent vite à un fort diamètre. A l'état sec, le limon est poussiéreux, dessèche et tache les doigts ; des petits agrégats éclatent et se pulvérisent sous la pression des doigts.

¹ CRATerre traité de construction en terre. Édition juin 1995

² Revue info.RBQ avril 2006

Constatations : à l'état brute avant concassage le sol est constitué en sa quasi-totalité de petit blocs dure qui ne s'effritent pas sous un effort simple de la main, il ne tache pas les mains à l'état sec mais qui devient très collant en y ajoutant de l'eau.

Interprétation : notre terre est fort probablement constituée en sa totalité d'argile, la maniabilité difficile est son adhésion très forte au moules en bois le témoigne.

E-Le teste de boudin¹

Objectif : Afin de déterminer le % d'argile. On peut effectuer le test du boudin.

Procédures de le l'examen : il s'agit d'essayer de rouler l'échantillon de terre fine prélevé en un boudin de 5 à 10 mm de diamètre. Afin de réaliser ce test, il faut veiller à avoir une humidité suffisante mais non excessive pour permettre le pétrissage : si trop sec, rajouter de l'eau ; si l'horizon est gorgé d'eau, le malaxage entre les doigts provoque un rapide et relatif assèchement.

- Boudin impossible à fabriquer : moins de 10 à 12 % d'argile
- Roulé sur la paume de la main, le boudin se fragmente : moins 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 à 30 % d'argile

Constatations : le boudin est facilement modelé avec l'absence de fissure, son remodelage en anneau était impossible sans se briser.

Interprétation : la terre est argileuse et constituée de plus de 18% à 25% d'argile.



Figure 35 : essai de boudin. Source : auteur

Note : L'appréciation tactile de la texture est une opération subjective et les impressions ressenties sont dépendantes de facteurs tels que : l'état d'humidité, la teneur en matière organique,... Ainsi, des différences notables peuvent apparaître entre la dénomination texturale donnée sur le terrain et le résultat de l'analyse granulométrique. Ci-dessus quelques cas où il y a nette divergence :

- Un matériau riche en matières organiques humidifiées donne une impression limoneuse ;

¹ INSA TOULOUSE

- Certaines textures limono-sableuses (à sable très fin) sont ressenties différemment selon l'état d'humidité (plutôt comme sableuses à sec, plutôt comme limoneuses quand très humide).

F- Le test de sédimentation¹

Objectif : réaliser un teste simple de sédimentation sur le terrain, qui va apporter quelques précisions sur la variation de fractions texturales.

Procédures de le l'examen :

- Remplir $\frac{1}{4}$ d'un flacon de capacité d'un litre, transparent avec un fond cylindrique plat ; avec de la terre.
- Compléter les $\frac{3}{4}$ de volume avec de l'eau.
- Laisser reposer le contenu du flacon pour permettre une imprégnation par une trituration manuelle.
- Agiter vigoureusement le flacon en obturant son ouverture avec un couvercle ou avec la main.
- Laisser décanter le mélange sur base horizontale
- Répéter l'agitation et la décantation après une heure.
- On fait la constatation de la répartition de différentes couches.
- Après 08 heures on mesure les hauteurs de différentes couches par rapport à la hauteur totale des sédiments sans prendre en compte la hauteur d'eau claire.



Figure 36: test de sédimentation.

source auteur

4.2.2 L'analyse visuelle des caractéristiques mécaniques

Ces analyses simples, in situ nous permet d'identifier d'une manière grossière mais pertinente le comportement mécanique de la terre objet d'étude, et de connaître certains paramètres tels que l'adhésion, la résistance à sec et la cohésion des pattes, ceci va nous informer ainsi sur des corrections nécessaires pour obtenir la patte idéale et convenable pour mener à bien les essais de stabilisation des blocs en adobe.

A-Le teste de résistance à sec²

Objectif : connaître la résistance du matériau et son aptitude à être utilisé.

Procédures de le l'examen :

- Confection de deux pastilles de terre molle.
- Faire sécher les pastilles jusqu'à ce qu'elles soient totalement sèches.
- Casser la pastille de terre et la réduire en poudre en utilisant les deux doigts le pouce et l'index.
- Evaluer la résistance de la pastille et interpréter le résultat.

Constatations : la pastille se casse en appliquant un effort considérable, mais la réduire en poudre était impossible

Interprétation : notre terre témoigne la présence de l'argile presque pure.

¹ CRATerre traité de construction en terre. Édition juin 1995

² CRATerre traité de construction en terre. Édition juin 1995

B- Le teste de ressuage¹

Objectif : connaitre la réaction d'une boule argileuse vis-à-vis rétention et le dégagement de l'eau de gâchage.

Procédures de le l'examen :

- Confectionner une boule de «mortier fin» de 2 ou 3cm de diamètre.
- Mouiller la boule de façon a ce qu'elle se tienne sans coller aux doigts
- Aplatir la boule dans la paume de la main en extension horizontal et du tranchant de l'autre main, frapper vigoureusement la paume portant la boule aplatie pour en faire sortir l'eau, l'aspect de la terre peut être lisse, brillant ou gras.
- Presser ensuite la boule plate entre le pouce et l'index et observer les réactions, puis interpréter les résultats

Le sol contient de sable très fin ou silts grossiers si la Réaction est rapide qui ne dépasse pas les 5 à 6 coups pour faire venir l'eau à la surface, En pressant l'eau disparaît puis la boule s'effrite

Le sol est argilo-silteux si en pressant la boule elle ne se craquelle pas ni ne s'effrite; elle s'aplatit:
Si Aucune réaction de ressuage en surface n'est observée, et si en pressant la boule elle donne l'aspect brillant, le sol est dans ce cas argileux.

Constatations : le ressuage n'a pas pris effet, la pate reste brillante.

Interprétation : notre échantillon est argileux.

C- Teste de consistance¹

Objectif : connaitre la quantité d'argile dans la terre, ceci va déterminer si l'échantillon est argileux ou non, ou autrement dit si on peut l'utiliser pour la construction ou non.

Procédures de le l'examen :

- Confectionner une boule de «mortier fin» de 2 ou 3cm de diamètre.
- Mouiller pour pouvoir modeler sans que la terre soit collante
- Rouler la boule sur une surface plane et propre jusque a obtenir peu a peu un cordon mince.

Pour une teneur en eau adéquate ; le cordon doit se fractionner lorsque son diamètre est égal à 3 mm, Si le cordon casse avant un diamètre de 3 mm, la terre est trop sèche et on doit ajouter un peu d'eau, si le cordon est brisé à $d = 3$ mm on reconstruit une boulette et l'écrase entre le pouce et l'index, puis on interprète le résultat.

Si le Cordon est dur la boulette reconstituée de ce cordon ne se fissure pas ni ne s'émiette et elle doit s'écraser difficilement, ceci signifie que la terre contient une quantité importante d'argile. Si le Cordon est mi-dur La boulette reconstituée se fissure et s'émiette a cause des petites quantités d'argile

Le cordon fragile ne peut pas donner lieu à la reconstruction de la boulette sans qu'elle ne se casse ni ne s'émiette, ceci est due aux taux de sable et de silt très élevées et très peu d'argile. La terre dans ce cas n'est pas de nature argileuse et sa résistance mécanique demeure réduite.

¹ CRATerre traité de construction en terre. Édition juin 1995

Un cordon mou ou spongieux signifie que la terre contient un excès de matière organique, son utilisation pour la construction est inutile

Constatations : le cordon confectionné en premier lieu s'est cassé avant d'atteindre le diamètre de 03mm, on reconfectionne le cordon on y ajoutant un peu d'eau. Le cordon est pâteux mais dur, il ne s'est pas fissuré en avoisinant le diamètre de 03 mm.

Interprétation : notre échantillon contient une bonne quantité d'argile.

D-teste de cohésion¹

Objectif : connaître la cohésion de la terre, qui est étroitement liée à la présence de l'argile

Procédures de l'examen :

- Confectionner un rouleau de terre de la taille d'un cigare de diamètre de 12mm
- Le cordon est placé dans la paume de la main, on l'aplatit entre le pouce et l'index en commençant par une extrémité jusqu'à obtenir un ruban de 3 à 6 mm de largeur «manipuler avec précaution » pour obtenir la plus grande longueur possible.
- Mesurer la longueur obtenue avant que le ruban ne se casse.

La confection d'un Long ruban de 25 à 30cm signifie la présence de beaucoup d'argile, si le ruban est court de 5 à 10 cm, obtenus difficilement la terre a donc une faible teneur en argile, mais si aucun ruban ne peut être confectionné, la terre a donc une très faible teneur en argile.

Constatations : le cordon confectionné en premier lieu s'est cassé

avant d'atteindre le diamètre de 03mm, on reconfectionne le cordon on y ajoutant un peu d'eau. Le cordon est pâteux mais dur, il ne s'est pas fissuré en avoisinant le diamètre de 03 mm.

Interprétation : le ruban dépasse les 25 cm et donc notre échantillon contient une bonne quantité d'argile.



Figure 37 : test de cohésion

Source : auteur

¹ CRATerre traité de construction en terre. Édition juin 1995

4.3 Identification au laboratoire

4.3.1 Problématique

Les essais de connaissance de la terre tel que l'analyse visuelle et tactile sont empiriques et demeurent insuffisantes pour discerner la compatibilité et la convenance de ses propriétés avec celles recherchées dans le domaine de la construction en terre crue comme pour notre terre il est encore difficile de savoir si elle est argileuse ou silteuse et de pouvoir quantifier la présence de la fraction fine, de ce fait il est indispensable de procéder à une identification expérimentale au laboratoire. Sans pour autant passer à une étude exhaustive car il s'agit dans notre cas d'étude de déterminer l'ensemble de paramètres utiles qui peuvent nous aider à mettre en exergue les principales caractéristiques de la terre et les corrections à apporter dans le cas échéant, ainsi que son aptitude à être utilisée dans la construction, pour ceci il est nécessaire de connaître les propriétés fondamentales ; mécaniques, physiques et chimiques. Dont on cite la granularité (texture de la terre qui est la quantité centésimale en cailloux, graviers, sables, limons, argiles et colloïdes.), la plasticité (aptitude de la terre à être modelée.), Compressibilité (potentialité de la terre de réduire au maximum sa porosité.), et la Cohésion (propriété des particules de la terre à rester associées).

4.3.2 Propriétés fondamentales

➤ Granularité

Granulat : Matériau constitué de grain minéral de provenance naturelle ou artificielle. On parle également de matériau grenu.

Granularité : Ensemble des caractéristiques d'un matériau granulaire.

Granulométrie : Science ayant pour but de mesurer les dimensions et de déterminer la forme des grains. Elle permet de définir les granulats et de les classer d'après la dimension de leurs grains.

Encore nommée texture d'une terre, elle se mesure par analyse granulométrique pour les fractions de grains grossiers: cailloux, graviers, sables et limons cette procédure consiste à filtrer la terre à travers une série de tamis normalisés superposés par ordre décroissant (le plus fin en dessous) et à déterminer les fractions de grains retenues par chaque tamis. et par sédimentométrie pour les fines argileuses.

A. L'analyse granulométrique par tamisage

I. Principes

On sait que la résistance d'un matériau grenu dépend principalement de la structure résultante de la disposition de ses grains ; des relations physiques et chimiques entre les différentes composantes ; ainsi que la proportion des vides qui tend à être minimisé au maximum pour augmenter la résistance, pour cela le but de l'analyse granulométrique est donc de déterminer la teneur centésimale en fractions de grains différents mesurées en pourcentages.

II. Mode opératoire

L'analyse granulométrique par tamisage consiste à classer les différents grains d'un échantillon en utilisant une série de tamis ou passoirs, emboîtés les uns sur les autres, dont les ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. L'échantillon étant placé au sommet, la pile de tamis est vibrée. Les matériaux restant dans chaque tamis (refus) sont pesés puis convertis en %. Les résultats sont tracés par la suite sur une courbe granulométrique.

Les conditions manipulations sont décrites par la norme **NA¹ 2607 1992-08-01** Elle concerne les granulats du diamètre entre 31.5 mm et 0.08 mm.

III. Préparation de l'échantillon

. Il est essentiel que l'échantillon soit sec et en quantité suffisante pour être mesurable et pas trop importante pour éviter de saturer les tamis

Une quantité de la terre de 500g a été tamisée au tamis de 80 μ imbibée dans l'eau pendant 24h pour permettre la dissolution des liens entre les grains et de les séparer pour pouvoir les classer suivant leurs diamètres. Après les 24heures l'eau est dégagée doucement pour éviter de perdre une quantité considérable de la fraction fine afin de ne pas fausser les résultats de cette analyse. L'échantillon est met dans l'étuve a une température de 105°C pour se débarrasser complètement de l'eau ajoutée au début.



¹ Norme Algérienne

Les tamis

Constitué d'une toile métallique ou d'une tôle perforée définissant des mailles de trous carrés. La taille des mailles est normalisée. Cette taille correspond aux termes d'une suite géométrique de raison 1.259.

Les tamis sont également repérés par un numéro d'ordre appelé « module », selon une progression arithmétique de raison 1.

IV. Analyse granulométrique

Empiler la série de tamis suivant leur module croissant.

- Placer un récipient à fond plein (appelé fond étanche) sous le dernier module.

- Fixer la série constituée sur le cadre vibrant.

- Tamiser par vibration pendant 2 minutes.

- Peser les quantités de granulat refus (noté R_i^1) retenues dans chaque module et noter les résultats dans le tableau.



Figure 40. Procédure de tamisage
Source : auteur

¹ Masse des refus cumulés en grammes à chaque tamis i.

Module	Tamis ouverture en mm	Masse des refus cumulés (Ri) en grammes	Pourcentage des refus cumulés $Ri/Ms*100$	Pourcentage des Tamisât cumulés $Tn=100*[(Ri/Ms)-100]$
46	31.50	/	/	/
45	25	/	/	/
44	20	/	/	/
43	16	/	/	/
42	12.50	/	/	/
41	10	/	/	/
40	8	0.00	0%	100%
39	6.30	5.00	1%	99%
38	5	8.00	1.6%	98,4%
36	4	14.00	2,8%	97,2%
34	2	25.00	5%	95%
31	1	32.50	6,5%	93.5%
29	0.500	37.50	7,5%	92.5%
27	0.400	39.00	7,8%	92.2%
26	0.315	40.00	8%	92%
24	0.200	41.50	8,3%	91.7%
21	0.100	44.50	8,9%	91.1%
20	0.080	45.50 (Rn)	9,1%	90.9%
Tamisât au dernier tamis (Tn)	/	0.75	OBS : (Ms1) masse de l'échantillon sec = 46.71 g (Ri) Masse des refus cumulés en grammes à chaque tamis i. (Rn) Masse des refus cumulés au dernier tamis (Tn) Tamisât au dernier tamis Note : aucun refus n'est constaté au dessus du tamis 40 (Ø = 8 mm)	
Rn + Tn	/	46.25		
$100*[((Ms1-(Rn+Tn))/Ms1]$ doit être <2%	/	0.98%		

Tableau 2: Résultat de l'analyse granulométrique par tamisage
Source : auteur

V. La validité de l'analyse granulométrique

Pour ne pas fausser l'analyse, la proportion de la masse totale perdue ou retenue par les tamis (différence entre la masse initiale et la masse résultante à la fin de l'essai) par rapport à sa masse initiale ne doit pas différer de plus de 2%. Ce qui témoigne que les tamis ne retiennent pas plus de 2% de la masse de l'échantillon. Dans notre cas la masse retenue est égale à 0.98% de la masse initiale. et les résultats sont ainsi validés.

VI. Elaboration de la courbe granulométrique :

- On trace un repère orthonormé.
- On place sur l'axe des abscisses (horizontal) les modules. (M^1)
- On place sur l'axe des ordonnées (vertical) les tamisât cumulés (Tn^2) en %.

VII. Classe granulaire

La classe granulaire désigne, un granulat en indiquant son plus petit diamètre représentatif, « **d** » suivi de son plus grand diamètre représentatif, « **D** ». Le granulat est appelé **d/D** (exemple gravier 5/25. $d=5$ et $D=25$). La connaissance de « **d/D** » est connue lorsque les granulats atteignent une représentativité de lorsque de 5% de son tamisât cumulés vers le début pour le « **d** » et vers le fin pour le « **D** ».

La norme NF P 18-304 est plus précise. Elle détermine la classe granulaire en numérisant les critères de plus petits et de plus grands diamètre ainsi que le critère de représentativité.

Il existe 5 classes granulaires principales adaptées de la norme française NF P 18-101 :

- Les fines 0/D D < ou = à 0,08 mm
- Les sables 0/D D < ou = à 6,3 mm
- Les gravillons d/D d > ou = à 2 mm et D < ou = à 31,5 mm
- Les cailloux d/D d > ou = à 20 mm et D < ou = à 80 mm
- Les graves 0/D D est compris entre 6,3 et 80 mm

VIII. Interprétation des résultats

L'analyse granulométrique par tamisage nous renseigne sur la constitution granulaire ayant un diamètre élevé de 0.08 mm , or il est claire que notre échantillon contient dans sa quasi-totalité des grains de fraction fine ou $D \leq 0,08$ mm puisque la proportion de l'entité grossière est à raison de 45,50/500g soit 9,1% et la proportion de l'entité fine est à raison de 445,5/500 g soit 90,9% . Donc quand il s'agit d'un matériau fin comme est notre cas il est nécessaire de procéder a une analyse par sédimentometrie afin de déterminer la consistance sub-grossière et de tracer la courbe granulométrique complète

¹ Modules

² Tamisât au dernier tamis

IX. Critique

Bien qu'il existe un grand nombre de modes opératoires, l'analyse par tamisage est une procédure assez fiable car les résultats demeurent assez similaires pour les différents modes opératoires.

La modulation des tamis ou des passoires est aussi assez large mais l'on observe une tendance à l'abandon des passoires au profit des tamis. De même, les diagrammes granulométriques varient, ce qui peut gêner la comparaison des résultats.

Actuellement, on peut utiliser tous les types de diagrammes classiques sans risques de mauvaise interprétation. Un inconvénient réside dans le fait que les fractions de grains sont exprimées en poids alors que la texture est plutôt évoquée en volume occupé.

En effet, les poids spécifiques des fractions fines sableuses et argileuses sont très différents mais des critères d'interprétation ont été élaborés en conséquence.

Le séchage sur réchaud peut provoquer des modifications minérales si la température monte trop haut. Le séchage en étuve prend beaucoup de temps.

Afin d'éviter ces inconvénients, une méthode a été mise au point qui élimine cette nécessité de séchage en pesant la fraction humide d'après le principe d'Archimède.

B. L'analyse granulométrique par Sédimentométrie

L'analyse granulométrique que l'on obtient par tamisage est incomplète. Si elle suffit pour la plupart des applications dans le domaine des travaux routiers, elle est insuffisante pour la construction en terre qui exige une analyse de la texture des fines avec un $\varnothing < 0,08$ mm. Cette analyse se fait par la sédimentométrie qui utilise la différence de vitesse de chute des particules d'une terre en suspension dans l'eau.

Les particules les plus grosses se déposent en premier et les plus fines en dernier. On mesure régulièrement, dans le temps et à une hauteur donnée (diminution de la densité avec l'éclaircissement du liquide), la variation de la densité. La connaissance de la vitesse de chute des particules selon leur taille permet de calculer les proportions par les différents grosseurs de grains.

I. Préparation de l'échantillon

L'entité passant à travers le tamis 0.08 mm est imbibé dans l'eau pendant 24h après la décantation on se débarrasse de l'eau ajoutée puis l'échantillon est met dans l'étuve à 105C° pendant 24h pour séchage ou il présente des plaques fissurées qui sont dues à l'effet d'adhésion entre les différents composants de l'échantillon

Ces plaques sont effritées jusqu'à l'obtention d'une poudre, et ainsi l'échantillon est préparé pour l'analyse sédimentométrie



Figure 41: Préparation d'échantillon sédimentométrie
Source : auteur

II. Mode opératoire

L'appareillage nécessaire à une analyse sédimentométrique réunit 2 éprouvettes graduées de 1000 ml, de Ø 5,5 cm: 1 densimètre gradué de 995 à 1050, un thermomètre et une montre. La fraction de terre de

$\varnothing < 0,08$ mm qui doit être analysée est préparée: sur les fines qui ont été étuvées après tamisage,

20 g sont prélevés et mélangés avec 20 cm³ de défloculant II est indispensable de vérifier, après défloculation si la solution n'est pas acide (pH 9,5) car les argiles risquent de flocculer.

La solution est remuée avec un agitateur pendant 3 mn et laissée au repos pendant 18 h. Les mesures commencent après ce délai. On agite à nouveau la solution de la 1^{ère} éprouvette pendant 3 mn puis l'on y

plonge le densimètre, doucement, après 45 secondes.

On prend avec un chronomètre les mesures à 1 mn et 2 mn, sans sortir le densimètre.

Les autres mesures sont prises à 5 mn, 10 mn, 30 mn, 1 h, 2 h, 5 h et 24 h

On plonge le densimètre environ 15 s avant de faire la lecture et on le retire aussitôt pour le plonger dans l'éprouvette témoin. Il est très important de vérifier à chaque mesure l'égalité de température des 2 éprouvettes car une différence peut influencer la qualité de l'analyse. On ne poursuit pas l'analyse au-delà de 0,001 mm. Car pour cette taille de grains, des phénomènes de turbulence et de défloculation perturbent la sédimentométrie.

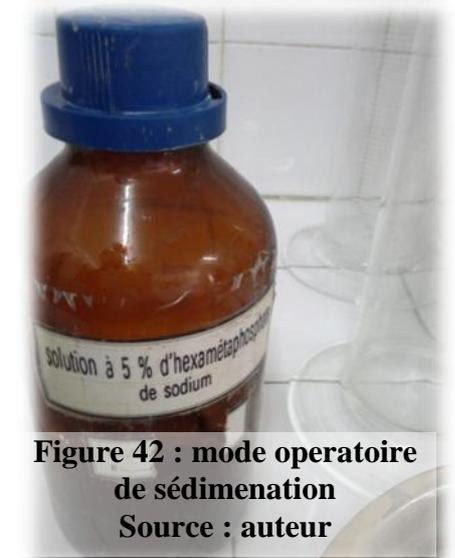


Figure 42 : mode opératoire de sédimentation
Source : auteur

III. Résultats

Tableau des résultats de l'analyse sédimentométrique.

date	heure	Temps de lecture	R Lecture densimètre	T(°C)	Ct	P% sur tamis 80 μm	D (mm)
	09 :50	30s	1,025	22	1,1	89	0,059
	/	01min	1,023	/	/	83	0,043
	/	02min	1,022	/	/	79	0,031
	09 :55	05min	1,020	/	/	73	0,019
7/05/2017	10 :00	10min	1,017	/	/	63	0,014
	10 :10	20min	1,015	/	/	58	0,010
	10 :30	40min	1,012	/	/	48	0,008
	11 :10	80min	1,010	23	/	42	0,005
	13 :50	04h	1,007	23	/	32	0,003
08/05/2017	9 :50	24h	1,004	22	/	21	0,001

Tableau 3:l'analyse sédimentométrique. Source : auteur

IV. Critique

L'analyse sédimentométrique ne prend que peu de temps pour chaque mesure mais dure près de 48 h. Quelques problèmes peuvent se poser pour les premières mesures, lorsque l'on consigne les résultats sur le diagramme granulométrique. La courbe de sédimentométrie s'accordant mal avec celle de tamisage. il est dans ce cas nécessaire de recommencer la procédure d'analyse sédimentométrique.

