

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira-Bejaia



Faculté Technologie
Département de Génie Civil

Mémoire pour l'obtention de diplôme de master en Génie Civil
Option « Structures »

Élaboration de briques en terre crue stabilisées chimiquement

Présenté par :

- M^{elle} OUBRAHAM Narimane
- M^{elle} BELMOKHTAR Sabrina

Encadré par :

-D^r. BOUZIDI Med-Amin

Co-Encadrant:

-M^r.SI AHMED Chabane

Devant le jury :

-M ^r .MEZIANI BELKACEM	Président
-M ^r .ABDELHAFID BOUKELLOUDA	Examineur

2022-2023



Remerciement

Tout d'abord nous remercions Dieu le tout puissant, le miséricordieux de 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^f.Bouzidi Mohamed Amin, qui, tout d'abord, accepté de nous encadrer et nous dirigé tout au long de cette recherche. Il a toujours été 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.

Nous voudrions remercier également M^f SI-Ahmed Chabane, et M^f Meziani Belkacem 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 LNHC de Bejaia à EL-KSEUR, là où nous avons effectué notre stage de fin d'étude.

À M^{me} BOUZEROURA, responsable du laboratoire MDC de l'université de Bejaia qui nous a facilité l'accès au labo.

Aux membres du jury 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.

Narimane et Sabrina

Dédicace

Cette recherche je la dédie à mes chers parents, mes deux sœurs, mon neveu Mathis, mes chers ami(e)s qui se reconnaîtront.

À toi Maman, maman chérie maman trésor, ma confidente, 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 fourni tous les moyens nécessaires ou peut-être plus pour que je réussisse dans mes études, de m'avoir tiré vers le haut, de m'avoir élevée, 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, espérant un jour je pourrai réaliser un maximum de mes rêves avec toi. Merci Maman.

À toi Papa, qui a toujours été présent pour moi et de me soutenir tout au long de mon cursus, merci de m'avoir fourni tous les moyens nécessaires pour que je réussisse dans mes études.

À mes sœurs Radia et Nedjma 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. Merci beaucoup didia et mimi hihihih !!!

À toi mon cher neveu Mathis, tu ne sais pas à quel point tu as illuminé nos vies ce jour-là ou tu es venue au monde, sache que je serai toujours là pour toi à tout moment, crois en tes rêves, vas de l'avant, je suis très sûr que tu arriveras.

Merci à toi tata Keltouma, ma nourrice adorée que j'ai toujours considéré comme 2eme maman ainsi que toutes ta famille comme étant père, frères et sœurs. À ma tante Ghania merci d'être là. À mes chers ami(e)s : Ouissam, Imane, Touka, Narimane et Youssef de m'avoir encouragé tout au long de ce mémoire et hors aussi surtout haha tu connais !!!!

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 !

C'était un rêve et aujourd'hui il s'est réalisé grâce à dieu puis mes efforts et sacrifices.

Merciiii je vous aime !

Narimane Oubrahim

Dédicace

Je dédie ce travail :

À ma famille et à mes proches,

Votre amour et votre soutien sont les piliers de ma vie. Cette réalisation est dédiée à vous tous, qui avez été mes sources d'inspiration et de force. Merci pour tout.

Sabrina

Table des matières :

<u>CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE:</u>	4
<u>Introduction :</u>	4
<u>1. La terre crue :</u>	4
<u>1.1. Construction en terre crue :</u>	4
<u>1.1.1. Les différents types de construction :</u>	4
<u>1.2. La construction de terre crue dans le monde :</u>	10
<u>1.3. La construction en terre crue en Algérie :</u>	11
<u>1.4. Les avantages de la construction en terre crue :</u>	12
<u>1.5. Les inconvénients de la construction en terre crue :</u>	13
<u>1.6. Les argiles comme matériau de construction :</u>	14
<u>1.6.2. Types structuraux et classification des argiles :</u>	14
<u>1.6.3. Les différents types d'argiles:</u>	17
<u>1.6.4. Propriétés et classification des argiles :</u>	19
<u>1.7. Les liants minéraux comme ajout dans la fabrication des briques crues :</u>	20
<u>1.7.1. Ciment :</u>	21
<u>1.7.2. La chaux :</u>	23
<u>2. Stabilisation des briques en terre crue pour la construction :</u>	24
<u>2.1. Ajout de chaux :</u>	24
<u>2.2. Ajout de ciment :</u>	25
<u>3. Etat de l'art :</u>	25
<u>3.1. Stabilisation au ciment :</u>	25
<u>3.2. Stabilisation à la chaux :</u>	27
<u>Conclusion :</u>	28
<u>CHAPITRE II : MATIREAUX ET METHODES EXPREMENTALES:</u>	30
<u>Introduction :</u>	30
<u>1. Matériaux :</u>	30
<u>1.1. Argile Djelfa :</u>	30
<u>2. Procédures expérimentales :</u>	31
<u>2.1. Caractérisation géotechnique :</u>	31
<u>2.1.1. Teneur en eau : (NF P94-050). [49]</u>	31
<u>2.2. Analyse granulométrique :(NF P 94-056), (NF P 94-057). [50]. [51].</u>	32
<u>2.2.1. Détermination de la masse volumique : (NF P 94-054). [52]</u>	34

2.2.2.	<u>Valeur au bleu de méthylène des sols :(NF P 11-300). [53].</u>	37
2.2.3.	<u>Détermination des limites d'Atterberg : (NF P 94-051). [56].</u>	38
2.2.4.	<u>Essai de gonflement a l'œdomètre : (XP P 94-091). [60].</u>	42
2.3.	<u>Fabrication des éprouvettes :</u>	44
2.3.1.	<u>Confection des éprouvettes :</u>	44
2.4.	<u>Caractérisation des briques :</u>	47
2.4.1.	<u>La conductivité thermique :(NF EN 12664 (2001)). [61].</u>	47
2.5.	<u>Présentation des essais mécaniques :</u>	48
2.5.1.	<u>Machine d'essais :</u>	48
2.5.2.	<u>Essais de compression :</u>	49
	<u>Conclusion :</u>	50
	<u>CHAPITRE III : CARACTERISATIONS DES MATIRIEAUX:</u>	52
	<u>Introduction :</u>	52
1.	<u>Caractérisations géotechnique du sol :</u>	52
1.1.	<u>Caractéristique physique :</u>	52
1.1.1.	<u>Essai analyse granulométrique:</u>	52
1.1.2.	<u>La teneur en eau :</u>	54
1.1.3.	<u>Limite d'Atterberg : (NF P 94-051) [56]</u>	54
1.1.4.	<u>L'essai œdométrique :</u>	57
1.2.	<u>Caractéristique chimique :</u>	58
1.2.1.	<u>Essai au bleu méthylène :</u>	58
	<u>Conclusion :</u>	59
	<u>CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS:</u>	61
	<u>Introduction :</u>	61
1.	<u>Résistance en compression :</u>	61
2.	<u>Conductivité thermique :</u>	63
3.	<u>Retrait :</u>	65
	<u>Conclusion :</u>	67
	<u>CONCLUSION GENERALE:</u>	69

Liste des figures

Chapitre 1 :

Figure 1.1 : La roue des techniques [1].....	5
Figure 1.2 : Mur en bauge [2].....	5
Figure 1.3 : Compactage des couches de terre crue à l'aide d'un psoir. [3].....	6
Figure 1.4 : Mur en pisé [4].....	6
Figure 1.5 : Mur de maison en torchis [5].....	7
Figure 1.6 : La brique de terre crue comprimée [4].....	7
Figure 1.7 : Fabrication d'adobe [6].....	8
Figure 1.8 : Mur en adobe [4].....	9
Figure 1.9 : Architecture de terre dans le monde [8].....	10
Figure1.10 : La vallée du M'Zab [9].....	12
Figure1.11 : La Casbah d'Alger [9].....	12
Figure1.12 : Les maisons traditionnelles de Timimoun [10].....	12
Figure1.13 : Les tétraèdres [15].....	15
Figure 1.14 : Les octaèdres [15].....	15
Figure 1.15 : Représentation schématique d'un feuillet de phyllosilicate 2 :1 [15].....	16
Figure 1.16 : Structure et la Morphologie des kaolinites [19] [20].....	18
Figure 1.17 : Structure et la Morphologie des Smectites [20].....	18
Figure 1.18 : Structure et la Morphologie de l'illite [22] [23].....	19
Figure 1.19 : Classification des particules solides d'un sol [24].....	19
Figure 1.20 : Définition des limites d'Atterberg et l'indice de plasticité [27].....	20
Figure 1.21 : Les grandes étapes de la fabrication du ciment [30].....	21
Figure 1.22 : Les différentes étapes de la fabrication du ciment [30].....	22
Figure 1.23 : Le cycle de la chaux [31].....	23
Figure 1.24 : Les différents types de chaux utilisée dans la construction (NF EN 459-1, 2015, p. 459) [33].....	24
Chapitre 2 :	
Figure 2.1 : Aspect visuel de l'argile utilisé.....	30
Figure 2.2 : Lieux d'extraction du sol sur la carte Géographique [46].....	30
Figure2.3 : aspect visuel du ciment utilisé.....	31

Figure 2.4 : Aspect visuel pour la chaux utilisée.....	31
Figure 2.5 : Méthode par tamisage à sec après lavage.....	33
Figure 2.6 : Méthode par sédimentation.....	34
Figure 2.7 : Essai de la densité sèche remaniée.....	35
Figure 2.8 : Aspect visuel du pycnomètre.....	36
Figure 2.9 : Essai de la méthode du pycnomètre a eau.....	36
Figure 2.10 : Aspect visuel du matériel utilisé lors de l'essai au bleu de méthylène [54].....	38
Figure 2.11 : Aspect visuel pour l'essai à la tâche [55].....	38
Figure 2.12 : L'appareil de Casagrande (NF P94-051, 1993, pp. 94–051) [57].....	40
Figure 2.13 : Aspect visuel de l'essai pour la détermination de la limite de liquidité [58]....	41
Figure 2.14 : Aspect visuel de l'essai pour la détermination de la limite de plasticité. [59]...41	41
Figure 2.15 : Préparation de l'échantillon dans la cellule œdométrique.....	43
Figure 2.16 : Immersion de la cellule œdométrique dans l'eau dans l'appareil œdométrique.....	44
Figure 2.17 : aspect visuel du mélange.....	44
Figure 2.18 : Aspect visuel de quelques mélanges effectués lors de la fabrication des éprouvettes.....	45
Figure 2.19 : Aspect visuel du mélange dans le moule utilisé.....	46
Figure 2.20 : Aspect visuel de quelques éprouvettes après démoulage.....	46
Figure 2.21 : Aspect visuel de quelques éprouvettes après séchage.....	47
Figure 2.22 : Machine du CT mètre.....	48
Figure 2.23 : Machine d'essais IBERTEST.....	48
Figure 2.24 : Essai de l'écrasement.....	49
Chapitre 3 :	
Figure 3.1 : Courbe granulométrique de l'argile.....	53
Figure 3.2 : Résultats de (WL) et (WP)%.....	55
Figure 3.3 : Diagramme de plasticité et classification des sols.....	56
Figure 3.4 : La courbe de compressibilité à l'œdomètre.....	57
Chapitre 4 :	
Figure 4.1 : Résistance en compression en fonction de pourcentage de ciment et d'eau.....	61
Figure 4.2 : Résistance en compression en fonction de pourcentage de chaux et d'eau.....	62

Figure 4.3 : Conductivité thermique (W/m*k) en fonction de pourcentage de ciment et d'eau	63
Figure 4.4 : Conductivité thermique (W/m*k) en fonction de pourcentage de chaux et d'eau.....	64
Figure 4.5 : Retrait en fonction de pourcentage de ciment et d'eau.....	65
Figure 4.6 : Retrait en fonction de pourcentage de chaux et d'eau.....	66

Liste des tableaux

Chapitre 1 :

Tableau 1.1 : La liste des sites inscrits au patrimoine mondial de l'Unesco [9].....	11
Tableau 1.2 : Classification des phyllosilicates 1 :1 et 2:1 [16].....	17
Tableau 1.3 : Synthèse bibliographique sur les briques en terre crue stabilisées au ciment (Fc: résistance à compression, n.m: non mesurée) [34].....	25
Tableau 1.4 : Synthèse bibliographique sur les briques en terre crue stabilisées à la chaux [34].....	27

Chapitre 3 :

Tableau 3.1 : Essai de analyse granulométrie par tamisage [54].....	52
Tableau 3.2 : Essai de analyse granulométrie par sédimentation [55].....	53
Tableau 3.3 : les résultats de la teneur en eau.....	54
Tableau 3.4 : Estimation de la plasticité d'un sol [66].....	54
Tableau 3.5 : Seuils de VBS correspondants à différents types de sols [57].....	58
Tableau 3.6 : Valeur VBS et le volume de bleu de méthylène introduit dans l'échantillon.....	58

Liste des abréviations

- BTC** : Brique de terre compressée.
- T** : Tétraédrique.
- SiO₄** : Silicium-oxygène.
- O** : Octaédrique
- Al** : Aluminium.
- Mg** : Magnésium.
- Fe** : Fer.
- AIPEA** : Association Internationale Pour l'Etude des Argiles
- Å** : Angströms.
- Al₂(OH)₄** : Aluminium-oxygène-hydroxyde.
- Si₂** : Deux tétraèdres de silicium-oxygène.
- WL** : Limite de liquidité
- WP** : Limite de plasticité.
- IP** : L'indice de plasticité.
- C₁₆H₁₈CIN₃S** : Bleu de méthylène.
- CaCO₃** : Calcaire.
- CaO** : La chaux vive.
- Ca(OH)₂** : La chaux éteinte.
- F_c** : Résistance à compression.
- CEB** : Compressed earth block.
- LNHC** : Laboratoire National de l'Habitat et de la construction.
- P_c** : pression de consolidation.
- C_c** : indice de compressibilité.
- C_g** : indice de gonflement.
- VBS** : Valeur d'adsorption au bleu de méthylène d'un sol.
- m₁** : la masse de la tare.
- m₂** : la masse de l'échantillon humide +tare
- W** : pourcentages d'eau.

m₁ : la masse du pycnomètre à sec.

m₂ : la masse du pycnomètre rempli d'eau.

m₃ : la masse du pycnomètre rempli d'eau et d'échantillon.

γ : masse volumique des particules solides.

λ : la conductivité thermique.

CT mètre : Current Transformer.

Na₆: sodium.

PO₃: phosphate.

10H₂O: sulfate de sodium.

CSH: silicate de calcium Hydrate.

Introduction générale

Introduction générale

La construction est un domaine qui joue un rôle crucial dans le développement de nos sociétés. Cependant, la construction traditionnelle à base de béton présente des défis importants en termes d'impact environnemental, de coûts élevés et de ressources limitées. Face à ces problématiques, de plus en plus de chercheurs et constructeurs se tournent vers des alternatives durables et écologiques, telles que les briques en terre crue stabilisée chimiquement.

Bien que la construction en béton présente de nombreux avantages des briques, elle reste très coûteuse sur le plan environnementales, la recherche d'alternative nous pousse naturellement à explorer des procédés de construction traditionnels tel la construction en terre.

Tout d'abord, elles sont fabriquées à partir de matériaux naturels, ce qui les rend écologiques et recyclables. L'extraction des matières premières nécessaires à leur fabrication est peu énergivore et ne génère pas autant de pollution que l'extraction de matériaux traditionnels tels que le ciment.

De plus, les briques en terre crue stabilisée chimiquement offrent une bonne isolation thermique, ce qui contribue à réduire les besoins en chauffage et en climatisation dans les bâtiments. Elles peuvent également réguler l'humidité à l'intérieur des structures, créant ainsi un environnement intérieur plus sain et confortable.

Enfin, les briques en terre crue stabilisée chimiquement sont économiquement avantageuses, car elles sont souvent fabriquées sur place à partir des ressources locales, réduisant ainsi les coûts de transport et de fabrication.

Cependant, il convient de noter que les briques en terre crue stabilisée chimiquement ne conviennent pas à tous les types de construction et à tous les environnements. Leur utilisation est souvent limitée aux zones où les conditions climatiques et environnementales sont favorables, et des études géotechniques et physico-chimiques approfondies doivent être réalisées pour s'assurer de leur adaptabilité à un projet spécifique.

La stabilisation chimique des briques en terre crue est une technique utilisée pour améliorer les propriétés mécaniques, durables et structurelles de ce matériau de construction. Elle consiste à ajouter des substances chimiques à la terre crue, telles que des liants ou des adjuvants, afin de renforcer sa cohésion et sa résistance. Différents types de stabilisants chimiques peuvent être utilisés, tels que les liants organiques et les liants minéraux.

Introduction générale

Notre étude a pour objectif de proposer une méthode de stabilisation de la terre crue à faible impact environnemental avec des liants minéraux tel que le ciment et la chaux. Les substances chimiques ajoutées réagissent avec les particules de terre crue pour former des liaisons chimiques qui augmentent la résistance globale de la brique et leur résistance aux intempéries. Cela permet d'obtenir des briques plus solides et plus durables, qui peuvent être utilisées dans une plus large gamme d'applications de construction.

Cette étude s'articule sur quatre chapitres à savoir :

- **Chapitre I** : nous présentons un aperçu bibliographique sur la construction en terre crue dans le monde et en Algérie ainsi que ses différentes techniques ainsi ces inconvénients et ces avantages, ensuite nous développerons sur l'adobe et sa stabilisation avec les ajouts chaux et ciment. Enfin nous terminerons ce chapitre avec la présentation de l'état de l'art de la stabilisation des briques.
- **Chapitre II** : comporte les méthodes et les procédés expérimentaux de chaque analyse chimique, thermique ainsi que les essais mécaniques.
- **Chapitre III** : est consacré aux résultats de la caractérisation physico-chimique et géotechnique de l'argile de Djelfa.
- **Chapitre IV** : est consacré aux résultats et discussions des essais thermiques et mécaniques.

Et enfin, on terminera par une conclusion générale.

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction :

La recherche de solutions de construction durables, économiquement abordables et respectueuses de l'environnement est devenue une préoccupation majeure dans le secteur de la construction. Dans ce contexte, l'utilisation de matériaux de construction traditionnels, tels que les briques en terre crue, a suscité un regain d'intérêt en raison de leur faible impact environnemental et de leur disponibilité locale. Cependant, leurs performances mécaniques et la durabilité de ces briques peuvent être considérées comme étant faibles, de nombreux chercheurs se sont intéressés pour l'améliorer avec de différentes techniques (pisé, Adobe, torchis...), la stabilisation chimique est souvent utilisée, tout en impliquant l'ajout de substances chimiques (chaux, ciment), pour renforcer les propriétés de la brique crue, tout en conservant ses avantages intrinsèques.

