

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

**Université Abderrahmane Mira-Bejaia**

**Faculté de Technologie**

**Département de Génie Civil**



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

Pour l'obtention du diplôme de Master en Génie Civil

Option : Structures

# **ELABORATION DES BRIQUES DE TERRE CRUE ALLEGES**

---

**Elaboré par :**

- M<sup>elle</sup>. OUKACI YASMINE
- M<sup>r</sup> CHERIGUI MOHAMED BACHIR

**Encadré par :**

- Dr. BOUZIDI MOHAMED AMIN

**Membres du jury :**

- P<sup>r</sup>. CHELOUAH NASSER                      Président
- M<sup>r</sup>. MEZIANI BELKACEM                      Examineur

2020 – 2021



Le succès est l'accumulation de petits efforts,  
jour après jour.

---

## *Remerciements*

Tout d'abord nous remercions Dieu le tout puissant, le miséricordieux de nous avoir protégés en cette pandémie et nous avoir donné la force et le courage pour entamer et venir à bout de ce travail.

C'est avec un grand plaisir que nous réservons ces quelques lignes en signe de gratitude et de reconnaissance à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce travail de recherche.

Ce travail a été mené à bout grâce à l'apport scientifique et aux encouragements de M. Bouzidi Mohamed Amin, qui, tout d'abord, a accepté de nous encadrer et nous diriger tout au long de cette recherche. Il a toujours été disponible, à l'écoute de nos nombreuses questions, et s'est toujours intéressé à l'avancée de nos travaux. Vous trouverez ici notre plus profond respect et nos vifs remerciements pour votre dévouement et votre présence quotidienne.

Nous voudrions remercier également M. Ould Amer Ahmed qui, grâce à lui, nous avons pu avoir la matière première de cette recherche. M. Si Ahmed Chabane et Mme. Rahma de nous avoir encouragés à aller de l'avant et pour leurs précieux conseils. Une pensée sympathique à eux pour la bonne ambiance de travail mais également pour les nombreux bons moments passés ensemble.

Nos remerciements vont à l'ensemble de l'équipe du laboratoire LTPEST, là où nous avons effectué notre stage de fin d'étude.

A M. Zoubiri Djamel technicien du laboratoire MDC de l'université de Bejaia qui nous a facilité l'accès au labo.

Aux membres du jury Pr Chelouah Nasser et M. Meziani Belkacem d'avoir accepté d'évaluer notre travail.

Enfin, un grand merci à nos proches qui ont su nous soutenir, nous supporter, nous encourager pendant toute la durée de notre travail et plus particulièrement durant les derniers mois de rédaction. Merci infiniment.

Yasmine & Med Bachir

---

## *Dédicaces*

Depuis mon entrée à l'université j'attendais ce moment précieux, j'avoue que je n'ai jamais pensé qu'un jour je serai ingénieur en génie civil. Le destin nous réserve plein de surprises !

Cette recherche je la dédie à mes chers parents, mes deux sœurs, mon petit frère et bien sur ma grand-mère Titis, les seuls qui ont été présents pour moi.

Que dieu vous protège et vous donne longue et heureuse vie nch'Allah.

A toi Maman, Mon soleil, comme je t'ai toujours appelée, tu illumines ma vie sans que tu t'en rendes compte, tu embellis mes journées assombries, merci de m'avoir tiré vers le haut, de m'avoir relevé, de croire en moi quand moi je n'y croyais pas et pour tes précieuses prières que tu n'as jamais cessé de faire. En écrivant ces quelques lignes, je me rends compte que les mots ne suffisent pas pour te décrire ni même pour te remercier d'avoir été toujours à mes côtés, tu as tant fait pour moi. Merci Maman.

A toi Papa, qui m'a fourni les moyens nécessaires pour que je réussisse dans mes études, toi qui essayais de me faire aimer ma spécialité et m'encourager à aller de l'avant dans mon domaine, d'être présent pour moi et de me soutenir tout au long de mon cursus. Merci Papa

A mes sœurs Dyhia et Anissa qui sont à l'étranger, j'aurais tant aimé que vous assistiez à ma soutenance, je ne vous remercierais jamais assez pour votre aide précieuse, grâce à vous j'ai pu mener à bout mon travail, seul dieu sait à quel point vous me manquez. Les moments précieux partagés ensemble sont irremplaçables. Thank you so much sisters .. !

A toi mon frère Ryan, merci pour tes conseils, pour tes encouragements, tu me pousses à aller de l'avant et de croire encore à mon rêve et surtout de le réaliser en tout cas, j'espère y arriver, il n'est jamais trop tard n'est-ce pas ?! Je te souhaite bon courage pour ton entrée à l'université et oui maintenant, je te lègue les clefs de la fac, je sais que tu réussiras, je crois en toi !

A ma grand-mère Titis, qui est aussi à l'étranger, je reçois chaque jour tes prières précieuses. Elles m'ont été d'un grand secours. Je te remercie énormément de penser à moi, à nous tous, sache que tu as une place importante dans mon cœur .. !

*Et enfin je dédie ce mémoire à moi-même et oui je me dois des dédicaces quand même !*

*Ce mémoire est le témoignage d'un combat que j'ai mené contre moi-même !*

*Enfin j'ai réussi, je suis diplômée !*

*Yasmine Oukaci*

---

*Je dédie ce travail à mes chers parents qui ont veillé tout au long  
de ma vie à me protéger. QUE DIEU LES GARDE.*

*A mes deux frères mounir et khalil, et à ma chère sœur wissam  
Je remercie beaucoup aussi ma fiancée assma, aussi mon cher ami  
yacine, et tous ceux qui ont contribué à ma réussite.*

*Cherigui Med Bachir*

---

## Liste des tableaux :

Tableau 1. 1 : Diffèrent mode d'utilisation de la terre crue [8] .....	6
Tableau 1. 2 : La liste des sites inscrits au patrimoine mondial de l'Unesco [15].....	12
Tableau 1. 3 : Opérations de construction en terre en Algérie [17] .....	14
Tableau 1. 4 : Résumé des différents types d'argile .....	21
Tableau 1. 5 : Critères de sélection des terres pour la construction en BTC selon différentes normes [29] .....	22
Tableau 1. 6 : Les trois principaux composants qui forment les parois cellulaires du bois [37] .....	28
Tableau 1. 7 : les composants chimiques élémentaire du bois [37] .....	28
Tableau 1. 8 : Propriétés mécaniques [38] .....	28
Tableau 1. 9 : Valeurs de la conductivité thermique de quelques essences de bois [38].....	29
Tableau 1. 10 : La conductivité thermique de quelque matériau de construction. [39].....	29
Tableau 2. 1 : résultat du tamisage des copeaux de bois.....	40
Tableau 3. 1 : Estimation de la plasticité d'un sol [30].....	50
Tableau 3. 2 : Limites d'Atterberg des deux argiles testées.....	51
Tableau 3. 3 : Valeurs au bleu des deux sols testés.....	52
Tableau 3. 4 : Volume du bleu méthylène introduit dans les deux échantillons testés.....	52
Tableau 3. 5 : Classes granulaires des deux argile AB et AR.....	53
Tableau 3. 6 : Teneur en CaCO <sub>3</sub> de quelque sol .....	54
Tableau 3. 7 : Composition chimique du sol (AR) en (%) [40] :.....	55
Tableau 3. 8 : Composition chimique (AB) en (%) [53] :.....	55
Tableau 3. 9 : Composition minéralogique du sol (AR) [40].....	56
Tableau 3. 10 : Composition minéralogique de (AB) [53] .....	56
Tableau 3. 11 : Masse volumique des briques en fonction du pourcentage (%) d'ajout.....	59

## Liste de figures :

Figure 1. 1 : Compactage des couches de terre crue à l'aide d'un pilon [9] .....	7
Figure 1. 2 : Décoffrage des murs en pisé [9] .....	8
Figure 1. 3 : Foulage du mélange en piétinant [9] .....	8
Figure 1. 4 : Remplissage des interstices d'une structure en bois[10] .....	9
Figure 1. 5 : La mise en œuvre de l'adobe [8] .....	9
Figure 1. 6 : Maçonnerie de brique compactée [9] .....	10
Figure 1. 7 : Architecture de terre dans le monde[8] .....	11
Figure 1. 8 : Constructions réalisées en blocs de terre comprimée [8] .....	11
Figure 1. 9 : Cycle de vie de la construction en terre [8] .....	16
Figure 1. 10 : Particules d'argile vues au microscope électronique [22].....	17
Figure 1. 11 : Représentation schématique de l'empilement des feuillets.....	17
Figure 1. 12 : Représentation des tétraèdres et des octaèdres [25] .....	18
Figure 1. 13 : Agencement des couches octaédriques et tétraédriques dans les phyllosilicates. Feuillet de type 1 :1 (a), feuillet de type 2 :1 (b) et feuillet de type 2 :1 avec une couche brucitique ou gibbsitique [25]. .....	19
Figure 1. 14 : Structure de la kaolinite [27] .....	20
Figure 1. 15 : Structure de l'illite. [28] .....	20
Figure 1. 16 : Structure de Smectites [28].....	21
Figure 1. 17 : Représentation des limites d'Atterberg [32].....	23
Figure 1. 21 : Destination des déchets de bois source ADEME [35].....	24
Figure 1. 22 : Diverses parties formant la section transversale d'un tronc d'arbre [37].....	26
Figure 1. 23 : La sciure de bois .....	27
Figure 2. 1 : Lieux d'extraction des sols sur la carte algérienne .....	30
Figure 2. 2 : Aspect visuel du sol 1 .....	31
Figure 2. 3 : Aspect visuel du sol de Bordj Bou Arreridj.....	31
Figure 2. 4 : copeaux de bois utilisé.....	32
Figure 2. 5 : Dispositif de pesé.....	33
Figure 2. 6 : Dispositif de tamisage par voie humide.....	34
Figure 2. 7 : Dispositif d'analyse granulométrique par sédimentation .....	34
Figure 2. 8 : Détermination de la valeur au bleu de méthylène du sol.....	35
Figure 2. 9 : Dispositif de détermination de la limite de liquidité .....	36
Figure 2. 10 : Appareil de Casagrande .....	37
Figure 2. 11 : Dispositif de détermination de la limite de plasticité .....	37
Figure 2. 12 : Dispositif de détermination de la masse volumique en vrac .....	38
Figure 2. 13 : échantillon paraffiné .....	38
Figure 2. 14 : balance hydrostatique .....	39
Figure 2. 15 : Dispositif de classification des copeaux de bois.....	39
Figure 2. 16 : Malaxage de l'argile avec l'eau .....	40
Figure 2. 17 : Malaxage manuel des différents composants .....	41
Figure 2. 18 : Moulage des éprouvettes .....	41

---

Figure 2. 19 : Pressage des éprouvettes.....	42
Figure 2. 20 : Eprouvettes sans après démoulage .....	42
Figure 2. 21 : Eprouvette avec ajout après démoulage .....	43
Figure 2. 22 : Séchage dans une étuve à 50°C .....	43
Figure 2. 23 : CT mètre .....	44
Figure 2. 24 : Moule et brique utilisé pour le teste de conductivité thermique.....	44
Figure 2. 25 : Image d'un DRX (Diffractomètre a Rayon X) (à droite), échantillons de poudres (à gauche) [30].....	46
Figure 2. 26 : Machine d'essais IBERTEST.....	47
Figure 2. 27 : essai de traction.....	47
Figure 2. 28 : essai d'écrasement.....	48
Figure 3. 1 : Classification des sols AB er AR sur le diagramme de Casagrande des sols fins	51
Figure 3. 2 : Courbes granulométrique des deux argiles AB et AR.....	53
Figure 3. 3 : La répartition des fractions granulaires [52].....	54
Figure 3. 4 : resistanece en compression en feonction de pourcentage de copeaux de bois et le pourcentage d'eau .....	57
Figure 3. 5 : Conductivité thermique en feonction de pourcentage de copeaux de bois et le pourcentage d'eau .....	58



## Table des matières :

Chapitre I : Etude bibliographique .....	5
1. Introduction : .....	5
2. La terre crue : .....	6
2.1. La construction en terre crue : .....	6
2.2. La construction en bloc de terre crue dans le monde : .....	10
2.3. La construction en terre crue en Algérie : .....	11
2.4. L'avantage de la construction en terre crue : .....	15
2.5. L'inconvénient de la construction en terre crue : .....	15
2.6. Impact environnemental de la construction en terre crue : .....	15
2.7. Les argiles comme matériau de construction : .....	16
2.8. Déchets industriels comme ajout dans la fabrication des briques crues : .....	24
2.9. Généralité sur les copeaux de bois. ....	25
3. Conclusion.....	29
Chapitre II : Matériaux et Méthodes Expérimentales .....	30
1. Introduction .....	30
2. Matériaux étudiés : .....	30
2.1. Terre crue : .....	30
2.2. Copeaux de bois : .....	32
3. Procédures expérimentales .....	32
3.1. Caractérisation géotechnique .....	32
3.2. Fabrication des éprouvettes.....	39
3.3. Caractérisation chimique et minéralogique.....	43
3.4. Présentation des essais mécaniques : .....	46
4. Conclusion.....	48
Chapitre III : Résultats et discussions .....	50
1. Introduction : .....	50
2. Caractérisation géotechnique des sols : .....	50
2.1. Limites d'Atterberg : .....	50
2.2. La valeur au bleu de méthylène : .....	52
2.3. Les courbes granulométriques .....	53
3. Caractérisation chimique et minéralogique des sols : .....	54

---

3.1. Méthode de la spectrométrie de fluorescence X :.....	55
3.2. Méthode de la diffraction au rayon x :.....	56
4. Caractéristique mécanique et physique des Briques de Terre Crue Allégées :.....	57
4.1. Résistance en compression : .....	57
4.2. Conductivité thermique :.....	58
4.3. Masse volumique .....	59
5. Conclusion :.....	59
Conclusion générale : .....	60

### **Résumé :**

Dans un contexte de lutte contre le réchauffement climatique, le développement de la construction en terre crue est une véritable alternative en vue de la réduction de la part d'émission de CO<sub>2</sub> du secteur du bâtiment. Toutefois, ce matériau millénaire doit pouvoir justifier de bonnes résistances mécaniques et d'une tenue à l'eau convenable dans des conditions particulièrement sévères qu'imposent les réglementations en vigueur.

Les matériaux d'isolation naturel sont actuellement les plus utilisés dans le monde et en croissance constante. La cellulose, le principal constituant du bois permet de donner en premier lieu une structure rigide à la cellule végétale et grâce à la faible densité de ce matériau, les propriétés thermiques ont augmenté en créant des espaces d'air ce qui permet d'avoir une bonne conductivité thermique.

La recherche actuelle dans le domaine des matériaux de construction est orientée vers la valorisation des déchets pour assurer l'allègement de certains éléments de construction et une économie d'énergie. L'objectif de cette étude est de produire des nouvelles briques d'argile plus légères que celles qui sont actuellement sur le marché, en ajoutant des copeaux de bois aux mélanges d'argile. Plusieurs paramètres ont été étudiés ainsi que leur effet sur les modifications des propriétés physiques et mécaniques tels que la proportion des copeaux de bois et celle de l'eau. Un processus de fabrication et de séchage a été adapté au nouveau produit. Les résultats ont montré que l'addition d'une quantité croissante de copeaux de bois tend à modifier sensiblement les propriétés physiques et mécaniques des échantillons. La présence de copeaux de bois réduit le nombre de points de contacts entre les grains d'argile et produit un matériau plus léger et moins conducteur. Enfin, les résultats ont montré aussi que la confection des briques à base de copeaux de bois est possible.

### **Abstract :**

In the context of the fight against global warming, the development of raw earth construction is a real alternative for reducing the share of CO<sub>2</sub> emissions from the building sector. However, this age-old material must be able to demonstrate good mechanical resistance and adequate water resistance under the particularly severe conditions imposed by the regulations in force.

Natural insulation materials are currently the most used in the world and are constantly growing. Cellulose, the main constituent of wood, gives a rigid structure to the plant cell and thanks to the low density of this material, the thermal properties have increased by creating air spaces, which allows a good thermal conductivity.

The current research in the field of building materials is oriented towards the valorization of waste to ensure the lightening of certain elements of construction and an energy saving. The objective of this study is to produce new clay bricks lighter than those currently on the market, by adding wood chips to the clay mixtures. Several parameters were studied and their effect on the modifications of the physical and mechanical properties such as the proportion of wood chips and water. A manufacturing and drying process was adapted to the new product. The results showed that the addition of an increasing amount of wood chips tends to significantly modify the physical and mechanical properties of the samples. The presence of wood chips reduces the number of contact points between the clay grains and produces a lighter and less conductive material. Finally, the results also showed that the manufacture of bricks based on wood chips is possible.

# Introduction Générale :

L'accroissement prévisible de la population en milieu urbain, s'accompagne d'une forte demande de logement. Le besoin de construire rapide a conduit à l'adaptation des matériaux tel que l'acier, le béton ou la combinaison des deux (béton armé), sa résistance mécanique élevée a fait de ce matériau une référence de la construction. Le béton est le matériau le plus consommé dans le monde reléguant au second plan des siècles de savoir-faire sur les matériaux locaux (terre crue, bois, pierre,). En effet, le béton de ciment classique nécessite dans sa formulation l'utilisation de matériaux tel que le sable, le gravier qu'on lie avec le ciment, ce dernier nécessite une énergie fossile non renouvelable, de ce fait la production du gaz à effet de serre est élevé. La consommation mondiale de ciment à près de 6milliards de tonnes dont environs 50% reviennent au pays en voie de développement et une baisse de la demande dans les pays développés [1]

Par ailleurs les ressources nécessaires à la fabrication de béton sont préjudiciables pour l'environnement, il est donc impératif de trouver d'autres alternatives pour une construction plus écologique et plus économique.

La terre peut-elle concurrencer le béton ?

Depuis des millénaires la terre est utilisée en construction, il s'agit d'une matière première omniprésente, renouvelable et surtout recyclable, faible en énergie grise, réduisant ainsi les émissions de CO<sub>2</sub>. La terre crue était utilisée dans les constructions sous différentes formes soit en pisé, en torchis, en adobe ou encore en brique de terre comprimée. Elle a permis de construire des édifices simples ou monumentaux dans des environnements variés, comme par exemple les immeubles en terre crue à 8 étages de plusieurs siècles de Shebam/Yémen, prouve tout le potentiel de ce matériau écologique.

Aujourd'hui, grâce à la prise de conscience environnementale les matériaux naturels retrouvent un regain d'intérêt à la construction et plusieurs alternatives se présentent, parmi eux on retrouve la construction en terre crue telle qu'elle a été utilisée par nos aïeux. Selon les sources CRATerre (Centre international de la construction en terre), 30 % de la population mondiale, vit dans un habitat en terre. Pour les seuls pays en voie de développement, il s'agit de 50 % de la population, en majorité rurale, et au moins 20 % de la population urbaine et périurbaine.

Les éco-matériaux à base de terre crue représentent l'avenir de la construction, les progrès technologiques ont permis une meilleure connaissance moléculaire de ce matériau et les possibilités de construction en terre crue s'élargissent et peut être bien qu'un jour elle remplacera le béton.

Chaque année dans le monde, l'industrie du bois produit d'énorme quantité de déchets (sciure de bois, copeaux de bois) et les valoriser n'est toujours pas faciles.

L'enjeu actuelle dans le domaine des matériaux de construction est orienté vers la valorisation des déchets pour assurer d'une part l'allègement de certains éléments de construction et d'autre part, une économie d'énergie.

Un des objectifs de ce projet est d'élaborer de nouveaux matériaux de construction économique et écologique à base de copeaux de bois qui représentent une solution durable avec un bon compromis entre les performances mécaniques, la conductivité thermique et l'impact environnemental. Ce matériau est obtenu en mélangeant l'argile, les copeaux de bois et l'eau. Nous avons réalisé une série d'essais au laboratoire universitaire de Bejaia MDC, sur le mélange d'argile-copeaux de bois, afin d'avoir des briques bien consolidées.

Ce travail vise à répondre à la problématique suivante : Comment alléger la terre crue pour une construction durable et économique ? Il traitera donc particulièrement de la typologie que constitue la brique de terre crue, qui représente l'un des modes de construction en terre crue des plus rapide, fiable et résistant ainsi que l'importance de la valorisation des déchets dans la construction

- Le premier chapitre présente un aperçu bibliographique sur la construction en terre crue dans le monde et en Algérie ainsi que ses différentes techniques, en suite nous développerons sur le matériau terre et son impact environnemental, enfin nous terminerons ce chapitre par l'importance de la valorisation du déchet de bois dans la construction.
- Le deuxième chapitre comporte les méthodes et les procédés expérimentaux de chaque analyse chimique, thermique ainsi que les essais mécaniques.
- Le troisième et dernier chapitre est consacré à la caractérisation physico-chimique et géotechnique des deux échantillons de matières premières prélevées de deux endroits différents. L'objectif de ce travail est de déterminer les propriétés intrinsèques de ces matériaux, afin de choisir le matériau le plus approprié pour la formulation d'une brique de terre crue allégée à base de copeaux de bois à faible masse volumique et dont les conductivités thermiques sont suffisamment faibles pour une bonne isolation thermique du matériau.

# Chapitre I : Etude bibliographique

## 1. Introduction :

Les coûts énergétiques associés à la construction et surtout l'exploitation de bâtiments sont parmi les plus élevés de tous les secteurs de l'activité humaine [2].

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé, certes il possède une des qualités particulièrement attrayantes dans les constructions des maisons et des infrastructures, mais elle génère plus de problèmes qu'elle n'en résout.

Le béton est responsable de 8% des émissions de gaz carbonique CO<sub>2</sub>, et la moitié est produite lors de la fabrication du ciment.

La terre crue est de plus en plus défendue comme une alternative viable au béton comme le défend Paul-Emmanuel Loiret : « La terre crue réapparaît aujourd'hui, poussée par l'urgence des questions environnementales, mais aussi parce qu'au-delà de ses atouts écologiques, elle a des qualités sensibles, esthétiques, sensuelles »<sup>1</sup>.