V. Défloculant

L'ajout d'un défloculant à la solution de fines en suspension qui doit être analysée par sédimentométrie est impératif. Il existe plusieurs produits mais l'un des plus employés en laboratoire est l'hexamétaphosphate de sodium à raison de 20 g par litre d'eau. La solution doit être bien

mélangée et immédiatement utilisée. On peut employer des produits de remplacement mais il est alors impératif de procéder à un étalonnage en prenant référence sur le mode opératoire qui emploie l'hexamétaphosphate de sodium. Les autres défloculants de remplacement, employés à raison de 1g/cm³

d'eau distillée sont:

- la gomme arabique;
- le bicarbonate de soude;
- le silicate de sodium (produit de lavage de vitres);
- des bases ou des sels basiques tels que: lessive de soude, ammoniaque, silicates de soude en solution ou carbonates de soude en solution.

C. La courbe granulométrique globale :

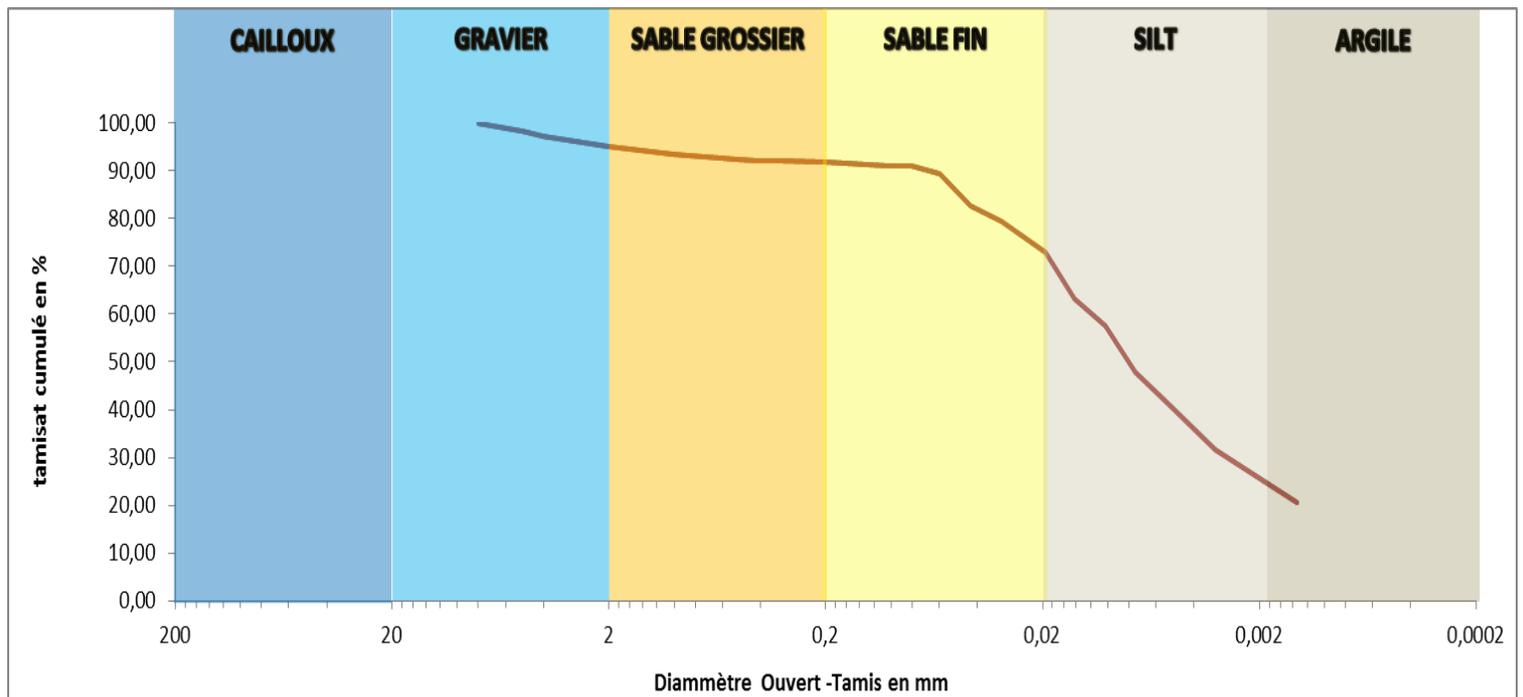


Figure 43: Courbe granulométrique de la terre. Source : auteur

I. Interprétation

Notre terre apportée est composée dans sa quasi-totalité de fractions fines constituée essentiellement de limons et d'argile, avec une présence amoindrie de sable et de particules grossiers. La texture de notre terre est ainsi illustrée sur le tableau suivant

constituant	Intervalle de quantitatif	Quantité en %	Diamètre des grains en mm
Argile	[0.00 , 26.00]%	26 %	$D < 0.002$
Limon	[26.00 , 73.00]%	47 %	$0.002 < D < 0.02$
Sable fin	[73.00 , 92.00]%	19 %	$0.02 < D < 0.2$
Sable grossier	[92.00 , 95.00]%	03 %	$0.2 < D < 2$
Gravier	[95.00 , 100.00]%	05 %	$2 < D < 5$

Tableau 4: la texture de notre terre. Source : auteur

Suivant les courbes de textures idéales des terres convenables à la construction et notamment le pisé et l'adobe, ces courbes élaborées à la base de la formule de FULLER¹ qui a comme objectif de déterminer une courbe continue sans pour autant laisser trop de vides à l'intérieur : on distingue que la courbe de notre terre n'est pas inscrite dans les fuseaux proposés suite aux travaux déjà élaboré dans ce sens, on cite notamment les travaux de l'institut CRAterre.

Donc pour que notre terre soit convenable à l'utilisation dans la construction en terre crue; des modifications de texture ou corrections autrement dit sont nécessaires pour avoir une terre ayant une composition homogène et continue. Ces corrections sont citées et détaillées dans le chapitre suivant 'correction et stabilisation'.

II. Classification de la terre

Après connaître la composition de notre terre et sa texture on peut procéder à sa classification suivant le modèle le plus approprié, il s'agit ici du triangle des textures GEPPA2 dont 17 classes sont identifiées.

Pour ceci on indique les paramètres suivants

constituant	pourcentage
Argile	26 %
Limon	47%
Sable (fin et grossier)	22 %

Tableau 5: pourcentage des constituants. Source : auteur

¹ Formule de Fuller:

$$p = 100 (d/D)^n.$$

p = proportion de grains d'un \emptyset donné.

d = \emptyset des grains pour la proportion p visée.

D = \emptyset du grain le plus gros.

n = \emptyset coefficient de gradation.

n = 0,5 pour des grains tous sphériques. Mais dans la terre, si les sables et les graves sont éventuellement d'un \emptyset presque sphérique, les argiles s'en éloignent

Aussi, dans le domaine des travaux routiers où l'on emploie souvent des terres sableuses, on corrige le manque de sphéricité par un n à 0,33. En construction en terre, on prend n = 0,20 à 0,25. CRAterre.

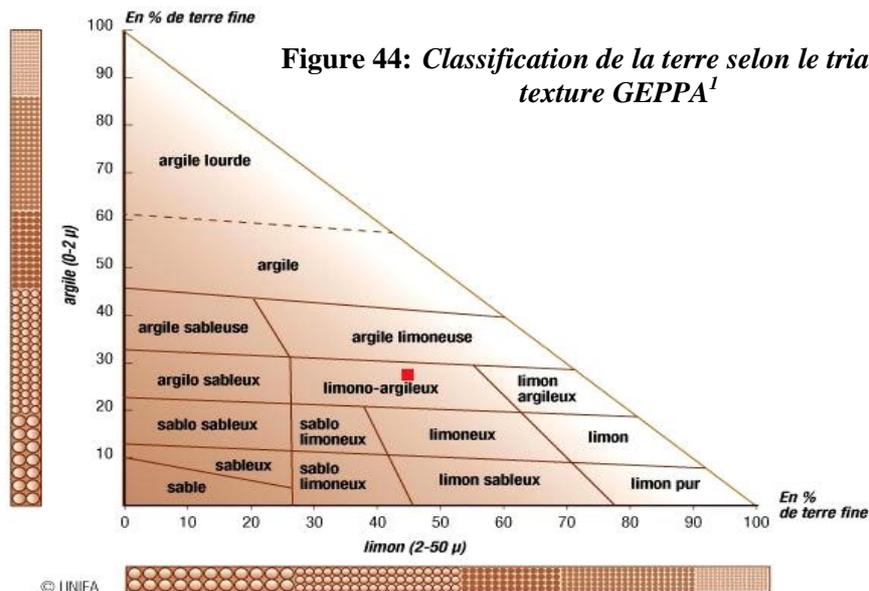
² Groupe d'Etude pour les Problèmes de Pédologie Appliquée. AGROCAMPUS OUEST, 2011

Publié en 1963 et élaboré par un groupe de pédologues, le triangle GEPPA se présente sous la forme d'un triangle rectangle isocèle dont les côtés représentent les teneurs en argile (axe vertical), limons (axe horizontal) et sable (axe oblique), chaque axe étant gradué de 0 à 100%.

Positionnons maintenant dans ce triangle un point dont l'analyse granulométrique nous a donné la répartition suivante : 26% d'argile, 47% de limons et 22% de sable.

On repère tout d'abord la graduation 26 sur l'axe des argiles et on trace une droite perpendiculaire à cet axe et passant par ce point 26. On fait de même avec l'axe des limons en traçant une droite perpendiculaire à cet axe et passant par la graduation 47. L'intersection entre ces droites nous donne l'emplacement du point recherché dans le triangle de texture. Ce point se trouve dans la classe **LA**, c'est-à-dire qu'il représente un échantillon de sol dont la texture est limono-argileuse.

La figure suivante illustre cette procédure de classification de notre terre.



➤ Plasticité

La plasticité définit la propriété de la terre à subir des déformations sans réaction élastique notable caractérisée par une fissuration ou une pulvérisation.

La plasticité d'une terre ainsi que les limites entre différents états de consistance sont déterminées par les mesures des limites d'Atterberg.

Elles s'effectuent sur la fraction "mortier fin" de la terre (Ø des particules < 0,4 mm).

La quantité d'eau, exprimée en pourcentage, qui correspond à la limite de transition entre l'état de consistance fluide et l'état plastique est nommée Limite de liquidité (*LI*).

Entre l'état plastique et l'état solide, la transition est nommée Limite de plasticité (*Lp*).

A *LI*, le sol commence à manifester une certaine résistance au cisaillement, tandis que à *Lp*, la terre cesse d'être plastique et devient cassante.

L'indice de plasticité (lp) égal à $Ll - Lp$ précise la plage de comportement plastique de la terre.

La combinaison de Ll et de Lp précise la sensibilité de la terre aux variations d'humidité. Les propriétés plastiques d'une terre sont représentées sur le diagramme de plasticité " P ".

I. Principes

On distingue différentes classes de sols ; c'est ainsi, les sols pulvérulents sont les sables fins qui se présentent sous l'aspect de poudre. Les argiles par contre, se forment les pâtes dans lesquelles chaque grain est relié aux grains voisins par des forces de cohésions dues à la présence des couches absorbées.

On appelle cohésion, l'aptitude que possède le sol à maintenir ses grains reliés les uns aux autres. Les sols doués de cohésion sont appelés sols cohérents, on distingue le cas de l'argile. Les sols qui n'ont pas de cohésion ou qui ont très peu de cohésion entre les grains sont appelés grenus ou pulvérulents, on distingue le cas du sable.

Le comportement des sols pulvérulents est quasi- indépendant de leur teneur en eau. Ce dernier, par contre, joue un rôle fondamental dans le comportement des sols cohérents. Les sols cohérents auront une consistance liquide si la teneur de l'eau est élevée, pâtes si la teneur de l'eau est modérée, et solide si la teneur de l'eau est très faible.

- **A l'état liquide**, les grains de sol sont indépendants et ne se touchent pas. Leurs mouvements relatifs sont très aisés.

- **A l'état plastique** (pâtes) les grains sont rapprochés et ont mis en commun l'eau absorbée qui agit comme un sachet en plastique dans lequel les grains peuvent se mouvoir sans s'écarter.

- **A l'état solide**, les grains se sont encore plus près les uns des autres, ils arrivent même au contact en quelques points en chassant l'eau absorbée. Les frottements internes sont alors importants.

Par humidification (augmentation de la teneur de l'eau) ou par séchage (diminution de la teneur de l'eau) le sol cohérent passera d'un état de consistance à un autre de manière progressive.

Néanmoins *Atterberg*, ingénieur agronome suédois, a défini en 1911, des teneurs en eau limites qui séparent le passage du sol d'un état de consistance à un autre. Ces teneurs en eau particulière sont appelées limites de consistance ou limites d'Atterberg.

La limite de liquidité notée WL :

Par définition, la limite de liquidité est la teneur en eau (exprimée en %) qui correspond à une fermeture en 25 chocs.

La limite de plasticité notée Wp :

Par définition, la limite de plasticité est la teneur en eau (exprimée en %) du fuseau qui se brise en petits tronçons de 1 à 2 cm de long au moment où son diamètre atteint 3 cm.

Ces teneurs en eau limites sont déterminées expérimentalement sur la fraction du sol (le mortier) qui passe au tamis 0,4 mm.

On exprime l'étendue du domaine de plasticité, l'étendue des teneurs en eau pour lesquelles le sol garde une consistance plastique par un paramètre, l'indice de plasticité (I_p), cet indice marque l'étendue du domaine plastique, c'est-à-dire la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité.

$$I_p = WL - W_p$$

II. Principe de détermination des limites de consistance :

❖ La limite de liquidité :

La limite de liquidité se détermine en utilisant l'appareil de casa grande. On étend sur une coupelle une couche de la terre dans laquelle on trace une rainure au moyen d'un instrument en forme de V. on imprime à la coupelle des chocs semblables en comptant le nombre de chocs nécessaires pour fermer la rainure sur 1 cm, on mesure alors la teneur en eau de la pâte, bien entendu, tout l'appareillage est rigoureusement normalisé.

L'expression a prouvé qu'il existe une relation entre le nombre de chocs N et la teneur en eau W . la représentation de cette relation est une droite en coordonnées semi- logarithmiques lorsque le nombre de chocs est compris entre 15 et 35. Pour le même intervalle des valeurs de N , la formule suivante permet de déterminer la limite de liquidité à l'aide d'une ou deux mesures seulement.

$$WL = (N/25)^{0,121}$$

Mode opérationnel

Appareillage :

- appareil de Casagrande
- coupelle
- spatule
- bascule électronique
- l'outil à rainure en V
- four électrique

Opération :

1) Préparation du mortier :

On prend une quantité suffisante d'échantillon de sol ayant passé à travers d'un tamis de 0,40 mm. Puis l'échantillon est imbibé dans l'eau pendant 24 heures et mis à l'étuve à 100° c aussi pendant 24 heures. Après séchage l'échantillon est retravaillé jusqu'à ce qu'il devient fin, et ainsi il est prêt pour la confection d'un mortier.

2) Détermination de la limite de liquidité :

Pratiquement nous avons suivi le même processus pré expliqué. C'est ainsi que nous aurions à chercher la limite de liquidité pour notre échantillon.

Pour ceci on procède aux étapes suivantes :

Préparation de l'échantillon y compris homogénéisation et imbibition à (T) ambiante pendant 24H, Puis Tamisât par voie humide, par un tamis de diamètre de mailles =400 μ

- 1) Décantation naturelle de l'eau de lavage au moins 12H, Siphonage tout en évitant pertes du matériau, puis évaporation de l'excédentaire à T < 50C°.
- 2) Malaxage et homogénéisation de la pâte (presque fluide).



Figure 45 : Préparation du mortier

Source : auteur



Figure 46 : mortier étendu sur la coupelle de Casagrande.

Source : auteur

- 3) Répartition de la pâte dans la coupelle : Nous étendons sur une coupelle du mortier un échantillon de mortier préparé, dans laquelle nous avons imprimé une rainure au moyen de l'outil en V.
- 4) Etaler l'appareil, et éviter les bulles d'air
- 5) Laisser 30 mm (Haut de la coupelle) vide, l'épaisseur de la pâte étalée doit être égale à 15 à 20 mm
- 6) Plaçons cette coupelle sur l'appareil de Casagrande en lui imprimant une série de chocs (coups) réguliers à raison de deux chocs par seconde. Comptons le nombre de coups N pour que les lèvres inférieures de l'entaille se touchent sur 1 cm de long.
- 7) Effectuer la série de chocs 2coups/s
- 8) Noter N lorsque les lèvres de la pâte se rejoignent $L = 10$ mm

Si : $N < 15$ on doit procéder au séchage de la pâte, si $N < 35$ on doit faire une fluidisation de la pâte.

- 9) Partager la pâte en deux, à l'aide de l'outil de rainure perpendiculairement.
- 10) A l'aide de la spatule prélevons quelques grammes du mortier à l'endroit où les lèvres se sont refermées de 1 cm. Plaçons ce mortier dans une tare afin de le peser sur une balance électronique. Cette opération ayant été reprise trois fois de suite alors ces pesées vont nous donner les poids total secs. Connaissant le poids de la tare nous pouvons calculer :
 - poids de l'eau (P_e) : $P_e = (\text{poids total humide}) - (\text{poids total sec})$
 - teneur en eau (W) : $W = (\text{poids de l'eau}) / (\text{poids sec})$.
 - L'écart entre deux valeurs de W doit être $< 3\%$
 - Déduire le graphe W correspondant à $N=25$

Nous avons repris l'opération trois fois de suite avec des teneurs en eau différentes

3) Résultats

Les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau suivant :

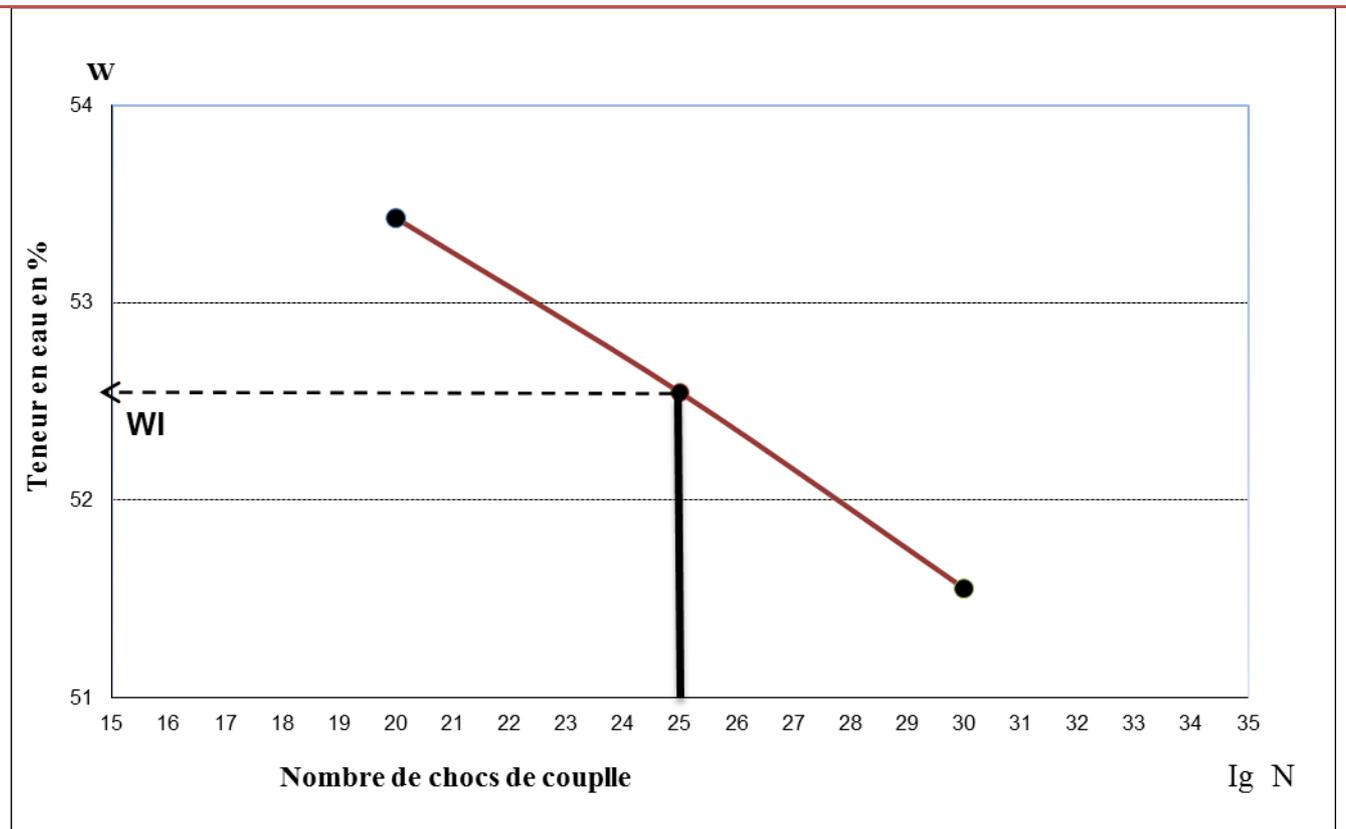


Figure 47 : Limite de liquidité à la coupelle de Casagrande
Source : auteur

	1 ^e ESSAI		2 ^e ESSAI		3 ^e ESSAI	
Nombre de coups	20		25		30	
N° de la tare	14	FYY	BB	CBBB	H17	CD
Poids total humide (g)	7,06	6,66	6,28	5,62	5,82	6,80
Poids total sec (g)	5,91	5,63	5,38	4,98	5,05	5,72
Poids de la tare (g)	3,76	3,70	3,67	3,76	3,56	3,62
Poids de l'eau	1,15	1,03	0,90	0,64	0,77	1,08
Poids de sol sec (g)	2,15	1,93	1,71	1,22	1,49	2,10
Teneur en eau (%)	53,49	53,37	52,63	52,46	51,68	51,43
moyenne	53,43		52,55		51,55	

Tableau 6: résultats des essais à l'appareil Casagrande

Mesures n°	1	2	3
Teneur en eau (%)	53,43	52,55	51,55
Nombre de coups N	20	25	30

Tableau 7 : Limite de liquidité à la coupelle de Casagrande
Source : auteur

1) Commentaire du tableau :

Les trois essais réalisés pour déterminer la limite de liquidité avec les résultats ci-dessus mentionnés, nous ont donné quatre valeurs différentes de la teneur en eau ; alors :

- la valeur de la teneur en eau obtenue au premier essai en 30 coups est 51.55 % celle-ci a dépassé la teneur en eau correspondant à la limite de liquidité qui est de 25 coups. Ce qui veut dire que le mortier (échantillon) était plus ou moins sec.
- lorsque nous avons augmenté la teneur en eau au deuxième essai à 52.55 %, le constat est que la rainure s'est formée sur 10 mm après 24 coups qui est presque égale à la limite de liquidité correspondant à 25 coups.
- Toujours en continuant l'opération qui est l'augmentation de la teneur en eau pour le troisième essai qui est 53.43 %, nous pouvons constater que la rainure s'est refermée plus rapide que prévu à 20 coups. Cette fois-ci on constate que l'échantillon est plus humide.
- Concernant la limite de plasticité, nous l'avons obtenu en diminuant la teneur en eau avec séchage de l'échantillon ce qui la rendue plus plastique

❖ La limite de plasticité :

1) Détermination de la limite de plasticité :

Pour déterminer la limite de plasticité, on roule l'échantillon en forme de fuseau qu'on amincit progressivement. La limite de plasticité est la teneur en eau du fuseau qui se brise en petits tronçons de 1 à 2 cm de long au moment où son diamètre atteint 3 mm. On exécute en général deux à trois essais pour déterminer cette limite. Les étapes se dérouleront comme suit :

- Former une boulette
- Rouler la boulette jusqu'à atteindre un diamètre de 3mm
- Le rouleau ne doit pas être creux
- Observer le commencement de fissuration sur le réseau, à cette teneur en eau on détermine la limite de plasticité, si y a pas de fissures on doit malaxer et sécher à nouveau la pate et refaire l'opération.