1. La terre crue :

1.1. Construction en terre crue :

La construction en terre crue, également connue sous le nom d'architecture en terre, est une technique de construction ancienne et durable qui utilise de la terre non transformée pour ériger des structures. Elle est pratiquée dans de nombreuses régions du monde depuis des milliers d'années.

1.1.1. Les différents types de construction :

Parmi les douze méthodes géotechniques, il existe quatre principales :

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

➤ Le pisé :

Le pisé est une technique de construction ancienne qui consiste à compacter de la terre humide entre des coffrages en bois pour former des murs solides et durables.

La construction en pisé se fait par l'ajout successif de couches de terre humide à l'intérieur des coffrages. Chaque couche est tassée de manière rigoureuse à l'aide d'un outil appelé "Pisoir", qui permet de compacter la terre et d'éliminer les vides. Les couches sont ajoutées progressivement jusqu'à ce que le mur atteigne la hauteur désirée.



Figure 1.3 : Compactage des couches de terre crue à l'aide d'un pisoir [3]



Figure 1.4 : Mur en pisé [4]

➤ Le torchis :

Le torchis est une technique traditionnelle de construction en terre crue qui consiste à utiliser un mélange de terre, de paille et parfois d'autres fibres végétales pour créer des murs. Il a été largement utilisé à travers le monde pendant des siècles et continue d'être utilisé dans certaines régions pour des constructions durables et écologiques.

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE



Figure 1.5 : Mur de maison en torchis [5]

➤ **La brique de terre comprimée :**

La brique de terre comprimée, également appelée brique de terre compressée ou BTC, est un matériau de construction fabriqué à partir de terre crue mélangée à une petite quantité de liant. Elle est utilisée pour la construction de murs dans des structures durables et respectueuses de l'environnement.



Figure 1.6 : La brique de terre crue comprimée [4]

➤ **L'adobe :**

L'adobe, également connue sous le nom de brique non cuite ou brique de terre crue, fabriquées à partir de terre mélangée à des ajouts minéraux (ciment, chaux), de la paille ou à d'autres fibres végétales et à de l'eau. Ce mélange est ensuite moulé dans des moules pour donner aux briques leur forme caractéristique, souvent rectangulaire. Contrairement aux briques cuites traditionnelles, qui nécessitent une cuisson à haute température, les briques crues sont simplement séchées à l'air libre.

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE



Figure 1.7 : Fabrication d'adobe [6]

- **Domaine d'utilisation de l'adobe :**

L'adobe, est utilisé dans divers domaines de construction, notamment :

- **Habitats résidentiels :** L'adobe est souvent utilisé pour construire des maisons et des habitations résidentielles. Il peut être façonné en blocs d'adobe, qui sont ensuite utilisés pour ériger les murs de la structure. Les maisons en adobe offrent une esthétique naturelle et peuvent être conçues dans différents styles architecturaux.
- **Bâtiments communautaires :** Les bâtiments communautaires tels que les écoles, les centres de santé, les centres culturels et les bâtiments publics peuvent également être construits en adobe.
- **Structures défensives :** Dans certaines régions, l'adobe est utilisé pour construire des fortifications ou des murs de défense.

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE



Figure 1.8 : Mur en adobe [4]

- **Les étapes de production de l'adobe :**

- Extraction de la terre.
- Préparation de la terre : broyages, tamisage.
- Préparation du mélange.
- Moulage des briques.
- Séchage des briques : sécher à l'air libre pendant une période prolongée.
- Finition des briques.
- Construction : utilisées pour la construction des murs.

- **Les différentes techniques de réalisation :**

- Brique d'adobe moulée et comprimée à la main : Cette méthode implique l'utilisation d'un moule plus petit et de forme régulière. La terre est tassée plus fermement dans le moule à l'aide d'un outil de compactage manuel, ce qui permet d'obtenir une densité plus élevée et des briques plus résistantes. Cette technique est couramment utilisée pour les briques stabilisées à la chaux ou au ciment.
- Brique d'adobe comprimée mécaniquement : Cette méthode utilise des presses hydrauliques pour comprimer le mélange de terre dans des moules. Les presses hydrauliques permettent d'obtenir une compression plus uniforme et plus élevée, ce qui donne des briques de forme régulière et de taille standard. Cette technique est utilisée pour la fabrication de blocs de terre comprimée (BTC) qui ont une densité et une résistance plus élevées.

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

- **La comparaison entre l'adobe et les autres matériaux :**

- Durabilité : Les briques en terre crue sont naturellement moins durables que les briques cuites, le béton ou le ciment. Elles sont plus sensibles à l'usure due à l'eau, au gel et au vent.
- Résistance au feu : Les briques en terre crue ont une résistance au feu relativement faible par rapport aux briques cuites et au béton.
- Impact environnemental : L'adobe est considéré comme un matériau de construction écologique car il est fabriqué à partir de ressources naturelles abondantes. Il nécessite moins d'énergie pendant le processus de fabrication par rapport à la production de briques cuites ou de béton.
- Coût : En général, la brique en terre crue est moins coûteuse que les briques cuites, le béton et le ciment.

1.2. La construction de terre crue dans le monde :

Sur tous les continents et sous tous les climats, on trouve des exemples de construction en terre, allant des plus simples aux plus élaborés. 175 sites entièrement ou partiellement construits avec ce matériau sont classés par l'Unesco au patrimoine culturel mondial, démontrant la durabilité de ce mode de construction. [7]



Figure 1.9 : Architecture de terre dans le monde [8]

La construction en terre crue est présente dans de nombreuses régions du monde et a une longue histoire dans diverses cultures. Voici quelques exemples notables d'architecture de terre à travers le monde :

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau 1.1 : La liste des sites inscrits au patrimoine mondial de l'Unesco [9]

Sites	Photos
La grande mosquée de Djenné, au Mali (bâtie en 1907).	
La vieille ville de Shibām au Yémen. (Cette ville du XVIe siècle).	
Les maisons traditionnelles du village de Shirakawa-go.	

1.3. La construction en terre crue en Algérie :

La construction en terre crue, ou architecture en terre, a une longue histoire en Algérie. Elle est utilisée depuis des siècles et continue d'être utile dans certaines régions du pays, en particulier dans les zones rurales.

Bien que ces sites ne soient pas tous inscrits sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO. Voici quelques-uns des sites de construction en terre crue en Algérie.

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE



Figure 1.10 : La vallée du M'Zab [9]



Figure 1.11 : La Casbah d'Alger [9]

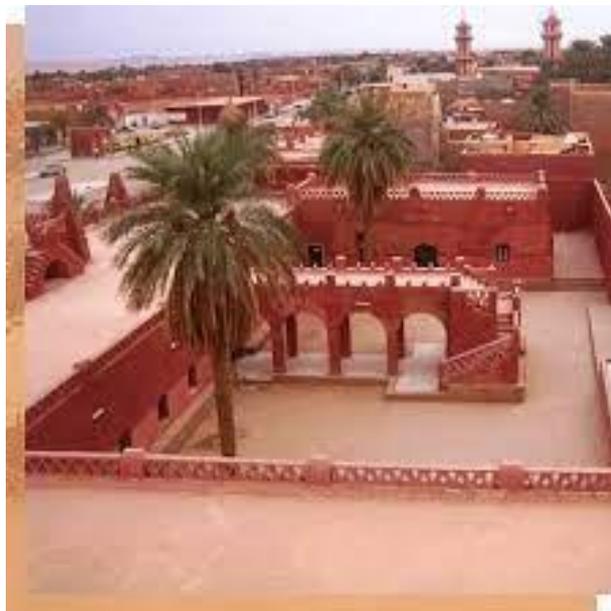


Figure 1.12 : Les maisons traditionnelles de Timimoun [10]

1.4. Les avantages de la construction en terre crue :

La terre crue est une méthode de construction durable et écologique qui offre de nombreux avantages sont les suivants :

➤ Les avantages écologiques :

-Matériau naturel et renouvelable : La terre crue est un matériau naturel et renouvelable. Elle est généralement extraite localement, réduisant ainsi la dépendance aux matériaux de construction industriels et leur transport associé, ce qui contribue à réduire l'empreinte carbone.

-Faible énergie embarquée : La production de terre crue requiert très peu d'énergie par rapport à la fabrication d'autres matériaux de construction tels que le ciment, l'acier ou les briques cuites. Cela permet de minimiser les émissions de gaz à effet de serre associées à la production des matériaux de construction.

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

-Régulation thermique naturelle : La terre crue a une capacité thermique élevée, ce qui signifie qu'elle peut stocker la chaleur pendant la journée et la libérer lentement pendant la nuit, contribuant ainsi à une régulation naturelle de la température intérieure.

-Isolation thermique : La terre crue possède également de bonnes propriétés isolantes. Les murs en terre crue peuvent aider à maintenir une température intérieure confortable, réduisant ainsi les besoins en chauffage ou en climatisation et les émissions de gaz à effet de serre associées.

➤ **Les avantages techniques de l'habitat en terre :**

L'habitat en terre crue présente plusieurs avantages techniques, notamment :

- Un excellent hygromètre ordinaire.
- Disponibilité des matériaux : La terre crue est un matériau de construction largement disponible et abondant dans de nombreuses régions du monde. Cela rend la construction en terre crue économiquement avantageuse, car les matériaux sont souvent peu coûteux voire gratuits, ce qui réduit les dépenses de construction.
- Durabilité : Les structures en terre crue peuvent être très durables lorsqu'elles sont correctes.

➤ **Les avantages économiques :**

La terre crue est considérée comme économique pour plusieurs raisons :

- Coût abordable : La terre crue est généralement bon marché par rapport à d'autres matériaux de construction tels que le béton, les briques ou le bois. Il peut souvent être trouvé localement et est moins cher à extraire et à transformer que de créer des matériaux synthétiques. [11]
- Disponibilité local : La terre crue est un matériau abondant dans de nombreuses régions du monde. Les coûts associés au transport et à l'approvisionnement en matériaux de construction peuvent être réduits en utilisant les ressources disponibles localement. [12]

1.5. Les inconvénients de la construction en terre crue :

- Sensibilité à l'eau : La terre crue est sensible à l'eau et peut se désagréger ou se détériorer si elle est exposée à des conditions d'humidité excessive.
- Faible résistance aux séismes : Les constructions en terre crue sont généralement moins résistantes aux séismes que les structures en béton armé ou bien en acier. Bien qu'il soit possible de renforcer la résistance sismique des structures en terre crue en utilisant des techniques spécifiques, elles restent généralement plus vulnérables aux tremblements de terre.

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

-Entretien régulier : Les bâtiments en terre crue prévoient un entretien régulier pour prévenir les dommages causés par les intempéries et l'érosion. Les enduits de protection doivent être entretenus et refaits périodiquement pour assurer la durabilité de la structure.

-Limitations architecturales : La construction en terre crue peut limiter les possibilités architecturales en termes de forme, de taille et de conception des bâtiments. Les techniques de construction traditionnelles en terre peuvent restreindre la flexibilité créative par rapport à d'autres matériaux de construction modernes.

1.6. Les argiles comme matériau de construction :

Les argiles sont largement utilisées comme matériau de construction, en particulier dans la construction en terre crue.

1.6.1. Définition :

Les argiles sont une catégorie de particules présentes dans le sol, caractérisées par leur taille inférieure à 0,002 mm (ou 2 μm). Ces particules sont trop petites pour être visibles à l'œil nu ou même au microscope optique. Ainsi, la sédimentométrie est utilisée pour évaluer la quantité de particules dans un sol et déterminer leur nature en utilisant des méthodes basées sur la diffraction des rayons X.

La nature des argiles a une influence significative sur les propriétés mécaniques des sols, notamment leur comportement vis-à-vis de l'eau. Les argiles représentent la fraction la plus fine des sols, tandis que la fraction la plus grossière est appelée "squelette" et comprend les pierres et les blocs. Entre ces deux extrêmes se situent les fractions des limons ou silts, des sables et des graviers.

La fraction fine des sols, dimensions :

- Argiles : < 0.002 mm.
- Limons ou silts : de 0.002 mm à 0.063 mm.
- Fraction fine des sols : souvent < 0.006 mm - argiles et limons fins. [13]

1.6.2. Types structuraux et classification des argiles :

➤ Phyllosilicates :

Les phyllosilicates, également appelés silicates en feuillets, sont un groupe de minéraux appartenant à la classe des silicates. Leur nom vient du grec "phyllo", qui signifie "feuille", en référence à leur structure en couches ou en feuillets.

➤ Structure des phyllosilicates :

Les différents minéraux argileux se distinguent par un agencement de deux couches :

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

- La couche tétraédrique, souvent notée T ou Te, fait référence à la couche constituée de tétraèdres de silicium-oxygène (SiO_4) dans la structure des phyllosilicates. [14]

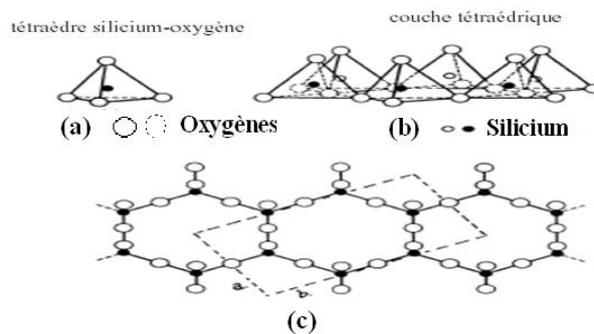


Figure 1.13 : les tétraèdres [15]

- La couche octaédrique, souvent notée O ou Oc, fait référence à la couche constituée d'octaèdres de cations métalliques dans la structure des phyllosilicates. Ces octaèdres sont composés d'oxygène et de cations métalliques, tels que l'aluminium (Al), le magnésium (Mg) ou le fer (Fe). [14]

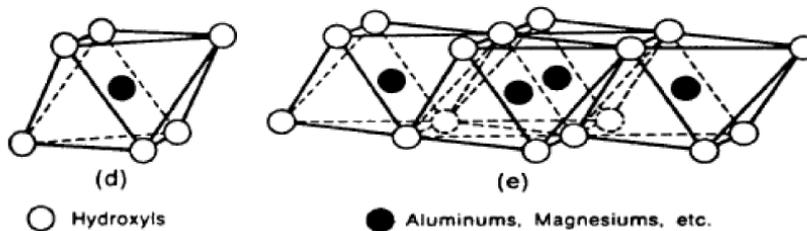


Figure 1.14 : les octaèdres [15]

➤ Classification des phyllosilicates :

La classification des phyllosilicates en 1 : 1 et 2 : 1 est une catégorisation basée sur la structure et la composition des minéraux phyllosilicates, qui sont des argiles à structure en feuillets. Cette classification a été développée par l'AIPEA (1966-1972) et Pédro (1994) ont permis d'aboutir à une classification qui repose sur l'utilisation des critères suivants :

- Type de feuillets 2 : 1 ou 1 : 1 ;
- Charge globale du feuillet ;
- Nature des cations interfoliaires. [16]

Les principaux groupes de phyllosilicates selon cette classification :

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

- Phyllosilicates 1:1 ou T:O : Les phyllosilicates 1:1 sont des argiles à structure en feuillets où chaque feuillet est composé d'une couche de tétraèdres de silice (SiO_4) liée à une couche d'octaèdres d'alumine (AlO_6). [17]
- Phyllosilicates 2:1 ou T:O:T : Les phyllosilicates 2:1 sont des argiles à structure en feuillets où chaque feuillet est composé de deux couches de tétraèdres de silice liées à une couche centrale d'octaèdres d'alumine. [17]

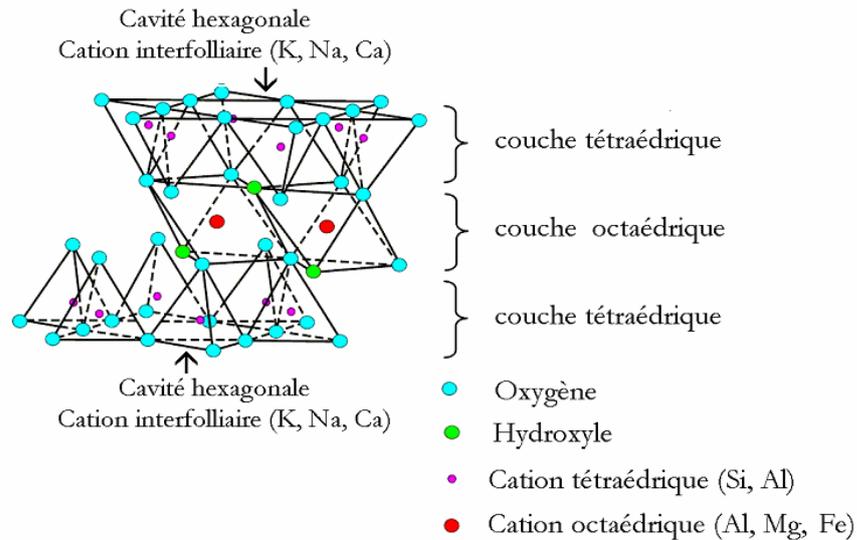


Figure 1.15 : Représentation schématique d'un feuillet de phyllosilicate 2 : 1 [15]

- Il existe différentes classifications des argiles. La plus classique est basée sur l'épaisseur et la structure du feuillet. On distingue ainsi 4 groupes:

Minéraux à 7 Å: Le feuillet est constitué d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique. Il est qualifié de T:O ou de type 1:1. Son épaisseur est d'environ 7 Å.

Minéraux à 10 Å: Le feuillet est constitué de deux couches tétraédriques et d'une couche octaédrique. Il est qualifié de T:O:T ou de type 2:1. Son épaisseur est d'environ 10 Å.

Minéraux à 14 Å: Le feuillet est constitué de l'alternance de feuillets T:O:T et de couches octaédriques interfoliaires.