De nos jours, on assiste à une prise de conscience de l'intérêt patrimonial, historique mais aussi écologique des maisons de terre, près d'un tiers de l'humanité vit dans des maisons en terre. Ce nombre atteint même plus de la moitié dans les pays en voie de développement [3] car elle représente une ressource naturelle, abondante et non polluante qui a un faible impact environnemental.

Écologiquement parlant, ce matériau n'a pas de limite dans sa réutilisation. Son recyclage se fait naturellement, ce qui participe activement à l'amélioration de la vie de l'être humain. Il possède des propriétés de confort qui sont recherchées dans les habitations modernes. Ce matériau peut apporter des réponses conformes en matière de construction durable [4], il est donc intéressant dans une démarche d'écoconstruction.

En Algérie, la terre crue est toujours employée, notamment dans les habitations en régions rurales. Il suffit juste de faire le tour du territoire pour les contempler, plus précisément en Kabylie et dans les zones présahariennes comme : Bejaia, Bechar, Adrar, Biskra, Ghardaïa... datant de la période romaine.

Néanmoins, la brique de terre crue fait face à plusieurs ordres, l'un d'eux est la méconnaissance du matériau par le grand public, ce qui implique l'absence du savoir-faire. Sa résistance mécanique relativement faible et la sensibilité à l'eau freinent le développement de ce matériau [5].

---

<sup>1</sup> Maître de conférences titulaire à l'énsa Versailles. Qualifié professeur TPCAU 2020

Enfin, L'absence de règles professionnelles formalisées ne permet pas aux professionnels de recourir à des textes de référence pour pratiquer les différentes techniques de construction de la terre crue, [6]

## 2. La terre crue :

### 2.1. La construction en terre crue :

La brique de terre crue utilisée en construction est composée de terre non-végétale, d'un mélange variable d'argile, de limon, de sable et parfois même de gravier à laquelle peuvent être ajoutés des liants. Environ 50% de la population des pays en développement, et au moins 20% de la population urbaine vivent dans des maisons de terre [7].

La terre crue est un matériau de construction ancestrale naturel qui a simplement besoin d'être extrait et remanié pour être utilisé et comme son nom l'indique, la terre crue se distingue de la terre cuite pour la simple raison qu'elle n'a pas subi de cuisson.

#### 2.1.1. Mode d'utilisation et dénominations de la terre crue [8] :

La recherche classe aujourd'hui la terre crue selon douze modes d'utilisation, recensés dans le (Tableau 1.1) ci-dessous.

Tableau 1. 1 : Différent mode d'utilisation de la terre crue [8]

Terre creusée	Habitat creusé dans l'épaisseur de l'écorce terrestre (habitat troglodytique).
Terre recouvrante	La terre recouvre une structure construite avec un autre matériau.
Terre remplissante	La terre remplit des matériaux creux employés comme enveloppe.
Terre découpée	Des blocs de terre sont directement découpés dans le sol.
Terre comprimée	Des éléments sont réalisés avec une terre comprimée dans des moules ou des coffrages.
Terre façonnée	La terre plastique est façonnée à la main pour dresser des murs minces.
Terre empilée	Des boules de terre sont empilées pour constituer des murs épais
Terre moulée	La terre est moulée à la main ou à l'aide de moules de formes diverses.

Terre extrudée	La terre est extrudée par une puissante machine.
Terre coulée	La terre est coulée dans des coffrages ou dans des moules, comme un béton.
Terre-paille	Une barbotine argileuse lie des fibres et constitue un matériau
Terre garnissante	La terre mêlée de fibres est appliquée en couche mince pour garnir un support

### 2.1.2. Les principales méthodes de construction en terre crue :

#### ➤ Le pisé :

Le pisé s'impose dans les régions où la terre est graveleuse, il est constitué d'un simple mélange de terre de sable et d'eau, bien compressé et lié par des argiles qui permettent de fabriquer ce matériau isolant et modulable à volonté. Son principe consiste à compacter successivement les couches de terre crue d'environ 12 cm à l'intérieur du coffrage à l'aide d'un pilon pour pouvoir constituer un mur, tel qu'il est montré sur la( Figure 1.1). Le décoffrage peut se faire dès la fin du compactage des couches de terre, voir la (Figure 1.2).



Figure 1.1 : Compactage des couches de terre crue à l'aide d'un pilon [9]





Figure 1. 2 : Décoffrage des murs en pisé [9]

### ➤ La bauge :

La bauge est obtenue à partir d'un mélange de terre argilo-limoneuse, de fibre végétale et d'eau, le foulage du mélange se faisait traditionnellement à l'aide de sabots d'animaux ou en piétinant des pieds jusqu'à obtention de l'élasticité désirée comme le montre la (Figure 1.3). Sa mise en œuvre s'effectue par assises successives, elles sont ensuite compactées au pilon puis laissées sécher pendant plusieurs semaines avant d'entamer la levée suivante.



Figure 1. 3 : Foulage du mélange en piétinant [9]

### ➤ Le torchis :

Un matériau de remplissage non porteur, le torchis n'a qu'à rôle de protection contre le froid et les précipitations [11], cette technique consiste à utiliser une structure en bois dont les interstices sont remplis par un mélange de terre et de paille devenu plastique par le piétinement, leur épaisseur est généralement comprise entre 15 et 20 cm. voir la (Figure 1. 4)



Figure 1. 4 : Remplissage des interstices d'une structure en bois[10]

### ➤ L'adobe :

Une technique ancestrale, là où la proportion d'argile dans la terre est abondante. Préparée à l'état liquide (teneur en eau de l'ordre de 30 %) [12].

C'est une brique de terre crue façonnée à la main puis compactée dans des coffrages prismatiques en bois ou en métal à l'aide d'un pilon, Ensuite ces blocs seront séchés au soleil puis transportés au chantier et seront utilisés comme matériau de remplissage ou matériau porteur. Voir la (Figure 1.5).

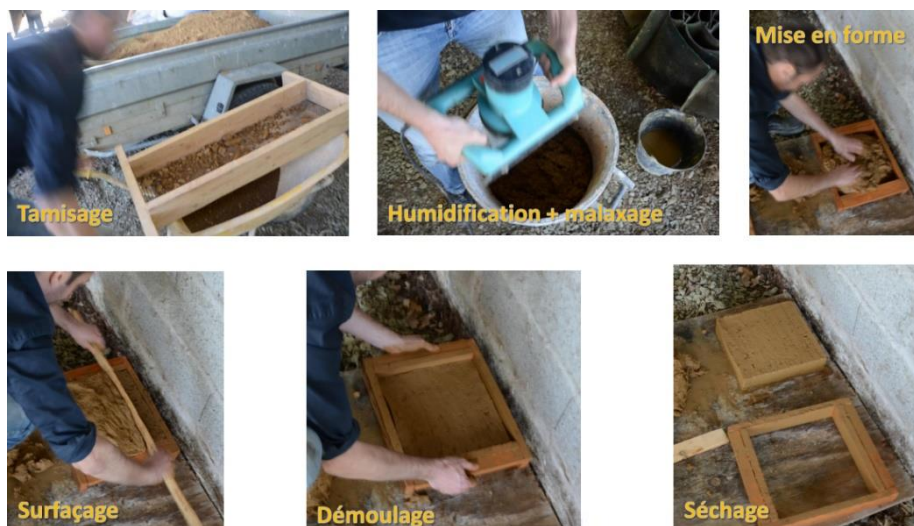


Figure 1. 5 : La mise en œuvre de l'adobe [8]

Une conductivité thermique aux alentours de  $1,1 \text{ W. m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  pour une masse volumique apparente de  $1780 \text{ kg. M}^{-3}$ . La résistance est supérieure à  $2,5 \text{ MPa}$  en compression et à  $1 \text{ MPa}$  en flexion [13].

➤ **La brique de terre compactée :**

Une version moderne de l'adobe composée de terre non-végétale (sable, limon, argile, gravier) et des liants peuvent être ajoutés telle que la chaux, c'est une technique qui consiste à compacter la terre à l'aide d'une presse qui peut être manuelle ou motorisée tel qu'il est montré sur la (Figure 1.6).



Figure 1.6 : Maçonnerie de brique compactée [9]

## 2.2. La construction en bloc de terre crue dans le monde :

La construction en terre crue connaît un regain d'intérêt sur le développement des matériaux de construction adaptés au type de construction et disponibles localement. Selon un document de CRATerre (Centre international de la construction en terre) [14], plus d'un tiers des habitants de la planète habitent encore dans des maisons en terre. Les zones construites en terre s'étendent sur l'ensemble de nos continents (Figure 1.7).





Figure 1. 7 : Architecture de terre dans le monde [8]

Le patrimoine bâti en terre crue jouit d'une richesse à la fois historique et culturelle qui inspire la construction moderne. En effet plusieurs constructions ont été réalisées en blocs de terre comprimée à travers les quatre coins du monde voir la (Figure 1.8) profitant de ses avantages, comme par exemple les immeubles en terre crue de huit étages de plusieurs siècles de Shibām/Yémen, Mosquée de Djenné (Mali) ainsi qu'en Argentine montrent tout le potentiel de ce matériau.



Shibam, Yémen



Argentine



Djenné, Mali




Figure 1. 8 : Constructions réalisées en blocs de terre comprimée [8]





### 2.3. La construction en terre crue en Algérie :

L'Algérie recèle de nombreux prestige en terre crue qui remonte à des millénaires. La construction en terre crue a été utilisée dans plusieurs édifices majestueux tels que la Casbah D'Alger et de Bejaia ainsi que les édifices religieux.

En Algérie, sept sites sont inscrits sur la liste du « patrimoine mondial » de l'Unesco (Tableau 1.2). Du désert du Tassili aux ruelles de la Casbah d'Alger, en passant par les ruines de Tipasa ou les extraordinaires constructions de la vallée du M'Zab [15]

Tableau 1. 2 : La liste des sites inscrits au patrimoine mondial de l'Unesco [15]

Site	Type	Illustration
Casbah d'Alger	Culturel	<p>La casbah d'Alger photographiée par Jacques Godeau (1963-1983)</p> 
Djemila	Culturel	<p>Les ruines de Djemila</p> 
Kalaa des Beni Hammam	Culturel	<p>Les ruines de la première capitale des émirs Hammadides, fondée en 1007</p> 

<p>Timgad</p>	<p>Culturel</p>	 <p>Les ruines romaines de Timgad</p>
<p>Tipaza de Maurétanie</p>	<p>Culturel</p>	<p>Le tombeau de la Chrétienne</p> 
<p>Vallée du M'Zab</p>	<p>Culturel</p>	<p>Le paysage de la vallée du M'Zab</p> 
<p>Tassili N'Ajjer</p>	<p>Mixte</p>	<p>Panorama de formations géologiques</p> 

En 2012 CAP-Terre a été créé sous la tutelle du ministère de la culture dans le but de valoriser le patrimoine bâti en terre et des techniques qui y sont attachées afin de préserver cet important pan du patrimoine national.

Le CNERIB (Le Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées du Bâtiment), a regroupé dans le (Tableau 1.3) plusieurs projets qui ont été réalisés en terre crue en Algérie [16] :

Tableau 1. 3 : Opérations de construction en terre en Algérie [17]

Années de réalisations	Projets réalisés
1969	Réalisation de 136 logements en pisé au village agricole de Bouhlilet à Batna
1971	Une équipe franco-belge réalise Zéralda un groupe expérimental d'habitations rurales.
1973	30 des 300 logements du village de Mustapha ben Brahim, sont réalisés en pisé
1975	Le village d'Abadla a été construit selon le procédé de la terre remplissant
1976	100 logements du village agricole de Felliache à Biskra sont réalisés en Toub.
1980	120 logements du village agricole de Madher à Boussaada sont réalisés en BTS.
1981	40 logements sont réalisés à Cheraga près d'Alger en blocs de terre comprimée (BTC)
1984	Un prototype bioclimatique fut réalisé à Tamanrasset en BTC.  Un prototype fut réalisé au CNERIB en BTC.
1986	10 logements sont réalisés à Adrar en BTC.  10 logements sont réalisés à Reggane en BTC
1994	24 logements sont réalisés à Tamanrasset par l'office de promotion et de gestion  Immobilière en BTC.  44 logements sont réalisés par l'ETR de Tamanrasset en BTC.
1998	Un prototype en pisé fut réalisé au CNERIB
2006	Un projet intitulé « réalisation d'un logement rural avec efficacité énergétique » est lancé au CNERIB et financé par l'union européenne.

### 2.4.L'avantage de la construction en terre crue :

On redécouvre aujourd'hui le patrimoine en terre crue, longtemps étouffé par les constructions industrielles, cette renaissance est due aux excellentes propriétés environnementales du matériau.

Comme mentionné précédemment, la terre crue est un matériau abondant, naturel et son recyclage se fait naturellement. La terre crue nécessite très peu d'énergie grise, son extraction se fait à quelques kilomètres du lieu de construction ce qui minimise le coût du transport.

- **Avantage écologique :** le matériau prélevé directement du sol, se recycle naturellement, il est très faible en énergie grise.
- **Avantage économique :** Dans les conditions économiques actuelles, les techniques de construction en terre présentent une alternative intéressante aux matériaux onéreux comme le béton et l'acier [18].
- La construction en terre crue consomme essentiellement des énergies naturelles ou renouvelables donc peu coûteuses. De plus, elle permet de créer de l'emploi.
- **Avantage culturel :** l'intégration du savoir-faire traditionnel et la prise de conscience de l'intérêt patrimonial.
- **Avantage sanitaire :** la terre offre une très bonne régulation hygrométrique, elle absorbe l'humidité en excès, la stocke et la restitue quand l'air devient trop sec. Son inertie thermique ralentit considérablement les échanges de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur.

### 2.5.L'inconvénient de la construction en terre crue :

- -La dégradation des briques de terre crue sous l'action des intempéries : la succession des phénomènes climatiques de pluie, soleil, froid, humidité et vent détériore le matériau.
- -Faible résistance des briques non stabilisées.

### 2.6. Impact environnemental de la construction en terre crue :

Aujourd'hui, le secteur du bâtiment représente la deuxième source de pollution la plus importante juste après les transports, il est responsable de 40% des dégagements de gaz carbonique dans l'atmosphère et d'autres gaz à effet de serre.

La consommation énergétique au cours de la vie d'un bâtiment se divise en trois catégories principales [19] :

- ❖ Construction : extraction du matériau brut, transport, fabrication du matériau de construction (ciment, armatures, charpente, etc.), transport, construction sur site.
- ❖ Utilisation : chauffage, ventilation, climatisation, éclairage et restauration.
- ❖ Démolition et traitement des déchets.



L'extraction, le transfert, le transport et la mise en œuvre des matériaux sont les problèmes les plus importants liés à la consommation d'énergie et aux fortes émissions de gaz à effet de serre, ce qui provoque souvent des impacts environnementaux importants.

La revendication des matériaux sains et simples ainsi que la réduction des influences néfastes sur l'environnement sont l'un des objectifs majeurs de tout concepteur responsable.

La construction en terre crue apporte des réponses à la préservation de l'environnement que ce soit du côté écologique, économique, culturel ou sanitaire.

Contrairement à d'autres matériaux, le liant qui donne sa cohésion à la terre crue, l'argile, n'a pas besoin d'être activé par une cuisson ou des processus chimiques. De plus, grâce à la réversibilité de la liaison argileuse, les matériaux de construction en terre crue peuvent être recyclés et remis en œuvre (Figure 1.9) [20].



Figure 1. 9 : Cycle de vie de la construction en terre [8]

## 2.7. Les argiles comme matériau de construction :

Pour mieux comprendre le comportement des sols, il est important de faire une étude sur l'un de ses éléments principaux qui est l'argile ainsi que son comportement mono minéral, sa structure et son affinité pour l'eau.

La structure superficielle des sols argileux peut se dégrader, formant une croûte. L'encroûtement limite l'infiltration et accroît le ruissellement. Un sol argileux mouillé a tendance à se compacter, ce qui favorise également le ruissellement. Les sols argileux peuvent également être très sensibles à l'érosion éolienne. [21]

Les argiles sont des silicates  $\text{SiO}_2$  invisibles à l'œil nu. Au niveau microscopique, comme le montre la (Figure 1.10) les grains sont très fins et très larges de formes variées, constituant un empilement de couches en forme de feuillet superposé et entrecoupé par un espace interfoliaire.

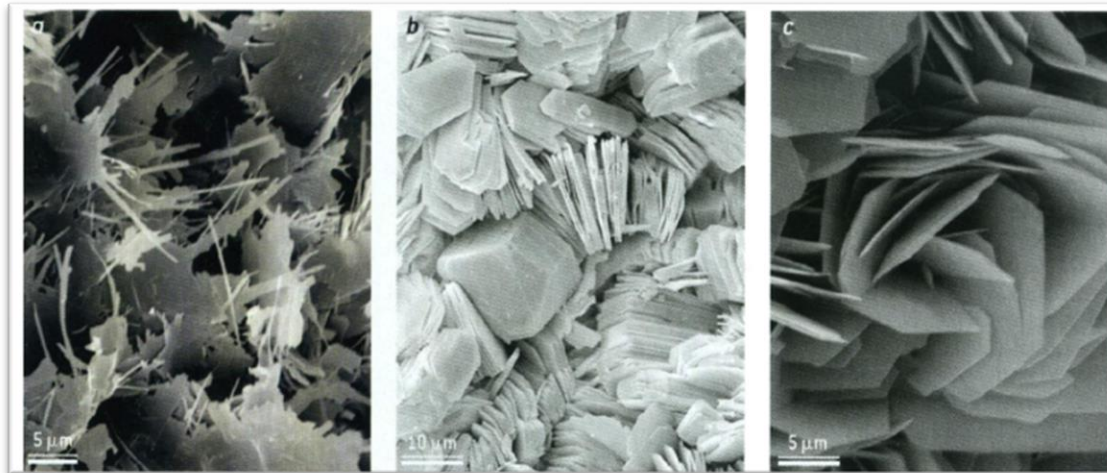


Figure 1.10 : Particules d'argile vues au microscope électronique [22]

### 2.7.1. Définition :

L'argile est une roche sédimentaire meuble, constituée de particules fines de taille inférieure à 2  $\mu\text{m}$ . [23]

Du point de vue structural, ces argiles sont des phyllosilicates hydratés qui sont formés à partir d'un empilement de plusieurs structures feuilletées et d'espaces interfoliaires (Figure 1.11). Cet espace est constitué d'eau et suivant les différents types d'argile, d'ions solidement fixés [24]. La nature différente des argiles est due à l'empilement de ces différentes couches.

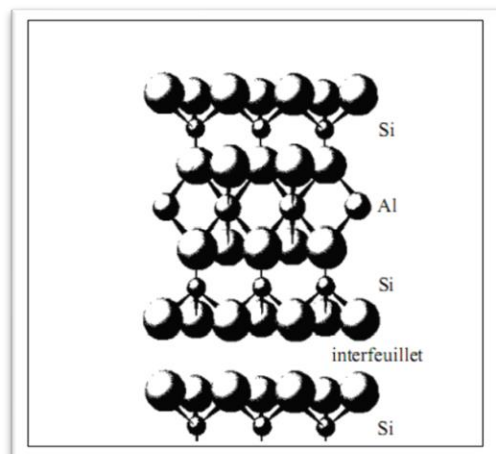


Figure 1.11 : Représentation schématique de l'empilement des feuillets

### 2.7.2. La structure de base :

Le plan des tétraèdres, noté T, est composé de tétraèdres d'atomes d'oxygène autour de chaque atome noté Z (Figure 1.12) [25]. Dans la couche tétraédrique, le cation dominant est  $\text{Si}^{4+}$  mais

de fréquentes substitutions ont lieu avec  $Al^{3+}$  et, plus rarement, avec  $Fe^{3+}$ . Le plan d'octaèdres, noté O, est formé par des atomes d'oxygène et des groupements hydroxyles autour de chaque atome noté M. Ces octaèdres (figure 1.12) forment un réseau hexagonal répété infiniment dans le plan du feuillet.

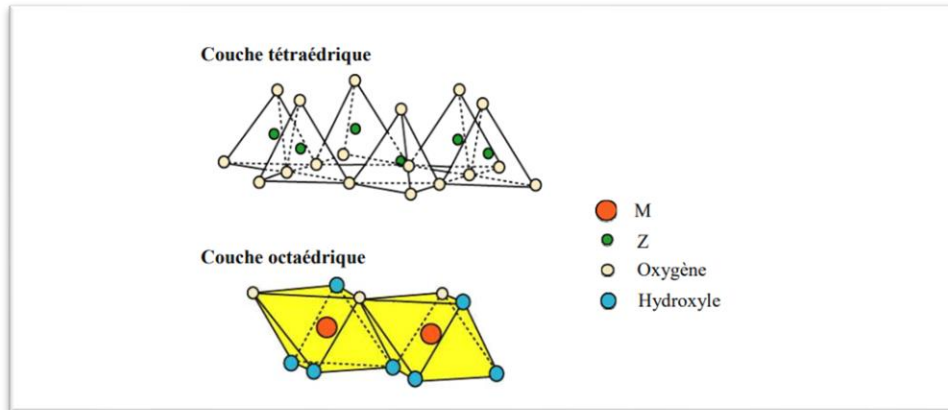


Figure 1. 12 : Représentation des tétraèdres et des octaèdres [25]

### 2.7.3. Classification des minéraux argileux :

Les argiles sont constituées de minéraux dont les particules sont essentiellement des phyllosilicates.

Les phyllosilicates 1 :1 ou TO, dont les feuillets sont constitués d'une couche T et d'une couche O, et les phyllosilicates 2 :1 ou TOT, dont les feuillets sont constitués d'une couche O entourée de deux couches T.

Association Internationale Pour l'Etude des Argiles *AIPEA* a abouti à une classification, cette dernière a été établie en fonction des critères suivants :

- ✚ -Type de feuillets 2 :1 ou 1 :1.
- ✚ -Charge globale de feuillets.
- ✚ -Nature des cations interfoliaires. [55], [56]

La classification des argiles est basée sur l'épaisseur et la structure du feuillet, la composition chimique, de la grandeur de l'espace interfoliaire et la valeur de la capacité d'échange de cations.