Figure 48 : essai de plasticité

Source : auteur

- Prélever la partie centrale du rouleau et la placer dans un godet (ayant un poids connu) et prendre son poids humide puis sec après 24h de séchage à l'étuve.
- Déterminer la teneur en eau W_p
- L'écart entre deux valeurs doit être <2%.

1) Résultats

	1 ^e ESSAI	2 ^e ESSAI	3 ^e ESSAI	4 ^e ESSAI
N° de la tare	133	DB	3DO	H50
Poids total humide(g)	4,98	5,12	5,47	5,49
Poids total sec (g)	4,7	4,82	5,16	5,19
Poids de la tare (g)	3,85	3,93	4,14	4,25
Poids de l'eau	0,28	0,3	0,31	0,3
Poids de sol sec (g)	0,85	0,89	1,02	0,94
Teneur en eau (%)	32,94	33,71	30,39	31,91
Moyenne	33,32		31,15	
	32,24			

Tableau 8 : résultats des essais de détermination de la limite de plasticité
Source : auteur

2) Commentaire du tableau :

Les quatre essais réalisés pour déterminer la limite de plasticité avec les résultats ci-dessus mentionnés, nous ont donné quatre valeurs différentes de la teneur en eau ; alors que la moyenne des quatre résultats peut nous informer sur la teneur en eau équivalente à la plasticité de notre échantillon. Qui est inscrite dans un intervalle de 32 à 33 %.

Donc pour toute opération de gâchage on peut prendre une teneur en eau dans cet intervalle pour pouvoir obtenir une pâte plastique et maniable sans pour autant risquer d'avoir un excès ou une carence en eau de gâchage.

❖ Indice de plasticité :

L'indice de plasticité I_p est la différence entre la limite de plasticité et la limite de liquidité, il mesure l'étendue du domaine de plasticité du sol. Il s'exprime donc par la relation : $I_p = W_L - W_p$

Teneur en eau de plasticité (%)	w=32,94 w=33,71	moyenne $W_1=33,32$	w=30,39 w=31,91	moyenne $W_2=31,15$
Limite de liquidité : $W_L=(w_1+w_2)/2$ $W_L = 52,50 \%$				
Limite de plasticité: $W_p=32,24 \%$		Indice de plasticité	$I_p = W_L - W_p$ $I_p = 20,26$	

Tableau 9 : récapitulation des résultats de limites d'Atterberg.

Source : auteur

Conclusion :

Notre terre est considérée plastique si sa teneur en eau est à l'ordre de 30%, sa plasticité s'augmente au fur et à mesure de l'augmentation de sa teneur en eau sur un intervalle de 20%, au delà de cet intervalle notre terre va devenir liquide. Le contrôle de la maniabilité doit se refaire aux limites citées.

➤ Compressibilité

La compressibilité d'une terre définit son aptitude à se laisser comprimer au maximum pour une énergie de compactage et un taux d'humidité donnés (teneur en eau optimale ou T.E.O.). Lorsqu'un volume de terre est soumis à l'action d'une force, le matériau est comprimé et l'indice des vides décroît. Plus la densité d'une terre peut être augmentée, plus sa porosité est bloquée et moins l'eau peut avoir l'occasion d'y pénétrer. Cette propriété résulte de l'imbrication plus étroite des particules qui réduit les risques de perturbation de la structure sous l'action de l'eau.

Pour notre cas d'étude, la détermination de la compressibilité de la terre va nous orienter vers le domaine de l'utilisation de cette terre dont certains types de construction dépendent essentiellement sur cet aspect, on cite par exemple la construction en pisé où la terre est juste humectée et comprimée, ou en blocs de terre comprimés pour plus de portance pour le cas des murs porteurs.

Donc à travers la connaissance de ce paramètre on va déterminer l'aptitude de notre terre à être utilisé pour les types de construction cités.

La compressibilité d'une terre est mesurée par l'Essai Proctor. On la représente sur le diagramme de compressibilité "C" où sont mis en relation la Teneur en Eau Optimale et la Densité Sèche Optimale, pour une énergie de compression donnée.

I. Principe :

L'essai Proctor est réalisé en principe sur la fraction de terre qui passe au travers du tamis 5 mm mais on peut tolérer des grains de taille allant jusqu'à 25 mm. Un échantillon de terre dont on connaît la teneur en eau (pesé et comparé au poids sec étuvé à 105° C) est placé dans un moule standard cylindrique (lui-même pesé au préalable). Le compactage se fait en trois couches d'épaisseur égale et de façon égale sur toute la surface des couches avec un poids normalisé tombant d'une hauteur déterminée vingt-cinq fois. Chaque opération terminée, on pèse le moule et l'échantillon et l'on porte les résultats sur un diagramme Proctor en une courbe passant par les points expérimentaux. Sur cette courbe, on peut lire la Pd max et la T.E.O. Les essais Proctor les plus classiques sont le Proctor AASHO standard et le Proctor AASHO modifié.

ESSAI PROCTOR STANDARD AASHO

POIDS DU PILON : 2.496 kg

DIAMÈTRE DU PILON : 5.08 cm

HAUTEUR DE CHUTE : 30.5 cm

VOLUME DU MOULE: 949 cm³

DIAMÈTRE DU MOULE: 10.16 cm

HAUTEUR DU MOULE: 11.70 cm

POIDS DE LA TERRE : 1.5 kg

ÉNERGIE : 6 j/cm³

COUP PAR COUCHE : 25

II. Mode opératoire :

- On prend 2,5 kg de notre échantillon préalablement préparé qu'on verse dans un bac.
- On ajoute une certaine quantité¹ d'eau proportionnelle au poids du sable utilisé.
- A l'aide de la truelle on malaxe bien le sol.
- On remplit le moule Proctor normalisé en trois couches puis après avoir versé chaque couche on compacte l'aide de la dame Proctor normal en 25 coups en respectant la hauteur de chute et en assurant une répartition équitable des coups sur la surface à compacter. On procède de la même manière après la mise en place de la 2eme et 3eme couche.
- Une fois le moule rempli, on arase le sol avec une règle à araser, on comble les vides laissés à la surface.
- On prélève ensuite un échantillon d'environ 100 g à la surface du moule, puis on retire la base de ce dernier afin de prendre un 2eme échantillon d'à peu près du même poids.
- A la balance, on évalue les masses des deux prélèvements puis on les fait passer à l'étuve au moins pendant 24h. au terme desquelles on va repeser les échantillons



Figure 49: Opération d'essai du PROCTOR

Source : auteur

¹ L'essai est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons portés à des teneurs en eau croissantes (2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12%, 14%, 16%)

III. Résultats

Les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau suivant :

Teneur en eau (W%)	06%	08%	10%	12%
Poids du moule (PM en gramme)	4055	4055	4055	4055
<i>Poids total humide</i> (PTH en gramme)	5840	5867	5982	5995
Poids du sol humide (PSH en gramme) $PSH = (PTH - PM)$	1785	1812	1927	1940
Poids du sol sec (PSS en gramme) $= (PSH \cdot 100) / (W\% + 100)$	1684	1678	1749	1732
La densité sèche (γ_d en kg/m^3) $\gamma_d = (PSS / V_{moule})$ $V_{moule} = 949 \text{ CM}^3$	1774	1768	1843 $\gamma_{d \text{ MAX}}$ optimum	1825

Tableau 10 : résultat Proctor de la densité sèche
Source : auteur

❖ Commentaire du tableau :

Les résultats nous montrent que la teneur en eau optimale correspondante à l'énergie de compactage utilisée dans l'essai, est de l'ordre de 10%, cette teneur en eau a assuré une densité sèche plus élevée ce qui indique que la compacité avait atteint son apogée par rapport aux autres teneurs en eau.

• Energie de compactage:

Une énergie de compactage croissante entraîne une augmentation de la densité sèche et une diminution de la T.E.O. En général. Pour un compactage croissant le sommet de la courbe Proctor est accentué alors qu'il s'aplatit pour un compactage moins énergétique. Au-dessus de la T.E.O, pour un volume d'air insignifiant un compactage croissant n'a que peu d'effet sur la masse volumique sèche (γ_s) alors qu'en dessous de la T.E.O, pour un volume d'air important l'effet d'un compactage croissant est manifesté. On ne parvient jamais à éliminer le volume d'air en totalité et donc à atteindre le maximum théorique de la densité sèche (souvent fixé à 2 650 kg/m^3).

- **Teneur en eau :**

Pour de faibles teneurs en eau, le sol est difficile à comprimer: on obtient des V_d basses et des volumes d'air (V_a) importants.

Avec une augmentation de la teneur en eau, le sol est lubrifié et plus ouvrable: les V_d sont plus importantes et les V_a plus réduits; V_d max. est obtenu pour la T.E.O. Si la teneur en eau augmente encore, V_a décroît mais la combinaison de l'eau et de l'air s'oppose à une réduction appréciable du volume d'air. Le volume total d'eau et d'air croît et V_d diminue.

- **Texture:** la V_d max. dépend du type de terre et de ses caractéristiques principales dont:

- la dimension moyenne des grains pour un passant de 50 o/o (050) dans la courbe granulométrique.

- Les terres argileuses: V_d max.= 2 000 kg/m³.

- Les terres sableuses: V_d max.= 2 200 kg/m³.

- Les terres graveleuses: V_d max.= 2 500 kg/m³.

En moyenne, la P_d max. d'une terre comprimée varie de 1700 à 2300 kg/m³.

- l'étendue granulométrique: pour une texture uniforme, la porosité est élevée et la sensibilité à la teneur en eau réduite. La courbe Proctor est aplatie. Pour une texture étalée, la courbe Proctor est plus pointue.

- le % des grains avec un $\phi < 0,08$ mm accentue les variations de P_d suivant la teneur en eau: courbes plus pointues.

❖ **La courbe Proctor :**

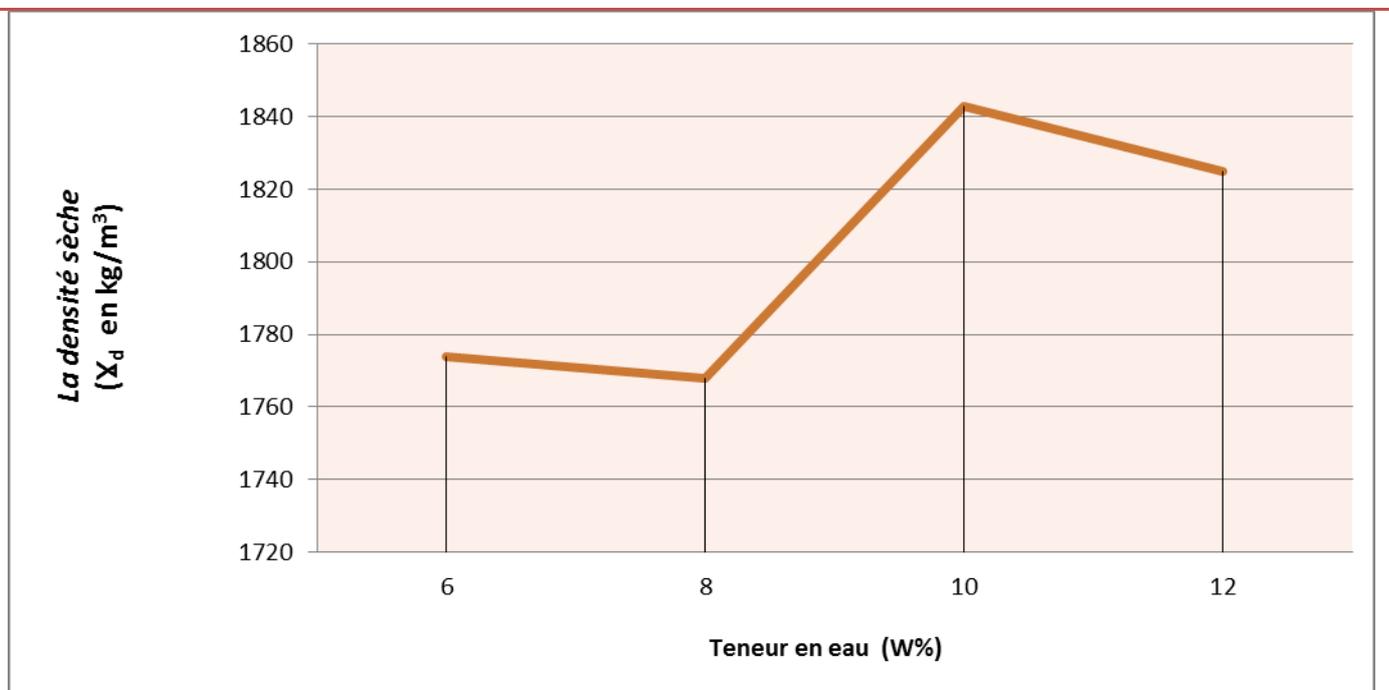


Figure 50: La densité sèche en fonction de la teneur en eau

Source : auteur

IV. Conclusion :

a travers l'essai Proctor nous avons pu déterminer la teneur en eau optimal équivalente à l'énergie de compactage fournie par la dame de Proctor , cette teneur en eau est de l'ordre de 10%.

Les teneurs en eau moins de 10% notamment 06% et 08% ont donné de très mauvais résultats d'où les densités sèches équivalente à ses deux pourcentage n'ont même pas atteint la moitié de la densité sèche optimale.

La teneur en eau de 12% quoiqu'elle a donné une densité moins que la densité maximal , demeure plus ou moins admissible

➤ Cohésion

La cohésion d'une terre exprime la capacité de ses particules à se maintenir ensemble lorsque l'on exerce sur le matériau une contrainte de traction. La cohésion d'une terre dépend des caractéristiques de collage ou de cimentation de son mortier grossier (fraction de grains de $0 < 2$ mm) qui lie les grains inertes entre eux

Cette propriété est donc tributaire de la quantité et de la qualité collante des argiles. La cohésion se mesure par l'essai de Traction à l'état humide ou encore dénommé l'essai du "8". La cohésion d'une terre est représentée sur un diagramme de résistance à la traction "T".

L'essai de cohésion que l'on appelle aussi essai à la traction humide ou encore essai du 8 (à cause de la forme de l'échantillon testé) a été mis au point par J'allemand Niemeyer. Il fut publié pour la première fois en 1944 puis adopté en 1947 par Wagner pour être enfin intégré aux normes Din en 1956.

La terre est constituée de 2 fractions de grains principales: les inertes ($\emptyset > 2$ mm) et le mortier grossier ($\emptyset < 2$ mm). Si l'on observe le mortier grossier afin d'évaluer la cohésion des grains entre eux, il faut faire un essai de résistance à la traction. Pour raccourcir la durée de cet essai, on le réalise sur un échantillon humide gagnant ainsi le délai du séchage. Cet essai peut se faire en laboratoire ou sur le terrain. En laboratoire, sur un appareil à balancier et pesage automatique, ou sur un appareil à potence avec débit et arrêt de charge automatique, ou sur un appareil sophistiqué, entièrement automatique avec enregistrement. Sur le terrain, avec quelques planches et clous, ficelles et récipients en suspendant l'échantillon à une branche d'arbre, une table ou un encadrement de porte, etc. Le sable de charge peut être remplacé par un liquide, eau ou huile de vidange par exemple. Il faut réduire au maximum la distance de chute de la charge.

I. Mode opératoire

La fraction de grains de $\emptyset > 2$ mm est éliminée à la main. L'essai est donc pratiqué sur la fraction mortier grossier qui est triturée sur une plaque métallique

(60 x 60 cm), à l'aide d'un marteau (2,5 x 2,5 cm) en ajoutant régulièrement très peu d'eau, si nécessaire, jusqu'à obtenir une galette compacte et de consistance plastique. Cette galette est ensuite soulevée à l'aide d'un couteau et découpée en larges lanières qui sont posées les unes à côté des autres verticalement puis de nouveau écrasées avec le marteau. La terre est ainsi retravaillée, une nouvelle galette de nouveau découpée puis encore écrasée, jusqu'à ce que la structure de la galette soit tout à fait homogène sur sa face inférieure et d'humidité égale en tout point de sa masse.

Les terres doivent reposer 12 à 24 h après la préparation pour permettre la meilleure dispersion de l'eau et donc favoriser l'obtention d'une cohésion maximale des grains.

200 g de la terre préparée sont prélevés. La masse volumique de cette terre est élevée par pétrissage et en la tapant plusieurs fois sur une plaque métallique. On forme ensuite une boule de $\varnothing = 50$ mm.

Il faut éviter une manipulation prolongée pour ne pas faire varier la consistance de la boule en différents points de sa masse par un séchage incontrôlé. Pour des terres maigres, le \varnothing de la boule est réduit de 1/2 à 1 mm.

Pour les terres grasses, le \varnothing est augmenté de 1/2 à 1 mm. Le diamètre peut être vérifié à l'aide d'un anneau. Ensuite, on laisse choir la boule d'une hauteur de 2 m sur une surface lisse et dure. La bonne consistance est obtenue si la partie aplatie de la boule est égale à 50 mm. Pour un \varnothing supérieur ou inférieur, il faut recommencer la préparation: laisser sécher pour un $\varnothing > 50$ mm (terre trop plastique) ou ajouter un peu d'eau avec un pulvérisateur) si le $\varnothing < 50$ mm (terre trop sèche). Ensuite on prépare l'échantillon; dans un moule en forme de 8 (section $22,5 \text{ mm} \times 22,3 \text{ mm} = 5 \text{ cm}^2$), légèrement huilé, la terre préparée est damée fortement avec une tige métallique de $\varnothing 20$ mm, en 3 fractions, jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'augmentation de la masse volumique.

On égalise ensuite les 2 côtés de l'échantillon avec un couteau, sans humidifier. L'échantillon est aussitôt démoulé en laissant tomber le moule sur une surface dure d'une hauteur de 10 cm. On a préparé au moins 3 échantillons.

L'échantillon est fixé sur l'appareil de mesure, suspendu à une griffe en fer ou même en bois dur de \varnothing intérieur égal à 70 mm, d'ouverture égale à 35 mm (largeur égale à 22 mm pour les griffes en fer). Une autre griffe suspend à l'échantillon un récipient qui recevra la charge de rupture: du sable ($\varnothing 0,2$ mm à 1 mm) venant d'un silo; 3000 g de sable en 4 minutes, à raison de 12,5 g/seconde ou au maximum de 750 g/mn, jusqu'à rupture de l'échantillon. Si la section déchirée contient un corps étranger, la préparation de la terre n'est pas homogène et la mesure n'est pas valable. La mesure de la cohésion est la moyenne de 3 mesures dont les résultats ne sont pas écartés de plus de 10%. Elle s'exprime en mbar (g/cm^2) ou (g/5 cm^2), la section de l'échantillon étant égale à 5 cm^2

II. Essai de cisaillement NFP 094-71-1 (W=10%)

N° Eprouvette	01	02	03
Poids du moule (g)	104,4	104,4	104,4
PH+moule (g)	213,6	213,7	213,9

Tableau 11 : les poids de moule et de PH+moule essai de cisaillement
Source : auteur

Déformation (mm)	Lecture anneau (100Kpa)	Lecture anneau (200Kpa)	Lecture anneau (300Kpa)
0.2	16	18	18
0.4	25	32	35
0.6	38	46	48
0.8	47	58	60
1.0	56	70	73
1.2	64	80	85
1.4	72	90	95
1.6	78	98	104
1.8	85	105	111
2.0	90	113	114
2.5	98	126	125
3.0	101	133	132
3.5	100	139	136
4.0	90	145	139
4.5	/	149	142
5.0	/	148	144

Tableau 12 : la déformation en fonction de lecture anneau



Figure 51: essai de cisaillement (en LTPO Tiaret)

Source : auteur

Tableau 13: poids des tares et des PH et poids secs
Source : auteur

Echantillon	1	2	3
Teneur en eau (%)	18.83	18.87	18.48
H (g/cm ³)	1.93	1.93	1.93
D (g/cm ³)	1.62	1.62	1.63
Ws (%)	24.69	24.69	24.31
S _R (%)	76.67	76.64	76.02
Contrainte normale (Kpa)	1.00	4.00	3.00
Déformation (mm)	3.00	4.50	5.00
Section (cm ²)	26.5	25.6	25.3
Force (Kgf)	40.70	60.05	58.03
Contrainte de cisaillement (Kpa)	1.54	2.35	2.29

Tableau 14: contrainte de cisaillement
Source : auteur

	Initiale	Finale	Initiale	Finale	Initiale	Finale
N° de la tare	10	22	29	11	20	30
Poids de la tare (g)	18,9	18,2	19,9	18,4	17,6	18,2
Ph+la tare (g)	76	74,2	76	80,1	71,2	73,7
Poids sec + la tare (g)	67,1	65,1	67,1	70,3	62,5	65,4



Figure 52 : une galette de notre terre cisailée

Source : auteur



LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DE L'OUEST

Dossier TRS3215

Type d'essai : UU Section de l'appareil : 28,3

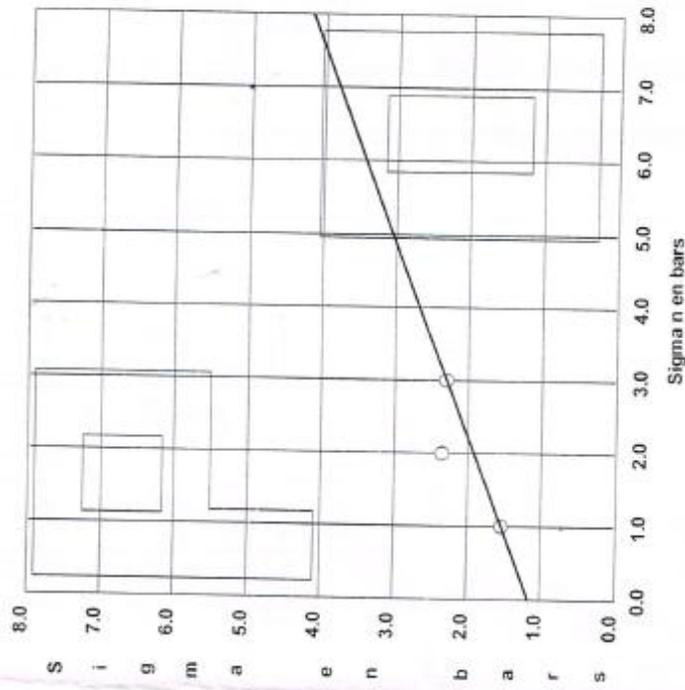
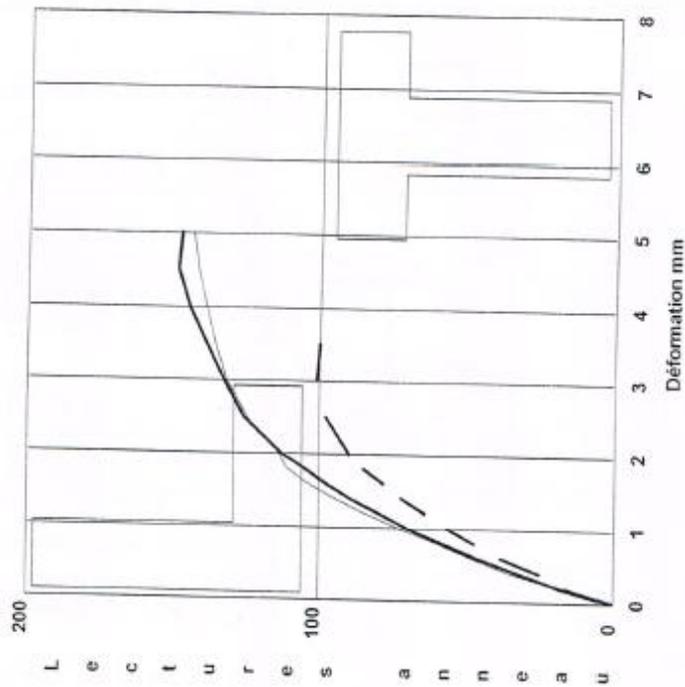
Coefficient de l'anneau : 0,403

Essai S/1 Prof. : W/10 %

ESSAI DE CISAILLEMENT RECTILIGNE A LA BOITE NORME NF P 94-071-1

Sigma N	N° Echan	Courbe	Dens.S t/m3	Wl %	WF %	Ws %	Sr %
1 Bar	I	---	1.62	18.93		24.69	76.67
2 Bars	II	---	1.62	18.87		24.69	76.42
3 Bars	III	---	1.63	18.48		0.00	0.00
Moyenne				18.76			

C	φ
1.157 bars	20.75°



LTPO-Unité de Tiaret

Etabli le 14/05/2017

Révisé le

Indice de révision

MATERIAUX TERRE

TIARET

Figure 53: résultats d'essai de cisaillement. Source: auteur (LTPO Tiaret)

III. Conclusion

Pour le pisé est malgré que la courbe granulométrique de notre terre ne s'inscrit pas dans le fuseau admissible mais les résultats de l'essai de cisaillement nous indiquent que cette terre est valable pour son utilisation dans la confection des murs en pisé l'essai.