Minéraux interstratifiés: L'épaisseur du feuillet est variable. Ces minéraux résultent du mélange régulier ou irrégulier d'argiles appartenant aux groupes ci-dessus. [16]

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau 1.2 : Classification des phyllosilicates 1 :1 et 2:1 [16]

Feuillet	Charge par maille	Dioctaédriques	Trioctaédriques
1: 1	0	Kaolinite (Si ₄)(Al ₄)O ₁₀ (OH) ₈	Antigorite (Si ₄)(Mg ₃)O ₁₀ (OH) ₈
	#0		Berthierines (Si _{4-x} Al _x)(Mg _{2+6x} M _{3+x})O ₁₀ (OH) ₈
	#0	Pyrophyllite (Si ₈)(Al ₄)O ₂₀ (OH) ₄	Talc (Si ₈)(Mg ₆)O ₂₀ (OH) ₄
2: 1	0.4 à 1.2	SMECTITES	
		Montmorillonite (Si ₈)(Al _{4-y} Mg _y)O ₂₀ (OH) ₄ ,M _y + Beidellite (Si _{8-x} Al _x)Al ₄ O ₂₀ (OH) ₄ ,M _x +	Hectorite (Si ₈)(Mg _{6-y} Li _y)O ₂₀ (OH) ₄ M _y + Saponite (Si _{8-x} Al _x)(Mg ₆)O ₂₀ (OH) ₄ ,M _x +
	1.2 à 1.8	Illites (Si _{8-x} Al _x)(Al _{4-y} M _{2+y})O ₂₀ (OH) ₄ K _{x+y}	Vermiculites (Si _{8-x} Al _x)(Mg _{6-y} M _{3+y})O ₂₀ (OH) ₄ K _{x-y}
		MICAS	
	2	Muscovite (Si ₆ Al ₂)(Al ₄)O ₂₀ (OH) ₂ K ₂ +2	Phlogopite (Si ₆ Al ₂)(Mg ₆)O ₂₀ (OH) ₂ K ₂ +2
	4	Margarite (Si ₄ Al ₄)(Al ₄)O ₂₀ (OH) ₂ Ca ₂ +2	Clintonite (Si ₄ Al ₄)(Mg ₆)O ₂₀ (OH) ₂ Ca ₂ +2

1.6.3. Les différents types d'argiles :

Parmi les argiles phylliteuses citées dans (le tableau 1.2), les trois familles les plus importantes et les plus couramment rencontrées sont les kaolinites, les illites et les smectites.

- Les kaolinites :

La kaolinite présente une structure cristalline de type dioctaédrique, ce qui signifie que chaque demi-maille contient deux octaèdres d'aluminium-oxygène-hydroxyde (Al₂(OH)₄) et deux tétraèdres de silicium-oxygène (Si₂). Cette structure confère à la kaolinite sa stabilité et sa faible capacité d'expansion ou de contraction en réponse à l'humidité.

Les limites des feuillets empilés correspondent à des plans distants d'environ 7.1Angströms. [18].

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

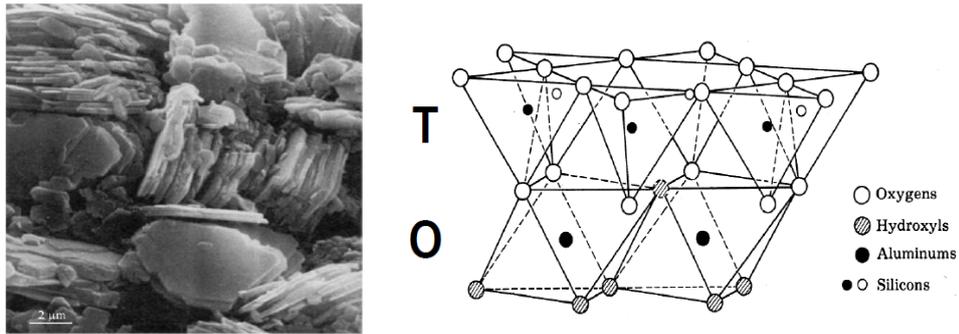


Figure 1.16 : Structure et la Morphologie des kaolinites [19] [20]

- Les smectites :

La montmorillonite est en effet un exemple courant de smectite, et elle est souvent considérée comme un minéral 2:1. Ce qui signifie qu'elles sont composées de deux couches tétraédriques de silicium-oxygène encadrant une couche octaédrique d'aluminium-oxygène-hydroxyde.

La structure de la montmorillonite est composée de deux feuillets de silice (tétraédrique) et d'un feuillet d'aluminium (octaédrique). Chaque couche 2:1 a une épaisseur d'environ 10 Å (1 nm). Les sommets des feuillets de silice sont reliés par de faibles forces de van der Waals, ce qui permet aux ions échangeables de pénétrer dans la structure et de séparer les couches. [16]

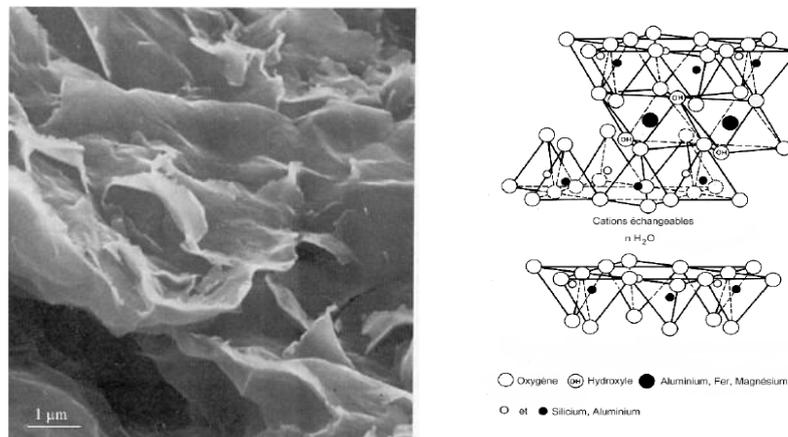


Figure 1.17 : Structure et la Morphologie des Smectites [20]

- Les illites :

Les illites sont en effet des minéraux argileux caractérisés par une structure de feuillet de type 2/1. Cela signifie qu'ils sont constitués de deux couches tétraédriques de silicium-oxygène encadrant une couche octaédrique d'aluminium-oxygène-hydroxyde.

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Une caractéristique importante des illites est leur équidistance basale stable à environ 10 Å (angstroms). Cela signifie que la distance entre les feuillets des illites est relativement constante, ce qui leur confère une certaine stabilité structurale. [21]

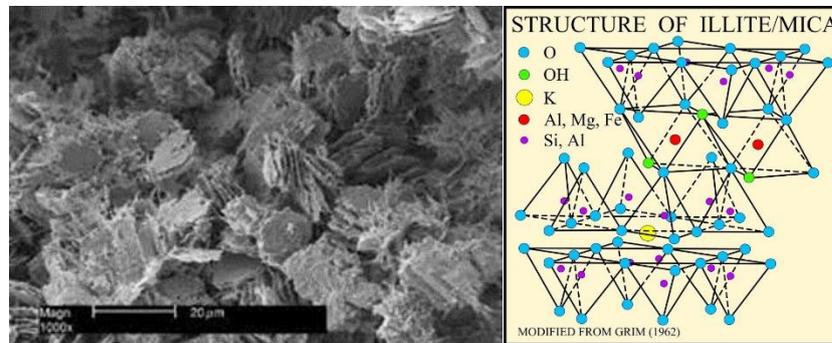


Figure 1.18 : Structure et la Morphologie de l'illite [22][23]

1.6.4. Propriétés et classification des argiles :

➤ Granulométrie :

La granulométrie des sols est une mesure de la distribution des différentes tailles de particules présentes dans un sol. Elle est utilisée pour caractériser les propriétés physiques et hydrauliques du sol, ainsi que pour déterminer sa classification selon les normes géotechniques.

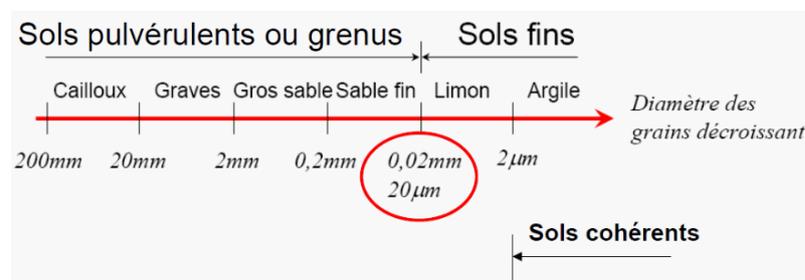


Figure 1.19 : Classification des particules solides d'un sol [24]

Pour effectuer une analyse granulométrique d'un sol, on utilise généralement la méthode du tamisage combinée à la méthode de sédimentation.

➤ La plasticité :

La plasticité est une propriété des sols, en particulier des sols fins comme l'argile, qui leur permet de se déformer sans se rompre lorsqu'ils sont soumis à des contraintes. C'est une caractéristique importante à considérer dans les domaines de la géotechnique et de l'ingénierie civile, car elle influence le comportement et la stabilité des structures construites sur des sols plastiques.

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

La limite d'Atterberg, la limite de liquidité WL et la limite de plasticité WP sont des indicateurs de plasticité couramment utilisés. [25]

D'une manière générale, de bons sols constructibles avec un indice de plasticité (IP) entre 16% et 28% et une limite de liquidité (WL) entre 32% et 46%. [26]

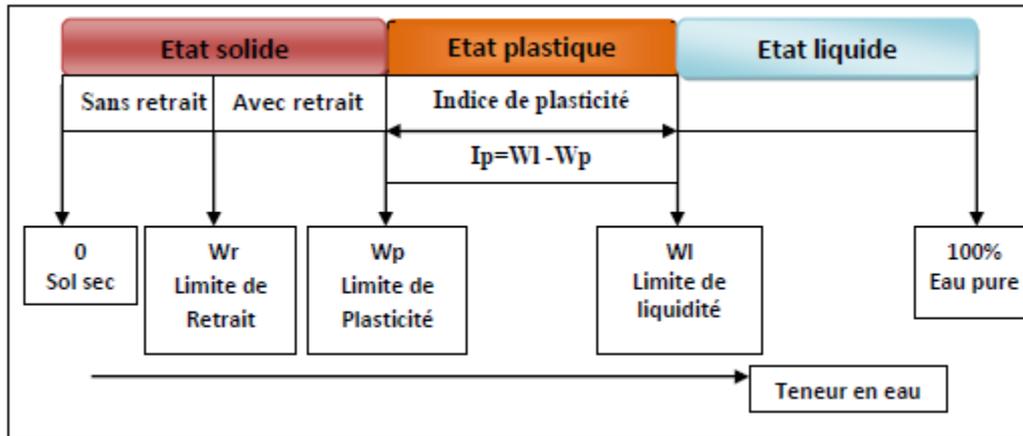


Figure 1.20 : Définition des limites d'Atterberg et l'indice de plasticité [27]

➤ 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. Elle comporte essentiellement la surface externe qui est comprise entre les particules argileuses et la surface interne correspondante à l'espace interfoliaire. Ce dernier est adsorbé par les surfaces des argiles qui sont chargées négativement. [28]

1.7. Les liants minéraux comme ajout dans la fabrication des briques crues :

Les liants minéraux sont des matériaux très finement broyés. Lorsqu'ils sont mélangés à de l'eau, ils se transforment en une pâte épaisse qui durcit progressivement en une pierre artificielle.

Dans la construction, les liants minéraux sont mélangés à de l'eau et/ou des granulats (sable, gravier, cailloux) pour faire du coulis ou du mortier ou encore du béton. Certains adhésifs sont connus pour durcir uniquement à l'air, tandis que d'autres durcissent dans des environnements humides ou dans l'eau. Cette propriété permet de classer les liants minéraux comme : [29]

- **Liants aériens** : ne durcissent qu'à l'air et conservent leurs propriétés mécaniques (ex. chaux grasse, gypse). [29]

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

- **Liants hydrauliques** : durcissent non seulement à l'air mais aussi à l'eau (ex. chaux hydraulique, ciment Portland...) et conservent leurs propriétés mécaniques. [29]

Les liants les plus couramment utilisés dans les travaux de terrassement sont le ciment et la chaux.

1.7.1. Ciment :

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire que lorsqu'il est mélangé à de l'eau, il forme une pâte qui prend et durcit (hydraulique). Il est utilisé sous forme de poudre pour fabriquer du béton ou du mortier.

Le ciment ordinaire est composé d'un mélange d'environ 80 % de calcaire et de 20 % d'argile qui est progressivement chauffé à environ 1450°C puis refroidi brusquement. Au cours de ces manipulations, plusieurs réactions chimiques se succèdent. Le résultat est le clinker, qui est mélangé avec du gypse et éventuellement d'autres produits, puis finement broyé pour donner du ciment. [30]



Figure 1.21 : Les grandes étapes de la fabrication du ciment [30]

➤ Fabrication du ciment :

La matière première (Calcaire + argile).

Broyage → farine.

Cuisson → clinker + Gypse + (ajouts) et broyage → ciment souhaité selon l'ajout additionné.

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

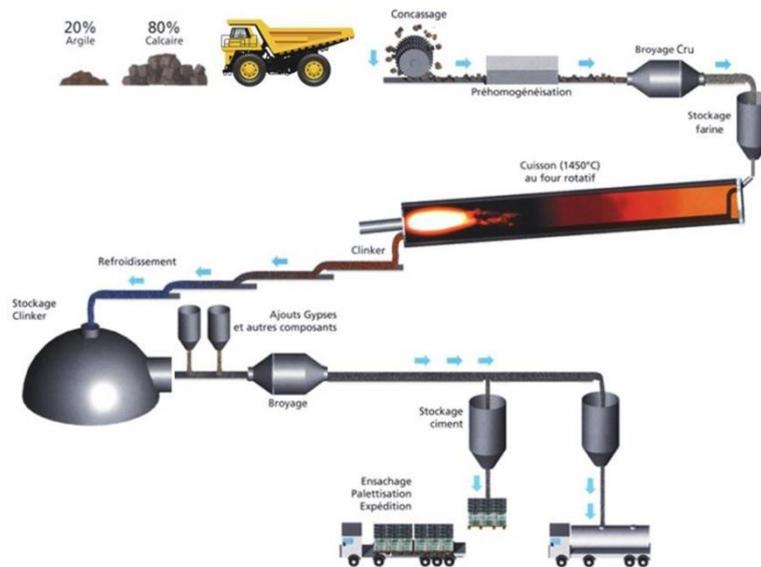


Figure 1.22 : Les différentes étapes de la fabrication du ciment [30]

➤ Les différents types de ciments : [30]

Il existe plusieurs types de ciments couramment utilisés dans l'industrie de la construction. Voici les principaux types de ciments :

- Le ciment Portland : CEM I

Il contient au moins 95% de clinker et au plus 5% de constituants secondaires.

- Le ciment Portland composé : CEM II/A ou B

Il contient au moins 65% de clinker et au plus 35% d'autres constituants : laitier de haut fourneau, fumée de silice, pouzzolane, cendres volantes, calcaires, constituants secondaires.

- Le ciment de haut fourneau :

CEM III/A ou B : contient entre 36 et 80% de laitier et 20 à 64% de clinker.

CEM III/C : contient au moins 81% de laitier et 5 à 19% de clinker.

- Le ciment pouzzolanique : CEM IV/A ou B

Il contient 45 à 89% de clinker et 11 à 55% de pouzzolanes.

- Le ciment composé : CEM V/A ou B

Il contient 20 à 64% de clinker, 18 à 49% de laitier et 18 à 49% de cendres volantes ou de pouzzolanes.

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

1.7.2. La chaux :

Le terme "chaux" fait référence aux produits dérivés du calcaire, y compris la chaux vive et la chaux éteinte. Le calcaire est une pierre naturelle qui contient des quantités importantes de carbonates de calcium et/ou de magnésium. Le calcaire est extrait de carrières et de mines du monde entier. [31]

- **Le cycle de la chaux :**

Les produits dérivés du calcaire (CaCO_3) ont une capacité de transformation unique pour retrouver leur forme d'origine. Le cycle de la chaux consiste à brûler du calcaire pour former de la chaux vive (CaO). La chaux éteinte (Ca(OH)_2) peut alors être produite en ajoutant de l'eau à la chaux vive. Dans cet état, le gaz carbonique de l'atmosphère ou des procédés industriels peut réagir avec la chaux éteinte et la retransformer en calcaire. Cette réponse représente la première réaction de durcissement d'un mortier dans l'histoire. Ce cycle continu s'appelle le cycle de la chaux. Le temps nécessaire à la chaux pour revenir à son état calcaire peut aller de quelques minutes avec l'aide de procédés industriels à des années si elle est laissée dans des conditions atmosphériques. [31]

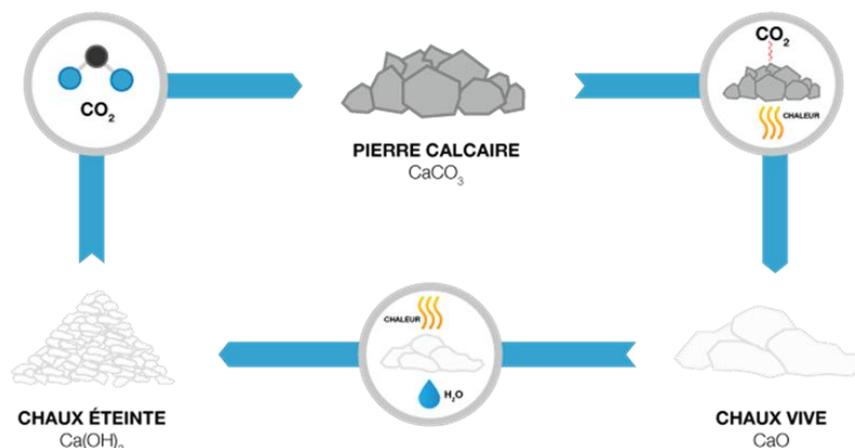


Figure 1.23 : Le cycle de la chaux [31]

- **Les différents types de chaux :** [32]

Il existe plusieurs types de chaux, chacun ayant ses propres caractéristiques et applications spécifiques. Voici les principaux types de chaux :

- **Chaux aérienne** : Fabriqué à partir de calcaire très pur, utilisé de préférence pour la stabilisation.
- **la chaux hydraulique** : similaire au ciment, déconseillée pour la stabilisation, même si la chaux naturelle a une plus grande stabilité que la chaux artificielle.

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

- **Chaux agricole** : utilisable en fertilisation, pas d'effet stabilisant.
- **Dolomite Lime** : Contient du magnésium et peut être utilisé pour la stabilisation mais réagit très lentement.