Les phyllosilicates se divisent en trois grandes familles :

- ❖ -La famille **des Kaolins de type T/O** : les kaolinites ou T-O, sont reliés d'une couche octaédrique  $Al(OH)_6$  et d'une couche tétraédrique  $SiO_4$  en forme de feuillets reliés par les atomes O et OH mis en commun. L'équidistance caractéristique est d'environ 7 Å
- ❖ -La famille **des smectites de type T/O/T** : Le feuillet est constitué de deux couches tétraédriques et d'une couche d'octaèdres. L'équidistance caractéristique est d'environ 10 Å. Ce type est entre autres représenté par les illites, smectites.

- ❖ -La famille de **chlorite de type T/O/T/O** : Elle est formée par un empilement de feuillets de type T/O/T, la famille des smectites est similaire au type précédent mais l'espace interfoliaire est occupé par une couche octaédrique. L'équidistance caractéristique est alors de 14 Å environ.

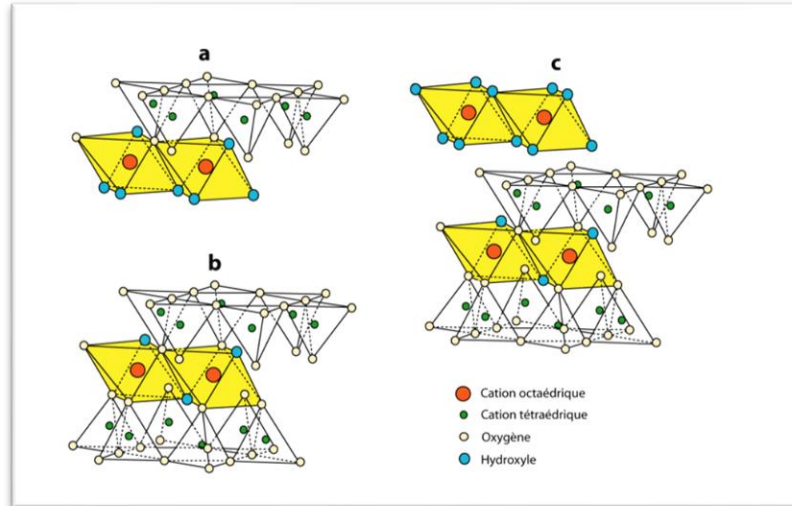


Figure 1.13 : Agencement des couches octaédriques et tétraédriques dans les phyllosilicates. Feuillet de type 1 :1 (a), feuillet de type 2 :1 (b) et feuillet de type 2 :1 avec une couche brucitique ou gibbsitique [25].

#### 2.7.4. Structure des principaux minéraux argileux :

##### ❖ Structure de la kaolinite :

La kaolinite est constituée d'une succession de couches alternées de feuillets en tétraèdre (Silice) et de feuillets en octaèdre (Aluminium) voir la figure 1.14, qui explique donc que l'on considère la kaolinite comme un minéral argileux 1/1 voir la figure. Sa formule théorique est  $\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ . Les deux feuillets sont liés de telle manière qu'ils forment une seule couche d'épaisseur d'environ 7Å (0,7 nm) qui s'étend indéfiniment dans les deux autres directions [26].

La liaison entre deux feuillets se fait grâce à des liaisons hydrogène. Ces liaisons s'établissent entre les hydroxyles de la couche octaédrique et les oxygènes de la couche tétraédrique. Celles-ci entraînent un rapprochement des feuillets empêchant toute pénétration de molécules d'eau, de molécules organiques ou d'ions minéraux voir la (Figure 1.14).

Ceci dit, la possibilité de gonflement ou de rétraction des feuillets est inexistante.

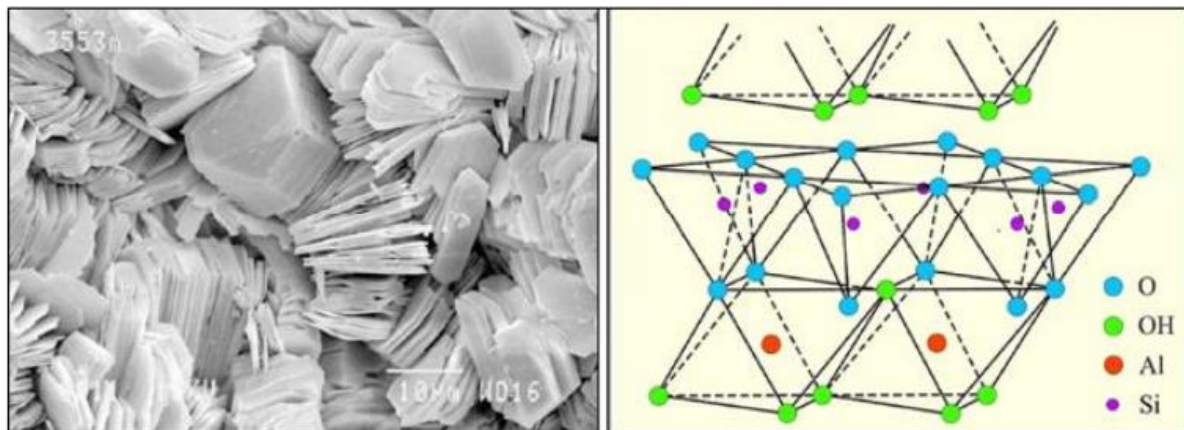


Figure 1. 14 : Structure de la kaolinite [27]

### ❖ Structure de l'illite :

L'illite est constituée d'une couche octaédrique (O) intercalée entre deux couches tétraédriques (T) voir la (Figure 1.15). Sa formule théorique est :  $(\text{Si}_{4-x}\text{Al}_x)^{(\text{Al}^{2+})}_{010}(\text{OH})_2(\text{K})_x$  avec  $x$  voisin de 0,5 [28].

Les illites sont des minéraux argileux à feuillet de type 2/1 et à équidistance basale stable à 10 Å. Elle présente des substitutions fréquentes de  $\text{Si}^{4+}$  par  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  ou  $\text{Fe}^{3+}$  [28]. Les espaces entre ces atomes sont reliés par des atomes de potassium (K), Les ions compensateurs de potassium (K) sont faiblement échangeables c'est-à-dire l'illite a une capacité d'échange cationique (CEC) faible.

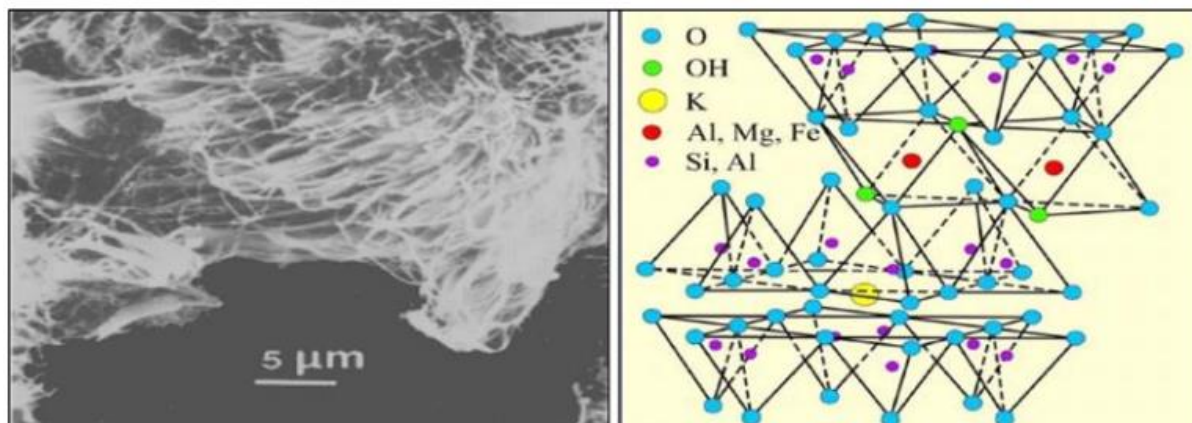


Figure 1. 15 : Structure de l'illite. [28]

### ❖ Structure des Smectites :

Parfois appelée La montmorillonite, désignée comme un minéral 2 :1 et composé de de deux feuillets de silice et d'un feuillet d'aluminium. L'épaisseur de chaque couche 2:1 est d'environ 10 Å (1 nm). Les sommets des feuillets de silice sont joints par de faibles forces de Van der Waals, ce qui permet aux ions échangeables de pénétrer dans la structure et séparer les couches.



Le terme d'« argile gonflante » est dû à la possibilité de « gonflement » des espaces interfoliaires. Ainsi, ces argiles ont une capacité d'échange cationique (CEC) élevée.

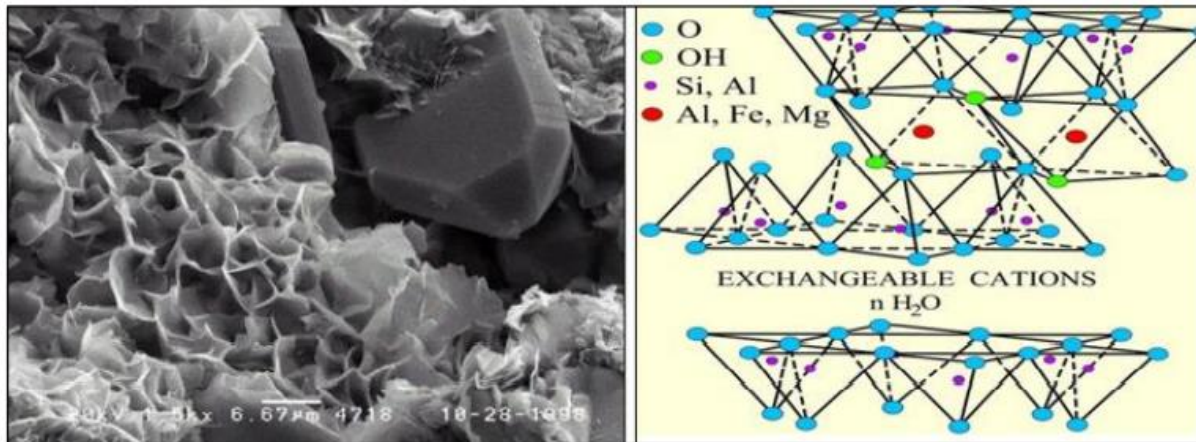


Figure 1.16 : Structure de Smectites [28]

Les différents types d'argile les plus courants sont représentés dans ci-dessous (Tableau 1.4) :

Tableau 1.4 : Résumé des différents types d'argile

TYPE DE L'ARGILE	Combinaison des feuillets	Formule chimique	Espace interfoliaire
Kaolinite	T-O	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	Liaison hydrogène forte
Illite	T-O-T	$(\text{K}, \text{H}_{30})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2, (\text{H}_2\text{O})]$	Présence de $\text{K}^+$
Montmorillonite (Famille des smectites)	T-O-T	$(\text{Na}, \text{Ca})_{0.3}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Présence ou pas des cations hydrates ( $\text{Na}^+$ et $\text{Ca}^+$ )

### 2.7.5. Propriétés et classification des argiles :

Le retour d'expérience sur les techniques de construction démontre que les normes d'utilisation des terres se basent principalement sur la granulométrie, la propreté et la plasticité du sol voir (le Tableau 1.5) ci-dessous [29] :

Tableau 1. 5 : Critères de sélection des terres pour la construction en BTC selon différentes normes [29]

Pays	Documents de référence	Critères de sélection de la terre
USA	NMAC 14.7.4 (2000)	Peu de recommandation : les unités constructives doivent être testées.
France	XP P 13-901 (2001)	Granularité, plasticité et nature de la terre.
Nouvelle Zélande	NZS 4297 (1998)	Les unités constructives doivent être testées.
Pérou	NTE E 080 (2000)	Granularité.
Afrique	ARSO (1996)	Granularité, plasticité et nature de la terre.
Zimbabwe	SAZS 724 (2001)	Granularité, sels, teneur en matière organique et cohésion.
Allemagne	Lehmbau Regeln (1999)	Force de liaison, plasticité et granularité.
Australie	HB 195 (2002)	Granularité
Espagne	MOPT (1992)	Granularité

### 2.7.5.1. Granulométrie :

Un sol est constitué de particules de dimensions très variées. Des cailloux de 10 cm et plus ou des particules d'ultrargile de dimensions inférieures au micron (1 micron noté  $\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m} = 0,001 \text{ mm}$ ) peuvent être contenu dans le sol. Les catégories de sols sont définies suivant la taille des grains.

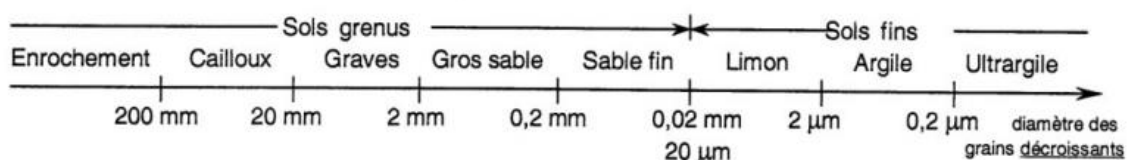


Figure : Classification des sols [30]

Le but de l'analyse granulométrique est d'étudier la taille de ces particules et de mesurer l'importance relative de chacune des fractions de sol de dimensions bien définies [30]

- Pour les sols grenus, on utilise une série de tamis.

- Pour les sols fins, on utilise la sédimentométrie (V.P.L.).
- Pour représenter les résultats de ces essais, on dresse la courbe granulométrique

### 2.7.5.2. La plasticité :

La plasticité est la capacité des matériaux de maintenir une déformation sans rupture [57]. La terre a un comportement élasto-plastique, c'est-à-dire elle représente une déformation élastique réversible et une déformation plastique irréversible. La plasticité d'une terre dépend de la capacité d'adsorption d'eau

Les limites d'Atterberg, limites de liquidité WL et de plasticité WP, sont les indicateurs de plasticité couramment employés. [58]

En général, une bonne terre de construction ayant un indice de plasticité (IP) compris entre 16 à 28 % et une limite de liquidité (WL) entre 32 à 46 % .[31]

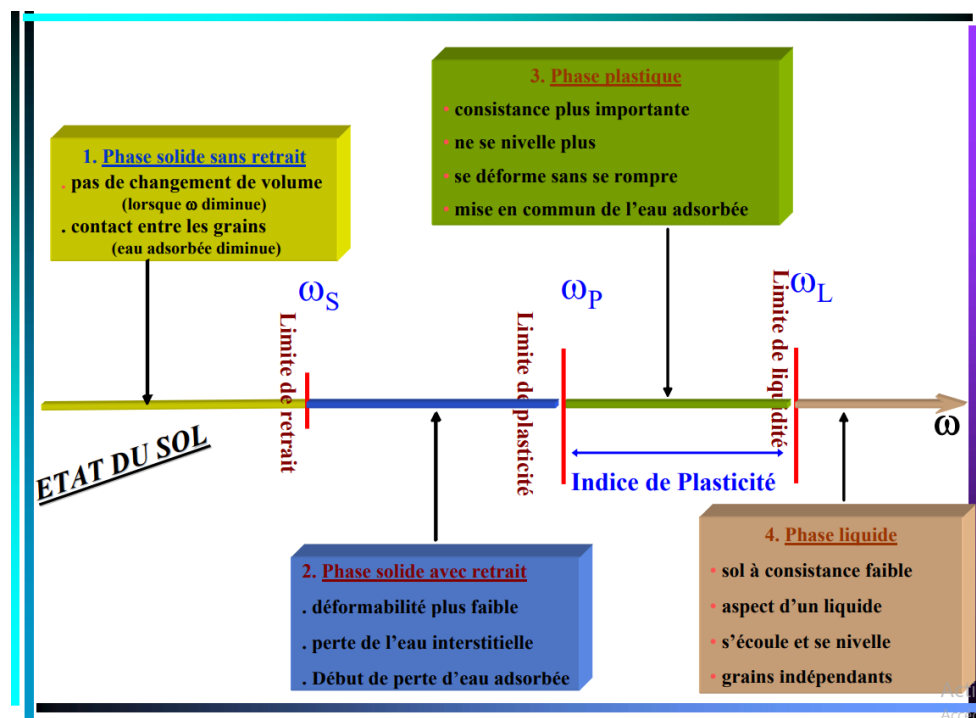


Figure 1. 17 : Représentation des limites d'Atterberg [32]

### Bleu de méthylène :

Le bleu de méthylène est un colorant cationique, de formule chimique  $C_{16}H_{18}ClN_3S$  et de masse molaire de 319,86 g/mol. Ce dernier est adsorbé par les surfaces des argiles qui sont chargées négativement.

Cette méthode permet de déterminer la surface totale d'échange ionique entre la fraction argileuse et les molécules de bleu de méthylène. Elle comporte essentiellement la surface externe qui est comprise entre les particules argileuses et la surface interne correspondante à l'espace interfoliaire [33]



## 2.8. Déchets industriels comme ajout dans la fabrication des briques crues :

### 2.8.1. Un geste écologique et responsable :

De grandes quantités de déchets solides sont générées dans le monde entier par des activités domestiques, industrielles, commerciales et de démolition de bâtiments ; les impacts environnementaux et économiques résultent de l'élimination sans recyclage ou la réutilisation de ces matériaux [34].

Lorsque de nouveaux produits à base de déchets recyclés sont utilisés au lieu de matériaux conventionnels, les ressources naturelles et l'énergie sont préservées et l'élimination des déchets coûteux et/ou potentiellement dangereux est évitée.

De nombreuses études ont été menées pour améliorer la qualité des briques et diminuer les coûts de fabrication. La plupart de ces études se sont concentrées sur l'incorporation de déchets dans la composition des briques pour améliorer ou modifier les propriétés mécaniques et physiques.

Selon l'ADEME (Figure 1.21), 79 % des déchets de bois sont valorisés et 57 % des 7,2 millions de tonnes de ces déchets sont valorisés en matière et 22 % en valorisation énergétique.

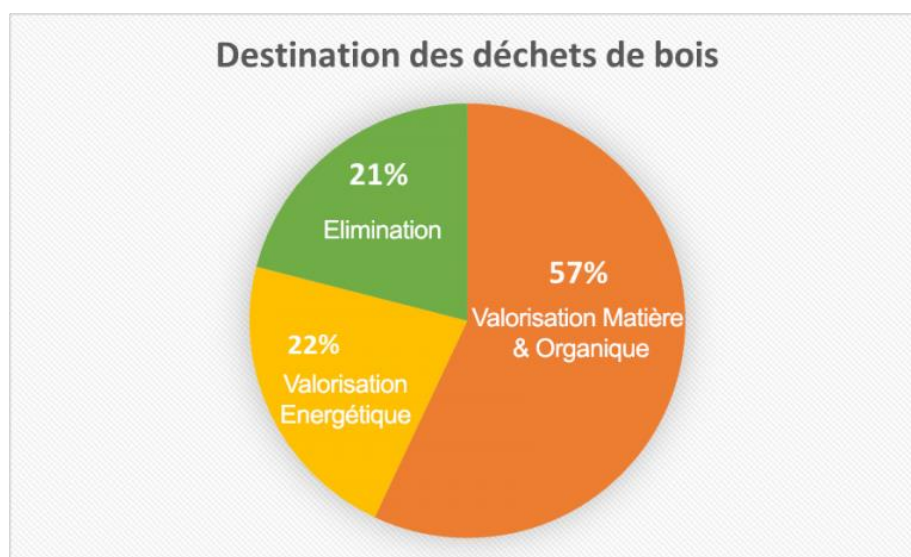


Figure 1. 18 : Destination des déchets de bois source ADEME [35]

## 2.9. Généralité sur les copeaux de bois.

Depuis la nuit des temps, le bois a accompagné l'homme dans son environnement, grâce à ses propriétés spécifiques il a été utilisé comme élément de construction.

Parmi les propriétés positives qu'il possède [36] :

- La résistance mécanique relativement élevée (en tension et en compression).
- La masse volumique modérée.
- La faible conductibilité thermique.
- Il se prête facilement à l'usinage.

On peut classer les types de bois en deux catégories :

- Les résineux (les bois durs) ;
- les feuillus (bois mous).

Les propriétés du bois varient selon l'espèce de bois, mais aussi d'un arbre à l'autre. Les facteurs principaux qui contribuent à ces variations sont :

- L'essence (l'espèce) d'arbre dont le bois est issu ;
- La vitesse de croissance de l'arbre ;
- La teneur en eau du bois ;
- Les conditions climatiques et la nature du sol.

### 2.9.1. La structure du bois :

Le bois est un matériau composite naturel composé de fibres de structures complexes. Ces fibres sont constituées de micro-fibrilles de cellulose de structure cristalline et fibreuse, enrobées de deux types de polymères amorphe : la lignine et les hémicelluloses [36].

Le bois comporte également une petite quantité de composés organiques (un pourcentage qui varie entre 2% à 5% en masse dans les cas des résineux), d'une masse encore plus faible de molécules et d'une structure variée.

En général, le bois est un matériau de construction anisotrope qui génère des sous-produits et des sciures lors d'une transformation industrielle qui peuvent être valorisées pour d'autres usages tels que la valorisation énergétique comme combustible et comme adsorbant propre, naturel et à faible coût.

La section transversale complète d'un tronc d'arbre (Figure 1.22), permet de mettre en évidence les trois parties plus ou moins distinctes que sont [37] :

- **L'écorce** : qui sert de couche protectrice au tronc.
- **L'aubier** : partie partiellement vivante de l'arbre qui assure, au niveau de l'assise génératrice, l'approvisionnement en sève de l'arbre. Cette partie est formée des premiers cerne se trouvant derrière l'écorce. Son épaisseur est fonction de l'essence.
- **Le duramen** : appelé également « bois de cœur » ou « bois parfait ». Il s'agit de la partie centrale du tronc où les vaisseaux sont obstrués par divers dépôts tels que du tanin, des colorants, des résines, etc. Le processus durant lequel les vaisseaux sont bouchés, appelé le duraminisation, est plus ou moins marqué et peut s'accompagner de modifications importantes de la couleur du bois.