Pour le cas de la fabrication des blocs d'adobe l'indice de la cohésion semble un peu bas pour assurer une meilleur résistance a la traction

4.3.3 Conclusion générale :

Nous pouvons dire que pour tout projet de construction en terre crue, que se soit en pisé , en adobe ; en btc ... , l'étude complète s'avère nécessaire d'où une bonne connaissance de cette terre, peut nous orienter vers le choix de la technique à utiliser et même elle peut nous mettre dans la possibilité de prévoir son comportement mécanique et même sa peut nous fournir des indice de durabilité de cette terre.

La reconnaissance d'une terre donc un des préliminaires indispensables ; l'un des moyens les plus sûres est de prélever des échantillons autant que possible intacts. Il faut dans tout les cas compléter les indication de la pré identification par des analyses au laboratoire telle que l'analyse granulométrique et sédimentométrique, une détermination de la plasticité, la compressibilité , et la cohésion .

Ces renseignements permettant aux bâtisseurs en matériau terre d'identifier les sols et par conséquent se faire une idée des paramètres à tenir en compte pendant la conception, le calcule, et la réalisation d'un projet en terre crue.

Chapitre 5

Essais mécaniques sur la terre crue choisie

Chapitre 5 : Essais mécaniques sur la terre crue choisie

5.1 Pisé

5.1.1 Introduction

Dans son principe, le pisé est assez simple; de la terre versée dans un coffrage est damée. Les conditions idéales d'une bonne terre à la bonne humidité ne sont pas toujours réunies. De même, une technologie trop sophistiquée peut infirmer cette simplicité originelle du pisé. Les variantes technologiques sont très nombreuses selon les régions du monde où l'on pratique le pisé

5.1.2 Préparation de la terre

La terre à pisé, dans son état naturel, est d'une cohésion variable. Selon le degré de cohésion de la production, elle peut être facilitée ou rendue plus complexe. Par ailleurs, si la technologie d'adobe ou des blocs comprimés supporte quelques variations dans la qualité de la terre, compensées par l'adoption de mesures appropriées lors de la production qui assurent la qualité de l'ouvrage, la technologie du pisé est plus rigoureuse.

La qualité d'une maison en pisé dépend pour beaucoup d'une qualité uniforme de la terre. L'exploitation du matériau brut à la carrière devra assurer cette meilleure uniformité de la qualité de la terre. Quand on construit en pisé non stabilisé, il convient de s'assurer que la terre employée réponde aux critères de choix, notamment pour sa composition granulaire et son humidité. Il est dans ce cas préférable de travailler avec une bonne terre à son humidité naturelle appropriée: l'ensemble du processus de production est simplifié; ce qui n'est pas le cas lorsque d'autres étapes de criblage, de pulvérisation, de mélange à sec et humide sont nécessaires. De trop grandes variations par rapport au fuseau granulométrique du pisé sont très préjudiciables à l'économie, au rendement et à la qualité du pisé.

Etant donné que cette technique est extrêmement rigoureuse nous avons procédé à une confection de blocs en pisé suivant le procédé Proctor, la terre est humectée à la teneur en eau optimale et la compacité correspondante telles que définies par l'essai de Proctor déjà cité¹. Pour assurer l'uniformité de la qualité de la terre exigée.

Le choix d'une confection avec une pulvérisation est dû à la faible humidité naturelle de notre terre. Sachant que la courbe granulaire de notre terre n'est pas inscrite dans le fuseau admissible du pisé, néanmoins les résultats de l'essai de cisaillement (cohésion) nous a permis de l'utiliser pour cette technique puisque notre terre demeure de bonne cohérence.

¹ Voir résultats de l'essai Proctor sur la terre (page 94)

5.1.3 Dimension des éprouvettes

Pour le pisé la relation entre la densité sèche (par compactage) et la teneur en eau est un paramètre primordiale pour tout travaille de définir ces caractéristiques mécaniques, cette relation telle qu'elle a fait l'objet de l'essai de Proctor nous a donné l'idée de projeter les paramètres de l'essai Proctor 1 (dimensions de moule², énergie de compactage³, teneur en eau correspondante à la compacité la plus élevée) sur la confection de blocs en technique de pisé.

5.1.4 Confection des éprouvettes

La confection est faite en faisant référence au mode opératoire⁴ normalisé pour effectuer l'essai Proctor

5.1.5 Détermination des caractéristiques mécanique des les blocs de pisé

A l'état humide

La détermination de la résistance à la compression est très importante vu que la construction d'un mur en pisé est continue, et nécessite une bonne résistance afin que le mur ne risque pas l'effondrement.

Les résultats obtenus sont motionné sur le tableau suivant:



Figure 54 :éprouvette de pisé

Source : auteur

Age (après déparaffinage)

Eprouvette écrasée immédiatement

Resistance a la compression (en bars)

7,2

¹PROCTOR STANDARD AASHO

² DIAMÈTRE DU MOULE: 10.16 cm ; HAUTEUR DU MOULE: 11.70 cm

³ ÉNERGIE : 6 j/cm³ ; COUCHES PAR ECHANTILLON : 3 ; COUP PAR COUCHE : 25 HAUTEUR DE COUCHE : 4 cm ;

⁴Retour a la Page « 93 »

A l'état sec

Nous avons aussi effectué les essais d'écrasement à l'état sec pour déterminer la résistance finale de nos blocs. Le durcissement des éprouvette a été accentué à l'étuve pendant 48h après déparaffinage.

Les teneur en eau sont différenciées à celle de l'optimum pour voir l'impact de la teneur en eau sur la résistance à la compression.

Les blocs de pisé destinés à l'écrasement sont fractionnés en trois galette, ce fractionnement est résultant de la rupture entre les trois couches de compactage après le séchage à l'étuve.

Les résultats sont les suivants :

résistance à la compression (en bars)				
Teneur en eau	Galette 01	Galette 02	Galette 03	Moyenne
W=12%	12,37	RNC ¹	RNC ¹	12,37
W=06%	7,36	RNC ¹	RNC ¹	7,36

Tableau 15: la résistance à l'état sec au éprouvette pisé
Source : auteur

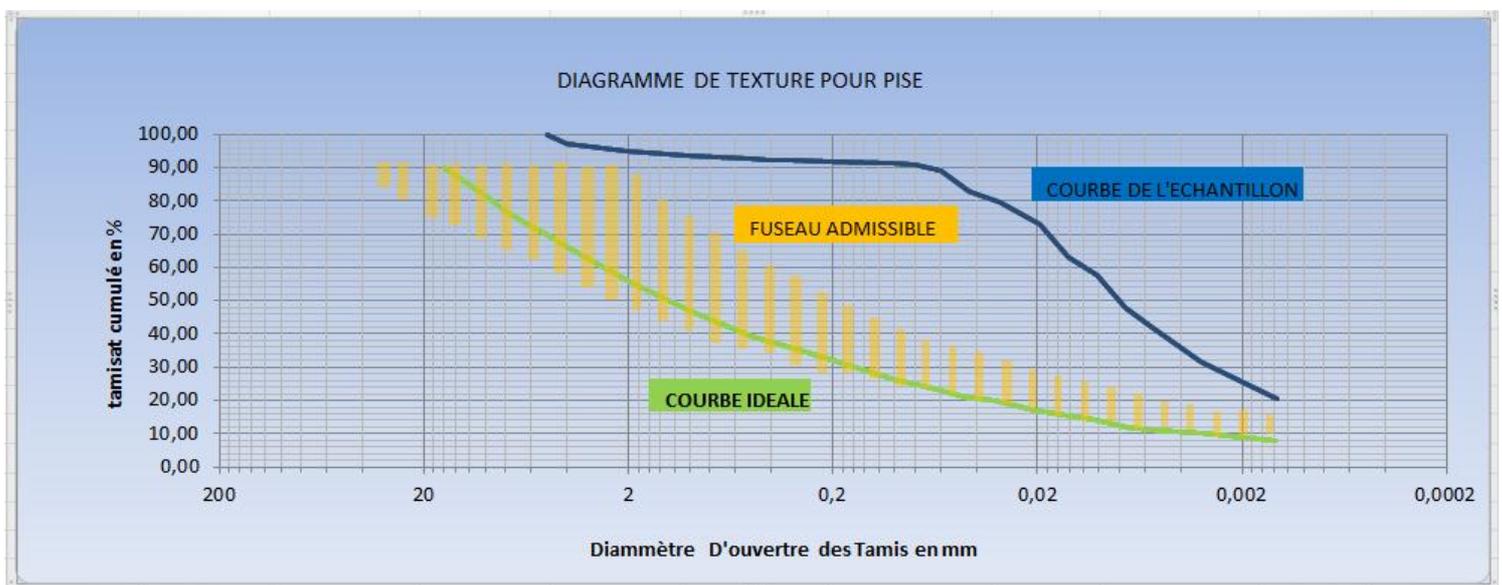


Figure 55: Figure : diagramme de texture pour pisé
Source : auteur

¹ Résultats non concluant : endommagement de l'échantillon sans donner un résultat admissible

5.2 Brique d'adobe

5.2.1 Introduction

La production des briques d'adobe décrit des modes parmi les plus simples pour la production de matériaux de construction. L'histoire, la géographie et les techniques de production de l'adobe exposent un très large registre de variantes. Ainsi les schémas de production décrits en détail, pourraient être multipliés à l'infini.

Les adobes peuvent être produites à partir d'une terre liquide ou d'une terre plastique, sans ou avec moules, de conceptions très diverses. L'état plastique permet aussi une production par extrusion. Au terme du procédé de production, contrairement aux blocs comprimés et au pisé, l'adobe est un produit malléable et fragile. Et s'il y a mécanisation, souvent le premier poste visé sera l'extraction. Vient ensuite le malaxage puis le moulage en dernier lieu.

5.2.2 Préparation de la terre d'adobe :

La terre est dans l'état humide naturelle tamisée pour éliminer les grands cailloux, puis travailler pour que le mélange soit cohérent, le gachage est fait progressivement pendant le malaxage mécanique pour permettre d'avoir une absorption homogène de l'eau avant que la terre soit boueuse et pateuse; ce qui nous permet de contrôler l'état plastique de la pâte.

5.2.3 Dimension des éprouvettes

Nous avons opté pour des blocs parallélépipédiques de dimensions proches à celles des blocs utilisés en construction en adobe dans la pratique ancestrale ceci pour savoir la résistance de nos blocs vis-à-vis les sollicitations principales (compression, traction...) tout en respectant le rapport « $H = (1.8 \text{ à } 2) * a$ ».

Ce choix de dimension a aussi pour objet d'éliminer l'influence de la compacité sur le résultat car on sait bien que les dimensions de l'éprouvette peuvent engendrer une différence de compacité dans une procédure d'un moulage manuel (le compactage sur des dimensions plus grande peut conduire à une compacité plus amoindrie, tandis que le compactage sur des dimensions plus petites induit à une compacité plus élevée)



Figure 56 confectionnement d'éprouvette d'adobe
Source ; auteur

Pour ceci les dimensions choisies sont de l'ordre de (10*10*20) cm.

5.2.4 Confection des éprouvettes

Le malaxage a été fait à l'aide d'un malaxeur pour l'assurer une bonne disposition des grains et une meilleure absorption de l'eau par les différents constituants du sol.

La teneur en eau de gâchage était contrôlée de manière d'ajouter de l'eau pendant le malaxage jusqu'à l'obtention d'un mélange pâteux et plus maniable en garantissant toutefois que la quantité d'eau ajouté demeure inscrite dans l'intervalle de plasticité sans atteindre la limite de liquidité.

Donc la teneur en eau prise en considération est celle correspondante à l'optimum définie à 25 coups sur l'appareil de Casagrande (T.E.O= 52,55%) , ce pourcentage élevé est dû la grande absorption de l'eau par les grains fine limon+argile .

Le moulage a été fait manuellement, le remplissage des moules en bois (20*10*10) cm, a été fait sur trois couches comprimées avec une force humaine tel qu'il est suivi dans les traditions empiriques

Le démoulage a été fait sur place, et vu la grande adhésion de notre pâte très collante; le démoulage été difficile et certains déformation sont apparus sur les blocs d'adobe.

5.2.5 Cure et stockage des blocs :

Les blocs sont laissés séchés à une température ambiante afin d'évité l'apparition des fissures dues à la perte rapide d'eau de gâchage.

Les déformations constaté sur les blocs après démoulage sont de plus en plus accentuées puisque les blocs n'ont pas gardé leur forme à l'état humide, et aussi à cause du phénomène de retrait.

Note : le démoulage des éprouvettes dans les prochains travaux ne sera fait qu'après 24h pour préserver leurs dimensions ainsi les moules seront métallique pour faciliter le démoulage.



Figure 57: stockage d'éprouvette d'adobe

5.2.6 Détermination des caractéristiques mécanique des les blocs d'adobe:

Les caractéristiques recherchées dans les blocs d'adobe sont très nombreuses et variables, en addition a celles-ci certains caractéristiques relatives a la durabilité et au confort thermique ont aussi fait l'objet de nombreuses recherches.

Quand il s'agit de notre travaille nous avons opté pour la détermination des caractéristiques élémentaires qui doivent être confirmées pour prononcer à ce que cette terre peut être convenable a la construction en terre crue dans la région de TIARET, pour cela nous devons identifier le comportement de nos blocs vis-à-vis les sollicitations élémentaires qui réagissent sur une construction en murs porteurs en terre crue. A défaut traction et compression.



Figure 58 : écrasement d'éprouvette d'adobe
Source : auteur

Ces essais sont effectués à des âges différents pour nous permettre de suivre l'évolution de la compression et de la traction en fonction de durcissement a travers le temps.

Les âges correspondant aux essais sont choisis suite à une constatation visuelle et la variation en masse, ces deux paramètres nous ont indiqué l'état de durcissement des blocs toute en tenant compte que dans le savoir ancestrale les blocs était prêt a l'utilisation dès qu'ils atteindraient généralement¹ l'âge de 30 jours.

Les résultats sont donne sur le tableau suivant:

	15jrs	30jrs
Résistance à la compression (en bars)	6	5,6

Tableau 16 : la résistance des éprouvettes d'adobe
Source : auteur

¹ Cet âge est différencie de zone a autre suivant les conditions climatiques et les conditions stockages

5.3 Vérification des résultats obtenus

D'après les tableaux de référence par l'institut CRAterre

CARACTÉRISTIQUES	S	U	CLASSES				I BLOCS COMPRIMÉS			II ADOBE		III PISE	
			A	B	C	D	1 CRU	2 STA	3 STA	4 CRU	5 STA	6 CRU	7 STA
RÉSISTANCE À LA COMPRESSION SEC À 28 JOURS * (+40% après 1 an, +50% après 2 ans)	σ_{28}	bar	> 120	50 120	20 50	ENVIR. 20	D *	C *	A *	D	C	D *	C *

Conclusion générale :

On a une résistance à la compression trop faible pour cette terre (moins de 20 bars) pour le pisé, et ainsi pour les briques d'adobe, par rapport aux valeurs de référence établies par l'institut CRAterre, on peut constater qu'avec cette terre, on a obtenus des résistances moins que admissibles ce que nous oblige a chercher d'améliorer les caractéristiques de la terre par des procédures de stabilisation.

Partie III

Correction de la terre et stabilisation des blocs d'adobe

Chapitre 6

Correction de la terre

Chapitre 6 : Correction de la terre

Problématique :

L'utilisation d'une terre dans la construction dépend de ses qualités de consistance et ses performances mécaniques et physique aussi bien que le type de son utilisation. Dans cette perspective, il est clair selon les expériences déjà effectuées et vécues ; que ce n'est pas toujours toutes sortes de terre demeure valable pour être utilisée dans la construction en terre crue, d'où il est nécessaire lors de la sélection d'une terre de prospecter les qualités exigées surtout celles relatives à la texture et la présence centimétrale d'argile.

Cette sélection demeure toujours incontournable, mais n'est pas à elle seule d'atteindre la performance demandée, dans ce sens, une correction de texture peut avoir lieu pour former un sol contenant des éléments ou des quantités modérées pour répondre à certains besoins exigés par la nature de la construction, par son emplacement et les conditions climatiques de la zone d'implantation.

L'intervalle de l'intervention sur la terre crue reste encore ouvert, en vue d'améliorer son aptitude envers les différentes sollicitations liées aux facteurs extérieurs

Là où la texture n'a pas grande chose à ajouter, la stabilisation par l'ajout de certains composants peut ramener des réponses dans ce cas.

Pour notre cas d'étude, on se pose la question de quelle correction ou stabilisation peut-on entreprendre pour aboutir à réussir un projet de construction en une terre crue qu'on déjà sélectionné et choisi, pour ceci il est nécessaire en premier lieu de savoir où réside l'insuffisance dans notre terre en se référant toutefois aux critères déjà identifiés par les recherches dans ce domaine.

La texture :

A travers la courbe granulométrique de la terre choisie, on peut clairement distinguer qu'il ne s'agit pas pour cette terre d'une courbe continue, ce qui veut dire que les proportions des grains quant à leurs diamètres ne peut pas assurer un remplissage complet et cohérent des vides, donc même si le volume des vides occupés par l'air se voit réduit, la disposition des grains peut devenir incohérente, car dans le cas où la quantité de la fraction fine par rapport à la fraction grossières atteint un rapport trop élevé, la fine au lieu de jouer le rôle d'une colle qui fixe les gros grains elle tend à les écarter et les éloigner, et à la fin la terre risque dans sa disposition de texture d'avoir un phénomène très semblable à celui de ségrégation en bétons.

En addition à ce phénomène, la quantité de la fraction fine rend notre terre trop riche en fine et trop pauvre en fraction moyenne et grossière qui doivent constituer le squelette de la terre pour subir et transmettre les charges externes, et donc il est nécessaire de rattraper ce déséquilibre par l'ajout d'un autre constituant de diamètre de gains plus gros. Dans le savoir ancestral l'ajout de sable était le moyen qui rend la pâte plus maniable et plus résistante, ce moyen par voie scientifique semble aussi une solution pour reconstruire le squelette de notre terre.

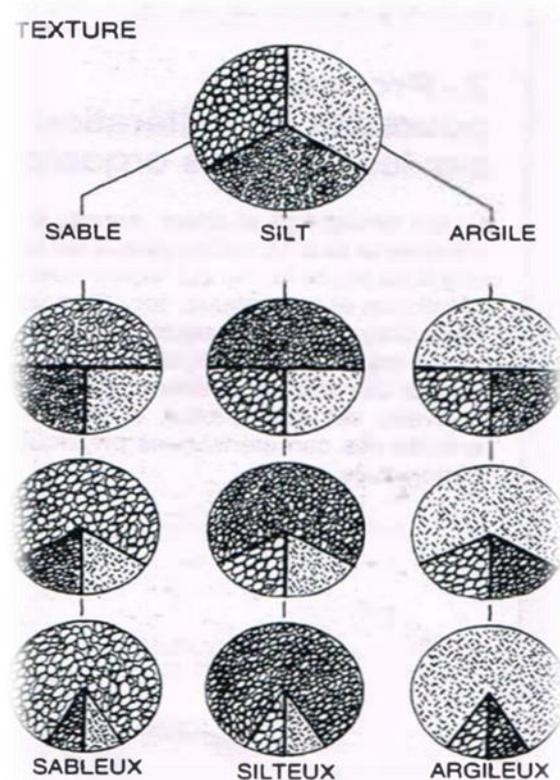


Figure 59 : structure microscopique de la terre argileuse. Source : CRAterre

Texture recherchée

Connaître la texture idéale d'une terre crue convenable aux blocs d'adobe :

Cette courbe dépend en premier lieu de plus gros diamètre qui peut être présent dans le sol ou le mélange. Cette courbe est formée suivant la formule de Fuller qui peut déterminer le pourcentage d'une classe suivant un diamètre recherché, les travaux expérimentaux réalisés dans ce domaine notamment par l'institut CRAterre ont démontré que dans la plupart des terres ayant une texture représentée par une granulométrie inscrite dans les fuseaux prédéfinis ont donné de bons résultats de performance et de durabilité.

Pour obtenir la meilleure résistance d'une terre, tant aux sollicitations mécaniques qu'à l'action de l'eau, il faut:

- réduire la proportion de vides;
- multiplier les contacts entre les grains.

Pour des grains sphériques, il est possible de calculer la proportion relative de chaque fraction de grains de diamètre différent s'arrangeant en un milieu le plus dense possible. On emploie la formule de Fuller: $P = 100 (d/D)^n$. avec :

p : proportion de grains d'un Ø donné.

d : Ø des grains pour la proportion p visée.