La chaux aviation est la plus intéressante dans le domaine de la construction. Ils sont divisés en deux catégories selon leur état d'hydratation :

- **Chaux vive (CaO)** : produite par cuisson de calcaire. Il réagit directement avec l'eau par une réaction exothermique jusqu'à 150°C pour former de la chaux éteinte qui nécessite un stockage particulier. A qualité égale, elle est plus efficace que la chaux éteinte.
- **Chaux éteinte (Ca(OH)₂) ou pierre de silicate** : Plus facile à travailler que la chaux vive et plus couramment utilisée pour la stabilisation.

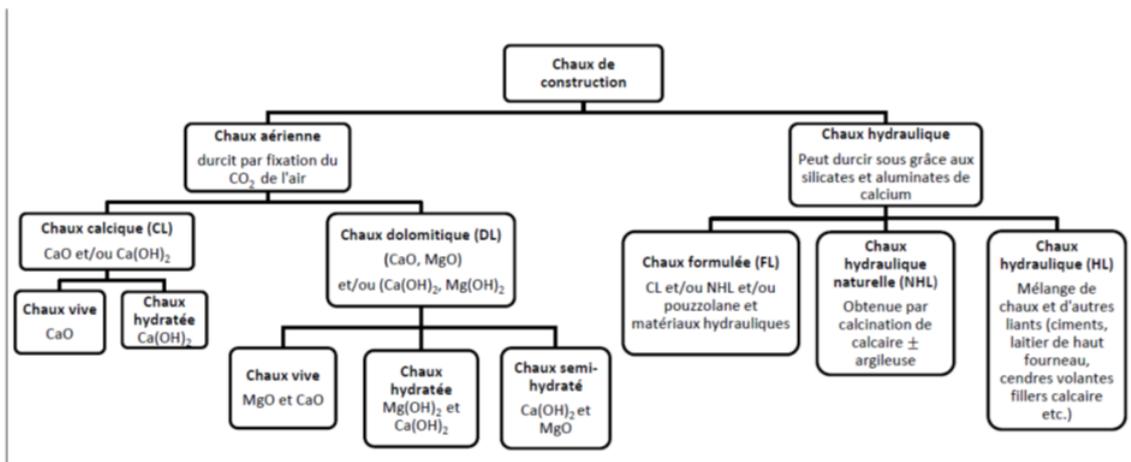


Figure 1.24 : Les différents types de chaux utilisée dans la construction (NF EN 459-1, 2015, p. 459) [33]

2. Stabilisation des briques en terre crue pour la construction :

Les liants minéraux couramment utilisés dans la stabilisation des briques en terre crue comprennent le ciment, la chaux et les mélanges de chaux-ciment. Ces liants réagissent chimiquement avec les particules de terre crue, formant des liaisons qui améliorent les propriétés mécaniques de la brique.

2.1. Ajout de chaux :

La chaux est souvent ajoutée à la terre crue pour améliorer sa résistance et sa durabilité. La chaux aérienne ou la chaux hydraulique peuvent être mélangées avec la terre crue. Lorsque la chaux réagit avec l'eau présente dans le sol, elle provoque une réaction chimique appelée carbonatation, qui renforce le matériau et améliore sa résistance à l'eau.

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

2.2. Ajout de ciment :

L'ajout de ciment à la terre crue est une autre méthode courante de stabilisation. Le ciment est un liant hydraulique qui réagit avec l'eau pour former une matrice solide, ce qui augmente la résistance et la durabilité du matériau. Cependant, l'ajout de ciment peut réduire la perméabilité de la terre crue, ce qui peut entraîner des problèmes d'humidité.

3. Etat de l'art :

3.1. Stabilisation au ciment :

La stabilisation de la terre crue est une technique utilisée dans la construction pour renforcer les propriétés de la terre crue et la rendre plus adaptée à un usage structurel. La chaux et le ciment sont deux agents de stabilisation couramment utilisés dans la fabrication de briques en terre crue. On cite quelques études déjà effectués :

Tableau 1.3 : Synthèse bibliographique sur les briques en terre crue stabilisées au ciment

(Fc: résistance à compression, n.m: non mesurée) [34]

Reference	Type	Elancement	Temps de cure (j)	Ciment (%)	Fc (MPa)
(Bahar et al., 2004) [35]	BTC	1	28	0	1.6
				4	2.3
				6	3.2
				8	4.0
				10	4.1
				12	5.2
				15	6.1
(Alavéz Ramírez et al.,2012) [36]	BTC	1	28	0	0.6
				10	23.5
(Medjo Eko et al., 2012) [37]	BTC	0.2	28	0	1.0
				4	3.0
				7	10.4
				10	11.6
(Lima et al.,2012) [38]	BTC	1	28	0	n.m.
				6	0.7
				12	3.1
(Eires et al., 2014) [39]	BTC	1.2	56	0	1.0
				4	1.5
(Alam et al., 2015) [40]	BTC	1	Pas de Cure	0	1.0
				5	1.0
				7	1.3
				10	2.0

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

(Seco et al., 2017) [41]	BTC	1.2	28	0	n.m.
				10	11-14
(Tran et al., 2018) [42]	BTC	2	28	0	0.6
				4	1.5
				8	5.6
				12	6.0
(Sore et al., 2018) [43]	BTC	n.m	21	0	1.4
				8	8.2
(Dao et al., 2018) [44]	Adobe	1	Pas de cure	0	2.2
				2	2.6
				4	2.8
				8	3.0
				12	3.2

Les données présentées dans le (tableau 1.3) mettent en évidence que l'ajout de ciment a un effet limité sur l'augmentation de la résistance en compression, à l'exception de l'étude menée par (Alavéz-Ramírez et al., 2012). Dans cette étude, l'ajout de 10% de ciment permet de passer d'une résistance en compression de 0,6 à 23,5 MPa. Cependant, les autres études ont montré des augmentations beaucoup plus faibles. Par exemple, dans les études de (Alam et al., 2015) et (Dao et al., 2018), les résistances passent respectivement de 1,0 MPa à 2,0 MPa avec 10% de ciment et de 2,2 MPa à 3,2 MPa avec 12% de ciment. Dans ces deux études, l'absence de cure humide peut expliquer la faiblesse des résistances en compression. Un autre exemple est celui de (Bahar et al., 2004), où la résistance passe de 1,6 MPa à 6,4 MPa avec 20% de ciment. Certaines de ces valeurs très faibles de résistance soulèvent des questions, car il est courant d'obtenir des résistances en compression supérieures à 2 MPa avec des briques de terre crue fabriquées à partir de terres suffisamment argileuses, comme l'ont démontré les travaux de (Aubert et al., 2016). Par exemple, dans leur étude sur des briques extrudées non stabilisées, ils ont obtenu des résistances en compression de 5,5 MPa et 7,5 MPa pour des ratios respectifs de 2 et 1. La faible augmentation des résistances en compression malgré l'ajout de ciment, parfois en quantités importantes, confirme les conclusions de l'article de Van Damme et Houben (Van Damme et al., 2017). [34]

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

3.2. Stabilisation à la chaux :

Tableau 1.4 : Synthèse bibliographique sur les briques en terre crue stabilisées à la chaux [34]

Reference	Type	Elancement	Durée de cure (j)	Type de chaux	Chaux (%)	Fc (MPa)
(Millogo et al., 2008) [45]	Adobe	1	Pas de Cure	Mélange de chaux vive et de chaux hydratée	0	2.3
					4	3.2
					6	3.3
					8	3.4
					10	3.5
					12	3.2
(Alavéz Ramírez et al., 2012) [36]	CEB	1	28	Chaux hydratée	0	0.6
					10	16.5
(Eires et al., 2014) [39]	CEB	1.2	56	Chaux vive	0	1.0
					4	0.8
					4	1.9
(Alam et al., 2015) [40]	CEB	1	Pas de cure	Non spécifié	0	1.0
					5	0.6
					7	0.8
					10	1.3
(Seco et al., 2017) [41]	CEB	1.2	28	Chaux hydraulique naturelle (NHL-5)	0	n.m
					10	4,5-5,5

Les résultats obtenus dans l'étude de (Alavéz-Ramírez et al., 2012) révèlent que les résistances en compression sèche des échantillons contenant 10% de chaux sont remarquablement élevées par rapport à d'autres études (16,5 MPa à 28 jours), tout comme les résistances des échantillons contenant 10% de ciment. Cependant, dans les autres études, une augmentation de la résistance en compression sèche est observée de manière négligeable, indépendamment de la teneur en chaux utilisée (jusqu'à 12%) et du type de chaux utilisée (y compris les chaux hydrauliques). [34].

4. D'après Kouka Amed Jérémy Ouedraogo.2019 [34], a utilisé des liants minéraux tels que le ciment et la chaux et liant organique pour stabiliser la terre crue. Cette étude vise à proposer une stabilisation de la terre crue avec un compromis optimal entre performances mécaniques, tenue à l'eau et impact environnemental. Le liant organique, ainsi que le ciment et

CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

la chaux, ont été variée entre [0% ; 4%]. Les résultats montrent que la cure est nécessaire pour garantir l'efficacité des liants minéraux, et que l'augmentation de la densité de fabrication améliore considérablement la stabilisation. Les propriétés du sol à stabiliser ont également une influence, avec une amélioration plus importante des résistances à la compression à l'état sec pour le sol à base de kaolinite et de résistances à la compression humide plus élevées pour le sol à base de montmorillonite et de chlorite. Finalement, seules les formulations contenant 4% de ciment ou liant organique, avec une densité de fabrication égale à celle du sol non stabilisé, respectent les critères de résistance définis par la norme française sur les BTC. En termes de performances hygrothermiques, l'ajout de liants réduit la capacité hygroscopique des sols tout en restant acceptable selon le critère du Nordtest, même avec une concentration de liant de 4%. Le liant organique réduit plus efficacement l'hygroscopie des sols que les autres liants. La conductivité thermique mesurée sur les mélanges ne présente pas de changement significatif par rapport à celle des sols non stabilisés. [34]

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une recherche bibliographique sur l'élaboration des briques en terre crue stabilisée chimiquement. Nous avons exploré diverses sources académiques et études spécialisées afin de comprendre les méthodes et les matériaux utilisés dans ce domaine. La recherche effectuée a mis en évidence l'importance de la stabilisation chimique pour renforcer les propriétés mécaniques de la terre crue, améliorer sa durabilité et favoriser son utilisation dans la construction durable.

La recherche effectuée dans ce chapitre nous a permis d'établir une base solide pour la suite du mémoire, d'où le chapitre suivant se portera sur les matériaux et méthodes expérimentaux que nous avons testés.

CHAPITRE II : MATÉRIAUX ET MÉTHODES ÉXPÉRIMENTALES

Introduction :

Ce second chapitre sur les matériaux et méthodes expérimentales, nous avons présenté les différentes caractérisations de l'argile utilisée pour la fabrication des briques, ainsi que les ajouts ajoutés pour améliorer sa stabilité. Nous avons également décrit les différentes étapes du processus de fabrication des briques, en mettant l'accent sur les variations des pourcentages d'eau, de chaux et de ciment.

1. Matériaux :

1.1. Argile Djelfa :

Pour notre expérience, on a utilisé l'argile de la wilaya de Djelfa, qui est une ville du centre d'Algérie, située au pied de l'Atlas saharien, à 300km au sud d'Alger.

- **Origine du sol :**

Cette argile appartient à la région de MESSAAD DJELFA (ALGERIE), briqueterie MESSAAD. L'argile de Djelfa est une argile de couleur rouge. Afin de mener l'ensemble des essais de caractérisation prescrit, on a pu avoir 10kg de cette argile.



Figure 2.1 : aspect visuel de l'argile utilisé.



Figure 2.2 : Lieux d'extraction du sol sur la carte

Géographique. [46]

- **Ajouts :**

Le ciment et la chaux sont les ajouts quand vas ajouter pour réaliser les essais :

- **Ciment** : Il s'agit d'un échantillon du lot de ciment CEM II 42.5 R PM-CP2., qui répond aux exigences des normes NF P 15-317[47] et NF P 15-318[48]. Nous avons choisi de travailler sur un ciment portland car c'est le type de ciment le plus utilisé dans le domaine de la construction.

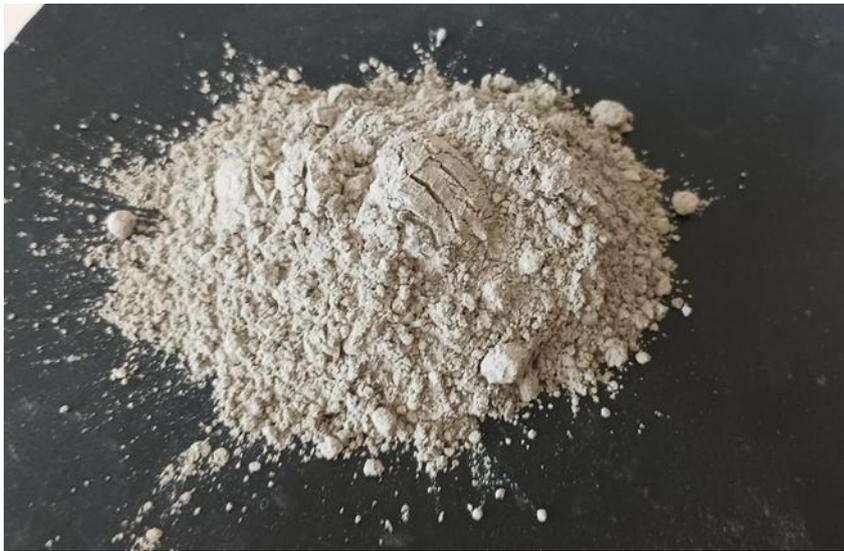


Figure2.3 : aspect visuel du ciment utilisé.

- **Chaux** : La chaux éteinte est souvent utilisée dans la construction pour différents usages. Elle peut être mélangée avec du sable ou de l'argile et de l'eau pour former un mortier de chaux, qui est utilisé pour lier les briques ou les pierres dans la construction de murs.



Figure2.4 : aspect visuel pour la chaux utilisée.

2. Procédures expérimentales :

2.1. Caractérisation géotechnique :

2.1.1. Teneur en eau : (NF P94-050). [49]

- **But de l'essai :**

L'essai de teneur en eau pour un sol selon la norme NF P94-050, permet de mesurer la quantité d'eau présente dans un échantillon de sol. Cela permet d'évaluer les propriétés et le comportement du sol dans diverses applications, en fournissant des informations essentielles pour la conception et l'ingénierie des projets liés aux sols.

- **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 :**

L'essai de teneur en eau permet de déterminer quel est le pourcentage massique (W%) d'eau dans le sol étudié :

La masse m_1 d'une tare numérotée est préalablement mesurée. Un échantillon est pris et pesé, sa masse initiale est dite m_2 (échantillon humide + tare), l'ensemble est placé dans une étuve à 105°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 : $\omega = (m\omega / md) \times 100$

Avec : $md = m_3 - m_1$ en (g).

$$m\omega = m_2 - m_3 \text{ en (g).}$$

2.2. Analyse granulométrique :(NF P 94-056), (NF P 94-057). [50]. [51].

- **But de l'essai :**

L'essai granulométrique selon les normes NF P 94-056 et NF P 94-057 permet de déterminer la distribution des particules dans un échantillon de sol ou d'agrégat, en utilisant respectivement la méthode du tamisage et la sédimentation. Ces informations sont essentielles pour évaluer les propriétés géotechniques du matériau, telles que la perméabilité, la compacité et la capacité de drainage, et pour effectuer des classifications granulométriques conformes aux normes en vigueur.

- ❖ **Méthode par tamisage à sec après lavage : [50].**

- **Principe de l'essai :**

Le but de cet essai est de séparer les grains agglomérés d'un échantillon d'une masse connue de matériaux par brassage sous l'eau, on laisse sécher pendant environ 24 heures puis à l'aide d'une série de tamis et peser successivement le refus cumulé sur chaque tamis.

- **Mode opératoire :**

Un échantillon du sol est lavé jusqu'à ce qu'il ne reste que des éléments propres on le met dans l'étuve pour le séchage pendant 24 heures, puis on le fait passer dans un tamis de maille 0.4m.



Figure 2.5 : méthode par tamisage à sec après lavage.

❖ **Méthode par sédimentation :** [51].

• **Principe de l'essai :**

L'analyse granulométrique par sédimentométrie permet de déterminer la distribution en poids des particules fines (de diamètre inférieure 0,08mm), d'un sol en fonction de leurs dimensions donc elle complète l'analyse par tamisage.

• **Mode opératoire :**

- On prend 50G de matériau près de la fraction inférieure 0,08mm qui a été recueilli par tamisage à sec.
- Puis on verse cette dernière dans un bécher et compléter avec 500CM³ d'eau distillée, et 30CM³ de phosphate de sodium (Na₆, PO₃, 10H₂O).
- On l'agite manuellement à l'aide de l'agitateur pendant 2min
- On laisse reposer 12h minimum.
- Après avoir laissée reposer on l'agite avec l'agitateur manuel 1min pour homogénéiser.
- Dès qu'on retire l'agitateur manuel, on déclenche le chronomètre et on introduit lentement le densimètre dans la suspension en vue de la 1^{ère} lecture à 30sec et des lectures successives à 1min et 2min, après la 3^{ème} lecture on retire le densimètre, et on prend la température à de Degrés prés.



Figure 2.6 : méthode par sédimentation.

2.2.1. Détermination de la masse volumique : (NF P 94-054). [52]

- **But de l'essai :**

Le but de l'essai de détermination de la masse volumique des particules solides d'un échantillon de sol selon la norme NF P 94-054, est d'obtenir une mesure précise de la densité des particules solides du sol, ce qui permet d'évaluer et de caractériser ses propriétés physiques pour des applications géotechniques.

- ❖ **Méthode de la densité sèche remaniée : [50].**

- **But de l'essai :**

Le principal objectif de cet essai selon la norme NF P 94-056, est d'évaluer la compacité maximale que peut atteindre un sol. Il permet de déterminer la densité sèche optimale du sol remanié, qui est un paramètre important dans de nombreuses applications géotechniques.

- **Mode opératoire :**

Après avoir laissé séchées les granulats dans l'étuve à 105°C, on pèse l'échantillon vide puis avec rempli, le remplissage se fait de façon à éviter la ségrégation, raser la surface avec une règle en faisant attention à ne pas compacter les granulats à la surface.



Figure 2.7 : essai de la densité sèche remaniée.