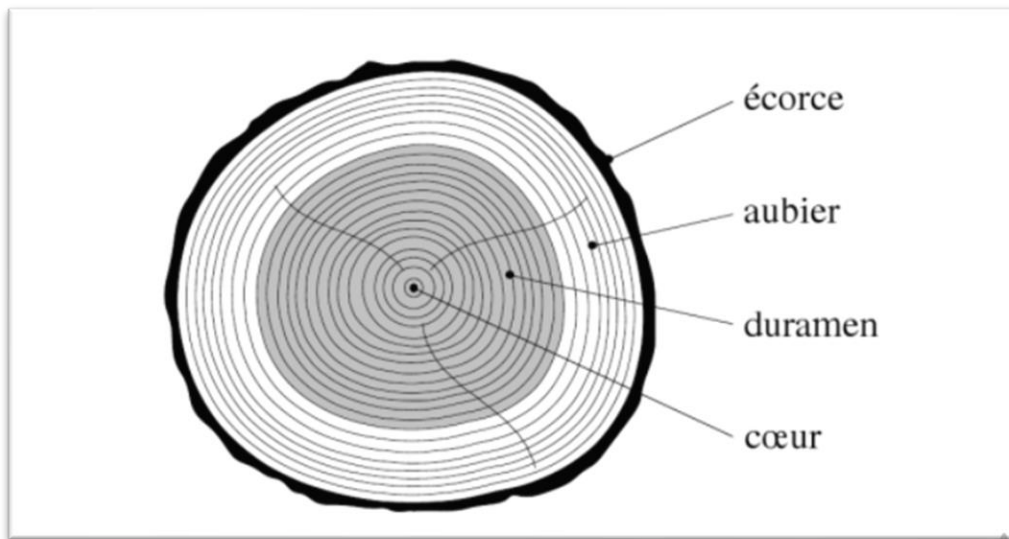


Figure 1. 19 : Diverses parties formant la section transversale d'un tronc d'arbre [37]

### 2.9.2. Les Sous-produits du bois :

L'objectif prioritaire des scieries consiste à optimiser le rendement en matière, ce qui conduit à minimiser le volume des sous-produits. Les déchets de bois varient en fonction de l'essence et de la nature des équipements.

Il existe plus exactement quatre types :

- ⇒ Sciures de bois.
- ⇒ Chutes de bois massifs.
- ⇒ Défaut de cœur au sciage.
- ⇒ Chutes de tronçonnage des grumes avant le sciage.

Dans notre cas, nous nous intéressons à la sciure de bois.

#### ➤ La sciure de bois :

Par définition la sciure est un résidu de bois produits après sciage (Figure 1.23), elle est constituée de fines particules qui représentent l'ensemble de ce résidu.

La sciure de bois dérivée du travail à un potentiel important c'est un absorbant et se prête à différentes utilisations ainsi il représente un déchet humble qui trouve une seconde vie, soit dans le domaine industriel, du bâtiment et agricole, il est à 100% naturel, biodégradable et écologique.



Figure 1. 20 : La sciure de bois

### 2.9.3. Composition chimique du bois :

La cellulose et l'hémicellulose sont les éléments prépondérants de la paroi cellulaire. Ces deux constituants sont très hydrophiles. La cellulose, dans une proportion variante entre de 40% et 50 %. Elle comporte des régions cristallines (plus de 60 %) interrompues par des zones amorphes qui affaiblissent les liaisons intermoléculaires. [36].

Les hémicelluloses sont des polymères amorphes ramifiés qui constituent 25 % à 40% de la paroi cellulaire. Enfin, la lignine est un polymère hétérogène complexe, amorphe et réticulé qui constitue 20% à 35% de la paroi cellulaire. (Tableau 1.6)

#### ❖ La cellulose :

La cellulose représente le polymère de la famille des polysaccharides le plus abondant sur la planète. Elle est l'élément structural de premier ordre pour la grande majorité des parois végétales. C'est l'élément constructif majeur du bois, son rôle principal est d'assurer la rigidité de la paroi végétale.

#### ❖ Type de cellulose :

Dans la structure de la cellulose, les macromolécules sont liées entre elles par des liaisons hydrogènes.

Il existe de type de cellulose [59] :

1. **Cellulose native** : Lors de la cristallisation toutes les extrémités alcools se retrouvent du même côté et les aldéhydes de l'autre.
2. **Cellulose régénérée** : provient du traitement chimique de la cellulose native par la soude suivie d'un séchage. En effet, la structure semi cristalline de la cellulose native évolue et forme d'autres structures amorphes. Des traitements chimiques permettent de passer d'une structure à une autre [60]

Tableau 1. 6 : Les trois principaux composants qui forment les parois cellulaires du bois [37]

La cellulose	40%-50%
La lignine	20%-35%
L'hémicellulose	25%-40%

La composition chimique élémentaire de la matière organique bois fait apparaître trois éléments principaux, qui sont repartis en pour cent du bois anhydre comme le montre le (tableau 1.7) ci-dessous :

Tableau 1. 7 : les composants chimiques élémentaire du bois [37]

Carbone	50 %
Hydrogène	6 %
Oxygène	44 %

Les propriétés mécaniques des composantes sèches de la fibre sont données dans le (Tableau 1.8) ci-dessus.

Tableau 1. 8 : Propriétés mécaniques [38]

Matériau	Ea (GPa)	Et (GPa)	G (GPa)	Coefficient de Poisson
Cellulose	134.0	27.2	4.4	0.1
Hémicellulose	8.0	4	2.0	0.33
Lignine	3.3	3.3	1.5	0.354

Où Ea, Et Eao G désignent respectivement les modules axial, tangentiel et de cisaillement.

#### 2.9.4. Conductivité thermique du bois :

La conductivité thermique du bois dépend de la masse volumique apparente du bois et de son humidité. Elle augmente lorsque l'humidité ou la masse volumique apparente augmente. La conductivité thermique est pratiquement identique dans les directions tangentielle et radiale, mais elle est environ 2,5 fois plus élevée dans la direction axiale [24].

Le (Tableau 1.9) Ci-dessous montre les valeurs moyennes de la conductivité thermique des résineux et des feuillus les plus utilisés.

Tableau 1. 9 : Valeurs de la conductivité thermique de quelques essences de bois [38]

Désignation	Conductivité thermique (W/m.K)	Masse volumique A 15% d'humidité (kg//m <sup>3</sup> )
<b>Résineux :</b> Sapin, Epicia, Pin sylvestre, pin maritime.	0.12 0.15	400 à 500 500 à 600
<b>Feuillus :</b> Chêne, hêtre, frêne.	0.23	600 à 700

La conductivité thermique du bois est environ 10 fois plus faible que celle du béton, 250 fois plus faible que celle de l'acier et environ 7 fois plus faible que celle de la terre. Elle varie selon les essences, en fonction de leur masse volumique, voir (Tableau 1.10).

Tableau 1. 10 : La conductivité thermique de quelque matériau de construction. [39]

Matériaux	Densité (Kg/m <sup>3</sup> )	Conductivité thermique $\lambda$ (M/m.K)
Brique de terre compressée	1700	1,000
Pisé (1900 Kg/m <sup>3</sup> )	1900	0.800
Adobe ou torchis dense (1600 Kg/m <sup>3</sup> )	1600	0.650
Bois léger brut, séché à l'air (sapin, épicéa)	540	0.140
Bois léger, raboté, étuvé (sapin, épicéa)	500	0.140
Bois lourd (hêtre, chêne)	800	0.200

### 3. Conclusion

La terre crue se révèle en effet imbattable dans un domaine difficile et d'une urgente actualité : la construction respectueuse de l'environnement.

La Brique crue offre des avantages multiples, comme son nom l'indique cette brique est faite de terre crue et n'a pas besoin de cuisson comme les briques traditionnelles en terre cuite qui dégagent énormément de gaz carbonique donc l'impact environnemental est largement respecté. La brique de terre crue utilisée en construction est composée de terre non-végétale,

d'un mélange variable d'argile, de limon, de sable et parfois même de gravier à laquelle peuvent être ajoutés des liants.

Il existe différents types de briques en terre crue tel que : le pisé, le torchis, la bauge, l'adobe et les briques de terre crue compressée.

L'argile représente la matière première de la construction en terre crue, C'est un matériau recyclable, possède de réelles qualités environnementales, peu énergivore, une ressource naturelle illimitée et surtout ne produit pas de déchets.

Du point de vue structural, les argiles sont des phyllosilicates hydratés qui sont formés à partir d'un empilement de plusieurs structures feuilletées et d'espaces interfoliaires.

Il existe un grand nombre de type d'argiles, mais les minéraux argileux les plus courants sont : La kaolinite, l'illite, la montmorillonite dite smectite.

L'utilisation de déchets dans l'industrie du bâtiment est devenue un élément indispensable à la solution des problèmes économiques et environnementaux, incorporer un déchet dans la fabrication des briques est non seulement économique mais aussi écologique. Le bois est un matériau renouvelable, naturel, largement disponible et surtout très léger.

En plus d'être un bon isolant thermique, le bois est également un excellent absorbeur de bruit. La conductivité thermique du bois est faible par rapport à celle de l'argile, le fait de l'ajouter dans l'argile pourrait diminuer la conductivité thermique du matériau brique en terre.

Notre travail portera donc sur l'étude de l'incorporation de déchets industriels dont les copeaux de bois dans la fabrication des briques de terre crue dans le but d'alléger cette dernière et améliorer sa conductivité thermique tout en conservant de bonnes caractéristiques mécaniques.



## Chapitre II : Matériaux et Méthodes Expérimentales

### 1. Introduction

La détermination des caractéristiques d'un sol nécessite la réalisation d'essais, ces derniers en des normes à respecter qui définissent comment doivent être conduits les opérations de qualification d'un échantillon. Ce processus nous permettra de classer le sol par rapport aux propriétés physiques et chimiques.

Ce chapitre présente les caractéristiques de la matière première issue des essais fait durant cette étude. La première partie consiste à présenter le matériau, il s'agit de la terre utilisée pour confectionner les briques. La deuxième partie présente les essais réalisés sur les différents échantillons du même sol et leur norme, ainsi le matériel utilisé pour la fabrication des BTC. La dernière partie présente le processus et les manipulations faites pour la confection des briques en terre crue.

### 2. Matériaux étudiés :

#### 2.1. Terre crue :

Pour notre étude on a utilisé et analysé séparément deux argiles de deux endroits différents (Figure 2.1), le but est de prendre celle qui a la meilleure caractéristique pour une résistance optimale.

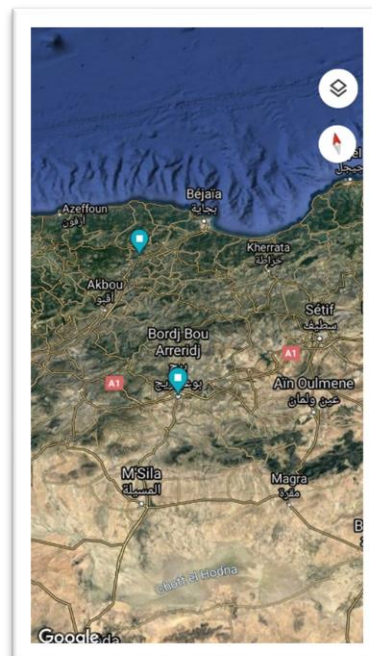


Figure 2. 1 : Lieux d'extraction des sols sur la carte algérienne

Le choix de sélection sur ces deux argiles est justifié par une configuration minéralogique différente, un stock suffisamment abondant, et des terres en décompositions



différentes de par leur argilosité et leur granulométrie qui peut jouer un rôle important dans les propriétés des briques.

### 2.1.1. Argile Bejaia (AB) :

- **Origine du sol :**

Cette terre est récupérée sur le terrain par nous-même, ce sol de couleur beige (Figure 2.2) appartient à un gisement qui se situe sur la hauteur de RMILA Commune de SIDI-AICH wilaya de Bejaïa, cette argile est nommée (AB).



Figure 2. 2 : Aspect visuel du sol 1

### 2.1.2. Argile Bordj Bou Arreridj :

- **Origine du sol :**

Cette argile appartient à la région de Oued lahmer Medjanna Bordj Bou Arreridj (Algérie). [40] L'argile de Bordj Bou Arreridj est une argile rouge (Figure 2.3) sa couleur est due à sa richesse en oxyde de fer, cette argile est nommée (AR)



Figure 2. 3 : Aspect visuel du sol de Bordj Bou Arreridj

- **Collecte de l'échantillon :**

L'échantillon est récupéré et dégagé proprement dans une zone bien localisée sans extraire ou ajouter quoi que ce soit de son état naturel. Propre sans matière organique telle que des racines vivantes, des graines, etc.

Afin de pouvoir mener l'ensemble des essais prescrit pour caractériser une terre à utiliser comme matériau de construction, on extraira des échantillons d'environ 20 kg.

## **2.2.Copeaux de bois :**

Les copeaux de bois ne fait pas l'objet d'une sélection particulière, il est utilisé tel qu'il est produit dans les menuiseries (Figure 2.4). Cependant avant son utilisation, il est nettoyé et débarrassé de tous les morceaux de bois massifs ainsi que de toutes les impuretés qu'il contient.



Figure 2. 4 : copeaux de bois utilisé

## **3. Procédures expérimentales**

### **3.1.Caractérisation géotechnique**

#### **3.1.1. Teneur en eau [41]**

- **Principe de l'essai :**

La perte d'eau d'un échantillon de matériau est provoquée par étuvage, les masses de l'échantillon et de l'eau évaporée sont mesurées par pesage.

- **Mode opératoire :**

La masse  $m_1$  d'une tare numérotée est préalablement mesurée. Un échantillon est pris et pesé (Figure 2.5).



Figure 2. 5 : Dispositif de pesé

Sa masse initiale est dite  $m_2$  (échantillon humide + tare), l'ensemble est placé dans une étuve à  $105^\circ\text{C}$  pendant 24h. Deux pesées séparées par un intervalle de temps est effectué.

On détermine donc la masse de l'échantillon sec dite  $m_3$  (échantillon + tare). La teneur en eau  $W$  en pourcentage est donnée par la formule suivante :

$$\omega = \frac{m_\omega}{m_d} \times 100$$

Avec :

$$m_d = m_3 - m_1 \quad \text{en (g)}$$

$$m_\omega = m_2 - m_3 \quad \text{en (g)}$$

### 3.1.2. Analyse granulométrique

#### ❖ Méthode par tamisage à sec après lavage [42]

- **Principe de l'essai :**

L'essai consiste à séparer les grains agglomérés d'un échantillon d'une masse connue de matériaux par brassage sous l'eau, à fractionner ce sol, une fois séché, au moyen d'une série de tamis et à peser successivement le refus cumulé sur chaque tamis.

- **Mode opératoire :**

Le sol contient une grande variété en fine qui s'agglomère pour constituer des grains. Un échantillon du sol est lavé jusqu'à ce qu'il ne reste que des éléments propres. Après avoir séché ce dernier dans l'étuve, il est passé sur une colonne de tamis d'ouvertures de mailles décroissantes du haut vers le bas (Figure 2.6).



Figure 2. 6 : Dispositif de tamisage par voie humide

Le refus des tamis est pesé pour le remplissage du tableau de l'analyse granulométrique. La quantité passant par le tamis 0,08 mm est récupérée et utilisée pour l'analyse granulométrique par sédimentation.

❖ **Méthode par sédimentation [43]**

• **Principe de l'essai :**

La présente norme a pour objet la détermination de la distribution pondérale de la taille des particules fines d'un sol.

Elle définit les termes employés et les paramètres mesurés spécifiques les caractéristiques de l'appareillage, fixe le mode opératoire à respecter et précise des résultats à présenter.

• **Mode opératoire :**

La partie tamisage est complétée par cet essai, la boue recueillie dans l'essai précédant est mise dans l'étuve. Une poudre sèche de  $80\text{g} \pm 10\text{g}$  est ajoutée à une solution de défloculante d'hexamétaphosphate de sodium ( $\text{Na}_6(\text{PO}_3)_6 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ).

Après avoir mélangé le tout, une série de mesures de densité et de température est effectuée à un intervalle de temps prédéfini (Figure 2.7).



Figure 2. 7 : Dispositif d'analyse granulométrique par sédimentation

Les courbes granulométriques des sols sont tracées à partir des résultats de ces deux essais.

### 3.1.3. Valeur au bleu de méthylène des sols [44]

- **Principe de l'essai :**

Cet essai a pour but de déterminer la propreté d'un sol en déterminant la capacité des éléments fins à capter l'eau par mesure de l'adsorption de bleu de méthylène à l'aide d'un agitateur.

- **Mode opératoire :**

Une masse comprise entre 30 à 60 gr est versée dans 500 ml d'eau déminéralisée et agitée à une vitesse de 700 tr/min de sorte à disperser entièrement l'argile. Introduire 5 à 10 cm<sup>3</sup> de solution de bleu de méthylène de concentration 10g/l avec une vitesse constante de 400 tr/min. Après 1 minute on dépose une goutte sur le papier filtre à l'aide d'une baguette en verre, la goutte forme un dépôt central compris entre 8 à 12 mm de diamètre. Le teste est positif quand une l'auréole bleu clair apparait autour de la goutte (Figure 2.8).



Figure 2. 8 : Détermination de la valeur au bleu de méthylène du sol

Le volume de bleu de méthylène du sol ( $V_{BS}$ ) est obtenu par les relations suivant :

Masse de bleu introduit B (g) :

$$B = V \times 0.01$$

Pour notre cas, notre sol ( $D_{max} < 5\text{mm}$ ) :

$$V_{BS} = \frac{B}{\frac{m_h}{1+W}} \times 100$$

Avec :  $m_h$  (g) : la masse de sol utilisé pour l'essai et  $w$  sa teneur en eau.

Le seuil du volume de bleu de méthylène est représenté dans le (Tableau 2.1) suivant :

Tableau 2. 1 : Seuils de VBS correspondants à différents types de sols [45]

Seuil de VBS (g/100g)	Type de sol
< 0,1	Sol insensible à l'eau (notamment si passant 80 $\mu\text{m}$ < 12%)
0,1-0,2	Début de la sensibilité à l'eau
0,2-1,5	Limite des sols sablo-limoneux
1,5-2,5	Sol limoneux peu plastiques
2,5-6	Sol limoneux de plasticité moyenne
6-8	Sol argileux
> 8	Sol très argileux

### 3.1.4. Détermination des limites d'Atterberg [46]

- **Principe de l'essai :**

Cette norme est destinée à la détermination des deux limites d'Atterberg qui sont la limite de liquidité et de plasticité, elle s'applique au sol dans les éléments passant à travers le tamis de dimension nominale d'ouverture de 400  $\mu\text{m}$ . Les limites d'Atterberg sont des paramètres géotechniques destinés à identifier un sol et à caractériser son état au moyen de son indice de consistance.

- **Mode opératoire :**

Une fraction masse de 200g est récupérée par voie humide au tamis de 400  $\mu\text{m}$  Après avoir imbibé le sol pendant 24h.

Atterberg a défini l'indice de plasticité ( $I_p$ ) comme la gamme des teneurs en eau pour lesquelles le sol a un comportement plastique ; cet indice donne une indication sur l'étendue du domaine plastique.

$$I = \omega_L - \omega_P$$

- ✓ **Détermination la limite de liquidité :**

Une masse de cette fraction est humidifiée puis malaxée pour avoir une pâte (Figure 2.9), puis étalée dans une coupelle de Casagrande.



Figure 2. 9 : Dispositif de détermination de la limite de liquidité

Le tout est monté sur la machine à choc et subit une série de chocs de tendance de 2 coups/seconde et le nombre de coups nécessaire pour la fermeture est noté. On effectue un prélèvement de la pâte en vue d'une mesure de teneur en eau (Figure 2.10).





Figure 2. 10 : Appareil de Casagrande

La pâte est mélangée puis étalée puis légèrement séchée. L'opération est reproduite de sorte à obtenir une série de quatre à cinq points compris entre 15 et 35 coups.

✓ **Déterminer la limite de plasticité :**

A partir de la pâte précédemment utilisée, une boulette est formée puis roulée sur une plaque pour avoir un rouleau de diamètre 3 mm et une longueur d'environ 10 cm (Figure 2.11). La limite de plasticité est obtenue lorsque, simultanément, les fissures apparaissent sur le rouleau dont le diamètre atteint  $3\text{mm} \pm 0,5\text{mm}$  et en le soulevant légèrement.



Figure 2. 11 : Dispositif de détermination de la limite de plasticité

Une fois fissuré un prélèvement est effectué puis pesé et mit dans l'étuve.

### 3.1.5. Détermination de la masse volumique

✓ **Masse volumique apparente [47]**

• **Principe de l'essai :**

La masse sèche des granulats remplissant un conteneur spécifié est déterminée par pesage et la masse volumique en vrac correspondante est calculée. Le pourcentage de porosité intergranulaire se calcule à partir de la masse volumique en vrac et de la masse volumique réelle.

- **Mode opératoire :**

Après séchage des granulats dans l'étuve à 105°C, on pèse le conteneur vide puis remplit. Le remplissage se fait de façon à éviter la ségrégation, niveler la surface avec une règle en faisant attention à ne pas compacter les granulats à la surface (Figure 2.12).



Figure 2.12 : Dispositif de détermination de la masse volumique en vrac

La masse volumique en vrac  $\rho_b$  (g) est déterminée par l'équation suivante :

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V}$$

Avec :

$m_1$  : Masse du conteneur vide en (g).

$m_2$  : Masse du conteneur rempli en (g).

V : capacité du conteneur en (ml).

- ✓ **Masse volumique real :**

- **Mode opératoire :**

L'échantillon doit être sélectionné de façon que sa masse soit comprise entre 0,1 et 0,5 kg et pesé puis paraffiné, ensuite repesé aussi tôt refroidie (Figure 2.13).