D : Ø du grain le plus gros.

n : coefficient de gradation.

n = 0,5 pour des grains tous sphériques. Mais dans la terre, si les sables et les graves sont éventuellement d'un Ø presque sphérique, les argiles s'en éloignent. Aussi, dans le domaine des travaux routiers où l'on emploie souvent des terres sableuses, on corrige le manque de sphéricité par un n à 0,33. En construction en terre, on prend n = 0,20 à 0,25.

Courbe idéale de l'adobe

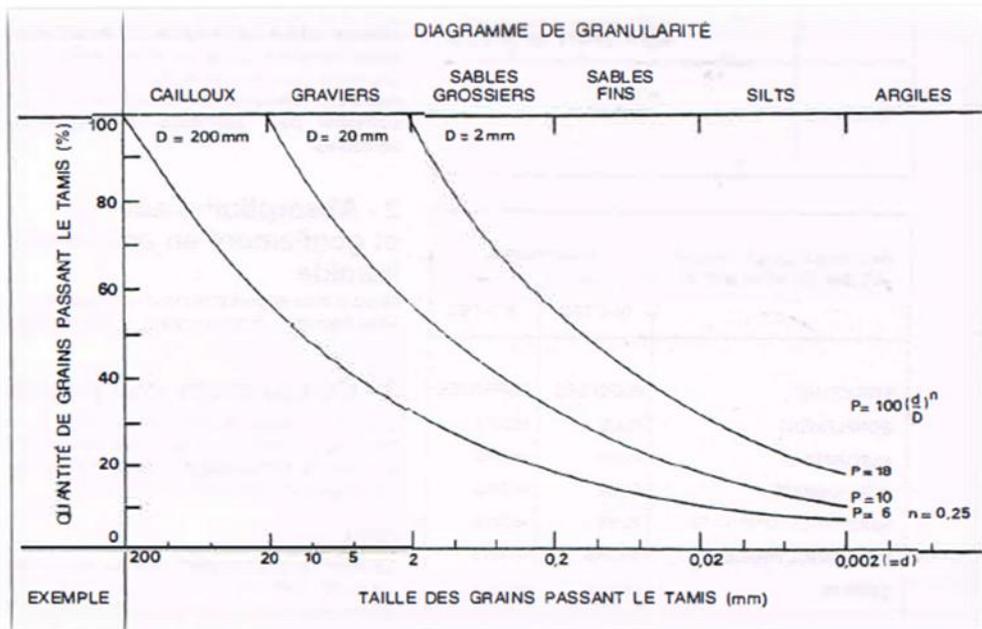


Figure 60 : les courbes idéales de l'adobe selon les expérimentations de CRAterre.

Correction de la texture

C'est les différentes forces de liaison établies entre les composantes d'un matériau qui donnent une cohérence aux particules d'une terre, les rassemblent en agrégats. Ces forces sont très variables en intensité et dépendent du comportement autonome de chaque fraction des composants. Il est clair donc que la résistance d'un matériau grenu dépend de sa compacité, c'est-à-dire de les différentes proportions de matière qu'il contient, la fraction grossière constitue la structure du matériau, supporte et répartit les charges. Les grains contenant des particules minérales de diamètre $> 2 \mu$ s'intercalent pour transmettre et répartir les charges entre ces grains grossières. Elles sont aussi très cohésives ; leur liaison chimique est de type interatomique en trois dimensions. Ces minéraux du type quartz et feldspaths constituent le squelette du sol qui résiste très bien à la déformation lorsqu'ils sont présents en quantité suffisante.

Pour la fraction colloïdale, par contre, les particules de diamètre $< 2 \mu$ présentent une liaison qui est pour l'essentiel en deux dimensions (structure en feuillets). Cette liaison est du type intermoléculaire (c'est-à-dire physique et de force moyenne ou faible) : ce sont principalement les phyllosilicates tels que kaolinites, illites et montmorillonites, micas, oxydes d'aluminium hydrique, l'argile joue le rôle de ciment, elle maintient ensemble les grains inertes et assure en grande partie la cohésion de la terre. Mais il a également des vides d'air entre ses constituants. L'air ne résiste pas aux forces. L'idée consiste donc à réaliser un mélange avec le moins de vide possible. Il faut donc, réaliser un mélange qui comporte le plus de matière solide possible.

Les terres disponibles peuvent être améliorées par correction granulaire. Il est possible de corriger une teneur trop forte ou trop faible en graves, en sables ou en fines, soit par apport de fractions faisant défaut soit par exclusion de fractions en excès.

Notre terre dans une perspective de correction, elle s'inscrit dans les démarches suivantes :

Terre trop riche en limon

Terre très sableuse ou très argileuse¹ : Si les terres disponibles sont très différentes et particulièrement sableuses et argileuses, il sera nécessaire de les mélanger. On portera sur un même diagramme granulométrique les courbes des terres sableuses et argileuses ainsi que le tracé de la courbe optimale recherchée. On joindra par une droite le point le plus bas sur la courbe de la terre sableuse au point le plus haut sur la courbe de la terre argileuse.

L'ordonnée du point d'intersection entre cette droite et la courbe optimale nous donne la proportion de la terre la plus fine à mélanger à la terre la plus grossière pour obtenir une texture qui approche celle de la courbe optimale.

Donc pour diminuer la teneur en limon de notre terre on doit procéder à la compensation de cette teneur par l'ajout d'un autre matériau.

Terre trop riche en fines

Une terre de ce type peut être améliorée en enlevant les fines par lavage. Néanmoins, cette technique demeure très difficile à contrôler car on risque d'enlever la totalité des fines. Il est préférable de laver entièrement une certaine quantité de terre puis, après séchage, de la mélanger avec la terre initiale. Cette procédure est délicate. Aussi, il conviendra plutôt de réaliser un mélange de la terre initiale avec une terre plus riche en éléments grossiers dont on s'assurera qu'elle ne contient ni fines, ni éléments d'un diamètre supérieur à la grosseur de grain maximale admissible¹.

¹ Traite de l'architecture en terre. CRAterre.

On va dans ce cas **apporter un matériau grossier** qui peut ramener la courbe de mélange à se rapprocher aux maximum à la courbe édile, et aie une même tendance ; ce matériau grossier ne doit pas contenir des très gros grains pour ne pas compromettre la maniabilité de la pâte pendant le moulage des blocs en terre crue.

Ce matériau est fort susceptible d'être un sable, tel qu'il est utilisé pour le mélange de la construction traditionnelle, ou même dans les procédés de fabrication des terre cuites, ce sable doit contenir des fractions grossières pour pouvoir atteindre le mélange recherché.

Terre à texture discontinue

La texture discontinue d'une terre est caractérisée sur la courbe d'analyse granulométrique. On peut en effet observer deux tracés caractéristiques.

- La courbe est plate pour une fraction de grains déterminée: cette fraction granulaire fait défaut dans la terre analysée. Il conviendra alors d'apporter à la terre les éléments de cette fraction manquante en juste proportion.
- La courbe décrit une ascension très nette pour une fraction de grains déterminée: (**dans notre cas le limon témoigne cette ascension**) cette fraction granulaire est trop abondante dans la terre analysée. Il conviendra alors d'exclure une partie de cette fraction par tamisage ou d'équilibrer cet excès par un apport d'autres fractions de grains.

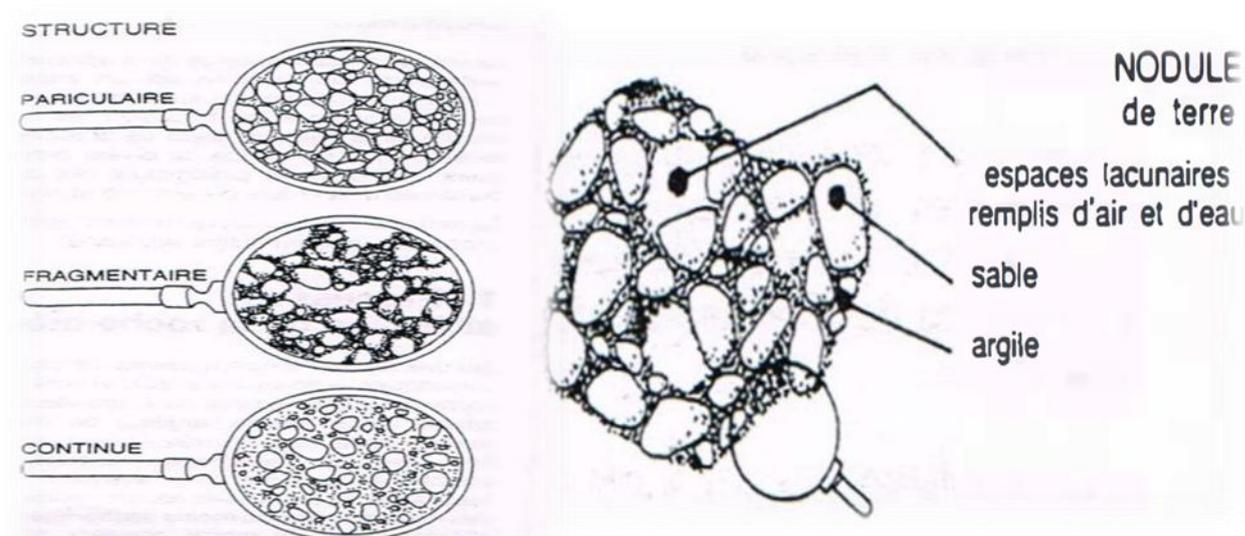


Figure 61 : différentes manières de disposition des grains selon la composition granulométrique de la terre. Source : CRAterre

Cette procédure ne sera entreprise que si elle s'impose vraiment pour l'obtention de la qualité recherchée du matériau.

L'objectif de cette procédure est donc d'introduire un nouveau composant qui à le double rôle de diminuer la présence de la fraction fine dans notre terre et de créer des éléments de squelette capable à assurer la bonne résistance aux sollicitations qui peuvent influencer la terre et de pouvoir les transmettre avant d'atteindre le seuil de rupture.

Cette correction est faite graphiquement par tâtonnement à travers l'imbrication des courbes granulométriques pour avoir une courbe résultante qui doit de rapprocher au maximum à une courbe idéale.

Pour procéder à cette correction, nous avons utilisé un sable concassé lavé pour éliminer la fine, ce choix était basé sur le fait que le sable naturel est fin, et vu la rareté de trouver un sable naturel grossier dans la région nous avons opté pour ce choix.

Procédure de la correction :

Le sable :

Pour ce cas d'utilisation d'un sable concassée on doit s'assurer que ce sable ne contient plus de fine qui est due au procéder de concassage, ce qui n'est pas le cas pour notre sable choisi provenant du concasseur de N'aima, dont on a constaté la présence de particules fines en formant une poudre, ce qui nous oblige à passer à un lavage de sable.



Figure 62 : lavage de sable. Source : Auteurs

Qualité granulaire des sables :

Les fuseaux :

Graphiquement, il est possible de représenter un secteur, appelé fuseau dans lequel la courbe granulaire du sable doit se situer pour vérifier le critère de qualité granulaire.

Le module de finesse : NF P 18 - 304

Analytiquement, le critère peut être vérifié par un nombre appelé module de finesse. Cette grandeur indique si un granulat comporte des grains plutôt fins, grossier. Il permet donc de détecter une discontinuité en début ou en fin de courbe et de définir une tolérance vis-à-vis de ces discontinuités.

Le module de finesse FM d'un granulat est défini par le pourcentage de la somme des refus cumulés, exprimés en pourcentage, sur les différents tamis de la série : 0.125 – 0.250 – 0.50 – 1.00 – 2.0 – 4.

Etablissement de la courbe granulométrique par tamisage :

Les résultats sont illustrés dans la courbe suivante :

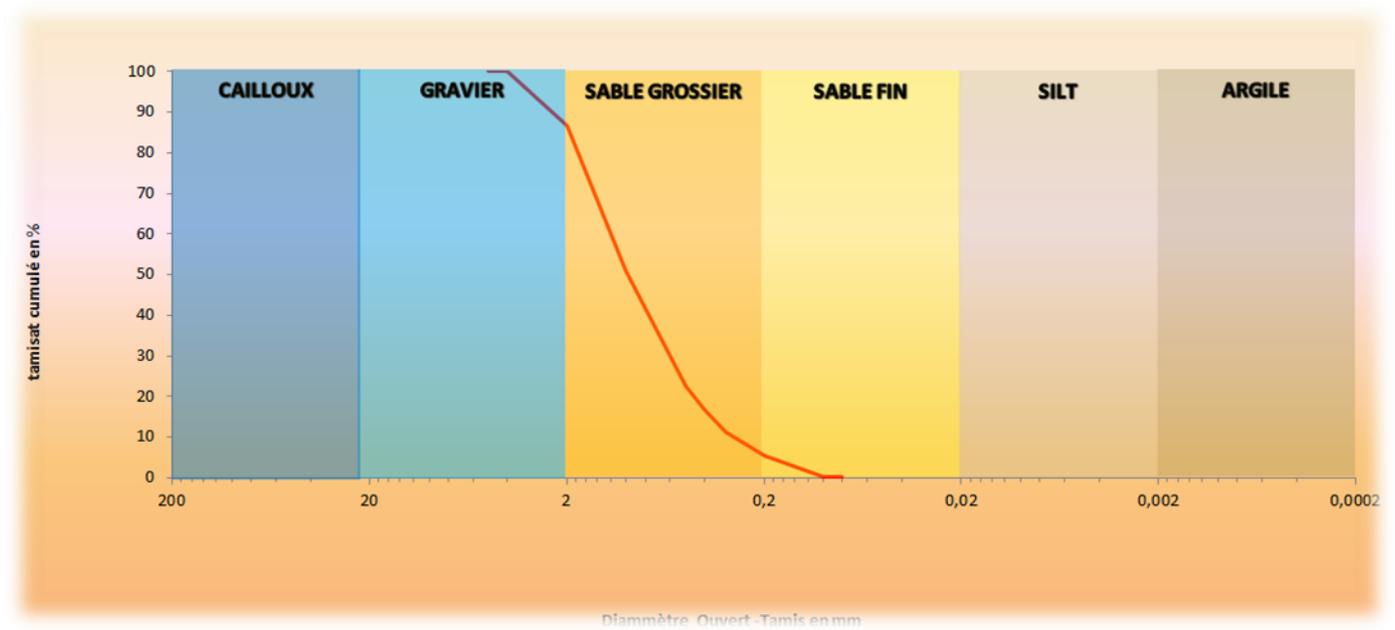


Figure 63 : Courbe granulométrique du sable de correction

Interprétation de la courbe :

La courbe indique que le sable contient dans sa quasi-totalité des grains de diamètre inclus dans l'intervalle de 02 à 20 mm, ce que fait que la classe de notre sable est d'ordre grossier.

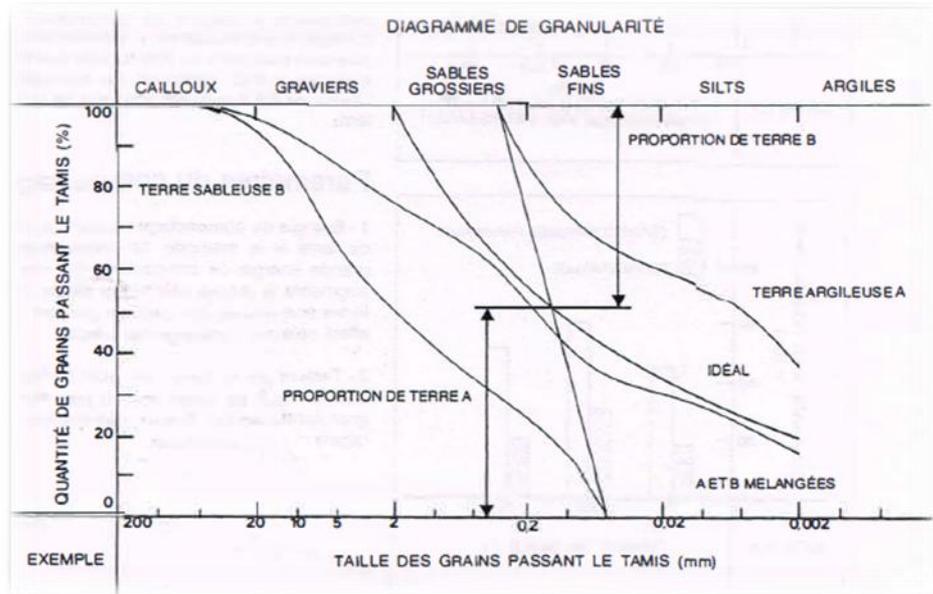


Figure 64 : méthode de correction par gradation. Source : CRAterre

Le tâtonnement sur la courbe de mélange :

Plusieurs méthodes de correction par gradation sont proposées par les chercheurs, on cite notamment la méthode de lignes de Joiselle et la méthode de Furry pour la formulation granulaire des bétons.

Or ces méthodes ne sont pas possibles pour résoudre notre problématique, de fait que ses méthodes interviennent sur la modification de proportion de chaque classe granulaire appart entière, et cela peut rendre l'objectif de correction de plus en plus compliqué où il faut séparer en premier lieu chaque classe granulaire seule pour pouvoir entreprendre la modification de sa teneur dans le mélange finale, ceci n'est plus pratique.

On a procédé au tâtonnement qui sert à proposer un pourcentage de la terre choisi ajouté au pourcentage équivalent de sable de correction, ceci par rapport à une consistance centésimale en masse pour aboutir graphiquement à une courbe de mélange la plus proche au model recherché.

Il s'agit dans cette phase de proposer des différentes formules de mélange pour avoir une courbe granulométrique du mélange qui se rapproche aux courbes idéales

La méthode la plus pratique nous a conduit à appliquer un pourcentage de sable de correction par rapport au pourcentage complémentaire de notre terre : comme exemple on cite 50% sable + 50% terre crue. Ces propositions ont été appliquées de manière globale sur toutes les classes au lieu d'appliquer des proportions sur chaque classe granulaire à part entière, ce qui épargne d'effectuer une longue opération de tamisage pour séparer chaque classe granulaire en vue d'appliquer le pourcentage en masse qui y est afférent.

Différents pourcentages ont été proposés, puis une analyse graphique a été établie pour en choisir la formulation la plus acceptable.

L'illustration suivante montre les courbes idéales et les fuseaux d'admission des terres crues convenables à la confection des blocs d'adobe. Ainsi le mélange résultant à la procédure de tâtonnement.

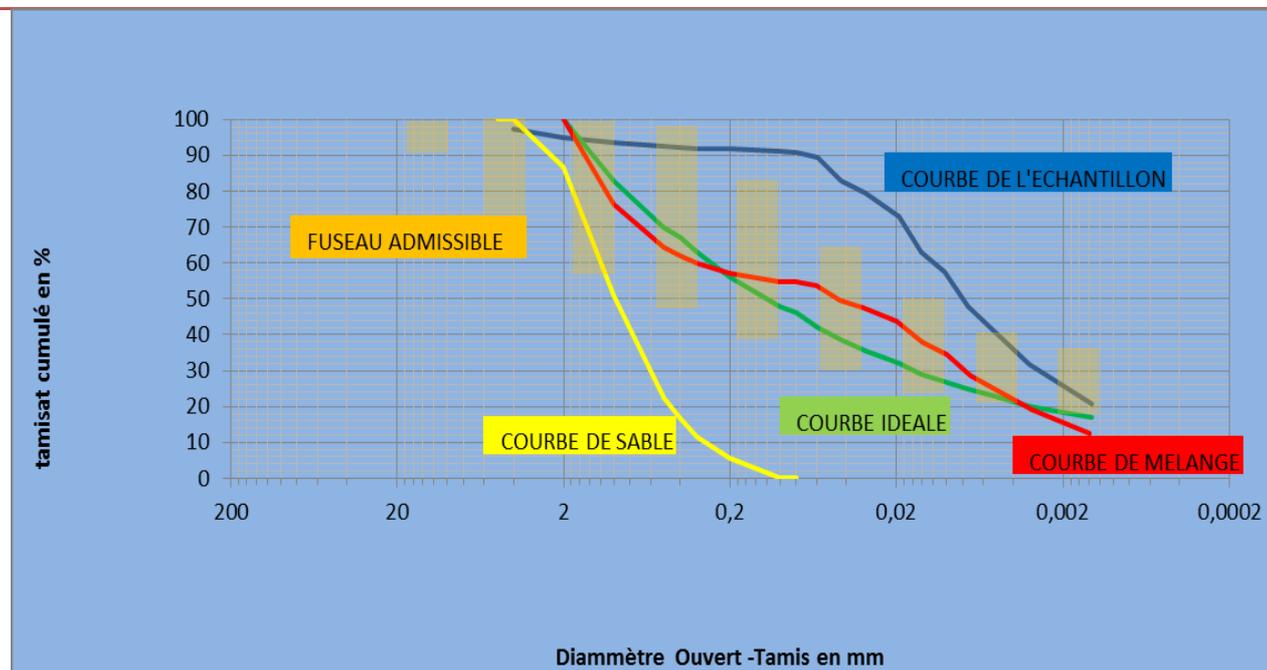


Figure 65 : le tâtonnement graphique pour obtention de composition de mélange proche à l'idéale

Chapitre 7

Stabilisation de la terre pour la confection des blocs d'adobe

Présentation du travail

Choix de type de construction en terre crue

A travers les recherches effectuées sur l'état de fait et les traditions de construction en terre crue en Algérie, et suivant une estimation des moyens disponible et ses apports en terme d'économie, nous avons met en exergue que le type le plus répandu et le plus susceptible à avoir une certaine admission chez les bâtisseurs en Algérie et notamment dans notre zone est celui de **briques d'adobe stabilisés**.

Confection d'éprouvettes

Pour pouvoir apporter des jugements il nous faut confectionner des éprouvettes témoins qui servent à créer une références à partir la quelle on peut situer l'apport des stabilisations entreprises.

Les éprouvettes sont confectionnées à partir du mélange corrigé, à une teneur en eau adéquate, on note la diminution de la teneur en eau de gâchage après l'ajout de sable grossier, cette teneur en eau est à l'ordre de 20% ce qui nous permet d'obtenir une pate plastique donnant la possibilité de bien remodeler la pâte, sans pour autant augmenter cette plasticité aux limites de liquidité.

Les éprouvettes sont de dimension de (4x4x16) cm, préparées grâce au moule prismatique, ces éprouvettes sont soumises par la suite au essaies de traction et de compression.

Choix des âges pour effectuer les essais mécaniques

Les différents âges des essais mécaniques ne sont pas choisis arbitrairement, mais selon un suivi effectué sur le degré de durcissement à travers les constatations faites sur la variation de la masse et les valeurs de retrait, quant la masse d'une éprouvette devenu stable on peut juger que le durcissement à atteint son degré maximal , pour accélérer ce phénomène de durcissement on à procédé à mettre les éprouvettes dans l'étuve à un degré de 40°C, cette température est correspondante aux températures d'assèchement dans les zones aride ayant construit avec de la terre crue, cette température n'influe pas également sur la composition chimique de la terre et n'engendre aucuns effets sur les caractéristiques mécaniques des éprouvettes.

Les résultats de ce suivi sont illustrés dans les procédures de stabilisations qui sont détaillées dans les titres suivants.

Choix des essais mécaniques à effectuer

Les essais à entreprendre ont pour objet de déterminer si la terre corrigée et stabilisée peut répondre aux exigences de la construction en terre crue.