❖ **Méthode du pycnomètre a eau : [52].**

• **But de l'essai :**

Le but de l'essai de détermination de la masse volumique a la méthode du pycnomètre selon la norme NF P 94-054, permet de déterminer la masse volumique des particules solides du sol avec une précision raisonnable. Cette donnée est importante pour évaluer les propriétés mécaniques du sol, telles que la compacité, la stabilité et la perméabilité, et elle est utilisée dans de nombreuses applications géotechniques.

• **Principe de l'essai :**

Le principe de l'essai de la méthode du pycnomètre à eau est donc basé sur la mesure de la poussée d'Archimède pour déterminer la densité d'un matériau à l'aide d'un pycnomètre rempli d'eau.

• **Mode opératoire :**

- L'échantillon de sol est prélevé et séché à l'étuve à 105 °C pour éliminer toute l'humidité présente.
- Un pycnomètre propre et sec est pesé avec précision et enregistré comme poids initial (m_1).
- Le pycnomètre est ensuite rempli d'eau pure jusqu'à une marque de référence préétablie et son poids est à nouveau mesuré et enregistré comme poids rempli d'eau (m_2).
- L'échantillon de sol est placé dans le pycnomètre jusqu'à ce qu'il soit complètement rempli.
- Le pycnomètre rempli d'eau et d'échantillon est pesé à nouveau et enregistré comme poids rempli d'eau et d'échantillon (m_3).

CHAPITRE II : MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

- Les poids mesurés (m_1 , m_2 , m_3) sont utilisés pour calculer la masse de l'échantillon de sol (Mech) et la masse de l'eau (Meau) présente dans le pycnomètre.

-La masse volumique des particules solides du sol est calculée en utilisant la formule suivante :

- Masse volumique des particules solides $\gamma_s = M / (m_2 - m_1 - M_{eau})$ (t/m³).



Figure 2.8 : aspect visuel du pycnomètre.



Figure 2.9 : essai de la méthode du pycnomètre a eau.

2.2.2. Valeur au bleu de méthylène des sols :(NF P 11-300). [53].

- **But de l'essai :**

Cet essai a pour objet de préciser la méthode de détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau, la valeur de bleu de méthylène d'un sol (VBS) mesure la capacité d'absorption d'un sol, elle constitue un des paramètres d'identification de la classification des sols décrite dans la norme NF P 11-300.

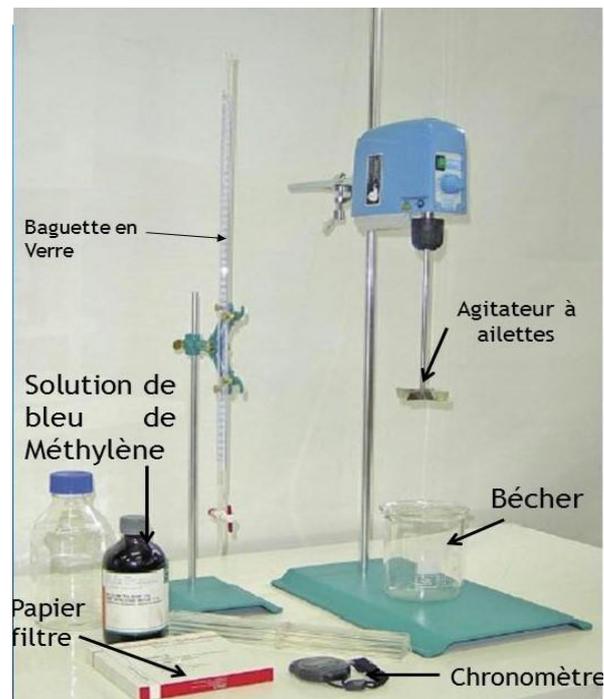
- **Principe de l'essai :**

L'essai consiste à mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène pouvant être adsorbée par le matériau mis en suspension dans l'eau. Cette quantité est rapportée par proportionnalité directe à la fraction 0/50mm du sol. La valeur de bleu du sol est directement liée à la surface spécifique des particules constituant le sol ou le matériau rocheux.

Le dosage s'effectue en ajoutant successivement différentes quantités de bleu de méthylène et en contrôlant l'adsorption après chaque ajout. Pour ce faire on prélève une goutte de la suspension que l'on dépose sur un papier filtre, ce qui provoque la création d'une tache. L'adsorption maximale est atteinte lorsqu'une auréole bleu clair persistante apparaît à la périphérie de la tache.

- **Mode opératoire :**

- Séparer par tamisage et si nécessaire par lavage la fraction 0/5mm contenue dans l'échantillon.
- Déterminer la proportion pondérale C de la fraction sèche 0/5mm contenue dans le matériau. Cette proportion peut être élue sur la courbe granulométrique du matériau si elle est connue par ailleurs ou sinon déterminée sur un autre échantillon représentatif du matériau.
- Déterminer la teneur en eau : $W = \text{Masse d'eau} / \text{Masse sèche}$ en %.
- Préparer une masse humide de sol comprise entre 30g et 60g pour un sol argileux et entre 60g et 120g pour un sol peu argileux.
- Introduire dans le récipient de 3 litres et ajouter 500ml d'eau déminéralisé ou distillé.
- Agiter l'ensemble à l'aide de l'agitateur à ailettes à une vitesse de 700tr/min pendant au minimum 5minutes et positionner à 5mm environ du fond du récipient.
- Agiter ensuite de manière permanente l'ensemble eau+sol à 400tr/min.



2.2.3. Détermination des limites d'Atterberg : (NF P 94-051). [56].

- **But de l'essai :**

Le but spécifique de l'essai des limites d'Atterberg selon la norme NF P 94-051 est de :

- **Déterminer la limite de liquidité (WL) :** L'essai vise à trouver la teneur en eau du sol à partir de laquelle il passe de l'état plastique à l'état liquide. Cela est réalisé en utilisant la méthode de la coupelle de Casagrande, où l'opérateur fait rouler une partie de la pâte de sol dans une coupelle jusqu'à ce qu'un sillon fermé de 12,7 mm de longueur soit formé. La teneur en eau correspondante est enregistrée comme la limite de liquidité.
- **Déterminer la limite de plasticité (WP) :** L'essai a également pour objectif de déterminer la teneur en eau du sol en dessous de laquelle il devient rigide et ne peut plus être façonné

sans se fissurer. Cela est réalisé en utilisant la méthode du rouleau sur la plaque, où l'opérateur ajoute progressivement de l'eau à une partie de la pâte de sol jusqu'à ce qu'elle puisse être roulée en une boulette de 3 mm de diamètre. La teneur en eau correspondante est enregistrée comme la limite de plasticité.

En effectuant ces essais, on peut obtenir les valeurs de WL et de WP, qui sont utilisées pour calculer l'indice de plasticité (IP) du sol ($IP = WL - WP$). L'indice de plasticité fournit une indication de la plasticité du sol, c'est-à-dire de sa capacité à subir des déformations sans se fissurer.

- **Principe de l'essai :**

L'essai de limite d'Atterberg est une méthode utilisée pour déterminer les limites de consistance des sols, c'est-à-dire les limites entre les différents états de consistance du sol, tels que l'état solide, plastique et liquide. Ces limites sont essentielles pour caractériser le comportement des sols et sont couramment utilisées en géotechnique.

- **Mode opératoire :**

- Matériel requis :

- Échantillon de sol : un échantillon représentatif de sol prélevé sur le site d'étude, tamiser, laver, mis dans l'étuve à 105 °C.
- Plateau de travail : une surface plane et propre pour effectuer les manipulations.
- Récipients : des coupelles pour contenir l'échantillon de sol et l'eau.
- Équipement de mélange : une spatule pour mélanger l'échantillon de sol et l'eau.
- Équipement de mesure : un appareil de mesure de la consistance du sol, tel qu'un dispositif de pénétration (cône de Casagrande).

- Étapes de l'essai :

- ❖ **Détermination de la limite de liquidité (WL) :**

- On a Prélevé une portion d'échantillon humide et on l'a placé dans une coupelle.
- On a ajoute de l'eau progressivement à l'échantillon et on a mélanger jusqu'à obtention d'une consistance suffisamment malléable.
- On a transféré l'échantillon dans le dispositif de pénétration (cône de Casagrande).
- On a fermé le couvercle du dispositif et on a pivoter la poignée à une vitesse pour permettre au cône de pénétrer dans l'échantillon.
- On a compté le nombre de coups nécessaires pour fermer une rainure normalisée sur une distance spécifique. Cela nous a donner la valeur de la limite de liquidité (WL).

❖ Détermination de la limite de plasticité (WP) :

- On a prélevé une autre portion d'échantillon humide et on l'a roulé dans nos mains pour former un cylindre d'environ 3-4 mm de diamètre.
- On a placé le cylindre d'échantillon sur une plaque de verre.
- On a roulé le cylindre jusqu'à ce qu'il se brise en deux.
- On a répété cette opération plusieurs fois jusqu'à ce qu'on a pu former une boule d'échantillon sans qu'elle se brise.

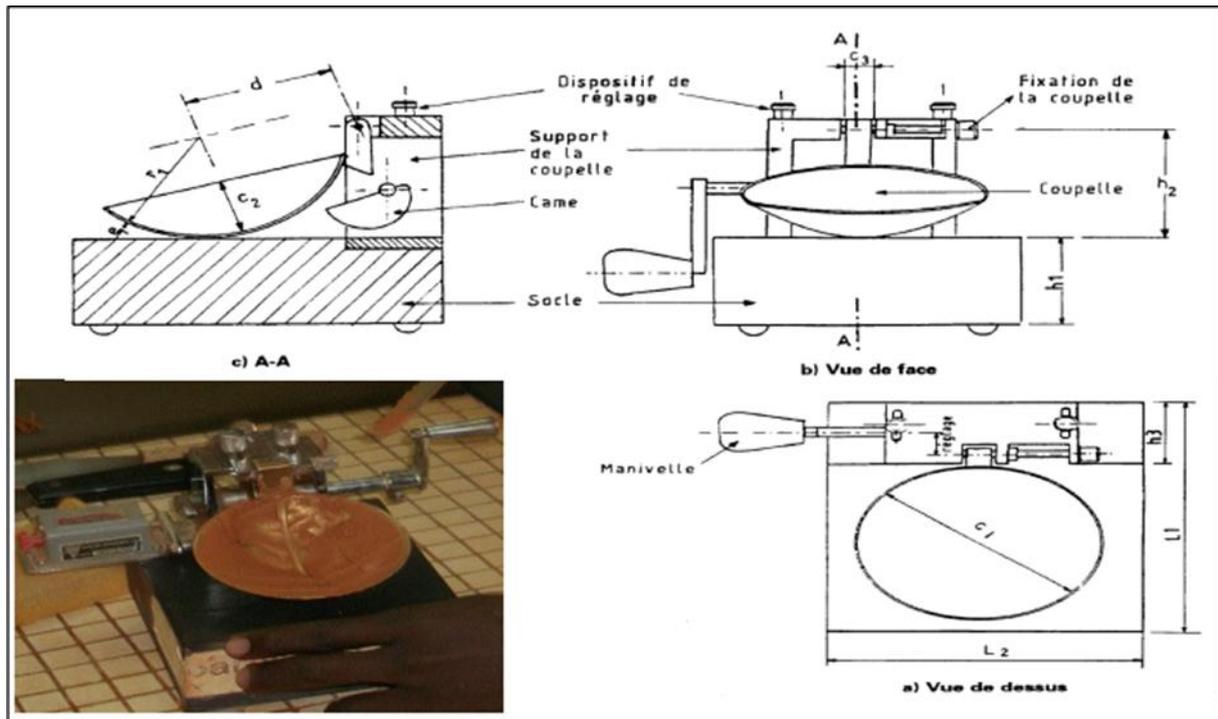


Figure 2.12 : L'appareil de Casagrande (NF P94-051, 1993, pp. 94-051) [57].



Figure 2.13 : aspect visuel de l'essai pour la détermination de la limite de liquidité. [58].



Figure 2.14 : aspect visuel de l'essai pour la détermination de la limite de plasticité. [59].

2.2.4. Essai de gonflement a l'œdomètre : (XP P 94-091). [60].

- **But de l'essai :**

Le but de l'essai œdométrique, également connu sous le nom d'essai de consolidation unidimensionnelle, est de déterminer le comportement de compression d'un échantillon de sol lorsqu'il est soumis à une charge verticale appliquée de manière progressive. Cet essai vise à étudier la capacité du sol à se tasser et à se déformer sous une pression appliquée.

- **Principe de l'essai :**

L'essai selon la norme XP P 94-091, s'effectue sur plusieurs éprouvettes provenant d'un même échantillon et prélevées sensiblement au même niveau. Chaque éprouvette de sol est placée dans une enceinte cylindrique rigide (œdomètre) et un dispositif applique sur cette éprouvette un effort axial vertical maintenu constant. L'essai consiste à appliquer à chaque éprouvette une contrainte verticale différente et à mesurer sa variation de hauteur lorsqu'elle est mise en présence d'eau.

- **Mode opératoire :**

- Préparation de l'appareil œdométrique : on a préparé l'appareil œdométrique en s'assurant qu'il est propre et en bon état de fonctionnement. On Vérifie que toutes les parties mobiles sont correctement lubrifiées et que les capteurs de mesure sont calibrés.
- Préparation de l'échantillon pour l'essai : on a prélevé un échantillon représentatif du sol préparé et on l'a placé dans une cellule d'œdomètre préalablement pesée. On a noté la masse initiale de la cellule et de l'échantillon.
- Saturation de l'échantillon : on a immergé la cellule contenant l'échantillon dans de l'eau distillée. On a laissé l'échantillon se saturer pendant un certain temps pour permettre à l'eau de pénétrer dans les pores du sol.
- Assemblage de la cellule d'œdomètre : on a assemblé la cellule d'œdomètre en plaçant une membrane filtrante au fond de la cellule pour empêcher les particules fines de s'échapper. On a placé ensuite l'échantillon saturé dans la cellule tout en assurant qu'il est bien compacté et réparti de manière uniforme.
- Application de la charge verticale : on a appliqué une charge verticale progressive sur l'échantillon 1,2,4,8,16kg. On a noté les valeurs de charge appliquées à des intervalles réguliers.
- Mesure de la déformation : on a mesuré la déformation verticale de l'échantillon en utilisant des capteurs de déplacement appropriés. Puis on a enregistré les valeurs de déformation à chaque niveau de charge appliqué.

CHAPITRE II : MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

- Calcul des résultats : À partir des données de charge et de déformation, on a tracé une courbe de compression qui représente le comportement de compression de l'échantillon. À partir de cette courbe.
- Analyse et interprétation des résultats : on a analysé les résultats de l'essai dans le chapitre 3 pour évaluer les propriétés du sol, telles que sa compressibilité, sa capacité de charge et sa consolidation.



Figure 2.15 : préparation de l'échantillon dans la cellule œdométrique.



Figure 2.16 : immersion de la cellule œdométrique dans l'eau dans l'appareil œdométrique.

2.3.Fabrication des éprouvettes :

2.3.1. Confection des éprouvettes :

Des éprouvettes ont été confectionnées de forme rectangulaire de dimensions (8x5x1) Pour les essais de compression, flexion, conductivité thermique.

- **Malaxage à sec du mélange :**

Au premier lieu, nous allons préparer l'échantillon sans ajouts qui est à base d'argile et d'eau seulement. Le sol est séché pendant 24 heures, par la suite la poudre obtenu (argile), ajoutant à cette argile obtenue de l'eau, puis mélanger manuellement ou avec un grattoir pendant un bon moment (3 à 4 minutes), pour une homogénéité parfaite et une meilleure répartition de l'humidité dans le sol comme la montre la **figure (2.17)** ci-dessous :



CHAPITRE II : MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

Puis, nous allons procéder à la préparation d'un échantillon à base d'argile, d'eau et de la chaux d'autres avec du ciment et d'autres avec de la chaux et ciment au même temps juste avec des pourcentages différents pour toutes les éprouvettes. On commence par ajouter la chaux, ciment, eau, ou les deux au même temps à l'argile, puis on mélange avec un grattoir ces deux ou trois composantes jusqu'à leur homogénéisation voire la figure (2.17) ci-dessous, enfin on ajoute petit à petit l'eau jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène.



Argile+Ciment+eau



Argile+chaux+eau



Pesée de chaux+ciment+argile



argile+chaux+ciment+eau

Figure 2.18: aspect visuel de quelques mélanges effectués lors de la fabrication des éprouvettes.

- On a varié entre [25% ; 40%] d'eau, et pour la chaux et ciment on a mis 4% et 8% pour la fabrication des restes des éprouvettes, sachant que on a fabriquées quatre échantillons pour chaque types d'éprouvettes pour chaque types d'essai (compression, flexion, porosité, conductivité thermique).

CHAPITRE II : MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

- **Mise en forme :**

Les éprouvettes sont fabriquées dans un moule en métal de dimensions intérieur de (8x5x1) cm, 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, puis on referme tout avec une pièce métallique de même dimension que le moule, on presse avec une force, ensuite on procède au démoulage à l'aide d'une pièce métallique au-dessous du moule pour faire ressortir l'éprouvette sans perte de matière ou de forme .



Figure 2.19 : aspect visuel du mélange dans le moule utilisé.

Ensuite, pour les autres éprouvettes avec les ajouts (chaux, ciment, ou chaux+ciment) on suit les mêmes étapes précédentes pour le moulage et le démoulage, la figure représente quelques exemples :



Figure 2.20 : aspect visuel de quelques éprouvettes après démoulage

- **Séchage :**

Après avoir démoulée nos éprouvettes, on procède à l'étape de séchage des éprouvettes, pour notre cas ont les as laissées séchées à l'air libre pendant 28jours, tout en prenant notes des poids de chaque éprouvette pendant les 28jours.



Figure 2.21 : aspect visuel de quelques éprouvettes après séchage.

2.4.Caractérisation des briques :

2.4.1. La conductivité thermique :(NF EN 12664 (2001)). [61].

- **Principe :** La conductivité thermique (λ) 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 :** Les faces des briques de dimension (8x5x1) cm, 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 (2.22). 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 2.22 : machine du CT mètre

2.5.Présentation des essais mécaniques :

2.5.1. 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 2.23 : Machine d'essais IBERTEST

2.5.2. Essais de compression :

Le test de compression est effectué 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 à ces essais afin de déterminer leurs résistances.