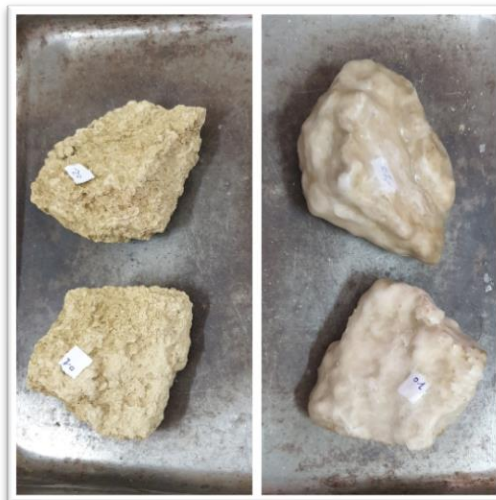


Figure 2.13 : échantillon paraffiné

Une fois fait, l'échantillon est placé dans le panier suspendu à l'étrier de la balance puis émergé dans l'eau pour être pesé avec la balance hydrostatique (Figure 2.14).



Figure 2. 14 : balance hydrostatique

Pendant l'essai, la température de la salle ne doit pas varier de plus de 3°C.

### 3.2.Fabrication des éprouvettes

#### 3.2.1. Préparation des copeaux de bois :

Après avoir nettoyé les copeaux de bois, un tamisage mécanique d'une masse de 1800 g est effectué à l'aide d'une tamiseuse à vibration qui a pour but de classer les différents morceaux constituant l'échantillon par rapport à leur dimension en utilisant une série de tamis (Figure 2.15). Chaque refus de tamis est ensuite pesé puis stocké apart pour la confection des briques allégées.



Figure 2. 15 : Dispositif de classification des copeaux de bois

Le (tableau 2.1) suivant présente le résultat du tamisage mécanique :

Tableau 2. 1 : résultat du tamisage des copeaux de bois.

Tamis (mm)	Masse refus cumulé (g)
5	270
2,5	782.15
1,25	345.78
0,63	211.26
0,315	92.22
0,16	72
0,08	30.54
Fond tamis	0

On choisit trois différents diamètres comme ajout nommés :

$D_1 = 0.63$  mm

$D_2 = 1.25$  mm

$D_3 = 2.5$  mm

### 3.2.2. Confection des éprouvettes :

Deux types d'éprouvette ont été confectionnés par compression :

- Des éprouvettes de forme rectangulaire de dimensions (16x4x4) pour les essais de compression et de traction.
- Des éprouvettes de forme rectangulaire de dimensions (8x5x1) pour l'essai de conductivité thermique.

#### ✓ Malaxage à sec du mélange :

D'abord nous allons préparer l'échantillon sans ajout qui est à base d'argile et d'eau seulement. Le sol choisi est séché pendant 24 heures puis broyé à l'aide d'un broyeur, par la suite la poudre obtenue est tamisée dans un tamis de 0.125 mm comme le montre la (Figure 2.16) ci-dessous, ajoutant à cette fine poudre de l'eau, puis mélangé manuellement pendant quatre minute pour une homogénéité parfaite et une meilleure répartition de l'humidité dans le sol.

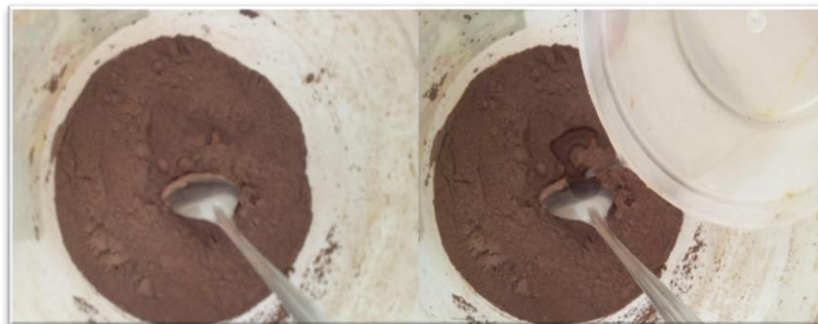


Figure 2. 16 : Malaxage de l'argile avec l'eau

En suite nous allons procéder à la préparation d'un échantillon à base d'argile, d'eau et de copeaux de bois, on commence par ajouter les copeaux de bois à l'argile qui a été séchée et

broyée, puis on mélange manuellement ces deux composantes jusqu'à leur homogénéisation voir la (Figure 2.17) ci-dessous, enfin on ajoute petit à petit l'eau jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène.



Figure 2. 17 : Malaxage manuel des différents composants

✓ **Mise en forme :**

Les éprouvettes sont fabriquées par compression sur une presse hydraulique de capacité de 2000kn en utilisant un moule en métal de dimension intérieur de (16x4x4) cm. Le moule est conçu spécialement avec une rigidité suffisante, sans tassement ni déformation nuisible

La quantité de mélange adéquate est introduite dans le moule en suivant un procédé précis qui consiste à compacter la terre progressivement au fur et à mesure qu'on ajoute de la matière comme le montre la (Figure 2.18). Puis on referme tout avec une pièce métallique. On presse avec une force prédéfinie, ensuite on procède au démoulage à l'aide d'un piston.



Figure 2. 18 : Moulage des éprouvettes

✓ **Pressage :**

Après avoir versé le mélange dans le moule métallique on compresse sous différentes pressions à l'aide d'une presse hydraulique de capacité 2000 KN voir la (Figure 2.19). La pression exercée sur les échantillons lors du moulage favorise le tassement des particules d'argile les unes sur les autres, minimisant ainsi les interstices entre les grains.





Figure 2. 19 : Pressage des éprouvettes

L'éprouvette issue doit être vérifiée vis-à-vis de son homogénéité de la couleur, ainsi absence de quelconque fissure ou défaut de mise en œuvre. La (Figure 2.20) représente quelques éprouvettes juste après le pressage.



Figure 2. 20 : Eprouvettes sans après démoulage

Des éprouvettes avec l'ajout de copeaux de bois sont fabriquées en suivant les mêmes étapes précédentes. La (Figure 2.21) représente quelques exemples :





Figure 2. 21: Eprouvette avec ajout après démoulage

### ✓ Séchage :

D'abord on procède au séchage à l'air libre des briques pendant 24h, ensuite ces briques sont mises dans une étuve à 105°C pendant 24h comme le montre la (Figure 2.22)



Figure 2. 22 : Séchage dans une étuve à 50°C

## 3.3.Caractérisation chimique et minéralogique

### 3.3.1. La conductivité thermique :

- **Principe :**

La conductivité thermique ( $\lambda$ ) des briques a été déterminée à partir de la norme NF EN 12664 (2001), qui est relative à la performance thermique des matériaux et des produits pour le bâtiment. Elle traduit la capacité d'un matériau à assurer un transfert de chaleur par conduction lorsqu'il est soumis à une différence de température. La méthode utilisée consiste à mesurer simultanément le flux thermique et la température sur les deux faces d'un échantillon soumis à un gradient de température imposé par deux plaques échangeuses.

- **Mode opératoire :**

Le mode opératoire de la fabrication des briques pour le test de la conductivité thermique est le même que celui de la fabrication des briques précédentes. Un moule plus petit de dimension (8x5x1) cm conçu spécialement pour cet essai est utilisé, donc les portions du mélange ainsi les force de compactage sont modifiés pour s'adapter à ce dernier. Les faces des briques issus sont lissées pour un contact sonde-échantillon maximal.

L'évaluation de la conductivité thermique a été réalisée à une température ambiante à l'aide d'un CT mètre (Figure 2.23). Ce dernier est équipé d'une sonde mise soigneusement entre deux briques, cette paire d'échantillon est soumise à un flux thermique délivré sous forme d'effet Joule par le CT mètre. L'évolution de température mesurée au cours du temps par un thermocouple permet de déterminer la conductivité thermique du matériau. Un écran est présent aussi pour afficher les résultats mesurés.



Figure 2. 23 : CT mètre

La (Figure 2.24) montre le moule et quelques briques confectionnées pour le test de la conductivité thermique.



Figure 2. 24 : Moule et brique utilisé pour le teste de conductivité thermique

### 3.3.2. Analyse minéralogique :

#### ✓ Méthode par diffraction aux rayons X (DRX) :

La diffraction des rayons X (DRX) est une analyse minéralogique indiquant la nature des phases cristallines et amorphes présentes dans les échantillons.

##### • Principe de l'essai :

L'analyse permet d'avoir la composition minéralogique d'un assemblage argileux ou toute autre matière finement broyée.

Cette analyse consiste à appliquer un rayonnement sur un échantillon, ce rayonnement est renvoyé dans des directions spécifiques déterminées par la Loi de Bragg, qui dépend de la longueur d'onde des rayons X et de la distance entre des plans d'atomes ordonnés sur le réseau cristallin. Après la pénétration du cristal par le rayonnement il y'aura absorption d'une partie d'énergie et d'excitation des atomes avec émission des radiations dans toutes les directions.

Les radiations émises par des plans atomiques qui sont en phase vont engendrer un faisceau qui pourra être détecté.

La condition pour que les radiations soient en phase s'exprime par la loi de Bragg :

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

- n : nombre de diffractions.
- $\lambda$  : longueur d'ondes des rayons X.
- d : épaisseur de la couche (espace basal en Å).
- $\theta$ : montée de la déviation, angle de diffraction.

##### • Procédure :

Procédure Pour réaliser l'essai, on doit préalablement préparer les échantillons préalablement séchés, broyés et tamisés. Le matériau sous forme de poudre est introduit dans un petit réceptacle PVC prévu à cet effet. On compresse la poudre sans tourner pour éviter une orientation préférentielle, on enfonce une bague sur la pastille PVC et on préserve la surface de poudre qui sera utilisée pour l'analyse (MOORE et REYNOLDS, 1989).

Ensuite, la pastille est introduite dans la machine où la poudre va recevoir un faisceau de rayons X monochromatique. Le rayon provient d'une anode métallique et est orienté selon un angle  $\theta$ . Les cristaux contenus dans l'échantillon engendrent des diffractions en fonction des distances inter planaires propres à chaque minéral. En faisant varier les angles de  $2$  à  $70^\circ 2\theta$  pendant 20 minutes, on obtient un diffractogramme, où le phénomène de diffraction est traduit en pics d'intensité variable en fonction des angles [48].

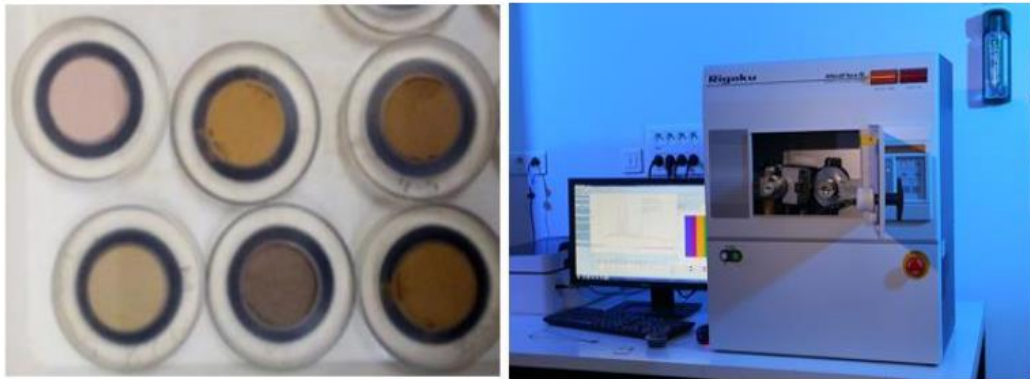


Figure 2. 25 : Image d'un DRX (Diffractomètre à Rayon X) (à droite), échantillons de poudres (à gauche) [30]

### ✓ Spectrofluorescence X :

La fluorescence X ou XRF, est une technique analytique utilisée depuis de nombreuses années pour déterminer la composition élémentaire d'une grande variété de matériaux.

Les majeurs s'expriment en oxydes et dénote de la présence de certains éléments du tableau périodique plus lourds que le fluor ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  et  $\text{P}_2\text{O}_5$ ).

#### • Procédure :

L'échantillon à analyser est placé sous un faisceau de rayon X. Sous l'effet de ces rayons X, les atomes constituant l'échantillon passent de leur état fondamental à un état excité. L'état excité est instable, les atomes tendent alors de revenir à l'état fondamental en libérant de l'énergie sous forme de photons X. Chaque atome ayant une configuration électronique propre, va émettre des photons d'énergie et de longueur d'onde propre. C'est le phénomène de fluorescence X qui est une émission secondaire de rayon X, caractéristiques des atomes qui constituent l'échantillon. L'analyse de ce rayonnement X secondaire permet à la fois de connaître la nature des éléments chimiques présents dans un échantillon ainsi que leur concentration.

## 3.4.Présentation des essais mécaniques :

### 3.4.1. Machine d'essais :

Les essais ont été réalisés sur une machine de marque IBERTEST dont la capacité est de 200 KN, pilotée avec une vitesse de 10 mm/min soit 0,1 KN/S. La machine est commandée par ordinateur muni d'un logiciel de commande et de traitement des résultats ce qui nous permettra une bonne acquisition de données c'est-à-dire les diagrammes (force/déplacement et force/temps) avec une bonne précision (Figure 2.26).



Figure 2. 26 : Machine d'essais IBERTEST

### 3.4.2. Essais de compression et de flexion :

Les tests de compression et de flexion 3 point sont effectués sur la machine IBERTEST, la machine est réglée à une vitesse de chargement de 0,1 KN/S.

Après séchage, un lot d'éprouvettes est soumis aux deux essais afin de déterminer leur résistance.

Pour l'essai de flexion 3 point les éprouvettes (16x4x4) sont centrées et posées horizontalement sur un dispositif de flexion avec deux appuis (Figure 2.27), la distance entre le point d'application de la charge et les appuis est de 7cm.



Figure 2. 27 : essai de traction

Pour l'essai de compression, Les deux morceaux obtenus après le test à la flexion de dimension (8x4x4) sont posés au milieu du dispositif de compression de la machine (Figure 2.28).

Les résultats de ces essais sont récupérés sur l'ordinateur de pilotage de la machine.





Figure 2. 28 : essai d'écrasement

## 4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents matériaux utilisés dans cette étude avec leurs caractéristiques et la formulation des différents mélanges. Nous avons extrait les deux échantillons de deux endroits : (AB) et (AR) avec les mêmes conditions de prélèvement et traitement pour pouvoir effectuer une comparaison entre eux.

Les méthodes d'analyse et de caractérisation des matières premières réalisées nécessitent une manipulation très délicate pour obtenir des résultats satisfaisants.

Nous avons varié certains paramètres lors de la confection des briques : la teneur en eau l'ajout des copeaux de bois ainsi que le l'énergie de compactage des briques formées.

Tous les résultats obtenus seront présentés dans le chapitre suivant et seront discutés pour mettre en évidence l'intérêt de notre recherche.



## Chapitre III : Résultats et discussions

### 1. Introduction :

La première partie de cette recherche a mis en évidence les qualités de la construction en terre crue, ainsi que les avantages de l'incorporation des déchets dans la fabrication des briques.

Un nouvel enjeu est de trouver des moyens pour une valorisation durable des sous-produits du bois, plus précisément celle des sciures de bois dans la construction qui peut représenter une solution durable.

Le but de cette étude est de développer un nouveau matériau qui est à base d'argile, et de sciure de bois, ce produit est obtenu en mélangeant l'argile et le déchet de bois tout en ajoutant de l'eau.

De ce fait il est nécessaire de connaître les caractéristiques chimiques des matériaux utilisés afin de comparer le comportement mécanique d'une brique de terre crue allégée par les sciures de bois et une brique de terre crue naturel à base d'argile et d'eau uniquement.

### 2. Caractérisation géotechnique des sols :

#### 2.1.Limites d'Atterberg :

Le (tableau 3.1) présente les résultats des limites d'Atterberg, l'indice de plasticité et l'indice de consistance des deux argiles testées.

L'indice de plasticité (IP) correspond à l'écart entre la limite de liquidité (WL) et la limite de plasticité (WP).

$$IP = WL - WP$$

Tableau 3. 1 : Estimation de la plasticité d'un sol [30]

Ip	Degré de plasticité
0-5	Non plastique
5-15	Peu plastique
15-40	Plastique
> 40	Très plastique

#### Les limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg [49] rendent compte du degré de plasticité d'un sol et de son argilosité. Les résultats des essais sont présentés dans le (Tableau 3.2) ci-dessous :

Tableau 3. 2 : Limites d'Atterberg des deux argiles testées

Limite d'Atterberg			
	Limite de liquidité (Wl) %	Limite de plasticité (Wp) %	Indice de plasticité (Ip) %
Sol AB	33,46	22,18	11,28
Sol AR	34,27	23,37	10,9

D'après les résultats obtenus, (AB) a une valeur d'indice de plasticité de 11.28 par contre celle de (AR) est de 10.9 ceci permet de les classer parmi les sols peu plastiques. (Tableau 10). Par ailleurs, la limite de plasticité obtenue  $W_p = 22.18$  pour (AB) et  $W_p = 23.37$  pour l'argile de (AR) donne une valeur approximative sur la quantité d'eau nécessaire lors de façonnage des briques.

La figure ci-dessous (Figure 3.1) présente le diagramme de plasticité et classification des sols.

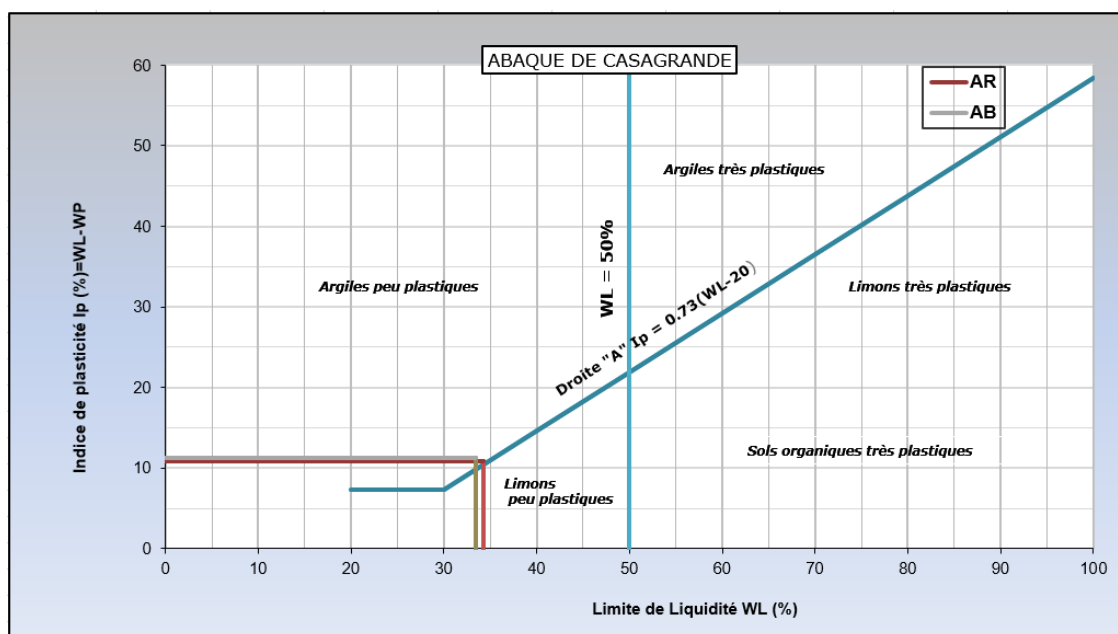


Figure 3. 1 : Classification des sols AB et AR sur le diagramme de Casagrande des sols fins

Ce diagramme permet une classification des types de sols, en se basant sur les critères liés à la plasticité des sols : l'indice de plasticité  $I_p$  et la limite de liquidité  $w_L$  [50].

Le diagramme de plasticité des sols fins est divisé en section par une droite A d'équation  $I_p = 0.73(WL - 20)$  et d'une ligne verticale de façon que  $WL = 50\%$ , chaque section correspond à un groupe de sols aux propriétés mécaniques bien définies. La plasticité augmente avec la limite de liquidité. La figure ci-dessus (3.1) montre la classification de nos deux échantillons, ainsi que les différentes sections présentées dans le diagramme de plasticité.

Au-dessus de la droite A, les sections sont celles des argiles de faible et forte plasticité, les sections au-dessous de la droite A représentent celles des sols organiques et des limons de forte plasticité ainsi que des limons de faible plasticité.

Cette classification montre que les échantillons AB et AR sont considérés comme des argiles peu plastique.

## 2.2. La valeur au bleu de méthylène :

Le (Tableau 3.3) ci-dessous donne les valeurs au bleu de méthylène (VBS) [44] des deux sols testés.

Tableau 3. 3 : Valeurs au bleu des deux sols testés

	<b>Sol (AR)</b>	<b>Sol (AB)</b>
VBS (g/100g)	2.747	3.162

Le (Tableau 3.4) ci-dessous donne les volumes du bleu méthylène introduit dans les deux échantillons :

Tableau 3. 4 : Volume du bleu méthylène introduit dans les deux échantillons testés

	<b>Echantillon AR</b>	<b>Echantillon AB</b>
Volume du bleu de méthylène (cm <sup>3</sup> )	<b>110</b>	<b>90</b>

La valeur au bleu de méthylène du sol quantifie la capacité d'absorption des argiles présentes dans le sol. Le (Tableau 3.4) montre que les deux sols dont les VBS sont comprises entre 2,5 et 6 sont des sols de plasticité moyenne [51]. Le sol (AR) est plus proche de la catégorie des sols dit argileux.

Vu les résultats obtenus par le bleu de méthylène dans le (tableau 3.8), on remarque que le sol (AR) a consommé plus de volume de bleu de méthylène que le sol (AB), on peut conclure que L'argile (AR) contient plus d'éléments réactifs.

### 2.3. Les courbes granulométriques

La (Figure 3.2) présente les courbes granulométriques complètes des sols AR et AB obtenues par tamisage par voie humide et par sédimentation [43].