Ces essais ont également le but de savoir si certains type de stabilisation sont convenables et pouvant apporter des améliorations de comportement des briques d'adobe.

Dans ce sens, il nous semble tel qu'on a vu à partir des recherches bibliographiques effectuées ; qu'il est nécessaire de déterminer avant tout les résistances de nos blocs vis-à-vis la traction et la compression, ces deux sollicitations majeures sont les plus répandues, et ont les effets les plus nocives et déstructurant qui peuvent agir sur une construction en blocs d'adobe.

Choix de types de stabilisation à entreprendre

Ce choix dépend des résultats donnée par les essais mécaniques sur les blocs témoins, et en quête d'une meilleure résistance on propose des stabilisations qui sont déjà entreprises par des travaux qui précédent sur ce sujet ; notamment la stabilisation chimique par cimentation, et la stabilisation mécaniques par ajout de fibres.

On note que la stabilisation mécanique par densification à été déjà faite par le baie de la correction de notre terre.

Essais mécaniques sur les blocs d'adobe

Eprouvettes témoins

L'objet visé par la confection de ces éprouvettes est de vérifier les qualités des blocs d'adobe fabriqués par cette terre crue sans apport de stabilisants, afin de déterminer son aptitude à l'utilisation de ce mélange dans la construction en terre crue, mais aussi pour construire une référence propre à nous pour déterminer si les stabilisants ont apporté de plus aux qualités de ces blocs



Confection

La préparation des mélanges a été réalisée manuellement par la voie rustique dans le laboratoire. La quantité d'eau ajoutée au mélange a été choisie de telle façon qu'elle conduise à une consistance normale, elle est de l'ordre de 20% et elle est fixée pour tous les mélanges.

L'eau est ajoutée pendant le malaxage pour assurer la bonne absorption de l'eau par toutes les particules du mélange



Stabilisation

Les caractéristiques de très nombreuses variétés de terre peuvent être améliorées considérablement grâce à l'ajout de stabilisants. Mais, à chaque variété de terre correspond le stabilisant approprié.

Les spécialistes dénombrent à ce jour plus d'une centaine de produits employés pour la stabilisation des sols ou des terres à bâtir. Ces stabilisants peuvent être employés aussi bien dans la masse des murs que dans leur "peau": dans les enduits par exemple.

La stabilisation est pratiquée de très longue date mais c'est à partir des années 1920 que fut développée une approche scientifique, avec un cumul de recherches dans les années 1940 à 1960 qui se perpétuent de nos jours. Mais, malgré cela, la stabilisation n'est toujours pas une science exacte et l'on ne connaît pas à ce jour un stabilisant "miracle" qui répondrait à tous les problèmes. Les méthodes de stabilisation les plus connues et les plus pratiquées sont:

- densification des terres par compression,
- armature de fibres, l'ajout de ciment, de chaux ou de bitume.
- Beaucoup d'autres produits existent, sont employés ou proposés mais ils n'ont reçu que très peu d'attention et leurs mécanismes ainsi que leurs efficacités sont mal connus.

Confronté à un problème de stabilisation, il convient de choisir un produit parmi la multitude de possibilités dont beaucoup ne devront même pas être envisagées, soit du fait de leur inefficacité soit du fait de leur coût prohibitif. Il existe une tendance actuelle à la stabilisation systématique et souvent selon des méthodes incontrôlées. Ceci est regrettable car il ne faut pas oublier que la stabilisation ne contribue qu'à améliorer les caractéristiques d'un sol ou d'une terre ou à les doter de bonnes caractéristiques qui leur font défaut. Il est fort dommage que de très nombreux adeptes de la stabilisation systématique apprécient mal les performances initiales de la terre, s'engageant souvent trop vite dans cette voie qui n'est pas forcément utile.

Problématique

Construire en terre dans un lieu donné implique un choix entre trois possibilités principales:

- Employer la terre disponible sur le site et adapter au mieux le projet à la qualité de cette terre.
- Employer une autre terre, importée sur le site, qui convient mieux aux exigences du projet
- Modifier la terre locale pour qu'elle convienne au mieux aux exigences du projet

C'est cette troisième possibilité que l'on dénomme stabilisation de la terre et qui définit l'ensemble des procédés permettant une amélioration des caractéristiques de la terre.

Définition

Stabiliser la terre c'est modifier les propriétés d'un système terre-eau-air pour obtenir des propriétés permanentes compatibles avec une application particulière.

Mais la stabilisation est un problème complexe, car de très nombreux paramètres interviennent Il faut en effet connaître :

- Les propriétés de la terre à stabiliser.
- Les améliorations envisagées.
- L'économie du projet: coûts et délais de réalisation.
- Les techniques de mise en œuvre de la terre choisies pour le projet et les systèmes constructifs.
- La maintenance du projet réalisé: coût d'entretien. L'amélioration des propriétés de la terre par stabilisation sera un succès si le procédé employé est compatible avec les impératifs du programme: coût et délais de réalisation, coût d'entretien notamment

Objectifs

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

- Réduire le volume des vides entre les particules: agir sur la porosité.
- Colmater les vides qui ne peuvent être supprimés: agir sur la perméabilité. -Améliorer les liens entre les particules: agir sur la résistance mécanique.

Les principaux objectifs poursuivis sont:

- Obtenir de meilleures caractéristiques mécaniques : augmenter la résistance à la compression sèche et humide, la résistance à la traction et au cisaillement
- Obtenir une meilleure cohésion.
- Réduire la porosité et les variations de volume: gonflement-retrait à l'eau.
- Améliorer la résistance à l'érosion du vent et de la pluie: réduire l'abrasion de surface et imperméabiliser.

Procédés

On dénombre trois procédés de stabilisation:

1 - **Stabilisation mécanique:** c'est le compactage de la terre qui modifie sa densité, sa résistance mécanique et sa compressibilité, sa perméabilité et sa porosité.

2 - **Stabilisation physique:** les propriétés d'une terre peuvent être modifiées en intervenant sur la texture: mélange contrôlé de fractions de grains différentes. Egaleme nt par traitement thermique: déshydratation ou gel; ou par un traitement électrique: électro-osmose qui favorise un drainage de la terre, lui conférant de nouvelles qualités. Structurales.

3 - **Stabilisation chimique :** la terre est ajoutée d'autres matériaux ou de produits chimiques qui modifient ses propriétés, soit du fait d'une réaction physicochimique entre les particules et le matériau ou le produit ajouté, soit en créant une matrice qui lie ou enrobe les particules. La réaction physico-chimique peut entraîner la formation d'un nouveau matériau: composé pouzzolanique issu d'une réaction entre l'argile et la chaux par exemple.

Stabilisation chimique par cimentation

Mécanismes de stabilisation

Dans la terre, le ciment hydraté réagit de deux façons:

- Réaction avec lui-même: formation d'un mortier de ciment pur hydraté; réaction avec le squelette sableux: mécanisme classique du mortier.

- Réaction avec l'argile selon trois phases :

1 - L'hydratation provoque la formation de gels de ciment à la surface des agglomérats d'argile. La chaux libérée pendant l'hydratation du ciment réagit aussitôt avec l'argile. La chaux est vite consommée et l'argile entame une dégradation.

2 - Progression de l'hydratation qui active la désagrégation des agglomérats d'argile; ceux-ci sont pénétrés en profondeur par les gels de ciment

3 - Interpénétration intime des gels de ciment et des agglomérats argileux. L'hydratation persiste, mais plus lente.

On obtient en fait trois structures mêlées:

- une matrice inerte sableuse liée au ciment;
- une matrice d'argile stabilisée;
- une matrice de terre non stabilisée.

La stabilisation n'affecte pas tous les agrégats, Une matrice stabilisée enveloppe des agglomérats composites de sable et d'argile.



Efficacité et dosage

La meilleure efficacité est obtenue par une compression à l'état humide. A l'état plastique, il faudrait 50% de ciment en plus pour une même efficacité. Les meilleures résistances à la compression sont atteintes avec des graves et des sables plutôt qu'avec des silts et des argiles.

Pour la terre, les dosages dépendent de sa texture et de sa structure, du mode de mise en œuvre. 6 à 12 % donnent de bons résultats. Certaines terres n'exigent que 3 % et d'autres, au même dosage, se comportent moins bien que sans ciment. En général, il faut au moins 6 % de ciment pour obtenir des résultats satisfaisants. La résistance en compression reste très dépendante du dosage.

Paramètres d'efficacité

- **Terre** : presque toutes les terres sont stabilisables au ciment. Les meilleurs résultats sont obtenus avec des terres sableuses.

- **Matières organiques**: elles sont reconnues comme nocives, surtout celles qui contiennent de l'acide nucléique, de l'acide tartrique ou du glucose: ralentissement de la prise du ciment, abaissement de la résistance. En règle générale, une teneur en matières organiques supérieure à 1 % constitue un risque et il ne faut pas utiliser une terre en contenant plus de 2 %.

Effets

Masse volumique sèche: elle diminue pour les terres qui se compactent bien ; elle augmente pour les terres qui se compactent médiocrement.

- **Résistance à la traction** : elle varie de 1/5 à parfois 1/10 de la résistance à la compression.

- **Variations dimensionnelles**: la stabilisation au ciment diminue l'importance du retrait au séchage et du gonflement à l'humidification.

- **Erosion** : amélioration de la résistance des terres à l'érosion sous l'action de la pluie surtout lorsque la terre contient de gros grains.

Stabilisation mécanique par ajout de fibres

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

Rôles des fibres

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



Mécanismes

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

Dans notre cas nous avons opté pour la stabilisation par ajout de fibres de paille, de palmiers, chaque types de fibres a été ajouté selon quatre différents pourcentage par rapport au volume ou au masse, suivant les indications édictées par le document technique CRAterre, et ceci afin de définir un intervalle dont les résultats peuvent nous informer sur les quantités de fibre optimales et les seuils à ne pas dépasser pour ne pas risquer d'avoir le fait contraire.

Etude de variation de masse et valeurs de retrait

La variation en masse à été prise comme référence pour déterminer le degré et la vitesse de durcissement, quand la variation est devenue stable on peut conclure que les éprouvettes ont atteint un degré de durcissement maximum qui ne change dans le temps que de valeurs minimales.

Or, la variation de la masse est dans tous les cas accompagnée de phénomène de retrait qui signifie un rétrécissement de volume dans les trois directions, mais nous avons opté de suivre ce paramètre à partir de mesurer les éprouvettes sur les axes des quatre cotés le plus longs puis les valeurs de retrait sont susceptibles d'être trop minime ne peuvent éventuellement être mesurées que dans les dimensions les plus considérables (cotes les plus longs)

Les résultats obtenus sont ainsi illustrés dans le tableau suivant :

SUIVI DE LA VARIATION DE LA MASSE

type de stabilisation		témoin								
condition		assèchement en étuve à 40°C								
les masses pesées dans différents âges en grammes										
	0 jour	1 jour	4 jours	7 jours	9 jours	10 jours	variation de la masse	moyenne	ratio de variation	moyenne
action	confection	démoulage	stockage		écrasement					
épreuve 01		495	407	407	407		88		17,78%	
épreuve 04		483	426	430	400		83	85,5	17,18%	17,48%

SUIVI DES VALEURS DE RETRAIT

type de stabilisation		témoin								
condition		assèchement en étuve à 40°C								
le retrait mesuré dans différents âges en mm										
	0 jour	1 jour	4 jours	7 jours	9 jours	10 jours	variation de la masse	moyenne	ratio de variation	moyenne
action	confection	démoulage	stockage		écrasement					
épreuve 01		160	153	153			07		4,38%	
épreuve 04		160	151	151			09	08	5,63%	5,00%

SUIVI DE LA VARIATION DE LA MASSE

**type de stabilisation
condition**

**FIBRES DE PALMIER
assèchement à température ambiante**

les masses pesées dans différents âges en grammes

	0 jour	1 jour	4 jours	7 jours	9 jours	10 jours	variation de la masse	moyenne	ratio de variation	moyenne
--	--------	--------	---------	---------	---------	----------	-----------------------	---------	--------------------	---------

action	confection	démoulage	stockage à température ambiante			écrasement				
---------------	------------	-----------	---------------------------------	--	--	------------	--	--	--	--

épreuve 02		495	477	426	416		79	78,5	15,96%	15,72%
épreuve 03		504	482	430	426		78		15,48%	

SUIVI DES VALEURS DE RETRAIT

**type de stabilisation
condition**

**FIBRES DE PALMIER
assèchement à température ambiante**

le retrait mesuré dans différents âges en mm

	0 jour	1 jour	4 jours	7 jours	9 jours	10 jours	variation de la masse	moyenne	ratio de variation	moyenne
--	--------	--------	---------	---------	---------	----------	-----------------------	---------	--------------------	---------

action	confection	démoulage	stockage à température ambiante			écrasement				
---------------	------------	-----------	---------------------------------	--	--	------------	--	--	--	--

épreuve 02		160	157	154	152		8	7,5	5,00%	4,69%
épreuve 03		160	/	/	153		7		4,38%	

SUIVI DE LA VARIATION DE LA MASSE

**type de stabilisation
condition**

**PAILLE 30 KG/ m3
assèchement en étuve à 40°C**

les masses pesées dans différents âges en grammes

	0 jour	1 jour	4 jours	7 jours	9 jours	10 jours	variation de la masse	moyenne	ratio de variation	moyenne
action	confection	démoulage	stockage/ étuve à 40°C			écrasement				
épreuve 19		457	381	386			71	78,5	15,54%	17,16%
épreuve 20		458	372	372			86		18,78%	

SUIVI DES VALEURS DE RETRAIT

**type de stabilisation
condition**

**PAILLE 30 KG/ m3
assèchement en étuve à 40°C**

le retrait mesuré dans différents âges en mm

	0 jour	1 jour	4 jours	7 jours	9 jours	10 jours	variation de la masse	moyenne	ratio de variation	moyenne
action	confection	démoulage	stockage/ étuve à 40°C			écrasement				
épreuve 19		164	158	158			6	6	3,66%	3,66%
épreuve 20		164	158	158			6		3,66%	

SUIVI DE LA VARIATION DE LA MASSE

type de stabilisation		CIMENT 06% / masse								
condition		assèchement en étuve à 40°C								
les masses pesées dans différents âges en grammes										
	0 jour	1 jour	4 jours	7 jours	9 jours	10 jours	variation de la masse	moyenne	ratio de variation	moyenne
action	confection	démoulage	stockage/ étuve à 40°C			écrasement				
éprouvette 37		525	483	381	443		82	81	15,62%	15,78%
éprouvette 38		502		422	422		80		15,94%	

SUIVI DES VALEURS DE RETRAIT

type de stabilisation		CIMENT 06% / masse								
condition		assèchement en étuve à 40°C								
le retrait mesuré dans différents âges en mm										
	0 jour	1 jour	4 jours	7 jours	9 jours	10 jours	variation de la masse	moyenne	ratio de variation	moyenne
action	confection	démoulage	stockage/ étuve à 40°C			écrasement				
éprouvette 37		164		162	162		2	1,5	1,22%	0,92%
éprouvette 38		162		161	161		1		0,62%	

SUIVI DE LA VARIATION DE LA MASSE

type de stabilisation		FIBRES DE PALMIER 15KG / m3								
condition		assèchement en étuve à 40°C								
		les masses pesées dans différents âges en grammes								
	0 jour	1 jour	4 jours	7 jours	9 jours	10 jours	variation de la masse	moyenne	ratio de variation	moyenne
action	confection	démoulage	stockage/ étuve à 40°C			écrasement				
épreuve 67		515	440	442			73	75,5	14,17%	14,54%
épreuve 68		523	445	445			78		14,91%	

SUIVI DES VALEURS DE RETRAIT

type de stabilisation		FIBRES DE PALMIER 15KG / m3								
condition		assèchement en étuve à 40°C								
		le retrait mesuré dans différents âges en mm								
	0 jour	1 jour	4 jours	7 jours	9 jours	10 jours	variation de la masse	moyenne	ratio de variation	moyenne
action	confection	démoulage	stockage/ étuve à 40°C			écrasement				
épreuve 67		162	157	157			5	2,5	3,09%	1,54%
épreuve 68		0	0	0			0		0,00%	

Conclusion

La variation de masse et durcissement

- Nous avons remarqué en premier lieu que la masse après la confection commence à se diminuer de façon accélérée jusqu'à l'aboutissement à un pourcentage de perte de masse par rapport à la masse initiale, après ce stade la variation en masse demeure trop négligée pour ne pas dire nulle. Cette perte de l'eau de gâchage est accompagnée par un durcissement des éprouvettes où elles gardent leurs formes et deviennent inaltérables par le toucher.
- En deuxième lieu, on cite que la variation de masse se fait progressivement mais moins rapide à la température ambiante qu'à l'étuve, cette perte de masse est due à l'évaporation de l'eau de gâchage.
- A travers l'ensemble de paramètres de stabilisation et de condition de stockage, la perte de masse est plus ou moins identique dans l'ensemble des cas, elle est de l'ordre de 15%, où on cite aussi la constatation de la rétention d'environ 5% de la masse de l'eau de gâchage par les éprouvettes ; ceci peut être expliqué par la qualité de l'argile de garder de l'eau.
- en addition à ceci on ne distingue que l'ajout de fibres végétales participent à la rétention de l'eau et rehumidifier toutefois l'adobe. Quoique le taux de variation le plus haut est noté dans ces cas de stabilisation par ajout de fibres, ce qui peut être expliqué par la densité faible des fibres ceci engendre une diminution de la masse des éprouvettes et par conséquent la teneur en eau de gâchage devient plus importante, et donc l'évaporation de l'eau malgré qu'elle est minime semble toujours élevée si on calcule le ratio de la perte de masse de l'eau évaporisée.
- On cite ainsi que les éprouvettes après retraitage de l'étuve, elles gagnent de poids en avantage, ce qui est due à l'absorption de l'humidité de l'environnement.

La variation de valeurs de retrait

- La valeur de retrait, avec cette terre peut atteindre au maximum une dimension de 5% qui veut dire une régression de 5 mm pour un bloc de 10 cm, ce qui est très important, d'où il est fortement recommandé de minimiser cette valeur par l'ajout de ciment au mélange.
- Le résultat qui a donné de meilleure résistance au retrait est assuré par la stabilisation par le ciment ce qui est même plus que celles données par les fibres végétales, ceci revient au qualité principale du ciment étant comme un liant de forte adhérence, qui garde les grains collés les uns aux autres.
- Les fibres de palmier ont témoignées une bonne résistance aux déformations linéaires dues au retrait, ceci par rapport aux fibres de paille qui sont moins résistante, d'ailleurs il nous était difficile de couper les fibres de palmier avec nos mains par contre était plus facile avec les fibres de pailles.

Etude de la résistance à la compression et à la traction



L'ensemble des essais effectués au laboratoire LTPO Tiaret les éprouvettes nous ont permis de dresser les tableaux suivants :

RESISTANCE A LA TRACTION**type de stabilisation****FIBRES DE PAILLE****condition****assèchement à l'étuve à 40°C****POURCENTAGE**

	10 KG / m3	20 KG / m3	30 KG / m3	40 KG / m3
07 jours	0,93	0,93	0,55	0,70
21 jours	0,87	0,90	0,70	0,63

RESISTANCE A LA COMPRESSION**type de stabilisation****FIBRES DE PAILLE****condition****assèchement à l'étuve à 40°C****POURCENTAGE**

	10 KG / m3		20 KG / m3		30 KG / m3		40 KG / m3	
07 jours	32,53	34,41	34,50	26,94	48,44	48,44	33,06	33,06
moyenne	33,47		30,72		48,44		33,06	
14 jours	50,81	43,44	38,22	33,28	27,63	41,63	33,72	37,78
moyenne	47,13		35,75		34,63		35,75	
21 jours	41,94	41,94	27,94	27,94	42,09	28,59	50,72	50,72
moyenne	41,94		27,94		35,34		50,72	

RESISTANCE A LA TRACTION

type de stabilisation

FIBRES DE PALMIER

condition

assèchement à l'étuve à 40°C

POURCENTAGE

	5 KG / m3	10 KG / m3	15 KG / m3	20 KG / m3
07 jours	0,68	0,97	0,92	0,90
21 jours	0,81	0,78	0,78	0,87

RESISTANCE A LA COMPRESSION

type de stabilisation

FIBRES DE PALMIER

condition

assèchement à l'étuve à 40°C

POURCENTAGE

	5 KG / m3		10 KG / m3		15 KG / m3		20 KG / m3	
07 jours	38,34	47,72	29,13	51,97	54,56	44,00	58,06	59,81
moyenne	43,03		40,55		49,28		58,94	
14 jours	0,00	0,00	45,13	42,38	46,22	51,59	0,00	0,00
moyenne	0,00		43,75		48,91		0,00	
21 jours	41,94	33,41	53,78	53,78	46,22	46,22	39,28	40,31
moyenne	37,67		53,78		46,22		39,80	

RESISTANCE A LA TRACTION

type de stabilisation

CIMENT

condition

assèchement à l'étuve à 40°C

POURCENTAGE par rapport à la masse

	4%	6%	10%	14%
07 jours	0,73	0,87	0,53	0,47
21 jours	1,02	0,76	0,48	0,51

RESISTANCE A LA COMPRESSION

type de stabilisation

CIMENT

condition

assèchement à l'étuve à 40°C

POURCENTAGE par rapport à la masse

	4%		6%		10%		14%	
07 jours	31,06	61,19	52,56	52,47	57,06	46,53	61,56	56,38
moyenne	46,13		52,52		51,80		58,97	
14 jours	59,66	46,00	60,88	50,31	54,63	54,00	74,25	70,53
moyenne	52,83		55,59		54,31		72,39	
21 jours	53,22	53,22	71,47	61,53	70,53	70,53	51,03	52,38
moyenne	53,22		66,50		70,53		51,70	

RESISTANCE A LA TRACTION

type de stabilisation	TEMOIN			
------------------------------	---------------	--	--	--

CONDITION DE STOCKAGE ET D'ASSECHEMENT

	stockage à température ambiante		assèchement à l'étuve à 40°C	
07 jours	0,47	1,17	0,47	0,55
21 jours	0,82		0,48	

RESISTANCE A LA COMPRESSION

type de stabilisation	TEMOIN			
------------------------------	---------------	--	--	--

CONDITION DE STOCKAGE ET D'ASSECHEMENT

	stockage à température ambiante		assèchement à l'étuve à 40°C	
07 jours	4,10	6,52	4,45	5,58
moyenne	5,31		5,02	
14 jours	3,96	4,14	3,80	4,05
moyenne	4,05		3,93	

Conclusion générale

- La résistance à la compression augmente avec l'âge particulièrement dans les premiers âges mais nous avons constaté que les éprouvettes en atteignant l'âge de 21 jours où elles perdent de plus en plus leur humidité, ont prouvé une chute de résistance qui peut être dû à l'assèchement excessif à l'étuve.
- Les témoins ont prouvé des résistances plus élevées que celles des blocs de la terre non corrigé mais demeurent des résultats trop bas par rapport aux autres types de stabilisation.
- Notre travail a mis en évidence que la stabilisation par cimentation peut donner des résultats très satisfaisant vis-à-vis la compression, en effet un pourcentage de 10% en masse semble le % le plus convenable aussi comme un pourcentage de 6%, en dehors de ces intervalles la résistance diminue mais pas d'une manière assez importante.
- Les fibres ont donné des résultats très variables qui nous ont rendus difficile de déterminer son apport dans la résistance à la compression ce qui est dû à l'empêchement de dispositif de détecter des premières ruptures causées par l'effort de compression, mais de façon générale les fibres peuvent augmenter de manière légère la résistance à la compression.