Pour l'essai de compression, les briques sont posées au milieu du dispositif de compression de la machine. Les résultats de ces essais sont récupérés sur l'ordinateur de pilotage de la machine.



Figure 2.24 : Essai de l'écrasement.

Conclusion :

Dans ce second chapitre, nous avons présenté les différents matériaux utilisés dans cette étude avec la caractérisation et la formulation de différents mélanges.

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

Tous les résultats obtenus seront présentés dans les chapitres suivant et seront commentés pour mettre en avant notre recherche.

**CHAPITRE III : CARACTERISTIQUE DES
MATÉRIAUX**

Introduction :

L'objectif de ce chapitre est de présenter les résultats et de les comparer aux normes spécifiques, des caractérisations physique, chimique et minéralogique des briques en terre crue stabilisées chimiquement, fournissant ainsi une base solide pour l'évaluation et l'analyse approfondies du matériau. Ces informations seront essentielles pour comprendre les performances, les caractéristiques des briques en terre crue traitées chimiquement en tant que solution de construction durable et écologique.

1. Caractérisations géotechnique du sol :

1.1. Caractéristique physique :

1.1.1. Essai analyse granulométrique :

L'essai granulométrique du sol a été réalisé au sein du LNHC de Béjaia, selon la Norme : NF P 94-056. [50]. Les résultats sont présentés dans le (tableau 3.1).

Tableau 3.1 : Essai d'analyse granulométrie par tamisage [50]

Tamis (mm)	Tamisat (%)
4.00	100
2.00	99.80
1.25	99.60
1.00	99.40
0.63	99.20
0.40	99.20
0.25	98.80
0.20	98.80
0.13	98.60
0.10	98.40
0.08	98.40

L'essai Sédimentométrie a été réalisé selon la norme : NF P 94-057. [51]. Les résultats sont présentés dans le Tableau 3.2 qui suit.

CHAPITRE III : CARACTERISTIQUE DES MATÉRIAUX

Tableau 3.2 : Essai d'analyse granulométrie par sédimentation [51]

Diamètre équivalent	Tamisat (%)
75.00 μm	98.40
55.00 μm	94.90
38.00 μm	94.90
25.00 μm	94.90
17.00 μm	91.41
12.00 μm	87.91
8.00 μm	84.42
5.00 μm	70.51
2.00 μm	56.37

La (figure 3.1) représente la courbe granulométrique complète de notre obtenue par tamisage par voie humide et par sédimentation. [NF P 94-057, mai 1992]. [51]

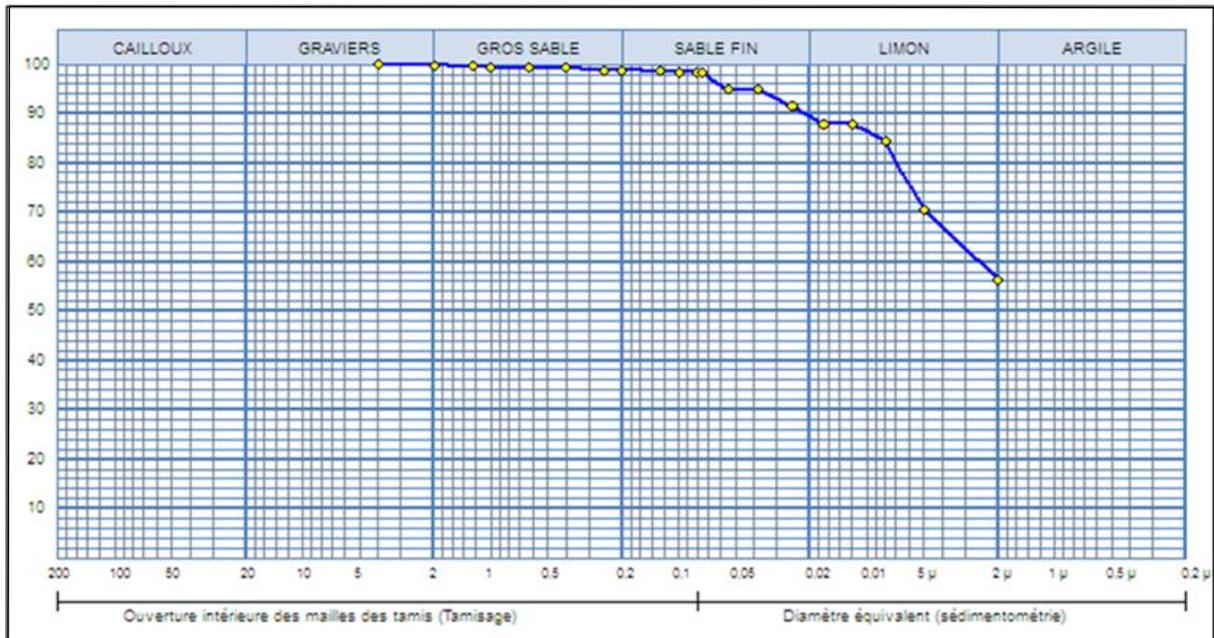


Figure 3.1 : courbe granulométrique de l'argile.

D'après la courbe granulométrique, l'échantillon est constitué de 98,4% de grains à inférieurs 80 μm ce qui nous permet dire que cette échantillon représente un sol fin.

CHAPITRE III : CARACTERISTIQUE DES MATÉRIAUX

1.1.2. La teneur en eau :

L'essai a été réalisé selon la norme : NF P 94-050. [49]. Les résultats sont présentés dans le Tableau 3.3 qui suit :

Tableau 3.3 : les résultats de la teneur en eau.

Echantillons	I	
N° Tare	556	107
P.H + Tare (g)	60.94	57.65
P.S + Tare (g)	57.36	54.22
P. Tare (g)	15.83	15.11
P. Eau (g)	3.58	3.43
P. Sol sec (g)	41.53	39.11
Teneur en eau (%)	8.62	8.77
Moyenne (%)	8.69	

Cette valeur de 8,69% indique une quantité d'eau relativement faible présente dans l'échantillon.

1.1.3. Limite d'Atterberg : (NF P 94-051) [56]

Comme indiqué dans le chapitre précédant la limite de liquidité a été déterminée au laboratoire par l'utilisation de la méthode de la coupelle de Casagrande pour notre argile.

Le (tableau 3.4) ci-dessous représente les résultats des limites d'Atterberg, l'indice de plasticité et l'indice de consistance pour l'argile de Djelfa.

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

$$IP=WL-WP$$

Tableau 3.4 : Estimation de la plasticité d'un sol [62]

IP	Degré de plasticité du sol
De 0 à 5	Sol non plastique
De 5 à 15	Sol peu plastique
De 15 à 40	Sol plastique
> 40	Sol très plastique

CHAPITRE III : CARACTERISTIQUE DES MATÉRIAUX

- **Ordre de grandeur : [62]**

- Argile $IP > 30$.
- Argile limoneuse $20 < IP < 30$.
- Limon $10 < IP < 20$.
- Sable argileux $5 < IP < 20$.
- Sable limoneux $5 < IP < 15$.

Remarque : Plus l'indice de plasticité est élevé, plus le sol est sensible aux effets de gonflement par humidification (ou de retrait par dessiccation).

➤ **Résultats et interprétation :**

Les résultats de cet essai sont présentés ci-dessous :

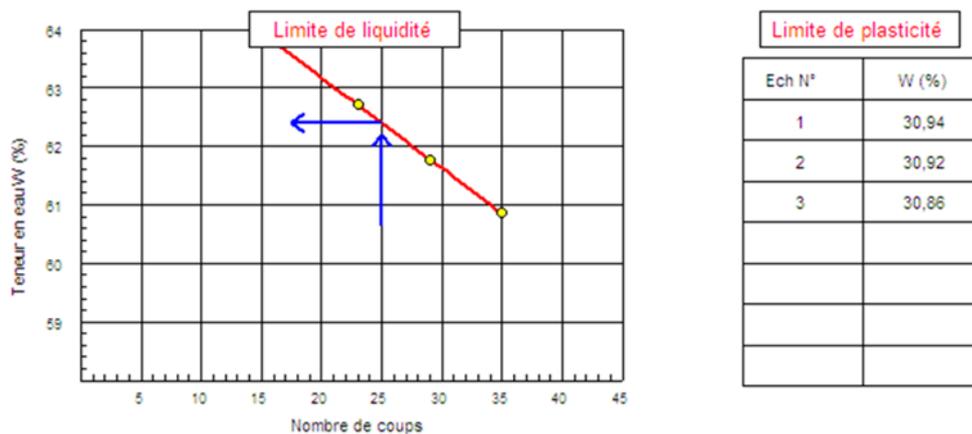


Figure 3.2 : Résultats de (WL) et (WP)%.

D'après les résultats obtenus $WL = 62.40\%$, $WP = 30.91\%$, notre sol a une valeur d'indice de plasticité de $IP = 31.49\%$ ceci nous permet de le classer selon le tableau (3.4) parmi les sols plastique.

CHAPITRE III : CARACTERISTIQUE DES MATÉRIAUX

La figure ci-dessous (figure 3.3) représente le diagramme de plasticité et classification des sols.

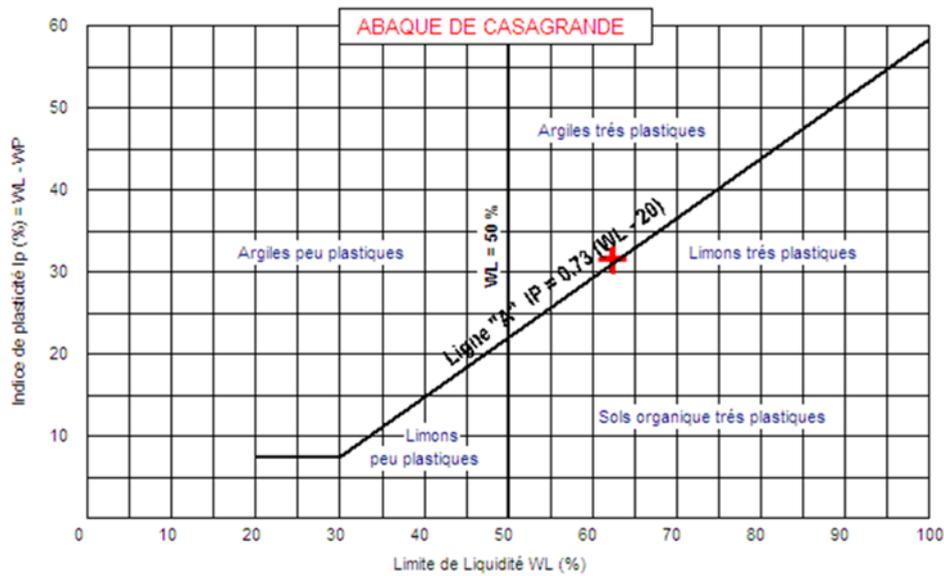


Figure 3.3 : Diagramme de plasticité et classification des sols.

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 WL . [Arthur Casagrande, 1932].

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 [60]. La figure ci-dessus (3.3) montre la classification de notre sol qui est considéré comme étant des argiles très plastiques.

CHAPITRE III : CARACTERISTIQUE DES MATÉRIAUX

1.1.4. L'essai œdométrique :

La figure ci-dessous (figure 3.4) représente la courbe de compressibilité à l'œdomètre.

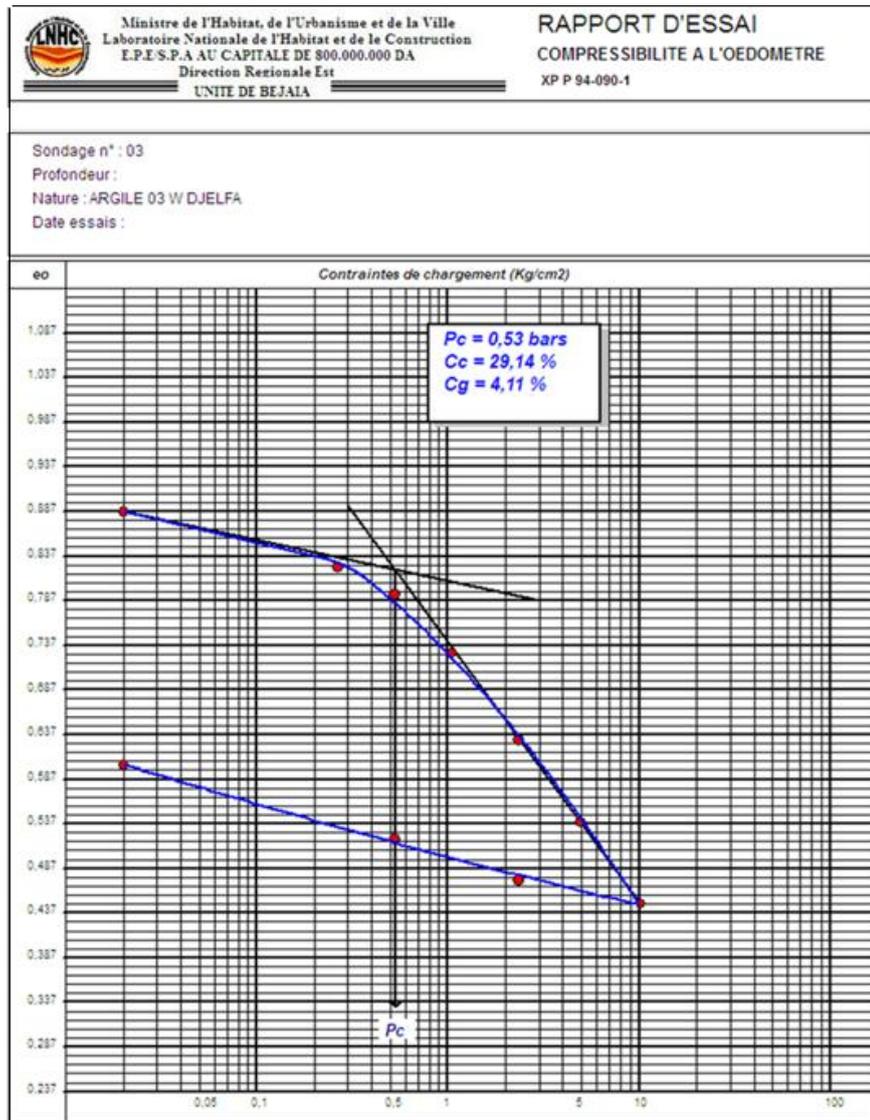


Figure 3.4 : La courbe de compressibilité à l'œdomètre.

Les résultats de l'essai œdométrique indiquent une pression de consolidation (P_c) de 0,53 bars, un indice de compressibilité (C_c) de 29,14%, et un indice de gonflement (C_g) de 4,11%. La P_c de 0,53 bars représente la pression appliquée sur l'échantillon de sol pendant l'essai. Cette valeur indique une consolidation partielle du sol. La valeur de C_c de 29,14% indique la compressibilité du sol, avec une valeur plus élevée suggérant une plus grande compressibilité. Enfin, le C_g de 4,11% met en évidence le potentiel de gonflement du sol, particulièrement pertinent pour les sols argileux. Une valeur plus élevée de C_g peut indiquer un potentiel de gonflement plus important, ce qui est le cas pour notre argile qui est une argile très gonflant.

CHAPITRE III : CARACTERISTIQUE DES MATÉRIAUX

1.2. Caractéristique chimique :

1.2.1. Essai au bleu méthylène :

Tableau 3.5 : Seuils de VBS correspondants à différents types de sols [53]

Seuil de VBS (g/100g)	Type de sol
< 0.1	Sol insensible à l'eau (notamment si passant 80 µm < 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

Le (Tableau 3.6) ci-dessous donne la valeur d'adsorption au bleu de méthylène (VBS). [63] (NF P 94-068)

Tableau 3.6 : Valeur VBS et le volume de bleu de méthylène introduit dans l'échantillon

	Sol
VBS (g/100g)	1.67
Volume du bleu de méthylène (cm3)	130

La valeur au bleu de méthylène du sol quantifie la capacité d'absorption des argiles présentes dans le sol. Le (Tableau 3.5) montre que le sol dont le VBS est compris entre 1.5 et 2.5 qui est un des sols limoneux peu plastiques [57]. (NF P11-300)

CHAPITRE III : CARACTERISTIQUE DES MATERIEUX

Conclusion :

La conclusion du troisième chapitre de caractérisation des matériaux met en évidence les résultats des différentes analyses effectuées. Les données obtenues sont les suivantes :

- Essai granulométrique : 98,4% des grains sont inférieurs à 80 micromètres, indiquant une distribution fine des particules.
- Teneur en eau : Le matériau présente une teneur en eau de 8,69%, ce qui peut influencer sa compressibilité et sa résistance.
- Limites d'Atterberg : La limite de liquidité est de 62,4%, la limite de plasticité est de 30,91% et l'indice de plasticité est de 31,49%. Ces valeurs renseignent sur la plasticité et la cohésion du matériau.
- Essai d'odométrie : La contrainte de préconsolidation est de 0,53 bars, la compressibilité en compression est de 29,14% et la compressibilité en gonflement est de 4,11%. Ces résultats évaluent la déformabilité, la consolidation et la résistance du matériau.
- Essai au bleu de méthylène : La valeur de bleu de méthylène (VBS) est de 1,67, permettant d'évaluer la porosité et la perméabilité du matériau.

Ces résultats de caractérisation fournissent des informations cruciales sur les propriétés granulométriques, hydriques, plastiques, mécaniques et perméables du matériau étudié. Ces données sont essentielles pour comprendre le comportement de l'argile et son potentiel dans le cadre de l'étude. Elles orienteront également les résultats et discussions des briques dans le chapitre suivant.

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats et discussions relatifs à l'élaboration des briques en terre crue stabilisée chimiquement, dans le cadre de notre étude. Nous avons entrepris des expériences approfondies pour évaluer l'impact de différentes méthodes de stabilisation chimique sur les propriétés des briques en terre crue, ainsi que leur performance globale en termes de résistance mécanique, de durabilité et d'impact environnemental. La stabilisation chimique des briques en terre crue est une approche prometteuse qui vise à améliorer les propriétés de la terre crue en ajoutant des agents chimiques spécifiques. Ces agents chimiques, tels que les stabilisants à base de ciment, de chaux, interagissent avec les particules d'argile et les minéraux présents dans la terre crue, formant ainsi des liaisons chimiques qui renforcent la structure des briques.

1. Résistance en compression :

Les figures ci-dessous (figure 4.1/4.2) représentent les résultats de la résistance en compression en fonction de pourcentage de ciment / chaux et d'eau sous forme histogramme.