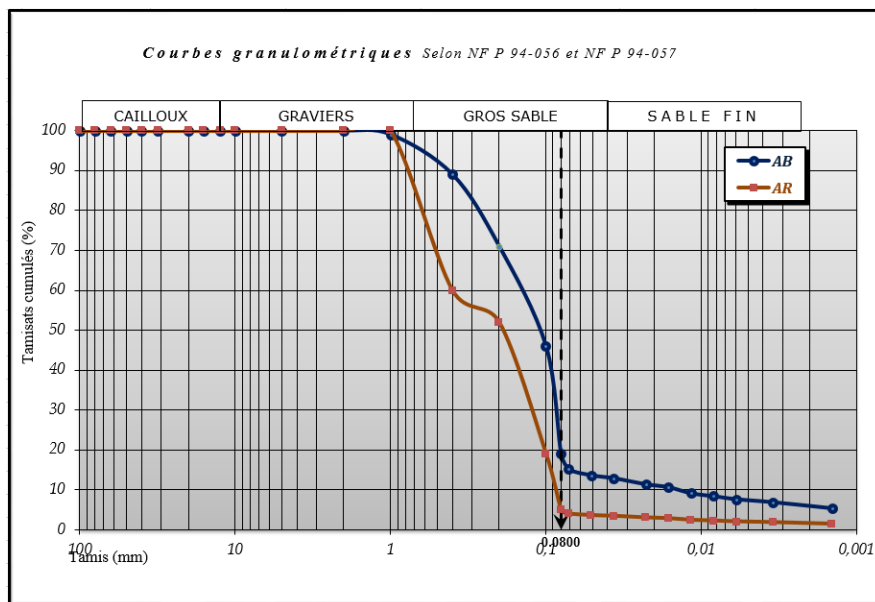


Figure 3. 2 : Courbes granulométrique des deux argiles AB et AR

Les courbes granulométriques montrent que les deux échantillons sont principalement des sols fins. Ils contiennent une quantité assez importante de particules fines (particules passant au travers du tamis de 0,08 mm), à peu près 80% de la masse totale. Suivant la répartition des fractions granulaires [51] (figure 3.2), les résultats obtenus indiquent que l'échantillon de AR est constitué principalement d'une fraction argileuse.

Le (Tableau 3.5) présente les différentes classes granulaires des deux sols étudiés.

Tableau 3. 5 : Classes granulaires des deux argiles AB et AR

	Sable fin < 60 $\mu\text{m}$ (%)	Gros sable 60-400 $\mu\text{m}$ (%)	Graviers > 400 $\mu\text{m}$ (%)
Sol AB	14	45	89
Sol AR	3.8	28,5	60

Les résultats présentés sur la (figure 3.2) et dans le (Tableau 3.5) nous montrent que le sol AB est plus fin que le sol AR. Pour ces deux sols, les quantités de particules inférieures à 60  $\mu\text{m}$  (argile) sont respectivement égales à 14% et 3.8% pour le sol AB et le sol AR. De plus, la taille maximale des grains étant de 1 mm pour les deux sols, il y a donc des particules qui appartiennent à la classe des graviers. Globalement, ces deux sols sont très fins et leur granularité est traditionnelle comparée à celle de la littérature sur les briques de terre.

Les courbes granulométriques montrent que les deux échantillons sont principalement des sols fins. Ils contiennent une quantité assez importante de particules fines (particules passant au travers du tamis de 0,08 mm), à peu près 80% de la masse totale. Suivant la répartition des fractions granulaires [52] (Figure 3.3), les résultats obtenus indiquent que les deux échantillons AB et AR sont assez similaires.

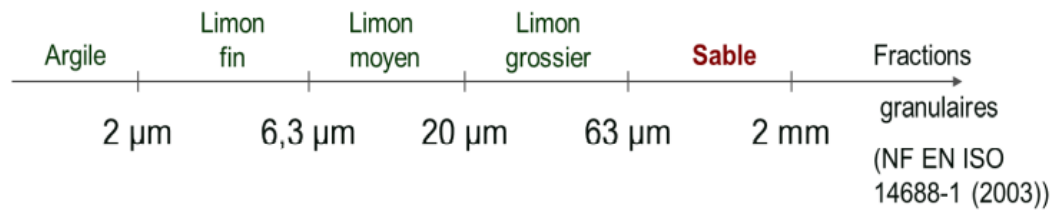


Figure 3. 3 : La répartition des fractions granulaires [52]

### 3. Caractérisation chimique et minéralogique des sols :

Les argiles peuvent être calcaires ou non calcaires, on peut distinguer visuellement ces deux argiles par leur couleur, les argiles calcaires sont plus claires comparant aux argiles non calcaires, elle peut aussi être distingué selon la composition chimique, le carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  (calcaire), la chaux  $\text{CaO}$ .

Le calcaire est une pierre naturelle qui comporte des niveaux élevés de carbonates de calcium et ou magnésium. Le terme chaux désigne le produit dérivé du calcaire notamment la chaux vive [53].

Le (Tableau 3.6) ci-dessous présente la teneur en  $\text{CaCO}_3$  de quelque sol [53] :

Tableau 3. 6 : Teneur en  $\text{CaCO}_3$  de quelque sol

$\text{CaCO}_3$	Dénomination
0-10	Argile ou Limon
10-30	Argile calcaire
30-70	Marne
70-90	Calcaire marneux
90-100	Calcaire

### 3.1.Méthode de la spectrométrie de fluorescence X :

La composition chimique des échantillons est déterminée par la technique de la spectrométrie de fluorescence X, les (Tableaux 3.7) et (Tableau 3.8) ci-dessous présentent la composition chimique des deux sols testés.

Tableau 3. 7 : Composition chimique du sol (AR) en (%) [40] :

Elément	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	Pf	Cl
%	54.05	20.66	8.37	1.23	2.68	0.01	3.86	0.59	0.13	0.86	7.57	0.003

Tableau 3. 8 : Composition chimique (AB) en (%) [53] :

Elément	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	Pf	Cl
%	46.67	11.85	5.15	14.7	1.89	0.52	1.57	0.89	-	-	15.7	-

L'échantillon de (AR) contient une importante quantité de silice, provenant principalement des silicates d'alumine et du quartz. Il possède aussi une forte concentration en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, liée généralement aux silicates argileux et contribue à l'obtention d'une bonne plasticité [Kornmann, 2005]. Par contre, l'échantillon de Bejaia contient une quantité de silice et d'alumine moins importante. Les oxydes de calcium sont plus importants, (AB) possède un taux élevé de 14.7% de CaO contrairement au sol (AR) qui possède un taux très faible 1.23% de CaO.

Les autres éléments importants sont les oxydes de fer et de potassium : pour ces deux éléments, les proportions contenues dans le sol de (AR) est plus élevée que celles de Bejaia. Enfin, l'oxyde de magnésium est présent en quantité significative et sa teneur est plus élevée dans le sol (AR) que dans (AB). Bien qu'à des proportions inférieures à 1% dans les deux sols, le sodium est plus important dans (AB) que dans le sol de (AR). Cette présence de sodium dans des sols altérés est souvent associée à la présence d'albite ce qui sera vérifié par DRX.

La perte au feu (P.F) présente la perte de poids de l'échantillon sec, après une calcination à 900 °C. L'échantillon (AB) possède le taux le plus élevé (15.7%) par rapport à l'échantillon de (AR) (7.57%). Ceci peut être expliqué par la teneur en eau élevée de cet échantillon, ainsi que la rétention capillaire importante grâce à sa surface spécifique la plus grande.



### 3.2.Méthode de la diffraction au rayon x :

La composition minéralogique des échantillons a été déterminée par la technique de la diffraction des rayons X, qui permet d'identifier les différentes phases minérales cristallisées présentes dans l'échantillon.

Le (Tableau 3.9) présente la composition minéralogique de (AR) déterminée par analyse par diffraction aux rayons X

Tableau 3. 9 : Composition minéralogique du sol (AR) [40]

Minéraux	Teneur (%)
Quartz (SiO <sub>2</sub> )	25
Calcite (CaCO <sub>3</sub> )	02
Albite (NaAlSiO <sub>2</sub> )	05
Feldspath k(K <sub>2</sub> O <sub>6</sub> SiO <sub>2</sub> 2H <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	09
Illite (2K <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 24SiO <sub>2</sub> 2H <sub>2</sub> O)	20
Kaolinite (Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> )	19
Chlorite (Mg <sub>2</sub> Al <sub>4</sub> O <sub>18</sub> Si <sub>3</sub> )	12
Minéraux ferrugineux et autre	08

Le (Tableau 3.10) présente la composition minéralogique de (AB) déterminée par analyse par diffraction aux rayons X [28] :

Tableau 3. 10 : Composition minéralogique de (AB) [53]

Minéraux	Teneur (%)
Quartz (SiO <sub>2</sub> )	29.13
Calcite et dolomie [CaCO <sub>3</sub> ] et [MgCa(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ]	18.03
Kaolinite Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	24.64
Chlorite (Mg <sub>5</sub> Al) (Si <sub>3</sub> Al)O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>	14.62
Illite (Al,Mg,Fe) <sub>2</sub> (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub>	-
Feldspath k(K <sub>2</sub> O <sub>6</sub> SiO <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	7.12
Minéraux micacés	4.46

Le diffractogramme de l'échantillon AR montre qu'il est essentiellement composé de quartz, d'illite, de kaolinite, de chlorite et quelques traces de feldspath et d'autres minéraux. Cependant, la composition minéralogique de l'échantillon AB contient une quantité importante de  $\text{CaCO}_3$ , ce qui peut nuire à la qualité de la brique.

Vu les résultats précédant notre choix d'argile est fait sur (AR).

## 4. Caractéristique mécanique et physique des Briques de Terre

### Crue Allégées :

#### 4.1. Résistance en compression :

Les résistances à la compression des briques sont données sur la (Figure 3.4), en fonction du pourcentage d'ajout des copeaux de bois :

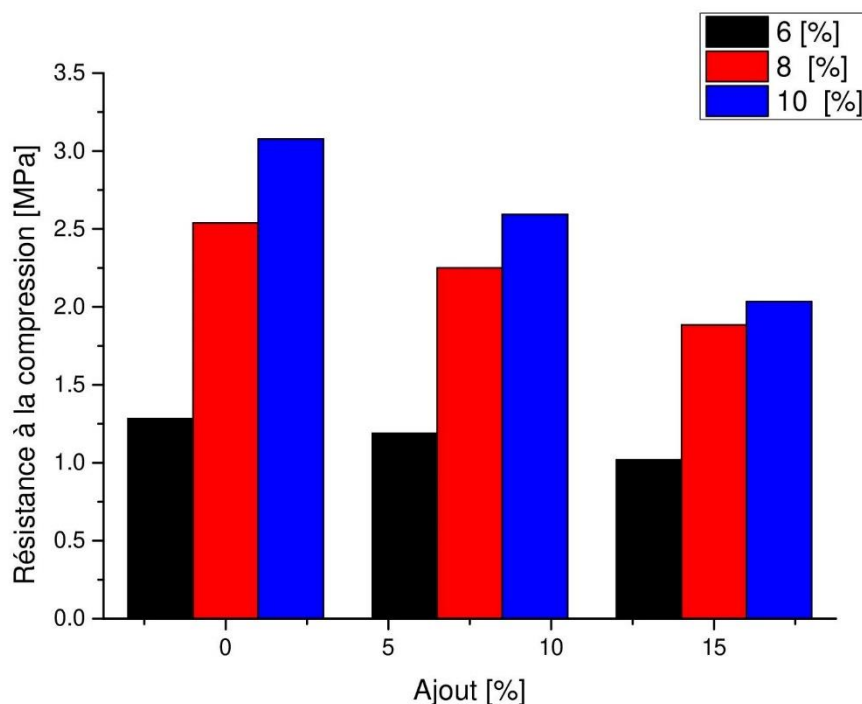


Figure 3.4 : résistance en compression en fonction de pourcentage de copeaux de bois et le pourcentage d'eau

La figure montre que les résistances des briques diminuent progressivement en augmentant dosages des copeaux. Les valeurs varient de 3,2 MPa à 2,7 MPa lorsqu'on passe de dosage en copeaux de bois de 0% à 7,5%, et à 2,2 MPa quand on passe à 15%. Les recommandations des guides de littérature pour l'utilisation des briques de terre crue suggèrent une résistance qui varie entre 1.2 et 5 MPa. Les Briques à 0%, 7.5% et 15% d'ajout satisfont largement cette exigence.

Concernant la quantité d'eau ajoutée au mélange, on remarque une croissance importante de la résistance tout en augmentant le pourcentage d'eau. On observe par exemple une augmentation d'une valeur initiale de 1,6 MPa concernant 6 % d'eau à une valeur de 2,7 MPa pour 8% d'eau, et à 3,3 MPa pour 10%.

Contrairement la force de compactage et le diamètre des copeaux de bois, les résistances à la compression ne sont pas vraiment influencées par ces deux paramètres. Donc Les résultats du diagramme s'accordent au principe de littérature sur la brique de terre crue, leur comportement est analysé comme suit : les briques de 0% et 7.5% en copeaux de bois montre une bonne performance à la résistance à la compression par rapport aux briques qui ont 15% d'ajout. Cette diminution de résistance peut être expliquée par l'influence de la texture du mélange, en conséquent la force d'adhésion entre l'argile et les copeaux de bois est moins importante.

#### 4.2. Conductivité thermique :

La variation de conductivité thermique des BTC est illustrée sur la (Figure3.5) en fonction du pourcentage d'ajout de copeaux de bois :

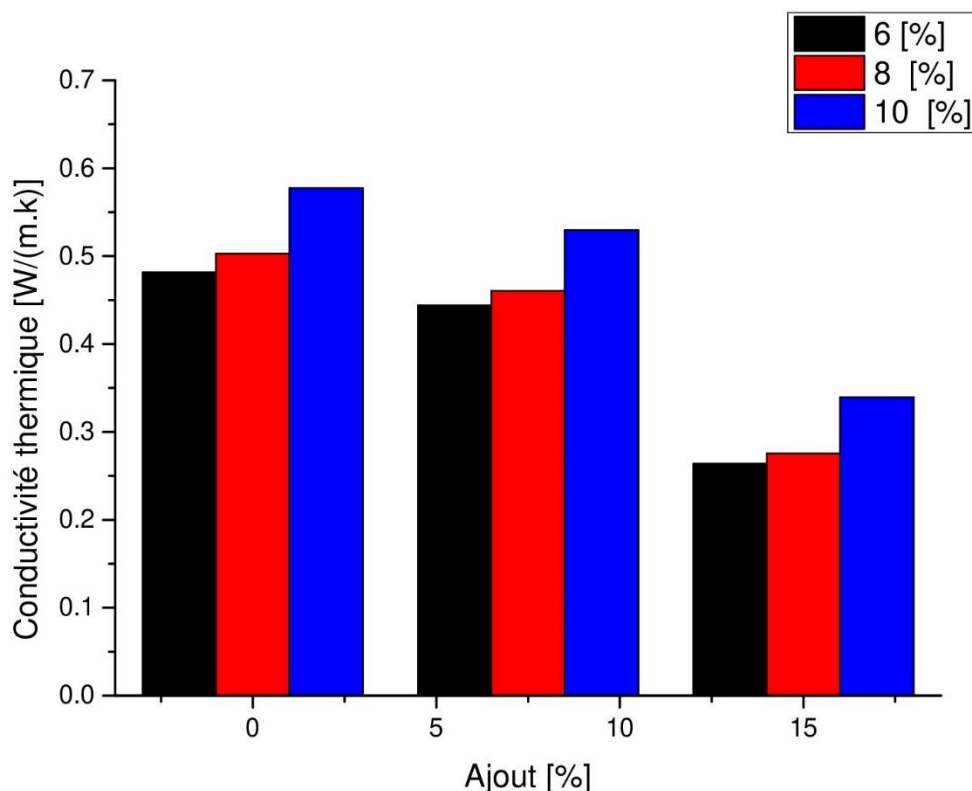


Figure 3. 5 : Conductivité thermique en fonction de pourcentage de copeaux de bois et le pourcentage d'eau

Le graphique indique une conductivité décroissante avec l'accroissement du dosage des copeaux de bois. On observe une grande diminution de conductivité thermique de 0.48 pour 0% d'ajout à 0.29 pour 15% d'ajout, par contre on voit que la conductivité thermique augmente en augmentant le pourcentage d'eau pour le même pourcentage d'eau.

Le résultat précédent peut être expliqué comme suit : le transfert de chaleur se fait principalement au niveau des points de contact entre les grains du sol, le mélange devient moins homogène avec l'ajout de copeaux, ce qui traduit la décroissance de la conductivité thermique.

Donc la densité des briques est diminuée sous l'effet de l'ajout, ce dernier crée des vides et par conséquent défavorise le transfert de chaleur, et nous donne une brique isolante.

### 4.3.Masse volumique

Le (Tableau 3.11) suivant nous donne la variation de la masse volumique en fonction du pourcentage de copeaux de bois ajouté :

Tableau 3. 11 : Masse volumique des briques en fonction du pourcentage (%) d'ajout

Pourcentage d'ajout	0%	7.5%	15%
Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	2.64	1.92	1.45

On observe une diminution très importante dans la masse volumique de la brique, d'une valeur de 2.64 (g/cm<sup>3</sup>) pour un pourcentage de 0% d'ajout à 1.45 (g/cm<sup>3</sup>) pour un pourcentage de 15%. On déduit que l'ajout de copeaux de bois est un gain économique en construction.

## 5. Conclusion :

Dans ce chapitre, les résultats des caractérisations chimiques, minéralogiques et géotechniques des deux échantillons ont été présentés. La caractérisation géotechnique des sols AB et AR a montré qu'ils sont tous deux des sols fins peu plastiques mais le sol AR est plus réactif. Ceci est confirmé par les analyses chimiques et minéralogiques qui montrent que le sol AR contient des minéraux argileux de types illite et kaolinite contre de l'illite, Calcite et de la kaolinite pour le sol AB. Il existe d'importantes différences dans la nature des minéraux argileux et c'est la raison du choix du sol de (AR) pour cette étude.

Cette caractérisation approfondie des terres utilisées dans notre recherche a donc confirmé leurs différences minéralogiques qui avaient justifié au départ le choix de l'argile AR. Ainsi, l'étude de ces deux sols, pour des raisons différentes, semble pertinente.

Pour les caractéristiques mécaniques et physiques de la brique, l'addition d'une quantité croissante d'eau et de sciures tend à modifier sensiblement les propriétés physiques et mécaniques des échantillons. La présence de copeaux de bois augmente la masse volumique et donne un matériau plus léger, en revanche réduit la résistance de la brique.

La conductivité thermique varie fortement en fonction de l'état physique du matériau et de l'interaction entre les grains du constituant en présence d'ajout, elle diminue sensiblement en augmentant le pourcentage des copeaux de bois. Contrairement à l'augmentation de quantité d'eau qui donne le résultat contraire.

## Conclusion Générale :

Le domaine du génie civil tend à concevoir des matériaux et des techniques de constructions plus économes en ressources non renouvelables, peu consommateurs en énergie et moins émissifs en gaz à effet de serre. Les éco-matériaux rentrent dans cette démarche en favorisant l'utilisation des ressources renouvelables ou issues du recyclage tel que les copeaux de bois.

La présente étude avait pour objectif de proposer des matériaux à base de terre crue allégés en ajoutant des copeaux de bois aux mélanges d'argile comme alternative écologique aux matériaux de construction à base de ciment et d'améliorer les performances des briques de terre crue.

La revue bibliographique a permis de mettre en évidence le regain d'intérêt des matériaux à faible impact environnemental. Dans le domaine de la construction en terre crue, il existe plusieurs manières d'utiliser la terre. Elle peut être compactée, moulée ou extrudée. La terre crue possède des résistances mécaniques faibles. La terre crue dispose intrinsèquement d'une masse volumique importante, de bonne capacité d'inertie et de régulation d'hygrométrie. Cependant, la résistance thermique de la terre crue reste faible. L'allègement de la terre par l'ajout de fibres végétales allège la terre et diminue la conductivité thermique.

Dans cette recherche, il a été décidé d'étudier le comportement de deux argiles différentes dans le but de choisir la plus appropriée à la formulation des briques de terre, ces deux matériaux ont été caractérisés individuellement par une série d'expérimentations.

Les tests montrent que le matériau AR présente un fort potentiel celui d'être plus relatif, contrairement au matériau AB qui contient un taux élevé de CaO qui peut nuire à la fabrication des briques de terre. Ainsi le choix du matériau AR comme matière première de cette recherche semble pertinent.

L'utilisation des copeaux de bois dans l'industrie des briques peut non seulement permettre leur valorisation de façon importante et durable mais aussi permettre la réduction de l'impact environnemental de cette industrie.

Une série d'essais a été réalisée en variant le pourcentage d'eau et d'ajout, les résultats obtenus ont montré une décroissance dans la résistance, cette diminution est due à l'ajout des copeaux de bois à l'argile qui peut être expliqués par le fait que plus la quantité de copeaux de bois augmente, plus les grains d'argile sont distancés les uns des autres, ce phénomène est remarqué lorsque l'ajout de copeaux de bois est plus que 7.5%

Les résultats ont démontré aussi l'ajout des copeaux de bois diminue la masse volumique de la brique et affaiblie la conductivité thermique.

L'augmentation de l'ajout a permis d'améliorer les caractéristiques thermiques du matériau en diminuant sa conductivité.

L'augmentation de la quantité de l'eau a eu un effet contraire.

Pour ce qui est des caractéristiques mécaniques, l'augmentation de la quantité d'ajout a joué un rôle défavorable en diminuant la résistance à la compression.