Tables des matières

Résumé.....	3
Abstract	4
ملخص	5
Introduction : La terre matériau d'hier et de demain.....	6
Problématique :.....	7
Objectifs de la recherche :	8
Chapitre 1: la terre crue dans l'architecture.....	10
Au commencement c'était la terre	10
Histoire de la construction en terre crue	11
En Afrique	11
En moyen orient	13
En Asie	13
En Europe	15
En Amérique.....	15
Chapitre 2 : Actualités de la terre crue dans l'architecture contemporaine.....	17
Dans le monde.....	17
Premiers étincelles vers une renaissance.....	17
Renaissance de l'architecture en terre en France :	18
La dynamique allemande pour la relance d'architecture en matériau terre :	19
L'Autriche à L'avant-garde :.....	20
En Angleterre :	21
Nouveaux actes entrepris pour la remise en valeur de l'architecture terre	22
En Algérie	24
Introduction	24
Exemple de la ville d'Oulef.....	24
L'habitat Ksourien et tentatives de restauration :.....	28
Réhabilitation des Ksour pour l'habitat.....	29
Chapitre 3 : Aperçus généraux sur le matériau terre -un matériau de construction-	33
3.1 Généralités	33
3.1.1 Introduction.....	33
3.1.2 Diversités	34
3.1.3 Champs d'applications divers	35
3.1.4 Avantages et inconvénients :	36
3.1.5 Les qualités de la terre crue	36

3.1.6	Quelle terre utiliser ?	37
3.1.7	Identification du matériau terre	38
3.2	Construire en terre crue	40
3.2.1	Les types de constructions en terre crue	40
3.2.2	Avantage et inconvénient de chaque type :	41
3.2.3	Les procédés constructifs.....	42
	Figure 18 : Les procédés constructifs.....	42
3.3	Les avantages et inconvénients de l'architecture en terre.....	48
3.3.1	Les avantages du matériau terre	49
3.3.2	Les inconvénients du matériau terre	50
3.4	Quelques pathologies des constructions en terre	52
3.4.1	Les principales causes de désordre	52
3.4.2	Les pathologies humides.....	53
3.4.3	Les pathologies structurelles.....	53
3.4.4	Les principes de bonne conception d'une architecture de terre.....	54
3.5	La nature d'un matériau terre :.....	55
3.5.1	Constituants gazeux	55
3.5.2	Constituants liquides.....	55
3.5.3	Constituent solides.....	56
3.5.4	Les constituants minéraux	56
3.6	Matières organiques et minérales du matériau terre :	56
3.6.1	Matières organiques.....	56
3.6.2	Matières minérales.....	57
3.6.3	Éléments sableux	57
3.7	Argiles.....	60
3.7.1	Origine	60
3.7.2	Structure.....	60
3.7.3	Principales espèces	60
3.8	Propriétés et classification du matériau terre	61
3.8.1	Propriétés à caractère chimique	61
3.8.2	Propriétés à caractère physique	62
3.8.3	Propriétés fondamentales.....	64
4.1.1	Classification géotechnique	67
4.1.2	Classification pédologique.....	67
4.1.3	Terres spécifiques	68

4.1.4	Localisation des terres	71
Chapitre 4 :	Prendre connaissance de la terre objet d'étude	74
4.1	Sélection d'une terre crue locale	74
4.2	Pré-identification et analyses visuelles	74
4.2.1	La pré-identification de la composition granulométrique	74
4.2.2	L'analyse visuelle des caractéristiques mécaniques	78
4.3	Identification au laboratoire	81
4.3.1	Problématique	81
4.3.2	Propriétés fondamentales	81
4.3.3	Conclusion générale :	111
Chapitre 5 :	Essais mécaniques sur la terre crue choisie	113
5.1	Pisé	113
5.1.1	Introduction	113
5.1.2	Préparation de la terre	113
5.1.3	Dimension des éprouvettes	114
5.1.4	Confection des éprouvettes	114
5.1.5	Détermination des caractéristiques mécanique des les blocs de pisé	114
5.2	Brique d'adobe	116
5.2.1	Introduction	116
5.2.2	Préparation de la terre d'adobe :	116
5.2.3	Dimension des éprouvettes	116
5.2.4	Confection des éprouvettes	117
5.2.5	Cure et stockage des blocs :	117
5.2.6	Détermination des caractéristiques mécanique des les blocs d'adobe:	118
5.3	Vérification des résultats obtenus	119
Conclusion générale :	.....	119
Chapitre 6 :	Correction de la terre	122
Problématique :	.....	122
La texture :	.....	123
Texture recherchée	124	
Correction de la texture	125	
Procédure de la correction :	127	
Le sable :	127	
Le tâtonnement sur la courbe de mélange :	129	

Chapitre 7 : Stabilisation de la terre pour la confection des blocs d'adobe.....	132
Présentation du travail.....	132
Choix de type de construction en terre crue	132
Confection d'éprouvettes	132
Choix des âges pour effectuer les essais mécaniques.....	132
Choix des essais mécaniques à effectuer.....	133
Choix de types de stabilisation à entreprendre	133
Essais mécaniques sur les blocs d'adobe	134
Eprouvettes témoins	134
Confection	134
Stabilisation.....	135
Problématique.....	135
Définition.....	136
Objectifs	136
Stabilisation chimique par cimentation	137
Stabilisation mécanique par ajout de fibres.....	139
Etude de variation de masse et valeurs de retrait	140
Conclusion.....	146
La variation de valeurs de retrait	147
Etude de la résistance à la compression et à la traction	147
Conclusion générale.....	152

Liste des figures

Figure 1 : captifs fabriquant des blocs d'adobe pour la construction de temple d 'Ammon. Thèbes, Egypte.....	11
Figure 2 : Mosquée de Djenné, construite en briques de terre crue, enduite de terre lissée à la main	12
Figure 3 : Touareg	12
Figure 4 : Jéricho et Mureybet (Syrie).....	13
Figure 5 : site de Çatal Höyük, en Anatolie.....	13
Figure 6: Reconstruction d'un village après séisme (Ma'anqiao, Chine, 2008)	14
Figure 7 : ville du Yémen de Shibam	14
Figure 8 : palais du Chan Chan, au Pérou	15
Figure 9: vue sur le village de nouvelle Gourna . Par l'architecte HASAN Fethi	17
Figure 10 : <i>Habitat locatif à Mayotte construit</i>	19
Figure 11 : technique en torchis mise en œuvre pour le remplissage	20
Figure 12 : construction moderne en murs de pisé. Autriche	20
Figure 13: Visitors Centre, Eden Project, Cornwall	21
Figure 14 : Woodley Park Centre for Sports & Arts, Lancashire.....	21
Figure 15 : la construction en terre crue à la ville d'Aoulef.....	25
Figure 16 : étapes de production des briques d'adobe. Source : L'architecture domestique en terre entre préservation et modernité: cas d'une ville oasienne d'Algérie "Aoulef". H. Boutabba, M. Mili, S.D. Boutabba.....	26
Figure 17 : Tibak et Etesbagh des murs extérieurs.....	27
Figure 18 : Les procédés constructifs	42
Figure 19: presse hydraulique.....	44
Figure 20: Presse manuelle.....	44
Figure 21 : Séchage de brique en adobe. Source: Encyclopédie interactive Wikipédia.....	45
Figure 22 : Construction d'un mur en pisé au Maroc. Source: N.Baloul.....	45
Figure 23: Montage d'un mur en adobe. Source: Encyclopédie interactive Wikipédia.....	46
Figure 24: Mur en adobe déjà monté.Source: Encyclopédie interactive Wikipédia	46
Figure 25: Torchis sur barreau.....	48
Figure 26: Torchis sur clayonnage	48
Figure 27: constituant d'un matériau terre	55
Figure 28: diagramme de granularité"G".....	65
Figure 29 : diagramme de plasticité "P"	65
Figure 30 : diagramme de compressibilité "C"	66
Figure 31: diagramme de résistance à la traction "T"	66
Figure 32: Carte des principaux sols	71
Figure 33: Carte des terres.....	71
Figure 34: djbel boughachuo ; frenda , source :auteur.....	74
Figure 35 : essai de boudin. Source : auteur	77
Figure 36: test de sédimentation.	78
Figure 37 : test de cohésion	80
Figure 38 : préparation de l'échantillon. Source auteur	82
Figure 39 : échantillon imbibé dans l'eau	82
Figure 40. Procédure de tamisage.....	83

Figure 41: Préparation d'échantillon sédimentométrie	87
Figure 42 : mode opératoire de sédimentation.....	88
Figure 43: Courbe granulométrique de la terre. Source : auteur	90
Figure 44: <i>Classification de la terre selon le triangle de texture GEPPA¹</i>	92
Figure 45 : Préparation du mortier.....	95
Figure 46 : mortier étendu sur la coupelle de Casagrande.....	95
Figure 47 : Limite de liquidité à la coupelle de Casagrande	97
Figure 48 : essai de plasticité.....	98
Figure 49: Opération d'essai du PROCTOR	102
Figure 50: La densité sèche en fonction de la teneur en eau	104
Figure 51: essai de cisaillement (en LTPO Tiaret).....	107
Figure 52 : une galette de notre terre cisailée	109
Figure 53: résultats d'essai de cisaillement. Source: auteur (LTPO Tiaret)	110
Figure 54 :éprouvette de pisé.....	114
Figure 55: Figure : diagramme de texture pour pisé.....	115
Figure 56 confectionnement d'éprouvette d'adobe	116
Figure 57: stockage d'éprouvette d'adobe	117
Figure 58 : écrasement d'éprouvette d'adobe	118
Figure 59 : structure microscopique de la terre argileuse. Source : CRAterre	123
Figure 60 : les courbes idéales de l'adobe selon les expérimentations de CRAterre.	124
Figure 61 : différentes manières de disposition des grains selon la composition granulaire de la terre. Source : CRAterre.....	126
Figure 62 : lavage de sable. Source : Auteurs	127
Figure 63 : Courbe granulométrique du sable de correction	128
Figure 64 : méthode de correction par gradation. Source : CRAterre	129
Figure 65 : le tâtonnement graphique pour obtention de composition de mélange proche à l'idéale	130

Liste des tableaux

Tableau 1 : Mesures préventives pour la maîtrise des pathologies des constructions en terre (source : Aguarwal.A, bâtir en terre, p.51)	51
Tableau 2: Résultat de l'analyse granulométrique par tamisage	84
Tableau 3:l'analyse sédimentométrique. Source : auteur	89
Tableau 4: la texture de notre terre. Source : auteur	90
Tableau 5: pourcentage des constituants. Source : auteur	91
Tableau 6: résultats des essais à l'appareil Casagrande.....	97
Tableau 7 : Limite de liquidité à la coupelle de Casagrande	98
Tableau 8 : résultats des essais de détermination de la limite de plasticité	99
Tableau 9 : récapitulation des résultats de limites d'Atterberg.	100
Tableau 10 : résultat Proctor de la densité sèche	103
Tableau 11 : les poids de moule et de PH+moule essai de cisaillement.....	107
Tableau 12 :la déformation en fonction de lecture anneau	107
Tableau 13: poids des tares et des PH et poids secs	108
Tableau 14: contrainte de cisaillement	108
Tableau 15: la résistance à l'état sec au éprouvette pisé	115
Tableau 16 : la résistance des éprouvettes d'adobe	118

Bibliographie

CRAterre. Traité de l'architecture en terre. Edition 2006

Des architectures de terre ou l'avenir d'une tradition millénaire. Jean Dethier. Édition du centre Pompidou 1981

Francois Vigouroux, dictionnaire de la bible.

Le renouveau de l'architecture de terre crue dans les années 80 – mémoire d'initiation à la recherche. Jessica ADJOUA. Ecole nationale d'architecture et de paysage de Lille. 2013

Rapport Atelier Grains d'Isere 2012

WHEAP intermediate report 2007-2012

INVENTORY World Heritage Earthen Architecture April 2012 - ENGLISH

INVENTAIRE de l'architecture de terre du patrimoine mondial avril 2012 - FRANCAIS

Leaflet Earthen Architecture Programme

Dépliant programme sur l'architecture de terre

Spécifications techniques illustrées, rehab Djenne 2012

Réhabilitation et revitalisation de la Maison des jeunes, Djenne, rapport final, OCT11

Réhabilitation et revitalisation de la Maison des jeunes de Djenné : rapport intermédiaire

Réhabilitation et revitalisation de la Maison des jeunes de Djenné : LIVRET de détail, février 2011

Teaching material, phase I, mission report to Benin, August 2010

Earthen Architecture on the Lalibela World Heritage Site, July 2010

Rapport de mission pour l'élaboration d'un projet de règlement d'urbanisme pour Djenné, juin 2010

Meeting Report on WHEAP for Arab States, 11 January 2010

Rapport Atelier Djenné décembre 2010.pdf

Etude sur les mausolées de Tombouctou

Manuel pour la conservation de Tombouctou

Statistiques présentées dans: Actes du Colloque international de l'UNESCO sur la conservation de l'architecture de terre du patrimoine mondial (Earthen architecture in today's world). Intervention de : Thierry Joffroy, Hubert Guillaud, Jean-Marie Le Tiec / Architectures contemporaines en terre crue : sur les traces de Hassan Fathi . UNESCO Headquarters, Room XI – Paris, France 17 – 18 Décembre 2012

Rapports de recherche - CNERIB 2008.

- Agarwal. A. Bâtir en terre. Le potentiel des matériaux à base de terre pour l'habitat du Tiers Monde. Londres, Earthscan.

1981. (Trad. anglaise: Londres. 1981; trad. espagnole: Londres, 1984.)

- CRATerre (Hays, A .. Matuk. S .. Vitaux. F.). Monzon, F.M .. Vildoso. A. Seguir construyendo con tierra. Lima, CRATerre.1984.
- Fathy, H. Construire avec le peuple. Paris, Sindbad, 1970.
- Actualité de la construction de terre en France. Actes du séminaire, 14-15 octobre 1982, Paris, Plan construction, 1983.
- Breshna, A., Christians, L., Erhard, H., Gruner, D. Lehmarchitektur. Rückblick - Ausblick. Eschborn, GATE, 1981.
- Earth construction technologies appropriate to developing countries. Proceedings of the international colloquium, 10-12 december 1984. Bruxelles, 1985.
- L'habitat économique dans les pays en développement: matériaux, techniques de construction, composants. Actes du colloque international, Paris, 25-27 janvier 1983, vol. 1 et 2. Paris, Presses de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées, 1983. (Trad. anglaise et espagnole.)
- Matériaux, techniques et économie de la construction dans les pays en développement Actes du colloque international, Paris, 9-10-11 décembre 1986, vol. 1 et 2, Paris. CSTB, 1986. (Trad. anglaise et espagnole.)
- Modernité de la construction en terre. Actes du colloque. 10-11-12 octobre 1984, Paris, Plan construction, 1986.
- Le patrimoine européen construit en terre et sa réhabilitation. Actes du colloque des 18-19-20 mars 1987. Vaulx-en-Velin, Formequip, 1987.
- La tierra material de construccion. Instituto Eduardo Torrojo, Monografia n°.385/386, Madrid, Consejo Superior de investigaciones Cientificas, 1987.
- "Réhabiliter et construire en terre", Energie Verte, Caen, ARBN, 1987.
- "Terre d'avenir", h, n°111, Paris, UNHLM, 1985.
- Hopson, R.C. Adobe: a comprehensive bibliography. Santa Fe, The Lightning Tree-Jene Lyon Publisher, 1979.
- Miller, D. & L. Rammed earth. A selected bibliography. Greeley, REII. 1982.

Liste des tableaux

Tableau 1 : Mesures préventives pour la maîtrise des pathologies des constructions en terre (source : Aguarwal.A, bâtir en terre, p.51)	51
Tableau 2: Résultat de l'analyse granulométrique par tamisage	84
Tableau 3:l'analyse sédimentométrique. Source : auteur	89
Tableau 4: la texture de notre terre. Source : auteur	90
Tableau 5: pourcentage des constituants. Source : auteur	91
Tableau 6: résultats des essais à l'appareil Casagrande.....	97
Tableau 7 : Limite de liquidité à la coupelle de Casagrande	98
Tableau 8 : résultats des essais de détermination de la limite de plasticité	99
Tableau 9 : récapitulation des résultats de limites d'Atterberg.	100
Tableau 10 : résultat Proctor de la densité sèche	103
Tableau 11 : les poids de moule et de PH+moule essai de cisaillement.....	107
Tableau 12 :la déformation en fonction de lecture anneau	107
Tableau 13: poids des tares et des PH et poids secs	108
Tableau 14: contrainte de cisaillement	108
Tableau 15: la résistance à l'état sec au éprouvette pisé	115
Tableau 16 : la résistance des éprouvettes d'adobe	118

Figure 41: Préparation d'échantillon sédimentométrie	87
Figure 42 : mode opératoire de sédimentation.....	88
Figure 43: Courbe granulométrique de la terre. Source : auteur	90
Figure 44: <i>Classification de la terre selon le triangle de texture GEPPA¹</i>	92
Figure 45 : Préparation du mortier.....	95
Figure 46 : mortier étendu sur la coupelle de Casagrande.....	95
Figure 47 : Limite de liquidité à la coupelle de Casagrande	97
Figure 48 : essai de plasticité.....	98
Figure 49: Opération d'essai du PROCTOR	102
Figure 50: La densité sèche en fonction de la teneur en eau	104
Figure 51: essai de cisaillement (en LTPO Tiaret).....	107
Figure 52 : une galette de notre terre cisailée	109
Figure 53: résultats d'essai de cisaillement. Source: auteur (LTPO Tiaret)	110
Figure 54 :éprouvette de pisé.....	114
Figure 55: Figure : diagramme de texture pour pisé.....	115
Figure 56 confectionnement d'éprouvette d'adobe	116
Figure 57: stockage d'éprouvette d'adobe	117
Figure 58 : écrasement d'éprouvette d'adobe	118
Figure 59 : structure microscopique de la terre argileuse. Source : CRAterre	123
Figure 60 : les courbes idéales de l'adobe selon les expérimentations de CRAterre.	124
Figure 61 : différentes manières de disposition des grains selon la composition granulaire de la terre. Source : CRAterre.....	126
Figure 62 : lavage de sable. Source : Auteurs	127
Figure 63 : Courbe granulométrique du sable de correction	128
Figure 64 : méthode de correction par gradation. Source : CRAterre	129
Figure 65 : le tâtonnement graphique pour obtention de composition de mélange proche à l'idéale	130

Liste des figures

Figure 1 : captifs fabriquant des blocs d'adobe pour la construction de temple d 'Ammon. Thèbes, Egypte.....	11
Figure 2 : Mosquée de Djenné, construite en briques de terre crue, enduite de terre lissée à la main	12
Figure 3 : Touareg	12
Figure 4 : Jéricho et Mureybet (Syrie).....	13
Figure 5 : site de Çatal Höyük, en Anatolie.....	13
Figure 6: Reconstruction d'un village après séisme (Ma'anqiao, Chine, 2008)	14
Figure 7 : ville du Yémen de Shibam	14
Figure 8 : palais du Chan Chan, au Pérou	15
Figure 9: vue sur le village de nouvelle Gourna . Par l'architecte HASAN Fethi	17
Figure 10 : <i>Habitat locatif à Mayotte construit</i>	19
Figure 11 : technique en torchis mise en œuvre pour le remplissage	20
Figure 12 : construction moderne en murs de pisé. Autriche	20
Figure 13: Visitors Centre, Eden Project, Cornwall	21
Figure 14 : Woodley Park Centre for Sports & Arts, Lancashire.....	21
Figure 15 : la construction en terre crue à la ville d'Aoulef.....	25
Figure 16 : étapes de production des briques d'adobe. Source : L'architecture domestique en terre entre préservation et modernité: cas d'une ville oasienne d'Algérie "Aoulef". H. Boutabba, M. Mili, S.D. Boutabba.....	26
Figure 17 : Tibak et Etesbagh des murs extérieurs.....	27
Figure 18 : Les procédés constructifs	42
Figure 19: presse hydraulique.....	44
Figure 20: Presse manuelle.....	44
Figure 21 : Séchage de brique en adobe. Source: Encyclopédie interactive Wikipédia.....	45
Figure 22 : Construction d'un mur en pisé au Maroc. Source: N.Baloul.....	45
Figure 23: Montage d'un mur en adobe. Source: Encyclopédie interactive Wikipédia.....	46
Figure 24: Mur en adobe déjà monté.Source: Encyclopédie interactive Wikipédia	46
Figure 25: Torchis sur barreau.....	48
Figure 26: Torchis sur clayonnage	48
Figure 27: constituant d'un matériau terre	55
Figure 28: diagramme de granularité"G".....	65
Figure 29 : diagramme de plasticité "P"	65
Figure 30 : diagramme de compressibilité "C"	66
Figure 31: diagramme de résistance à la traction "T".....	66
Figure 32: Carte des principaux sols	71
Figure 33: Carte des terres.....	71
Figure 34: djbel boughachuo ; frenda , source :auteur.....	74
Figure 35 : essai de boudin. Source : auteur	77
Figure 36: test de sédimentation.....	78
Figure 37 : test de cohésion	80
Figure 38 : préparation de l'échantillon. Source auteur	82
Figure 39 : échantillon imbibé dans l'eau	82
Figure 40. Procédure de tamisage.....	83

Chapitre 7 : Stabilisation de la terre pour la confection des blocs d'adobe.....	132
Présentation du travail.....	132
Choix de type de construction en terre crue	132
Confection d'éprouvettes	132
Choix des âges pour effectuer les essais mécaniques.....	132
Choix des essais mécaniques à effectuer.....	133
Choix de types de stabilisation à entreprendre	133
Essais mécaniques sur les blocs d'adobe	134
Eprouvettes témoins	134
Confection	134
Stabilisation.....	135
Problématique.....	135
Définition.....	136
Objectifs	136
Stabilisation chimique par cimentation	137
Stabilisation mécanique par ajout de fibres.....	139
Etude de variation de masse et valeurs de retrait	140
Conclusion.....	146
La variation de valeurs de retrait	147
Etude de la résistance à la compression et à la traction	147
Conclusion générale.....	152

4.1.4	Localisation des terres	71
Chapitre 4 :	Prendre connaissance de la terre objet d'étude	74
4.1	Sélection d'une terre crue locale	74
4.2	Pré-identification et analyses visuelles	74
4.2.1	La pré-identification de la composition granulométrique	74
4.2.2	L'analyse visuelle des caractéristiques mécaniques	78
4.3	Identification au laboratoire	81
4.3.1	Problématique	81
4.3.2	Propriétés fondamentales	81
4.3.3	Conclusion générale :	111
Chapitre 5 :	Essais mécaniques sur la terre crue choisie	113
5.1	Pisé	113
5.1.1	Introduction	113
5.1.2	Préparation de la terre	113
5.1.3	Dimension des éprouvettes	114
5.1.4	Confection des éprouvettes	114
5.1.5	Détermination des caractéristiques mécanique des les blocs de pisé	114
5.2	Brique d'adobe	116
5.2.1	Introduction	116
5.2.2	Préparation de la terre d'adobe :	116
5.2.3	Dimension des éprouvettes	116
5.2.4	Confection des éprouvettes	117
5.2.5	Cure et stockage des blocs :	117
5.2.6	Détermination des caractéristiques mécanique des les blocs d'adobe:	118
5.3	Vérification des résultats obtenus	119
Conclusion générale :	.....	119
Chapitre 6 :	Correction de la terre	122
Problématique :	.....	122
La texture :	.....	123
Texture recherchée	124	
Correction de la texture	125	
Procédure de la correction :	127	
Le sable :	127	
Le tâtonnement sur la courbe de mélange :	129	