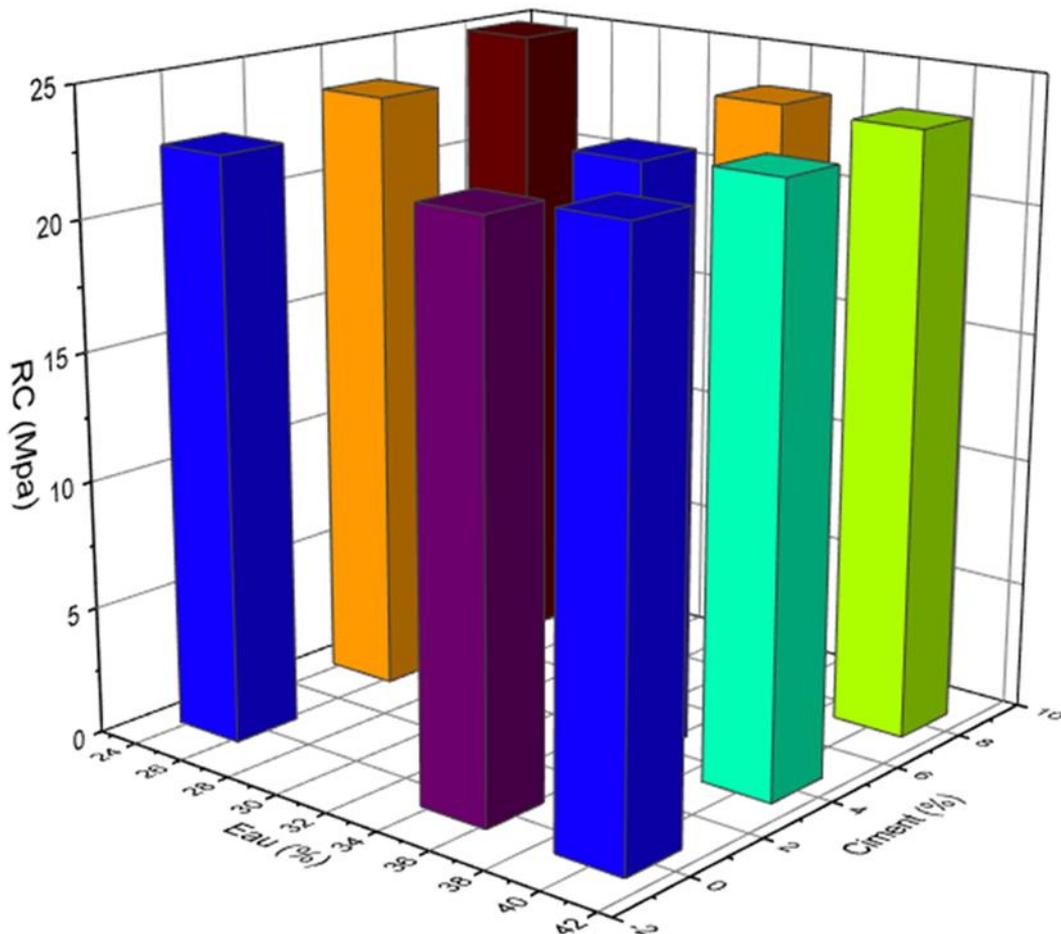


Figure4.1 : Résistance en compression en fonction de pourcentage de ciment et d'eau.

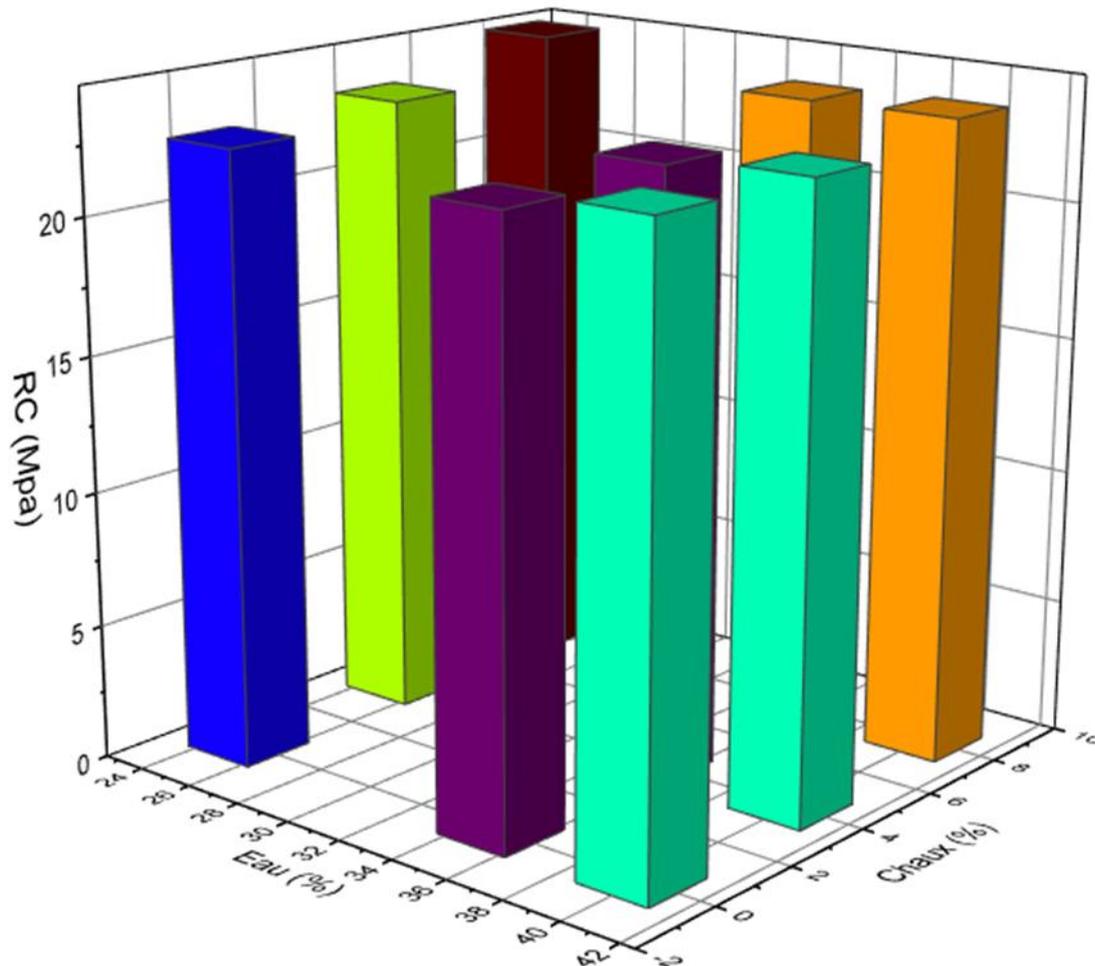


Figure 4.2 : Résistance en compression en fonction de pourcentage de chaux et d'eau.

Le graphe ci-dessus, montre que les résistances des briques augmentent progressivement en augmentant le dosage du ciment / chaux. Les valeurs varient entre 23.59/23.14MPa à 22.18MPa lorsqu'on passe de 0% à 4% de ciment et à 24.95/24.55MPa quand on passe à 8% de ciment/chaux. Cela est due aux réactions puzolaniques qui prennent place entre le ciment portland et l'argile ce qui permet la formation des CSH.

Concernant la quantité d'eau ajoutée au mélange, on remarque une diminution importante de la résistance tout en augmentant le pourcentage d'eau, on observe par exemple une diminution d'une valeur initiale de 24.95MPa concernant 25% à une valeur de 23.5MPa pour 40% d'eau pour le ciment.

On remarque que la brique avec 25% d'eau et 8% de ciment a une plus grande résistance en compression de 24.95%. Ce qui est due à la formation des pores lors du séchage.

Pour conclure, les briques avec les ajouts ciment et chaux procèdent des résistances à la compression comparable, les briques avec du ciment ont une résistance légèrement supérieure cela peut s'expliquer par l'hydratation du ciment qui développe des résistances plus rapidement que la chaux.

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

2. Conductivité thermique :

Les figures ci-dessous (figure 4.3/4.4) représentent la conductivité thermique (W/M*K) en fonction de pourcentage de ciment/ chaux et d'eau.

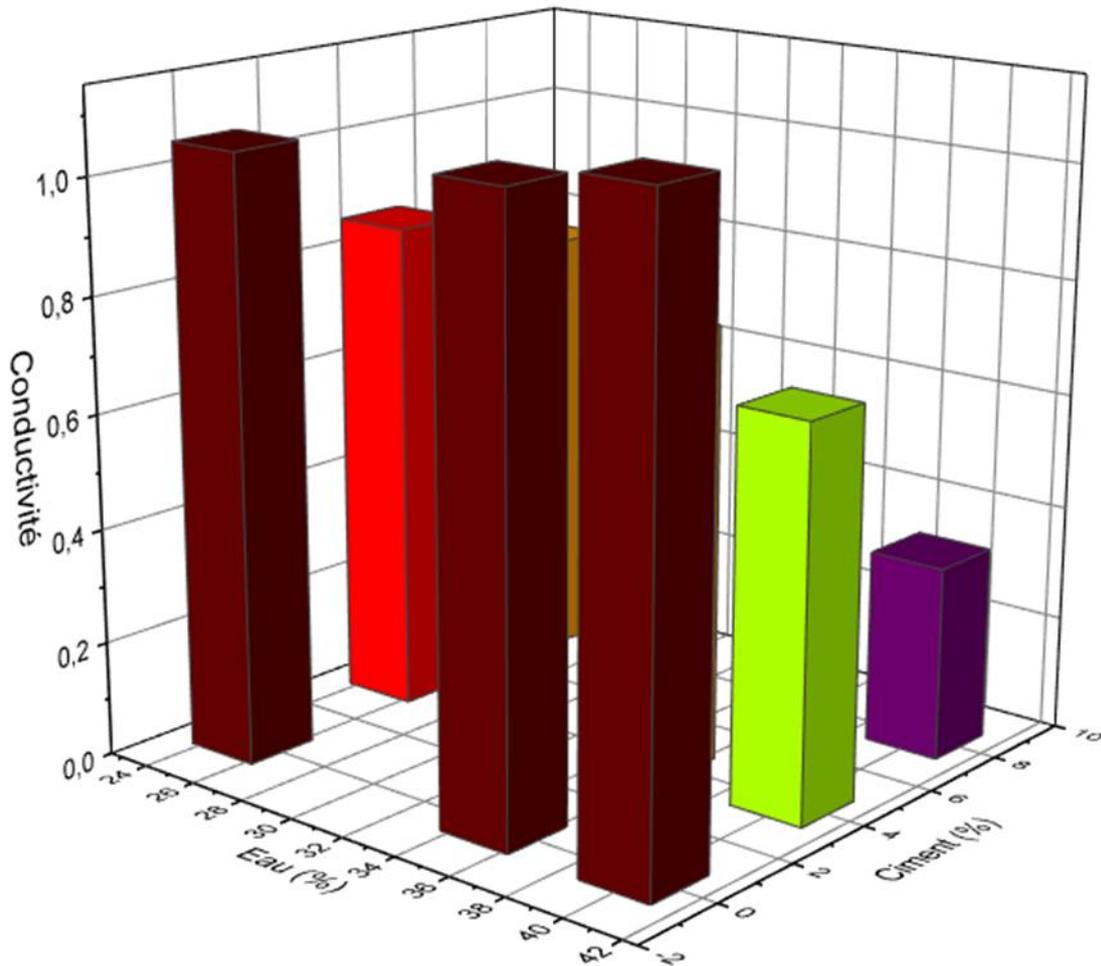


Figure 4.3 : Conductivité thermique (W/M*K) en fonction de pourcentage de ciment et d'eau

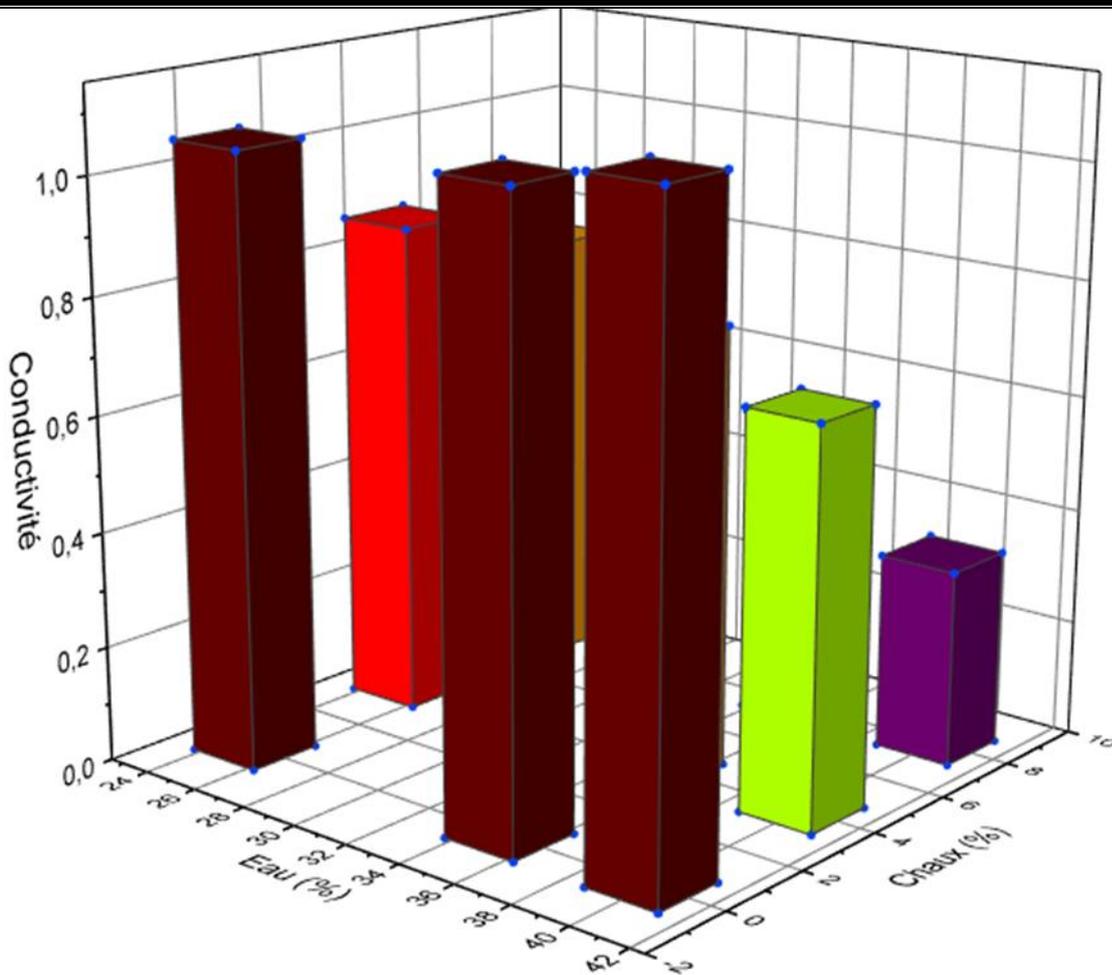


Figure 4.4 : Conductivité thermique (W/M*K) en fonction de pourcentage de chaux et d'eau

Le graphique ci-dessus indique que la conductivité thermique diminue en augmentant le pourcentage d'eau, ce phénomène peut-être expliqué par le départ de l'eau qui crée des pores ouverts qui ont un effet favorable sur la conductivité thermique.

On observe une diminution de conductivité thermique de 1.11 à 0.34 tout en augmentant le dosage de ciment et de 0% à 8%, en ce qui concerne la chaux on remarque aussi une diminution de la conductivité thermique de 1.05 à 0.79 tout en augmentant le dosage de chaux de 0% à 8%. Ce qui peut être expliqué par la fermeture des pores lors de la formation des CSH.

On observe que la densité des briques est diminuée sous l'effet du ciment, par conséquent il défavorise le transfert de chaleur et nous donne une brique isolante avec 40% d'eau et 8% de ciment donne la conductivité minimale 0.34.

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

3. Retrait :

Les figures ci-dessous (figure 4.5/4.6) représentent le retrait en fonction de pourcentage de ciment / chaux et d'eau.

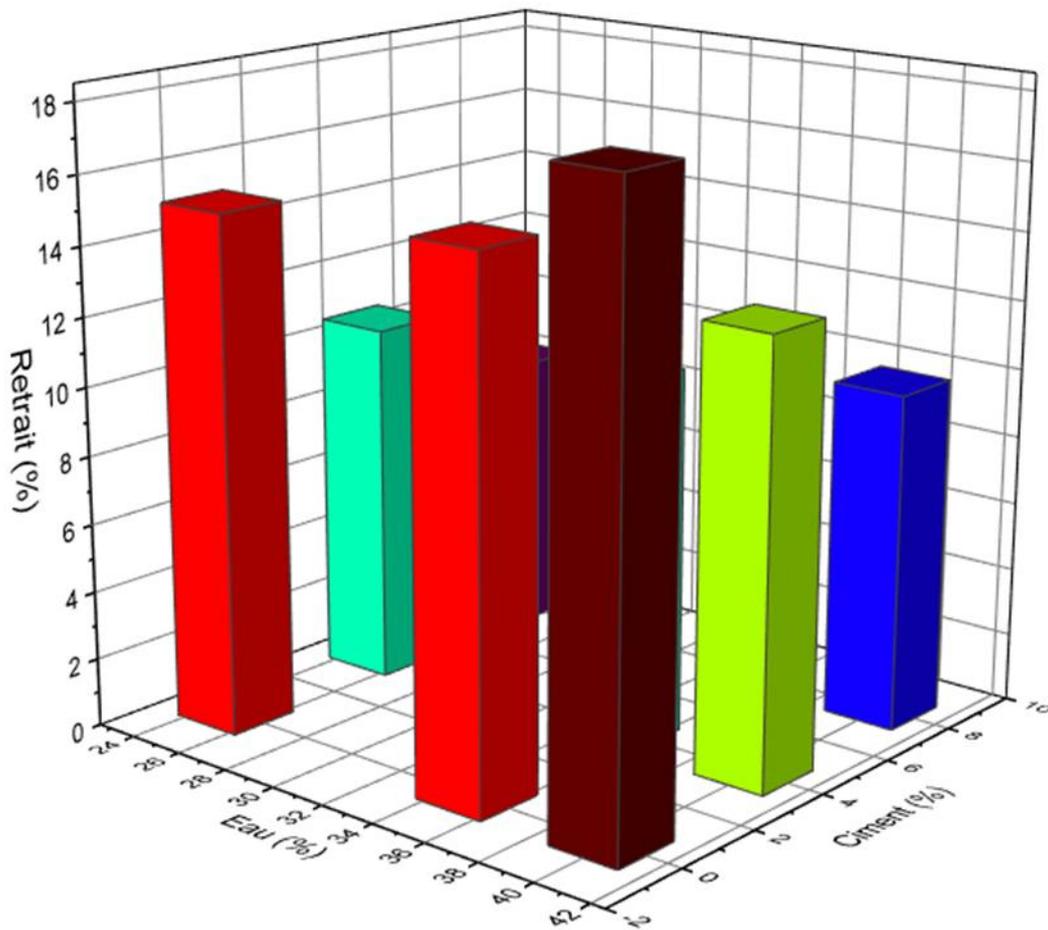


Figure 4.5 : Retrait en fonction de pourcentage de ciment et d'eau.