L'augmentation de la quantité d'eau a augmenté la résistance à la compression.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- [1] : Pacheco-Torgal, F., Jalali, S., 2011. Eco-efficient construction and building materials. Springer, London.
- [2]: Agostino Walter Bruno, Domenico Gallipoli, Céline Perlot-Bascoules, Joao Mendes, Nicolas Salmon. Briques de terre crue : procédure de compactage haute pression et influence sur les propriétés mécaniques. Rencontres Universitaires de Génie Civil, May 2015, Bayonne, France.
- [3]: Florian Champire. Étude expérimentale du comportement hydro-mécanique de la terre crue compactée pour la construction. Génie civil. Université de Lyon, 2017.
- [4]:Thibaud Mauffre. Compréhension et optimisation des échanges hydriques entre surface et volume dans les enduits en terre crue- Lyon
- [5]: Agostino Walter Bruno, Domenico Gallipoli, Céline Perlot-Bascoules, Joao Mendes, Nicolas Salmon  
Briques de terre crue : procédure de compactage haute pression et influence sur les propriétés mécaniques.
- [6]: Véronique galmiche, architecte , expert près la cour de Nancy. Construction et réhabilitation en terre crue : points de vigilance.
- [7]:Houben, H., Guillaud, H. Earth construction, Intermediate Technology publications 1994, London.
- [8]: CRATerre, Traité de construction en terre, Marseille, 1989.
- [9] : « Construire en terre crue » produite par amàco amàco - l'atelier matières à construire
- [10]: Rod Waddington Mud and Sticks, Tanzania.
- [10]: Bruno Pignal. Terre crue, techniques de construction et de restauration
- [11]: Parc naturel régional Marais du Cotentin et du Bessin
- [12]: DEAL Guyane - Ministère de l'Environnement. Document préparatoire au séminaire-formation " Construire en terre crue de Guyane
- [13]:Dao, K., M. Ouedraogo, Y. Millogo, J.-E. Aubert, et M. Gomina. (2018). Thermal, hydric and mechanical behaviours of adobes stabilized with cement. Construction and Building Materials 158, 84-96.
- [14] : DEAL Guyane - Ministère de l'Environnement.Document préparatoire au séminaire-formation " Construire en terre crue de Guyane"
- [15]: déclare Pierre Magnan Rédaction Afrique France Télévisions, Les sept merveilles de l'Algérie distinguée par l'UNESCO
- [16]: Le Décret exécutif a été publié n : 12-79 du 19 Rabie El Aouel 1433 correspondant au 12 février 2012
- [17] : MEMOIRE DE MAGISTER SPECIALITE : ARCHITECTURE OPTION : HABITAT, PATRIMOINE ET MATERIAUX INNOVANTS 2014
- [18] : DEAL Guyane - Ministère de l'Environnement.Document préparatoire au séminaire-formation " Construire en terre crue de Guyane"
- [19]:Florian Champire. Étude expérimentale du comportement hydro-mécanique de la terre crue compactée pour la construction. Génie civil. Université de Lyon, 2017.
- [20]:Ulrich Rokhen, Christof Ziegert, Construction en terre crue
- [21]: Mécanique des sols et des roches. géologie appliquéB Contet. Caractérisation du comportement hygrothermique du pisé - Mémoire de Travail de Fin d'Etudes, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, Vaulx-en-Velin. Technical report, 2012
- [22] : Source : Van Damme, 2013 : p. 54.

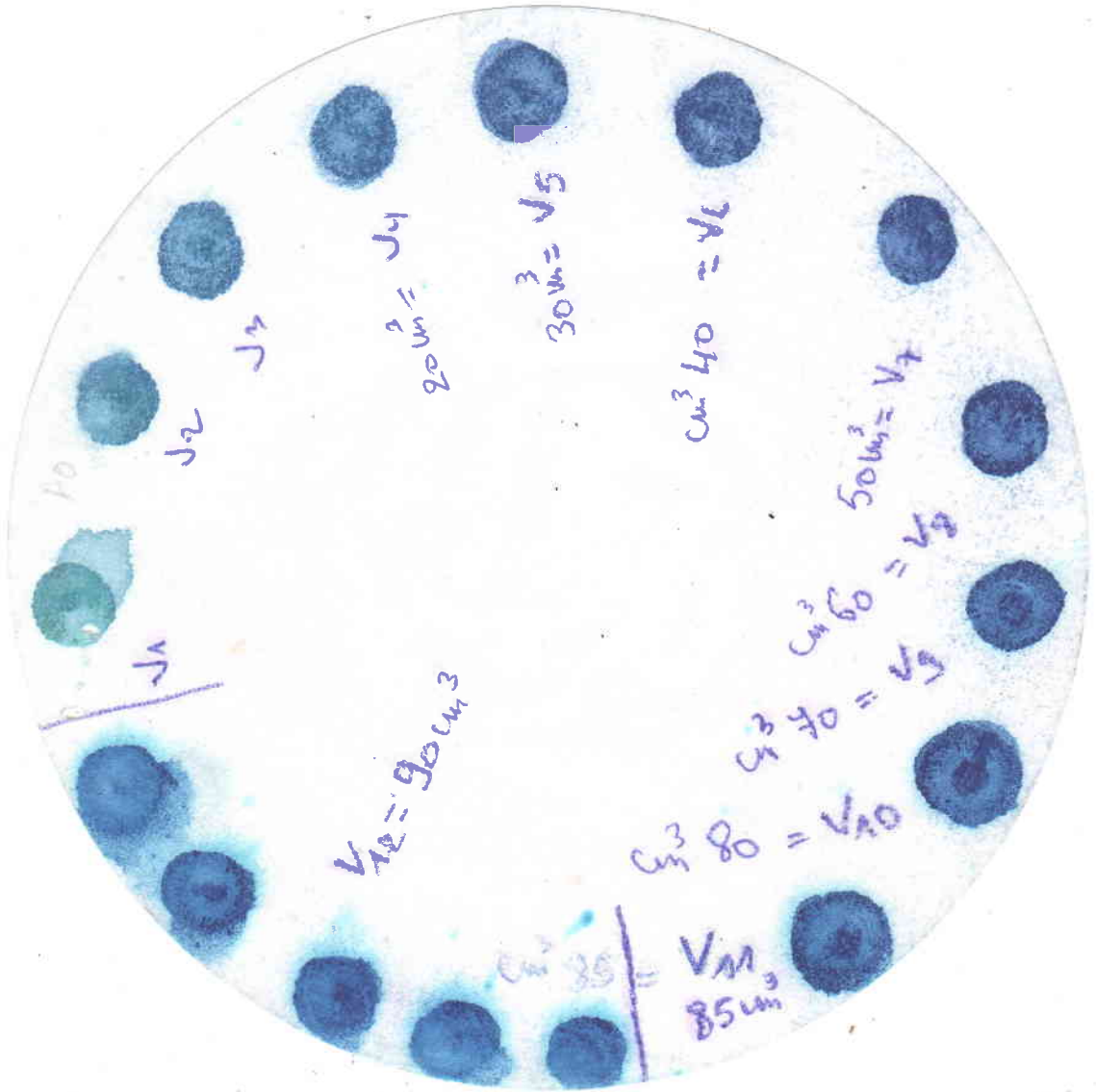


- [23] : Caillère S., Henin S. et Rautureau M., 1982. Minéralogie des argiles : Classification et nomenclature (Tome 2), vol. 2, Paris : Masson
- [24 ] : Gaombalet J. Le gonflement des argiles et ses effets sur les ouvrages douterrains de stockage. Ecole polytechnique; 2004
- [25] : Gautier M 2008. Interactions entre argile ammoniée et molécules organiques dans le contexte du stockage des déchets. Cas de molécules à courtes chaînes. Thèse de doctorat de l'Université d'Orléans.
- [26] : Fabian Valencia CARACTERISATION DES PARTICULES FINES D'UN MATÉRIAU GRANULAIRE DE FONDATION PAR L'ESSAI AU BLEU DE MÉTHYLÈNE
- [27] : S. Héning, J. Chaussidon, and R. Calvet, "Surface, forme et croissance des minéraux des argiles," Bull. du Groupe français des argiles, vol. 21, no. 1, pp. 31–45, 1969, doi: 10.3406/argil.1969.1106.
- [28] : Grim, 1968. Caillère et al, 1982. Le Sol: Constitution, structure. Phénomènes aux interfaces. 457 pages.
- [29] : Delgado, M.C., Guerrero, I.C., 2007. The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review. Constr. Build. Mater. 21, 237–251. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.006>
- [30] : : Pierre VASSART. Cours MDS 2017/2018
- [31] : Jiménez Delgado et al., The selection of soils for unstabilised earth building
- [32] : Cours de mecanique des sols. Sanglerats
- [33] : Faycal El Fgaier. Conception, production et qualification des briques en terre cuite et en terre crue. Autre. Ecole Centrale de Lille, 2013. Français
- [34] : Effects of incorporating wood sawdust on the firing program and the physical and mechanical properties of fired clay bricks Hisham Alabduljabbar a,\*\*, Omrane Benjeddou a,b , Chokri Soussi a , Mohamed Amine Khadimallah a , Rayed Alyousef a,\*
- [35] : Marie Combarieu, ecodrop.net édité par la Société :ECODROP SAS
- [36] : Madani BEDERINA.CARACTÉRISATION MÉCANIQUE ET PHYSIQUE DES BÉTONS DE SABLES À BASE DE DÉCHETS DE BOIS
- [37] : Xavier DEGLISE et André DONNOT Laboratoire d'études et de recherches sur le matériau Bois (LERMAB) Faculté des Sciences de Nancy
- [38] : Salmen (1986)
- [39] : [blogs.paysmellois.org/terrecrue/public/materiaux.pdf](https://blogs.paysmellois.org/terrecrue/public/materiaux.pdf)
- [40] : Effet du Sable sur la Durabilité du Béton de Terre Stabilisé. Mémoire de fin d'étude 2019/2020
- [41] : (NF P 94-050, septembre 1995)
- [42] : (NF P 94-056, mars 1996)
- [43] : (NF P 94-057, mai 1992)
- [44] : (NF P 94-068, octobre 1998)
- [45] : (NF P11-300, 1992, pp. 11-300)
- [46] : (NF P 94-051, mars 1993)
- [47] : [NF EN 1097-3]
- [48] : Valorisation des rejets de raffinage des huiles dans l'élaboration des briques cuites. Mémoire de fin d'étude 2018/2019
- [49] : (NF P94-051, 1993)
- [50] : Casagrande, 1932.
- [51] : NF P 11-300 (NF P11-300, 1992),
- [52] : [NF EN ISO14688-1, 2003]

## Références Bibliographiques

---

- [53] : Arezki née Djadouf Samia, Thèse: Etude et caractérisation thermo-physique et mécanique des matériaux allégés : cas de la brique à base d'argile pauvre en chaux allégé avec ajout du grignon d'olive. 2016/2017
- [54] : [Kornmann, 2005], Kornmann, M. Matériaux de construction en terre cuite – Fabrication et propriétés. Editions Septima. Paris, Genève 2005.
- [55] , B. Tyagi, Ch. D. Chudasama, R. V. Jasra, Determination of structural modification in acid activated montmorillonite clay by FT-IR spectroscopy, Spectrochimica Acta Part A 64
- [56]: J. Pan, Ch. Wang, Sh. Guo, J. Li, Z. Yang, Cu supported over Al-pillared interlayer clays catalysts for direct hydroxylation of benzene to phenol, Catalysis Communications 9
- [57] : Peltier et Rumpler,
- [58] : Mouevus et al.,
- [59] : Etude de l'effet du traitement chimique de la cellulose sur les propriétés physico-mécaniques des composites PVC/CELLULOSE
- [60] : F. Michaud, « rhéologie de panneaux composites Bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique : Aptitude au post fromage »

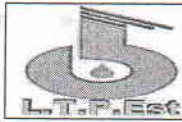




Structure : .....	Feuille d'essai de laboratoire		Document de référence NF P 94-068
Dossier N°: .....	Détermination de la Valeur de Bleu de Méthylène d'un Sol Ou d'un Matériau Rocheux par l'essai à la tache VBS		Version : Octobre 1998
Echantillon N°: .....			
Provenance du matériau : .....	Date de prélèvement: .....		
Sondage N°: ..... Puits: .....	Profondeur: .....	Date d'essai: 4.6.1998	
Mode de prélèvement : <input type="checkbox"/> Ech intact <input type="checkbox"/> Ech Remanié <input type="checkbox"/> Ech reconstitué	% de la fraction 0/5 mm dans la fraction 0/50 mm du matériau sec : .....		
Expression des résultats			
Désignation		Essai 01	Essai 02
Masse humide de la première prise d'essai (mh <sub>1</sub> )	(g)	30,00	
Masse humide de la deuxième prise d'essai (mh <sub>2</sub> )	(g)	56,09	
Masse sec de la deuxième prise d'essai (ms <sub>2</sub> )	(g)	53,21	
Déterminer la proportion pondérale (C)	(%)		
Teneur en eau ( $W = \frac{mh_2 - ms_2}{ms_2}$ )	(%)	0,054	
Masse sèche de la prise d'essai ( $m_0 = \frac{mh_1}{1+W}$ )	(g)	28,46	
Volume du bleu introduit (V)	(cm <sup>3</sup> )	90	
Masse de bleu introduite (solution à 10 g/l) $B = V \times 0.01$	(g)	0,9	
Si $D_{max} < 5$ mm; ( $V_{Bs} = \frac{B}{m_0} \times 100$ )	g/100g	3,162	
Si $D_{max} > 5$ mm; ( $V_{Bs} = \frac{B}{m_0} \times C \times 100$ )	g/100g		
Mode opératoire			

DESIGNATION	Norme de référence	EQUIPEMENT
<b>Préparation de l'échantillon :</b> le D max du matériau est sup à 50 mm prélever 10 Kg de sa fraction 0/50 mm Le D max du matériau est compris entre 5 mm et 50 mm, prélever une masse (m) du matériau humide telle que (m) > 200 D max Séparer par tamisage et si nécessaire par lavage la fraction 0/5mm contenu dans cet échantillon Déterminer la proportion pondérale (C) de la fraction 0/5 mm sèche contenu dans le matériau ou dans sa fraction 0/50 mm lorsque le D max > 50 mm. Si le D max du matériau est < ou égal à 5 mm prélever une masse (m) du matériau humide telle que (m) > 200 D max	NFP 94-068	
Quarter et homogénéiser la fraction 0/5 mm		Diviseur N Ident : .....
Préparer trois prises d'essais de masses égales et de l'ordre de : De 30 à 60 gr : cas des sols très argileux De 60 à 120 gr : cas des sols moyennement à peu argileux		
Introduire la 1 <sup>ère</sup> prise d'essai soit (mh <sub>1</sub> ) dans le récipient de 3000 cm <sup>3</sup> mise en suspension dans (500 ± 10) cm <sup>3</sup> d'eau déminéralisée et agiter à une vitesse de 700 tr/min à ± 100 tr/min pendant 5 min		Chronomètre N Ident : .....
Peser la 2 <sup>ème</sup> prise d'essai soit (mh <sub>2</sub> ) humide pour déterminer la teneur en eau		Etuve N Ident : .....
Peser la 3 <sup>ème</sup> prise d'essai soit (mh <sub>3</sub> ) humide et conserver dans l'éventualité où l'essai doit être renouvelé		
<b>Mode opératoire :</b>		
Introduire dans la prise d'essai mise en imbibition en agitation permanente à (400tr/min ± 100 tr/min) 5 à 10 cm <sup>2</sup> de solution (suivant l'argilosité du matériau). Au bout d'une minute ± 10 s, procéder à l'essai à la tache sur papier filtre		Agitateur à ailettes N Ident : .....
Poser le papier filtre sur un support adapté non absorbant.		Burette graduée N Ident : .....
Prélever à l'aide de la baguette de verre une goutte en suspension et la déposer sur le papier filtre jusqu'à l'apparition de l'aurole bleu clair dans la zone périphérique de la tache. la goutte prélevée doit former un dépôt central compris entre 8 et 12 mm de diamètre		
Laisser poursuivre absorption de la solution de bleu et effectuer des essais à la tache de minute en minute (sans ajout de solution) L'essai est positif si l'aurole persiste au bout de 5 taches Si l'aurole disparaît à la 5 <sup>ème</sup> tache ou avant procéder à de nouvelles injections de bleu avec des pas de 2 à 5 cm <sup>2</sup> selon l'argilosité		Thermomètre N Ident : .....
Reprendre l'essai à la tache jusqu'à ce que l'essai soit positif		
Prendre le volume total soit : (V) de solution de bleu		
Laver le récipient et les accessoires en contact avec la suspension de bleu		
Observation:	Chargé d'essai Nom et Prénom Signature	Responsable Nom et Prénom Signature





Structure : .....		Feuille d'essai de laboratoire		Document de référence : NF P 94-056		
Dossier N° : .....		SOLS : Analyse granulométrique Tamisage à sec après lavage		Version :		
Echantillon N° : .....						
Provenance du matériau :			Date de prélèvement :			
Sondage N° : ....., Puits N° : .....		Profondeur : .....		Date d'essai : 02/05/2021		
Expression des résultats						
Matériau : dm = ..... mm		Masse : m = ..... g	Partage au tamis dc = ..... mm		Masse sèche du refus au tamis dc : Rc = ..... g	
Tamis (mm)	Masse des refus mesurés (g)		Masse refus R cumulé en g	Pourcentage massique		Masse passant au tamis dc : mh = ..... g
	ri	R		Refus cumulé r	Tamisat cumulé p	
100	/					Part 1 sur tamisât au tamis dc
80	/					Masse humide : mh1 = ..... g
63	/					Masse sèche : ms1 = ..... g
50	/					Part 2 sur tamisât au tamis dc
40	/					Masse humide : mh2 = ..... g
31,5	/					Masse sèche : ms2 = ..... g
20	/					Masse sèche totale
16	/					ms = Rc + mh x ms1/mh1
12,5	/					ms = 193 ..... g
10	/					Coefficient multiplicateur sur refus au tamis de 80 µ :
5	/					b = mh/mh2 b = .....
2	/					Refus cumulé : R = Rc + b x ri
1	/		5,00	0,63	99	ms4 = ..... g
0,4	/		50	6,31	94	ms3 = ..... g
0,2	/		92	11,60	88	% refus : r = 100 x R/ms
0,1	/		129	16,29	84	% tamisat : 100 (1 - R/ms)
0,08	/		136	17,15	83	
Vérification : (ms2 - ms4)/ms2 = ..... ≤ 0,01			NB : si dc = dm, Rc = 0, b = 1			
Mode opératoire						

Designations	Equipements												
	Matériel	N° identifi											
1) Choix de dm : plus grande maille du tamis à utiliser.													
2) Procéder à une prise d'essai sur le matériau prélevé conformément aux indications du tableau ci-dessous :													
Masse minimale de tamisât nécessaire en fonction de la dimension des mailles du tamis													
Tamis d (mm)	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80
Masse de matériau m (kg)	0,3	0,4	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	12	20	30	50
3) Eliminer les éléments de dimension > à dm après broissage. Peser en notant la dimension approximative des plus gros éléments.													
4) Séparer par tamisage les éléments de dimension < à dc des éléments de dimension > à dc, tel que : 5 ≤ dc < dm													
5) Traitement des refus au tamis d'ouverture dc : - Laver le contenu du tamis à faible débit d'eau, jusqu'à ce qu'il ne reste que des éléments propres ; - Recueillir le tamisât issu du lavage dans un récipient ; - Rassembler dans un autre récipient les éléments de dimension > à dc et sécher jusqu'à masse constante. - Tamiser à sec sur une colonne de tamis décroissants d'ouverture dm à dc avec un fond de tamis et peser les refus cumulés ; - Rc est le refus cumulé au tamis dc - Ajouter le tamisât obtenu au tamis dc aux éléments < à dc	Série de tamis												
6) Traitement des passants au tamis d'ouverture dc : - Laisser décanter et sécher à - 50 °C le tamisât issu du lavage des éléments > à dc - Ajouter ce tamisât aux éléments < à dc - Malaxer la totalité du tamisât afin d'obtenir un mélange homogène puis peser (mh) - Prélever et peser une masse (mh1), sécher et peser (ms1) - Prélever une masse (mh2), tremper dans un récipient, laver sur le tamis 0.080 mm et sécher, peser (ms2) - Tamiser à sec sur une colonne de tamis décroissants d'ouverture < dc à 0,080 mm avec un fond de tamis et peser les refus cumulés ; - (ms4) est le refus cumulé au tamis 0.080 mm - (ms3) est le tamisât au tamis 0.080 mm s'il existe.	Etuve												
Observation :	Chargé d'essai Nom et Prénom Signature		Responsable Nom et Prénom Signature										

Structure	Feuille d'essai de laboratoire			Document de référence NF P 94-057 version : Mai 1992
Dossier N°: .....	<b>SOLS : Analyse granulométrique</b>			
Echantillon N°: .....	<b>Méthode par sédimentation</b>			
Mode de prélèvement :	Ech intact	Ech Remanié	Ech reconstitué	Date de prélèvement:
Provenance /projet :				Date d'essai: <b>10/05/2021</b>
Sondage N° :	Profondeur: .....	Pourcentage < 80µm : .....		Température de la salle d'essai : ..... °C
Mv particules solides : $\rho_s =$ ..... t/m <sup>3</sup>	mesurée	conventionnelle	Densimètre : H <sub>0</sub> = .... cm H <sub>1</sub> = .... cm h <sub>1</sub> = .... cm V <sub>d</sub> = ..... cm <sup>3</sup>	
Facteurs correcteurs: C <sub>m</sub> = ..... C <sub>d</sub> = .....			Section de l'éprouvette : A = ..... cm <sup>2</sup>	

**Expression des résultats**

Temps de lecture			R Lecture densimètre	Température (°C)	C <sub>t</sub> Correction température	P% Sur tamis à 80µ	P% Sur tamis à 50 mm	D (µm)
h	min	s						
-	-	30	1,021	24,2	0,0008	84,57	40,19	69,27
-	1	-	1,020	24,2	0,0008	80,01	36,91	49,45
-	2	-	1,018	24,2	0,0008	79,71	60,35	35,62
-	5	-	1,017	24,1	0,0008	62,76	57,07	29,27
-	10	-	1,015	24,0	0,0008	60,86	50,51	16,04
-	20	-	1,014	24,1	0,0008	56,90	47,23	11,44
-	40	-	1,012	24,1	0,0008	49,00	40,67	08,23
-	80	-	1,010	24,4	0,0008	41,10	34,11	05,90
4	-	-	1,009	24,8	0,0008	30,03	24,93	03,47
24	-	-	1,004	29,1	0,0004	15,83	13,14	01,50

Mode opératoire

**Préparation de la prise d'essai :**

- 1) recueillir le tamisât à 80 µm préparé avec son eau de lavage dans un bac
- 2) mettre à décanter
- 3) siphonner l'eau du bac une fois redevenue claire sans entraîner d'éléments fins et mettre à sécher dans une étuve
- 4) prélever une prise d'essai de 80±10g sur le tamisât séché et désagrégé avec le pilon dans le mortier et homogénéiser
- 5) introduire la prise d'essai dans le récipient utilisé
- 6) ajouter 500 cm<sup>3</sup> du mélange : 440 cm<sup>3</sup> Eau distillée ou déminéralisée + 60 cm<sup>3</sup> défloculant [solution à 5% d'héxaméthaphosphate de sodium (Na<sub>6</sub>(PO<sub>3</sub>)<sub>6</sub> 10H<sub>2</sub>O)] et laisser imbiber pendant au moins 15 heures à la température ambiante
- 7) disperser la prise d'essai dans la solution d'eau et de défloculant au moyen de l'agitateur mécanique pendant 3 min à 10000 tr/min au moins

**Exécution de l'essai :**

- 1) verser la suspension dispersée dans une éprouvette d'essai immédiatement après la fin de l'agitation mécanique
- 2) rincer le récipient ainsi que l'arbre et les palettes de l'agitateur avec de l'eau distillée ou déminéralisée
- 3) recueillir le liquide de rinçage dans l'éprouvette afin d'éviter de perdre une partie de l'échantillon de sol lors du transfert
- 4) compléter par de l'eau distillée ou déminéralisée à la température ambiante jusqu'à 2000 cm<sup>3</sup>
- 5) verser 2000 cm<sup>3</sup> d'eau distillée ou déminéralisée dans une seconde éprouvette témoins et y plonger le thermomètre et le densimètre parfaitement propre
- 6) agiter vigoureusement verticalement la suspension au moyen de l'agitateur manuel pour obtenir une concentration uniforme sur toute la hauteur de l'éprouvette puis retirer l'agitateur manuel et déclencher au même moment le chronomètre
- 7) plonger le densimètre avec précaution dans la suspension immédiatement après le déclenchement du chronomètre
- 8) faire les lectures depuis le début de l'essai aux temps suivants en minutes : 0,5 - 1 - 2 - 5 - 10 - 20 - 40 - 80 - 240 - 1440
- 9) noter à chaque lecture au sommet du ménisque la densité de la solution à 0.0001 près et la température de l'eau se trouvant dans l'éprouvette témoin à 0.1 °C
- 10) procéder aux 3 premières lectures sans retirer le densimètre de la solution
- 11) à partir de la 3<sup>ème</sup> lecture retirer le densimètre de la solution après chaque mesure le nettoyer puis le plonger dans l'éprouvette d'eau distillée ou déminéralisée
- 12) à partir de la 4<sup>ème</sup> lecture (t=5min) plonger le densimètre avec précaution dans la solution au minimum 30s avant la mesure.