3.1.6	Quelle terre utiliser ?	37
3.1.7	Identification du matériau terre	38
3.2	Construire en terre crue	40
3.2.1	Les types de constructions en terre crue	40
3.2.2	Avantage et inconvénient de chaque type :	41
3.2.3	Les procédés constructifs.....	42
	Figure 18 : Les procédés constructifs.....	42
3.3	Les avantages et inconvénients de l'architecture en terre.....	48
3.3.1	Les avantages du matériau terre	49
3.3.2	Les inconvénients du matériau terre	50
3.4	Quelques pathologies des constructions en terre	52
3.4.1	Les principales causes de désordre	52
3.4.2	Les pathologies humides.....	53
3.4.3	Les pathologies structurelles.....	53
3.4.4	Les principes de bonne conception d'une architecture de terre.....	54
3.5	La nature d'un matériau terre :.....	55
3.5.1	Constituants gazeux	55
3.5.2	Constituants liquides.....	55
3.5.3	Constituent solides.....	56
3.5.4	Les constituants minéraux	56
3.6	Matières organiques et minérales du matériau terre :	56
3.6.1	Matières organiques.....	56
3.6.2	Matières minérales.....	57
3.6.3	Eléments sableux	57
3.7	Argiles.....	60
3.7.1	Origine	60
3.7.2	Structure.....	60
3.7.3	Principales espèces	60
3.8	Propriétés et classification du matériau terre	61
3.8.1	Propriétés à caractère chimique	61
3.8.2	Propriétés à caractère physique	62
3.8.3	Propriétés fondamentales.....	64
4.1.1	Classification géotechnique	67
4.1.2	Classification pédologique.....	67
4.1.3	Terres spécifiques	68

Tables des matières

Résumé.....	3
Abstract	4
ملخص	5
Introduction : La terre matériau d’hier et de demain.....	6
Problématique :.....	7
Objectifs de la recherche :	8
Chapitre 1: la terre crue dans l’architecture.....	10
Au commencement c’était la terre	10
Histoire de la construction en terre crue	11
En Afrique	11
En moyen orient	13
En Asie	13
En Europe	15
En Amérique.....	15
Chapitre 2 : Actualités de la terre crue dans l’architecture contemporaine.....	17
Dans le monde.....	17
Premiers étincelles vers une renaissance.....	17
Renaissance de l’architecture en terre en France :	18
La dynamique allemande pour la relance d’architecture en matériau terre :	19
L’Autriche à L’avant-garde :.....	20
En Angleterre :	21
Nouveaux actes entrepris pour la remise en valeur de l’architecture terre	22
En Algérie	24
Introduction	24
Exemple de la ville d’Oulef.....	24
L’habitat Ksourien et tentatives de restauration :	28
Réhabilitation des Ksour pour l’habitat.....	29
Chapitre 3 : Aperçus généraux sur le matériau terre -un matériau de construction-	33
3.1 Généralités	33
3.1.1 Introduction.....	33
3.1.2 Diversités	34
3.1.3 Champs d'applications divers	35
3.1.4 Avantages et inconvénients :	36
3.1.5 Les qualités de la terre crue	36

Phase 2 (2009-2011) : activités mises en œuvre

Afrique

- Le projet de conservation de quatre années pour l'Afrique (2008-2012) a mis en place une série d'activités sur les sites du patrimoine mondial en terre en Afrique : étude sur les bâtiments traditionnels en terre pour la conservation durable des Eglises creusées dans la pierre de Lalibela en Ethiopie ; développement d'un projet de réglementation de la construction pour les villes anciennes de Djenné et de Tombouctou au Mali avec la publication de spécifications techniques illustrées ; réhabilitation et rénovation de la Maison des jeunes de Djenné au Mali ; ateliers de responsables de sites régionaux et réunion de guides touristiques, développement de matériel didactique pour les établissements de formation régionaux EPA (Ecole du patrimoine africain, Porto-Novo, Bénin) et CHDA (Centre pour le développement du patrimoine en Afrique, Kenya), avec le soutien du fonds-en-dépôt italien.

États arabes

- La réunion de consultation de l'UNESCO sur la mise en œuvre du Programme du patrimoine mondial pour l'architecture de terre dans les États arabes - stratégies et approches (11 janvier 2010) a été soutenue par l'initiative privée conjointe du Centre pour la culture et la recherche Shaikh Ebrahim Bin Mohammad Al-Kalifa / ARCAPITA Bank B.S.C du Bahreïn ;
- Le Projet de sauvegarde du village de Hassan Fathy Nouveau Gournah, en Egypte a été financé par le compte spécial pour la sauvegarde du patrimoine culturel de l'Egypte.

Phase 3 (2012-2014) : activités mises en œuvre

Amérique latine et Asie centrale

- La phase 3 a été lancée à Terra 2012, 11^{ème} Conférence internationale sur l'étude et la conservation du patrimoine d'architecture de terre (22-27 avril 2012, Lima, Pérou) ;
- La planification stratégique a été réalisée avec le Centre UNESCO Lúcio Costa de Catégorie II au Brésil pour la mise en œuvre du programme dans la région (2011) ;
- Un atelier sur les artisans de terre en Amérique latine et dans les Caraïbes à Tlaxcala, au Mexique (2009), a été soutenu par le fonds-en-dépôt espagnol.

Autres régions

- La 1^{ère} Conférence méditerranéenne sur l'architecture de terre, Mediterra 2009 sous l'égide du Centre du patrimoine mondial de l'UNESCO, l'ICCROM, l'ICOMOS-ISCEAH Comité scientifique international sur le patrimoine architectural en terre et le Getty Conservation Institute (13-16 mars 2009) ;
- Projet de restauration de Bam et son paysage culturel (pris en charge par le fonds-en-dépôt italien).

Le Programme du patrimoine mondial pour l'architecture de terre (WHEAP) implique l'assistance technique des principales institutions internationales de conservation : le Centre international d'études pour la conservation et la restauration des biens culturels (ICCROM), le Conseil international des monuments et des sites (ICOMOS) et l'Institut pour la conservation de la construction en terre (CRAterre-ENSAG), ainsi que des institutions régionales l'Ecole du Patrimoine Africain (EPA, Bénin), le Centre pour le développement du patrimoine en Afrique (CHDA, Kenya), et le Centre de restauration et de conservation de l'architecture de terre (CERKAS, Maroc). En 2009, l'Université d'Udine (Italie) est également devenue un partenaire du programme. Dans le cadre des activités, le programme cherche une coopération et des partenariats avec d'autres institutions spécialisées ainsi qu'avec des autorités gouvernementales nationales et locales.

Les activités du programme sont rendues possibles grâce au soutien financier accordé par le Comité du patrimoine mondial par l'intermédiaire du Fonds du patrimoine mondial, le compte spécial UNESCO pour la sauvegarde du patrimoine culturel de l'Egypte, l'Accord de coopération Convention France-UNESCO, le fonds-en-dépôt italien, le fonds-en-dépôt espagnol et le Centre pour la culture et la recherche Shaikh Ebrahim Mohammad Al-Kalifa / ARCAPITA Bank B.S.C du Bahreïn.

Nouveaux actes entrepris pour la remise en valeur de l'architecture terre

L'architecture de terre est l'une des expressions les plus originales et les plus puissantes de notre capacité à créer un environnement construit avec des ressources locales facilement disponibles.

Elle inclut une grande variété de structures, allant des mosquées, palais et greniers aux centres villes historiques, paysages culturels et sites archéologiques. Son importance culturelle dans le monde entier est évidente et a conduit à la considérer comme patrimoine commun de l'humanité, et par conséquent méritant d'être protégée et préservée par la communauté internationale. En 2011, plus de 10% des biens culturels inscrits sur la Liste du patrimoine mondial incluaient des structures en terre. La disponibilité et la qualité économique du matériel contribuent à la lutte contre la pauvreté et au développement durable.

Toutefois, ces architectures de terre sont de plus en plus menacés par des impacts naturels et humains (inondations et séismes, industrialisation, urbanisation, technologies modernes de construction, disparition des pratiques traditionnelles de conservation...), et méritent donc une attention particulière en termes de conservation et d'entretien ; environ ¼ des sites inscrits sur la Liste du patrimoine mondial en danger sont des sites en terre.

Le **Programme du patrimoine mondial pour l'architecture de terre** (WHEAP) vise à l'amélioration de l'état de conservation et de gestion des sites architecturaux en terre à travers le monde. Des projets pilotes menés sur des sites en terre inscrits sur la Liste du patrimoine mondial ou inclus dans les Listes indicatives d'Etats parties à la Convention aideront à identifier les meilleures pratiques. Ils fourniront des exemples pour le développement et la diffusion de méthodes et de techniques appropriées dans la conservation et la gestion, et ils permettront de renforcer les capacités locales. La recherche scientifique permettra en outre de promouvoir et d'améliorer le savoir-faire dans ce domaine. Les résultats attendus visent à une meilleure compréhension des problèmes auxquels est confrontée l'architecture de terre, au développement de politiques de conservation, à la définition de lignes directrices pratiques et à l'organisation d'activités de formation et de sensibilisation, en particulier auprès des communautés locales, à travers des ateliers, des expositions, des conférences et des publications techniques. Le programme cherche à accroître la reconnaissance de l'architecture de terre et à créer un réseau mondial actif pour l'échange d'informations et d'expériences.

Lors de sa 31^{ème} session (Nouvelle-Zélande, 2007), le Comité du patrimoine mondial a approuvé le lancement du Programme intégré du patrimoine mondial pour l'architecture de terre (2007-2017), (Décision 31 COM 21C, document de travail 31 COM 21C). Donateurs et Etats parties ont été invités à fournir un soutien financier pour la mise en œuvre d'activités structurées en quatre phases et s'étendant progressivement dans le monde entier. La phase préparatoire, achevée en 2008, a été suivie de trois phases, chacune se concentrant sur deux régions ou sous-régions : la phase 2 (2009-2011) se concentre sur l'Afrique et les Etats arabes, la phase 3 (2012-2014) sur l'Amérique latine et l'Asie centrale et la phase 4 (2015-2017) sur l'Europe et l'Asie.

Phase 1 (2007-2008) : activités mises en œuvre

- Une réunion de consultation d'experts internationaux renommés dans la conservation de l'architecture de terre s'est tenue en novembre 2007 au Siège de l'UNESCO, permettant de définir des orientations finales du cadre opérationnel et de la stratégie du programme ;
- Le Programme du patrimoine mondial pour l'architecture de terre (WHEAP) a été officiellement lancé à l'occasion de la 10^{ème} Conférence internationale sur l'étude et la conservation de l'architecture de terre, Terra 2008 (1-5 février 2008, Bamako, Mali), organisée par le Getty Conservation Institute et le ministère de la culture du Mali ;
- Le projet d'inventaire des sites d'architecture de terre a été lancé, avec le soutien de l'Accord de coopération France-UNESCO (en cours).

En Europe

Les plus anciens établissements d'Europe sont datés du VI^e millénaire. L'habitat primitif en Thessalie est en de clayonnage de bois et d'argile puis évolue vers des groupements de constructions carrées en briques crues. Il faudra attendre le Siècle des Lumières pour observer un retour progressif à des habitats massifs en terre crue (pisé, bauge). Ce renouveau est sans aucun doute dû à François Cointeraux, qui écrira plus de 70 fascicules sur le sujet du pisé. Ce retour en force de la terre crue concerne donc non seulement l'Europe mais le monde entier. La terre crue continuera à être utilisée jusqu'au lendemain de la Seconde Guerre mondiale puis sera abandonnée pour des solutions plus rapides à mettre en œuvre, dans l'urgence de la reconstruction. Toutefois, le patrimoine constitué jusqu'alors représente aujourd'hui un nombre considérable de bâtiments, surtout ruraux, dans certaines zones (en France : vallées de la Saône et du Rhône, Dauphiné, Auvergne, Bourgogne, Bretagne, Normandie, Midi toulousain).

L'intérêt porté aujourd'hui au matériau dans certains pays européens (Allemagne, Pays-Bas, Danemark, France depuis peu) date du début des années 1980. La terre crue est une alternative à une industrie briquetier énergivore. Les coûts d'approvisionnements énergétiques des fours à brique poussent d'ailleurs certaines briqueteries à une inévitable reconversion dans la fabrication de briques en terre crue.

En Amérique

Sur le continent américain, la vie nomade des groupes de chasseurs-collecteurs dure plusieurs milliers d'années avant que ne soit expérimentée l'agriculture. C'est en Amérique Centrale que la culture du maïs permet la création des premiers villages et d'un urbanisme autour de centres religieux. L'habitat semble avoir été un système ouvert de petites maisons quadrangulaires élevées en matériaux légers : bois et torchis ou boules de terre, couvertures en palme. L'emploi de la brique crue apparaît entre 500 av. J.-C. et 600 ap. J.-C. Les civilisations précolombiennes ont également utilisé la terre crue. Un des exemples les plus connus est Chan Chan, au Pérou, grand ensemble de douze palais construits sur une surface de 20 km² en bordure de l'océan. À Taos, les habitations empilées configurent une forme pyramidale à degrés. Les murs d'adobe sont enduits de terre mêlée de paille finement hachée, boules de terre jetées et lissées à la main. Les toitures à "vigas" couvertes de brindilles sont recouvertes de terre damée. Cet habitat très élaboré a servi de modèle à l'architecture hispano-mexicaine en adobe qui fut depuis lors réalisée dans ces régions au Sud-Ouest des États-Unis. Aujourd'hui, la brique d'adobe et le pisé sont associés au fantastique développement que connaît l'architecture solaire, dans l'ensemble de ces contrées².



Figure 8 : palais du Chan Chan, au Pérou

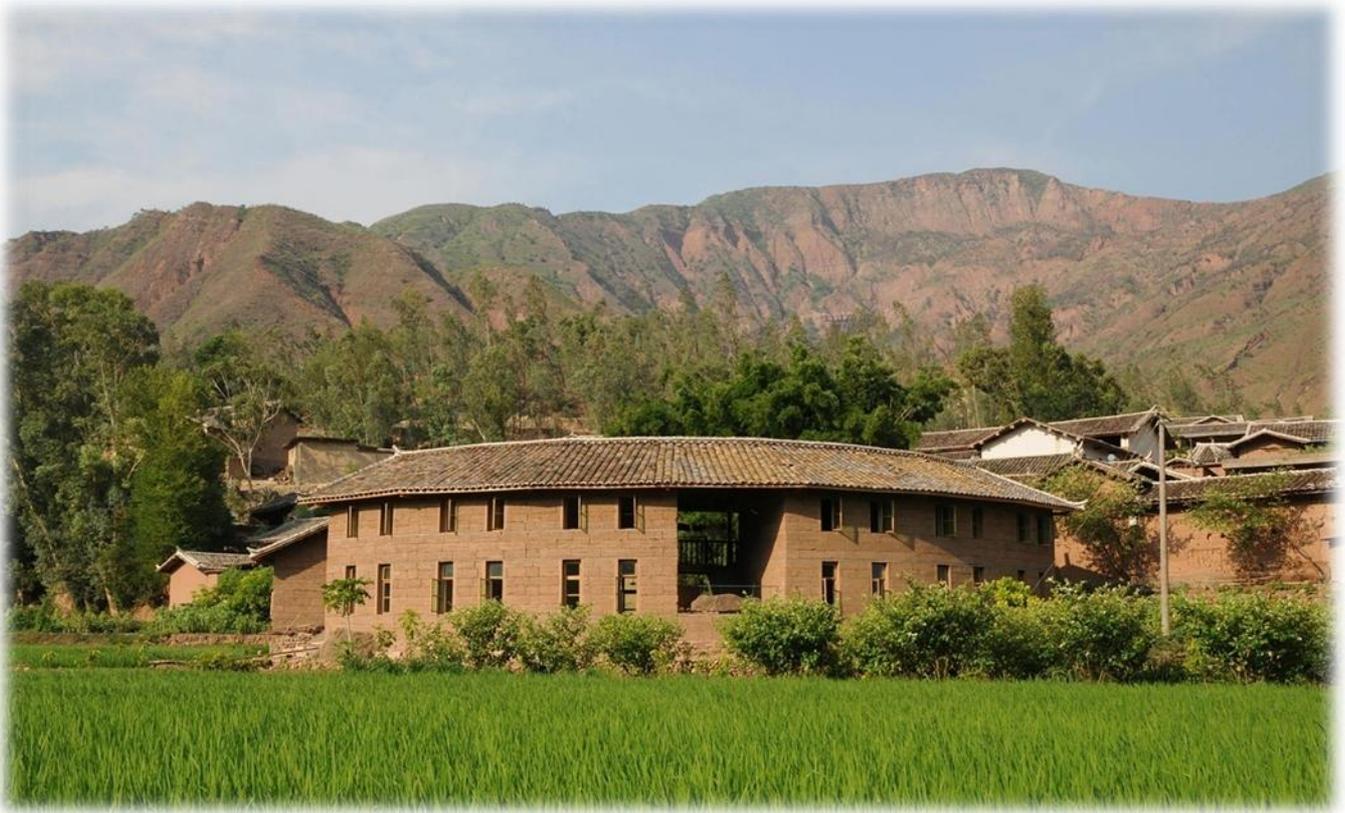


Figure 6: Reconstruction d'un village après séisme (Ma'anqiao, Chine, 2008)



Figure 7 : ville du Yémen de Shibam

En moyen orient

La terre crue a été employée dans toutes les zones géographiques, par la plupart des civilisations : les plus anciennes traces remontent à 10 000 ans à Jéricho et Mureybet (Syrie). La technique utilisée est alors l'empilement de pains de terre façonnés à la main. Il y a 8 500 ans, la brique de terre apparaît (site de Çatal Höyük, en Anatolie). Puis il y a 7 000 ans, une architecture de terre fait son apparition avec les ouvrages de fortification, suivent l'apparition des coupoles il y a 6 500 ans, les temples monumentaux et les villes-temple il y a 5 000 ans avec Sumer².



Figure 4 : Jéricho et Mureybet (Syrie)



Figure 5 : site de Çatal Höyük, en Anatolie

En Asie

Dans l'architecture chinoise, les premières constructions en terre crue n'étaient autres que des habitats troglodytes, creusés dans la terre (il y a 7 000 ans). Puis l'habitat sort un petit peu de terre, et les fortifications en terre battue font leur apparition (il y a 3 500 ans). Avec la dynastie des Han apparaissent les premières fortifications en pisé. Cette tradition du pisé perdure, on connaît en particulier les tulous, habitats des Hakkas, constitués d'une enceinte massive de pisé à l'intérieur de laquelle une vraie petite ville s'installe, et dont quelques exemples sont encore habités. Le pisé est toujours utilisé pour la construction.

En Arabie, la ville du Yémen de Shibam et son architecture en immeubles de briques terre crue lui vaut l'inscription au patrimoine mondial de l'Unesco en tant que « plus ancienne cité gratte-ciel du monde »

En Afghanistan, un centre de recherche sur le matériau terre ouvrira bientôt ses portes. Né d'un partenariat réussi entre l'ambassade de France et l'association Darah Afghanistan, il se situe sur le site de l'Université Polytechnique de Kaboul.

Figure 2 : Mosquée de Djenné, construite en briques de terre crue, enduite de terre lissée à la main



Figure 3 : Touareg

Histoire de la construction en terre crue

La terre crue est sans doute le matériau de construction le plus vieux du monde. 30 % de la population mondiale vit dans un habitat en terre. L'histoire de la construction en terre est mal connue. L'intérêt pour ce matériau jugé antique et médiocre était éclipsé par celui accordé à la pierre ou au bois, matériaux considérés plus "nobles". C'est pourtant bien la terre qui fut associée aux époques décisives de la révolution urbaine et qui servait la quotidienneté autant que le prestige des plus glorieuses civilisations de l'Antiquité.

En Afrique ;

Le rôle joué par le continent africain dans l'évolution humaine fut considérable. C'est en Afrique que l'on situe l'apparition même de l'homme. C'est aussi en Afrique que s'est épanouie la civilisation égyptienne durant près de trois millénaires. Aux premiers établissements humains des sites de Merimdé et du Fayoum (delta du Nil), datés du V^e millénaire av. J.-C., correspond un habitat de clayonnages de roseaux et de branchages enduits d'argile ou remplis de mottes de terre. Le matériau est modelé puis moulé en briques crues qui sèchent sous le soleil.

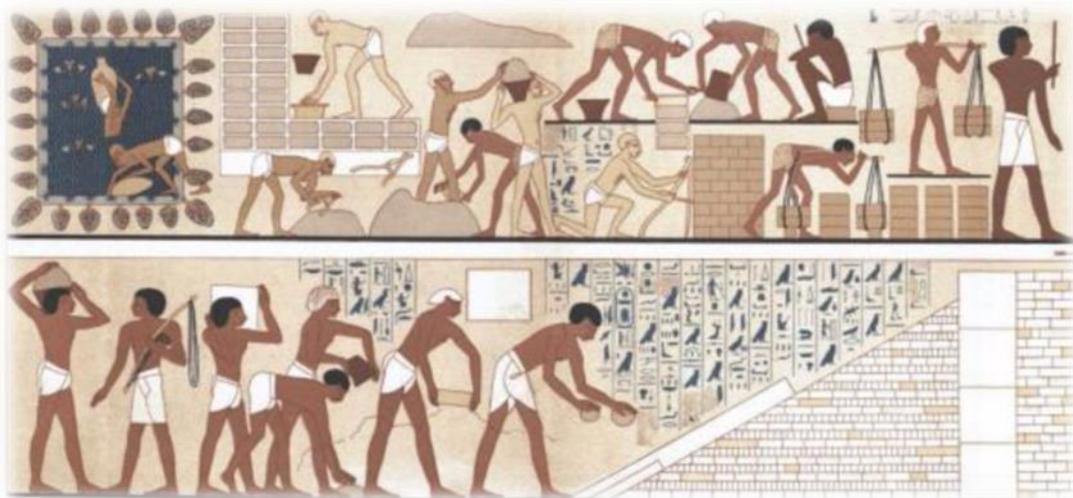


Figure 1 : captifs fabriquant des blocs d'adobe pour la construction de temple d'Ammon. Thèbes, Egypte.

Le développement de la construction en terre crue s'étend sur tout le continent africain, produisant une diversité et une richesse architecturales exceptionnelles. On peut citer l'architecture des mosquées soudanaises (mosquées de Tombouctou, XIII^e siècle apr. J.-C., de Djenné). La terre crue reste en Afrique un matériau de construction majeur, même si son image est souvent fortement dégradée¹

¹Traité de construction en terre crue. CRAterre