**Equipements**

Etuve	N° identification	Balance	N° identification	Densimètre	
Agitateur	N° identification	Thermomètre	N° identification	chronomètre	N° identification
Observation:			Chargé d'essai Nom et Prénom Signature	Responsable Nom et Prénom Signature	



Structure .....	Feuille d'essai de laboratoire	Document de référence NF EN 1097-3
Dossier N°: .....	<b>Granulats : Masse volumique en vrac et la porosité inter granulaire</b>	Version : Août 1998
Échantillon N°: .....		Date de l'échantillonnage: .....
Provenance du matériau: .....		Date d'essai: 10/05/2011
Date de réception: .....		

Classe granulaire Essai N°	Expression des résultats			Expression des résultats		
	01	02	03	01	02	03
Masse du conteneur vide $m_1$ (kg)	1275,4	1275,4	1275,4			
Masse du conteneur rempli $m_2$ (kg)	2301,2	2309,4	2305,1			
Capacité du conteneur $V$ (L)	1036,19	1036,19	1036,19			
Masse volumique en vrac : $\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V}$ (T/m <sup>3</sup> )	0,989	0,997	0,993			
Masse volumique réelle : $\rho_p$ (T/m <sup>3</sup> )						
Porosité intergranulaire : $v = \frac{\rho_p - \rho_b}{\rho_p}$						
Moyenne						

**Mode opératoire**

**Préparation des éprouvettes :**

Prélever trois éprouvettes conformément à l'EN 932-2  
 Les granulats doivent être séchés à 110±5°C jusqu'à masse constante  
 La masse de chaque prise d'essai doit être comprise entre 120 et 150% de la masse nécessaire  
 Pour les granulats légers, après séchage à 110±5°C atteindre une teneur en eau d'équilibre à 23±3°C et une humidité de 50±10%

**Capacité minimale du conteneur en fonction de la granularité**

Limite supérieure de la classe granulaire (mm)	Capacité (L)	Limite supérieure de la classe granulaire (mm)	Capacité (L)
Jusqu'à 4	1.0	Jusqu'à 31.5	10
Jusqu'à 16	5.0	Jusqu'à 63	20

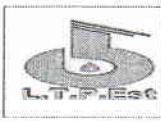
**Exécution de l'essai :**

Peser les conteneurs vides secs et propres : ( $m_1$ )  
 Poser le conteneur sur une surface horizontale et le remplir à l'aide de la pelle jusqu'à ce qu'il déborde  
 Durant le remplissage, limiter la ségrégation en appuyant sur le bord supérieur. A aucun moment le bord de la pelle ne doit être à plus de 50 mm au dessus du conteneur. Enlever avec soin tout excédent au sommet du conteneur en veillant à ce que la surface soit étalée de manière uniforme afin d'éviter tout phénomène de ségrégation. Niveler la surface des granulats à l'aide de la règle en ayant soin d'éviter tout compactage à la surface.  
 Peser le conteneur rempli et enregistrer sa masse à 0.1 % près ( $m_2$ ). Soumettre trois prises d'essai à cet essai.

**Equipements**

Etuve	N° d'identification	Balance	N° d'identification	Thermomètre	N° d'identification
Conteneur	N° d'identification				
Fidélité :	Sables $r=0.032$ $R=0.165$ Gravillons $r=0.019$ $R=0.079$		Chargé d'essai : Nom et Prénom Signature		Responsable Nom et Prénom Signature
Observation :	..... ..... .....				

AU



Structure .....	Feuille d'essai de laboratoire	
Dossier N°:.....	SOLS : Détermination des limites d'Atterberg	Document de référence NF P 94-051
Échantillon N°:.....		Version : Mars 1993
Provenance du matériau :	Date de prélèvement:	
Sondage N°:..... Puits N°:.....	Profondeur:.....	Date d'essai: 09/05/2021

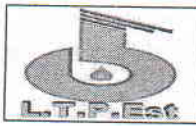
Essai	Limite de liquidité				Limite de Plasticité		
	1 <sup>er</sup> essai	2 <sup>ème</sup> essai	3 <sup>ème</sup> essai	4 <sup>ème</sup> essai	1 <sup>er</sup> essai	2 <sup>ème</sup> essai	3 <sup>ème</sup> essai
N° d'essai	15	25	30	35			
Nombre de coup	15	25	30	35			
Numéro de la tare	B20 B14	3	17	H2 B13 B12	8	6	2
Tare m <sub>1</sub> (g)	3,778	3,671	3,651	4,110	3,884	4,031	4,309
Masse de l'ensemble (éch. humide+ tare) m <sub>2</sub> (g)	7,471	7,511	7,632	8,137	7,576	7,366	8,257
Masse de l'ensemble (éch. sec + récipient) m <sub>3</sub> (g)	6,490	6,490	6,622	7,109	6,685	6,558	7,308
Masse de l'échantillon sec m <sub>d</sub> = m <sub>3</sub> - m <sub>1</sub> (g)	2,712	2,820	2,971	2,999	2,801	2,527	2,999
Masse de l'eau m <sub>w</sub> = m <sub>2</sub> - m <sub>1</sub> (g)	0,981	1,02	1,01	1,028	0,891	0,808	0,949
Teneur en eau (W = 100 x (m <sub>2</sub> - m <sub>3</sub> ) / (m <sub>3</sub> - m <sub>1</sub> )) (%)	36,17	36,17	34,00	34,28	31,81	37,97	31,64
Moyenne	36,17	34,14	31,89	31,61			22,19
Limites d'Atterberg :	W <sub>L</sub> = 33,46				W <sub>P</sub> = 22,19		
Indice de plasticité : I <sub>p</sub> = W <sub>L</sub> - W <sub>P</sub>	I <sub>p</sub> = 11,98						

Mode opératoire

Désignations	Equipment	
	Désignation	N° inventaire
<b>Préparation du sol</b>		
Echantillonner le sol et homogénéiser le par brassage		
Imbiber dans un récipient d'eau à la température ambiante, pendant au moins 24 h, une masse de matériau gr >200D		
Tamiser par voie humide au tamis de 400µm pour récupérer une masse >200 g		
Recueillir l'eau de lavage et le tamisat dans un bac		
Siphonner sans entraîner de particules solides après uné décantation d'au moins 12h		
Evaporer l'eau excédentaire à une température ne dépassant pas 50 °C		
<b>Détermination de la limite de liquidité</b>		
Vérification de l'appareil de casagrande		
Malaxer la totalité du tamisat afin d'obtenir une pâte homogène et presque fluide		
Répartir avec la spatule, dans la coupelle propre et sèche une masse d'environ 70 g de matériau et l'étaler en plusieurs couches	BOITE DE CASAGRANDE	
Partager la pâte en deux au moyen de l'outil à rainurer		
Fixer délicatement la coupelle sur le support métallique de l'appareil de Casagrande		
Actionner la came de façon à soumettre la coupelle à une série de choc à la cadence de 2 coups/seconde		
Noter le nombre N de chocs nécessaires pour que les lèvres de la rainure se rejoignent sur une longueur d'environ 1 cm		
Ne poursuivre l'essai que si N est compris entre 15 et 35 : si N <15 ou N >35 refaire l'essai		
Prélever environ 5 g de pâte de chaque coté des lèvres de la rainure et au voisinage de l'endroit où elles se sont refermées afin d'en déterminer la teneur en eau	NF P 94 - 050	
Placer le prélèvement dans une capsule de masse connue et pesée immédiatement avant d'être introduit dans l'étuve pour dessiccation	BALANCE	
Effectuer au moins 4 fois la même opération complète sur la même pâte mais avec une teneur en eau différente à chaque fois	ETUVE	
<b>Détermination de la limite de plasticité</b>		
Former une boulette à partir de la pâte préparée		
Rouler la boulette sur une plaque lisse à la main ou éventuellement à l'aide d'une plaquette, de façon à obtenir un rouleau qui aminci progressivement jusqu'à ce qu'il atteigne un diamètre de 3 mm et une longueur d'environ 10 cm et ne doit être creux		
La limite de plasticité est obtenue lorsque, simultanément, le rouleau se fissure et que son diamètre atteigne 3 mm ± 0,5 mm		
Si aucune fissure n'apparaît, le rouleau est réintégré à la boulette et reformer à nouveau		
Prélever, une fois les fissures apparues, la partie centrale du rouleau et la placer dans une capsule de masse connue, la peser immédiatement et l'introduire dans l'étuve, afin de déterminer sa teneur en eau	NF P 94 - 050	
Effectuer un deuxième essai sur une nouvelle boulette		
Observation:	Chargé d'essai Nom et Prénom Signature	Responsable Nom et Prénom Signature

AS





Structure :	<b>Feuille D'essai de laboratoire</b>		Document de référence NF P 94-050 ; version septembre 1995	
Dossier N° :	<b>SOL : Détermination De La Teneur En Eau</b>			
Échantillon N° :	<b>Pondérale des matériaux</b>			
Mode de prélèvement :	Ech intact	Ech Remanié	Ech reconstitué	Date de prélèvement:
Température d'étuvage :	Profondeur :		Date d'essai: 8/01/2021	
Provenance /projet :				

**Expression des résultats**

Essai	Prise 01	Prise 02	Prise 03	Prise 04
Numéro de la tare (coupelle et/ou bac)	A	O		
m <sub>1</sub> = Masse tare (g)	192,31	200,78		
m <sub>2</sub> = (échantillon humide+ tare) (g)	493,32	484,04		
m <sub>h</sub> = m <sub>2</sub> - m <sub>1</sub> (g)	301,01	283,26		
m <sub>3</sub> = (échantillon sec + tare) (g)	480,59	470,67		
m <sub>d</sub> sec = m <sub>3</sub> - m <sub>1</sub> (g)	288,28	269,89		
m <sub>w</sub> = m <sub>2</sub> - m <sub>3</sub> (g)	12,73	13,37		
Teneur en eau (W = $\frac{m_w}{m_d} \times 100 = 100 \times \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1}$ ) (%) (arrondir à 0.1%)				
Moyenne (%)				

**Mode opératoire**

- La masse (m) du matériau sur laquelle est déterminée la teneur en eau est choisie en fonction de la dimension des éléments qu'il contient. Elle doit être supérieure ou égale aux valeurs du tableau 1. Toutefois, dans certains essais (limites d'Atterberg, etc.) où la prise d'essai sur les éléments inférieurs à 400µm n'atteint pas la masse minimale du tableau 1, la teneur en eau est alors déterminée sur la totalité de cette prise d'essai.

Tableau 1 : Masse minimale de matériau nécessaire pour déterminer la teneur en eau en fonction de la dimension des éléments passant à travers le tamis à maille carrée d'ouverture d<sub>m</sub>

d <sub>m</sub> (µ m)	400	500	630	800
Masse (g)	20	50	100	150

d <sub>m</sub> (mm)	1	5	6.3	8	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80	d <sub>m</sub> > 80mm
Masse (kg)	0.2	0.3	0.4	0.5	0.8	1.2	2	3	5	8	12	20	30	50	$m = 6 \cdot 10^{-4} \cdot d_m^{3.66}$

-Tout d'abord, il faut s'assurer de la provenance et de la nature minéralogique ou origine géologique des matériaux et procéder à une identification visuelle, afin de savoir si, par exemple, les matériaux sont gypsifères, latéritiques ou s'ils contiennent des matières organiques. Les matériaux énumérés sont des matériaux susceptibles d'être modifiés sous l'action de la chaleur. En cas de doute, le matériau est traité comme s'il était susceptible d'être modifié par la chaleur.

-Une masse (m) de matériau est placée dans une coupelle ou un bac propre et sec de masse connue (m<sub>1</sub>).

-La prise d'essai et son contenant sont pesés immédiatement (m<sub>2</sub> = m+m<sub>1</sub>). Puis, ils sont introduits dans une étuve à 105 °C pour les matériaux insensibles à la chaleur et à 50 C pour les matériaux sensibles à la chaleur.

Deux pesées, séparées par un étuvage d'un intervalle de temps t, sont effectuées sur la prise d'essai après chacun des passages à l'étuve. Conventionnellement l'évaporation de l'eau est considérée comme achevée si la masse (m<sub>d</sub>) de la prise d'essai n'a pas variée de plus de 2/1 000 entre ces deux pesées.

L'intervalle t est au minimum :

- de 4 h dans le cas d'un étuvage à 105 °C ;
- de 8 h dans le cas d'un étuvage à 50 °C.

La durée totale du séchage peut donc varier de quelques heures à plusieurs jours.

-Dans le cas d'un essai sur un échantillon ne contenant que des éléments passant au tamis de 400µ m, la pesée se fait après refroidissement

en présence d'un matériau dessiccateur ('air est maintenu sec au moyen d'un gel de silice ou de tout autre absorbant).

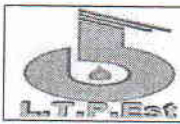
**Equipement**

Dessiccateur	N° inventaire	Balance	N° inventaire	Etuve	N° inventaire
Observation		Chargé d'essai Nom et prénom Signature		Responsable Nom et prénom Signature	

AG





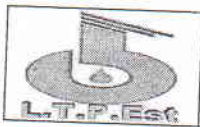


Structure : .....		<b>Feuille D'essai de laboratoire</b>		Document de référence NF P 94-053 Version : Octobre 1991	
Dossier N° : .....		Masse volumique des sols fins en laboratoire Méthode : l'immersion dans l'eau			
Échantillon N° : .....					
Provenance du matériau : .....			Date de réception : .....		Date d'essai : .....
Sondage / Puits N° : .....		Profondeur : .....		Température de la salle : .....	
Mode de prélèvement : Ech intact		Ech Remanié		Nature du sol : .....	
<b>Expression des résultats</b>					
Essai					
Masse de l'échantillon humide : m (kg)		0A	09J		
		226,80	219,29		
Masse de l'échantillon humide + paraffine à l'air libre : m <sub>p</sub> (kg)		247,30	242,54		
Masse de l'échantillon humide + paraffine immergé dans l'eau : m' <sub>p</sub> (kg)		90,38	89,90		
Masse volumique de l'eau : γ <sub>w</sub> (kg/m <sup>3</sup> )		23°	997,5	997,5	
Masse volumique de la paraffine : γ <sub>p</sub> (kg/m <sup>3</sup> )		880 Kg/m <sup>3</sup>			
$\text{Volume de l'échantillon : } V = \frac{(m_p - m'_p)}{\gamma_w} - \frac{(m_p - m)}{\gamma_p} \quad (\text{m}^3)$		1,34	1,26		
		10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-4</sup>		
Masse volumique humide : γ = $\frac{m}{V}$ (kg/m <sup>3</sup> )		1692	1733		
<b>Moyenne</b>					
Teneur en eau : W(%) (résultat porté sur la feuille d'essai teneur en eau)		17,13 %			
Masse volumique sèche : γ <sub>d</sub> = $\frac{\gamma_w}{(1+W/100)}$ (kg/m <sup>3</sup> )		4,47			
		<del>1044</del> 1639			
Teneur en eau de saturation : W <sub>sat</sub> (%)		23,90			
Degrés de saturation : Sr %		18,71			
<b>Mode opératoire</b>					
<p><b>1- Préparation de l'échantillon :</b>          L'échantillon soumis à essai doit avoir une forme simple afin de pouvoir être paraffiné facilement, il est taillé, afin d'avoir une masse comprise entre 0.1 et 0.5 kg</p> <p><b>2- Mesure :</b>          La prise d'essai, après taille éventuelle, est immédiatement pesée (m), et est paraffinée aussitôt après.          Une fois revenue à la température de la salle d'essai, Elle est pesée (m<sub>p</sub>) à l'air libre. Puis est placée dans le panier suspendu à l'étrier de la balance et est immergée afin d'être pesée (m'<sub>p</sub>) avec la balance hydrostatique.          Pendant la durée de l'essai la température de la salle ne doit pas varier de plus de 3°C.</p>					
<b>Equipement</b>					
Balance			Thermomètre		
N° D'identification			N° D'identification		
Observation		Chargé d'essai		Responsable	
		Nom et prénom		Nom et prénom	
		Signature		Signature	

AP







Structure .....	Feuille d'essai de laboratoire <b>Granulats : Masse volumique en vrac et la porosité inter granulaire</b>	Document de référence NF EN 1097-3 Version : Août 1998
Dossier N° .....		
Échantillon N° .....		
Provenance du matériau:		
Date de réception :	Date d'essai:	Date de l'échantillonnage:

Classe granulaire Essai N°	Expression des résultats					
	01	02	03	01	02	03
Masse du conteneur vide $m_1$ (kg)	1275,36	1275,36	1275,36			
Masse du conteneur rempli $m_2$ (kg)	2687,8	2676,0	2679,3			
Capacité du conteneur $V$ (L)	1036,10	1036,19	1036,19			
Masse volumique en vrac : $\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{V}$ (T/m <sup>3</sup> )	1,3629	1,3517	1,3549			
Masse volumique réelle : $\rho_p$ (T/m <sup>3</sup> )						
Porosité intergranulaire : $v = \frac{\rho_p - \rho_b}{\rho_p}$						
Moyenne						

Mode opératoire

Préparation des éprouvettes :

Prélever trois éprouvettes conformément à l'EN 932-2

Les granulats doivent être séchés à 110±5°C jusqu'à masse constante

La masse de chaque prise d'essai doit être comprise entre 120 et 150% de la masse nécessaire

Pour les granulats légers, après séchage à 110±5°C atteindre une teneur en eau d'équilibre à 23±3°C et une humidité de 50±10%

Capacité minimale du conteneur en fonction de la granularité

Limite supérieure de la classe granulaire (mm)	Capacité (L)	Limite supérieure de la classe granulaire (mm)	Capacité (L)
Jusqu'à 4	1.0	Jusqu'à 31.5	10
Jusqu'à 16	5.0	Jusqu'à 63	20

Exécution de l'essai :

Peser les conteneurs vides secs et propres : ( $m_1$ )

Poser le conteneur sur une surface horizontale et le remplir à l'aide de la pelle jusqu'à ce qu'il déborde

Durant le remplissage, limiter la ségrégation en appuyant sur le bord supérieur. A aucun moment le bord de la pelle ne doit être à plus de 50 mm au dessus du conteneur. Enlever avec soin tout excédent au sommet du conteneur en veillant à ce que la surface soit étalée de manière uniforme afin d'éviter tout phénomène de ségrégation. Nivelier la surface des granulats à l'aide de la règle en ayant soin d'éviter tout compactage à la surface.

Peser le conteneur rempli et enregistrer sa masse à 0.1 % près ( $m_2$ ). Soumettre trois prises d'essai à cet essai.

Equipements

Etuve	N° d'identification	Balance	N° d'identification	Thermomètre	N° d'identification
Conteneur	N° d'identification				
Fidélité :	Sables $r=0.032$ $R=0.165$ Gravillons $r=0.019$ $R=0.079$	Chargé d'essai : Nom et Prénom Signature		Responsable Nom et Prénom Signature	
Observation :	..... ..... .....				