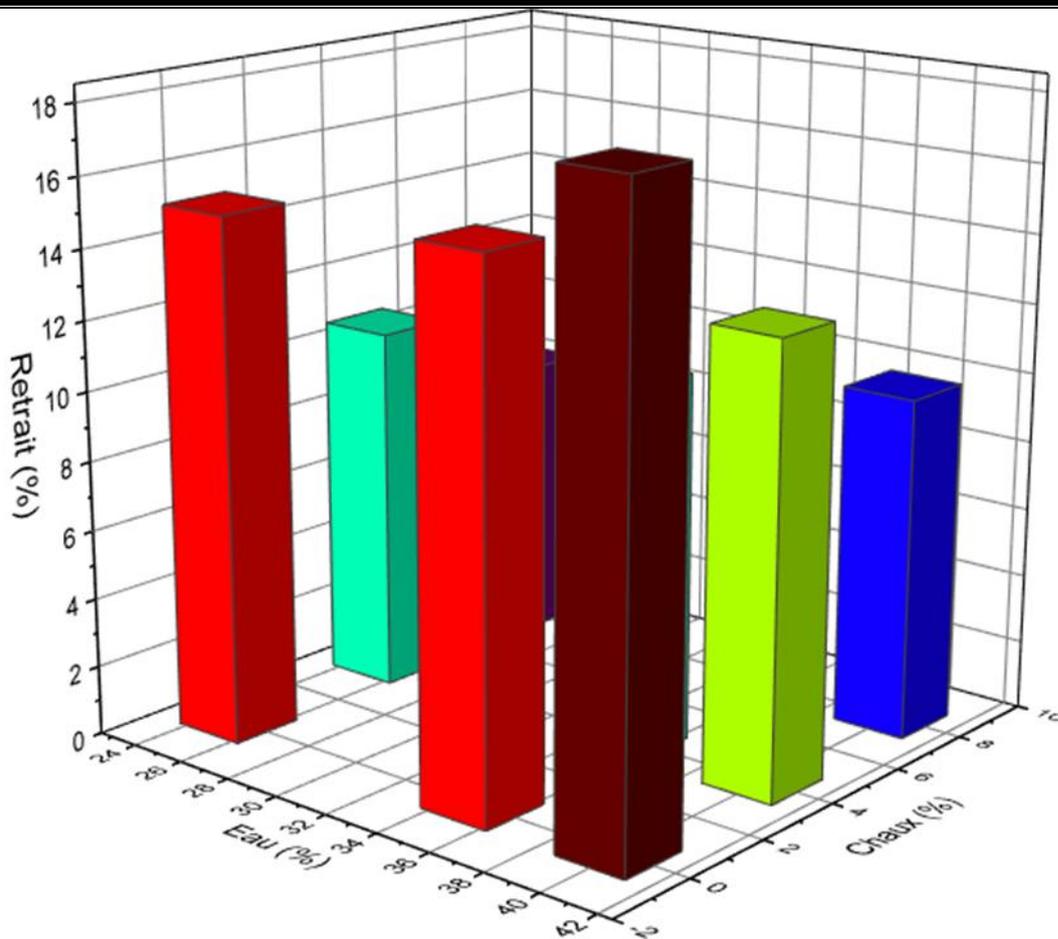


Figure 4.6 : Retrait en fonction de pourcentage de chaux et d'eau.

On observe une augmentation de retrait avec l'augmentation de la quantité d'eau ce qui est dû au volume plus important d'eau évaporées lors du séchage, l'introduction de quantité grandissante de ciment et de chaux diminue le retrait en densifiant la structure des briques et en stabilisant le caractère gonflant de l'argile.

L'ajout du ciment et de chaux a permis de stabiliser le caractère gonflant des argiles ce qui se traduit par une réduction significative du retrait.

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Conclusion :

Des différents essais de caractérisation réalisés sur la brique nous constatant que l'augmentation de la quantité d'eau a un effet positif sur la conductivité thermique et toutes fois négative sur la résistance à la compression et le retrait. L'ajout de ciment ou de chaux a permis d'améliorer les caractéristiques mécaniques des briques ainsi que de diminuer le retrait et de réduire la conductivité thermique en densifiant la structure des briques par la formation des CSH.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

La présente étude avait pour objectif de proposer une méthode de stabilisation chimique des briques en terre crue à faible impact environnemental, cela nécessite d'incorporer des liants minéraux tels que le ciment et la chaux avec des pourcentages variés entre [0% ; 8%], cette méthode permet d'améliorer les propriétés mécaniques, durables et structurelles de ce matériau de construction.

La revue bibliographique a permis de mettre en évidence l'importance croissante de ce matériau dans le domaine de la construction durable. Les briques en terre crue, combinées à des techniques de stabilisation chimique appropriées, offrent une alternative écologique, économique et durable aux matériaux de construction conventionnels.

L'utilisation de ciment et de la chaux dans l'industrie des briques a pour objectif de proposer des briques à faible impacte environnementale, tout en augmentant la résistance globale de cette dernière ainsi que la résistance aux intempéries.

Dans cette recherche nous avons étudié les différentes caractéristiques de l'argile de Djelfa, ce matériau a été caractérisé individuellement par une série d'expérimentation au niveau de laboratoire LNHC de Bejaia à El-Kseur.

Les tests montrent que l'argile utilisée est appropriée à la formulation des briques en terre crue stabilisée chimiquement.

Les résultats des essais de caractérisation effectués sur les briques indiquent que l'augmentation de la quantité d'eau a un impact positif sur la conductivité thermique, mais a un effet négatif sur la résistance à la compression et le retrait. Cependant, l'ajout de ciment ou de chaux a permis d'améliorer les propriétés mécaniques des briques, tout en réduisant le retrait et la conductivité thermique. Cela a été réalisé en densifiant la structure des briques par la formation de composés hydratés de silicate de calcium (CSH). En conséquence, l'incorporation de ciment ou de chaux a conduit à des briques plus solides, présentant moins de retrait et une meilleure isolation thermique. Le ciment a eu un effet plus prononcé sur la résistance à la compression contrairement à la chaux qui a exhibé des meilleurs résultats sur le plan de retrait et de la conductivité thermique.

Ces résultats encouragent l'adoption de ces briques dans la construction durable, offrant une alternative écologique et économique aux matériaux de construction conventionnels.

En perspective on envisage d'explorer la durabilité ainsi que l'effet des liants organiques sur le comportement des briques stabilisées.

Références

RÉFRÉRENCES

- [1] : La roue des techniques, CRAterre, 2009. D'après Houben Hugo et Guillaud Hubert, « Traité de construction en terre ».
- [2] : Eleve_FRW. (CONSTRUIRE EN TERRE CRUE : TOUT SAVOIR SUR CETTE MATIÈRE ÉCOLOGIQUE) Mar 11, 2023 <https://e-writers.fr/construction-terre-crue/> consulter le 25/04/2023
- [3] : Formation au pisé, pour une maison en autoconstruction « <https://www.architecture-design-corse.com/formation-sur-le-pise-pour-une-maison-en-autoconstruction/> » On 17 Mar, 2015. Consulter le 25/04/2023
- [4] : Joanna Eid. « Élaboration d'un éco-géo-matériau à base de terre crue ». Génie civil. Université du Havre, 2016. Français.
- [5] : MUR ET MAISON EN TORCHIS <https://www.renovationetravaux.fr/mur-maison-torchis>. Consulter le 26/04/2023
- [6] : Fabrication brique de terre : adobe «<https://chapeau-et-bottes.fr/fabrication-brique-de-terre-adobe/> » Consulter le 27/04/2023
- [7] : Abdelhak Maachi et Rodolphe Sonnier. «Le plus vieux matériau de construction au monde est aussi le plus écoresponsable » : March 26, 2020 8.48pm <https://theconversation.com/le-plus-vieux-matériau-de-construction-au-monde-est-aussi-le-plus-écoresponsable-133587>. Consulter le 27/04/2023
- [8] : MATIÈRES DE VILLE. Emploi et réemploi des matériaux de construction parisiens Cycle 2018 des Petites Leçons de Ville
- [9] : UNESCO Centre du patrimoine mondial 1992-2023. <https://whc.unesco.org/fr/list> Consulter le 28/04/2023.
- [10]: NOTRE WILAYA <https://timimoun.mta.gov.dz/fr/notre-wilaya-2/> consulter le 29/04/2023
- [11] : architecture en terre crue dans la vallée du Jourdain <https://core.ac.uk/download/47359026.pdf>. Consulter le 26/04/2023
- [12] : Les 10 types de matériaux écologiques pour une construction durable. <https://www.maison-responsable.fr/construire-renover/materiaux-durables/liste-materiaux-construction-durable/> 8 juin 2021 By MaisonResponsable. Consulter le 27/04/2023
- [13] : Prof. Chelouah.N, «Cours Matériaux Innovants master 1, chapitre 2», université de Bejaia 2019/2020.
- [14] : Marthe Tatiana DIATTA, Matières premières argileuses du Sénégal : caractéristiques et applications aux produits céramiques de grande diffusion. Le 23 mai 2016.
- [15]:ChapitreI.I.1 Les phyllosilicates <http://dspace.univ-djelfa.dz:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/924/ChapitreI.pdf?sequence=13&isAllowed=y> . Consulter le 28/04/2023

RÉFRÉRENCES

- [16] : Nevila Jozja. « Étude de matériaux argileux albanais. Caractérisation "multi-échelle" d'une bentonite magnésienne » Minéralogie. Université d'Orléans, 2003. Français.
- [17] : Laurent Caner, PHYLLOSILICATES DES SOLS : DE L'IDENTIFICATION A LA QUANTIFICATION. Sciences de la Terre. Université de Poitiers, 2011.
- [18] : ROUABHIA Fatima « Elaboration et caractérisation d'une matrice inorganique (silicate) destinée à l'inclusion d'un polymère ». 2018.
- [19]:Ch 7- Environmental mineralogy <https://wou.edu/las/physci//poston/ch310/PDF/Ch07%20-%20Environmental-Mineralogy-w15.pdf> 1/24/2019.
- [20] : Projet Aléa et risque sécheresse «Analyse du comportement des sols argileux lors de cycles climatiques extrêmes.Application au risque sécheresse : aide au diagnostic et recommandations » Armines – Centre de Géosciences. (janvier 2009)
- [21] : Ugo de Filippis. Stabilisation de la terre par activation alcaline : Etude des phénomènes physico-chimiques et de leur influence sur les propriétés d'usage. Génie civil. Université de Lyon, 2021. Français.
- [22]: Illite is defined as an interlayer-deficient mica $[K_{0.65} [iv]Si_{3.35} [iv]Al_{0.65} [vi]Al_2 [vi]O_{10}(OH)_2]$.From: Developments in Clay Science, 2013
- [23]: https://en.wikipedia.org/wiki/Illite_crystallinity. Consulter le 29/04/2023
- [24]:Caractéristiques d'un sol http://ressources.unit.eu/cours/geotechnique_routiere/3_Classification_Sols/co/Cours_2_Caracteristiques.html Consulter le 1/05/2023
- [25]: Mouevus et al.,
- [26]: Jiménez Delgado et al., The selection of soils for unstabilised earth building.
- [27] : Abdelfeteh Sadok. «Maintenance du barrage de Ouizert dans la gestion des sédiments d'envasement et dans la réalisation d'un Centre de Stockage de Déchets (CSD) » Thesis • January 2013.
- [28] : Faycal El Fgaier. Conception, production et qualification des briques en terre cuite et en terre crue.Autre. Ecole Centrale de Lille, 2013. Français.
- [29]:Microsoft Word - CHAPITRE 3 Les liants minéraux (<https://www.exocold.com/materiaux-de-construction/cours-les-materiaux-de-construction/?action=dlattach;attach=7201>). Consulter le 2/05/2023
- [30]:Tout sur le béton, Le ciment : composition et fabrication, (<https://www.toutsurlebeton.fr/le-ba-ba-du-beton/le-ciment-composition-et-fabrication/>) Consulter le 2/05/2023
- [31]: Copyright © 2019 Graymont Limited. (<https://www.graymont.com/fr/a-propos/qui-nous-sommes>). Consulter le 2/05/2023
- [32] : David Miraucourt, « Stabilisation du matériau terre crue pour application en brique de terre comprimée au Burkina Faso » (2016-2017).
- [33] : construction (NF EN 459-1, 2015, p. 459)

RÉFRÉRENCES

- [34] : Kouka Amed Jérémy Ouedraogo. « Stabilisation de matériaux de construction durables et écologiques à base de terre crue par des liants organiques et/ou minéraux à faibles impacts environnementaux » Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2019. Français.
- [35]: Bahar, R., Benazzoug, M., Kenai, S., 2004. Performance of compacted cement-stabilised soil. *Cem.Concr. Compos.* 26, 811–820. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.01.003>
- [36] : Alavéz-Ramírez, R., Montes-García, P., Martínez-Reyes, J., Altamirano-Juárez, D.C., Gochi-Ponce, Y., 2012. The use of sugarcane bagasse ash and lime to improve the durability and mechanical properties of compacted soil blocks. *Constr. Build. Mater.* 34, 296–305. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.072>
- [37]: Medjo Eko, R., Offa, E.D., Yatchoupou Ngatcha, T., Seba Minsili, L., 2012. Potential of salvaged steel fibers for reinforcement of unfired earth blocks. *Constr. Build. Mater.* 35, 340–346. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.050>
- [38]: Lima, S.A., Varum, H., Sales, A., Neto, V.F., 2012. Analysis of the mechanical properties of compressed earth block masonry using the sugarcane bagasse ash. *Constr. Build. Mater.* 35, 829–837. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.127>
- [39] : Eires, R., Camões, A., Jalali, S., 2014. Ancient Materials and Techniques to Improve the Earthen Building Durability. *Key Eng. Mater.* 634, 357–366. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.634.357>. Consulter le 25/05/2023
- [40] : Alam, I., Naseer, A., Shah, A.A., 2015. Economical stabilization of clay for earth buildings construction in rainy and flood prone areas. *Constr. Build. Mater.* 77, 154–159. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.046> Consulter le 28/05/2023
- [41] : Seco, A., Urmeneta, P., Prieto, E., Marcelino, S., García, B., Miqueleiz, L., 2017. Estimated and real durability of unfired clay bricks: Determining factors and representativeness of the laboratory tests. *Constr. Build. Mater.* 131, 600–605. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.107>
- [42] : Tran, K.Q., Satomi, T., Takahashi, H., 2018. Improvement of mechanical behavior of cemented soil reinforced with waste cornsilk fibers. *Constr. Build. Mater.* 178, 204–210. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.104>
- [43] : Sore, S., Messan, A., Prud'homme, E., Escadeillas, G., Tsobnang, F., 2018. Stabilization of compressed earth blocks (CEBs) by geopolymer binder based on local materials from Burkina Faso. *Constr. Build. Mater.* 165, 333–345. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.051>
- [44]: Dao, K., Ouedraogo, M., Millogo, Y., Aubert, J.-E., Gomina, M., 2018. Thermal, hydric and mechanical behaviours of adobes stabilized with cement. *Constr. Build. Mater.* 158, 84–96. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.001>. Consulter le 5/05/2023
- [45]: Millogo, Y., Hajjaji, M., Ouedraogo, R., 2008. Microstructure and physical properties of lime-clayey adobe bricks. *Constr. Build. Mater.* 22, 2386–2392. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.09.002> . Consulter le 5/05/2023
- [46] : ville de Massad sur Google maps

RÉFRÉRENCES

- [47] :NF P 15-317 : Norme française. Septembre 1995 – Liants hydrauliques – Ciments pour travaux à la mer.
- [48] : NF P 15-318 : Norme française. D’octobre 1998 – Liants hydrauliques – Ciments à teneur en sulfures limitée pour béton précontraint.
- [49] : NF P94-050 : Norme française. L’essai en teneur en eau.
- [50] : NF P 94-056 : Norme française. Méthode par tamisage à sec après lavage.
- [51] : NF P 94-057 : Norme française. Méthode par sédimentation.
- [52] : NF P 94-054 : Norme française. Détermination de la masse volumique.
- [53] : NF P 11-300 : Norme française. Valeur au bleu de méthylène des sols.
- [54] : Publié par Abdo ban Les matériaux de construction Filière : Génie civil <https://slideplayer.fr/slide/14187519/> . consulter le 1/06/2023
- [55] : Par Agir Laboratoire. <https://www.agir-labo.fr/catalogue-essais/capacite-absorption-bleu-methylene/> Consulter le 31/05/2023
- [56] : NF P 94-051 : Norme française. Détermination des limites d’Atterberg.
- [57] : L’appareil de Casagrande (NF P94-051, 1993, pp. 94–051). Consulter le 5/06/2023
- [58]:coursgeologie.com.http://moodle.insa-toulouse.fr/file.php/301/content/mcyr/chapitre_1-proprietes_physiques_des_sols.pdf . Consulter le 9/06/2023
- [59] : coursgeologie.com. <https://coursgeologie.com/> essais-d-identification-sols-fins-171/. Consulter le 9/06/2023
- [60] : XP P 94-091 : Essai de gonflement à l’œdomètre.
- [61] : NF EN 12664 (2001) : Norme française. L’essai de conductivité thermique.
- [62] : cours MDS licence 2, GENIE CIVIL, TP2, université de Bejaia.
- [63] : NF P 94-068 : Norme française. Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d’un sol ou d'un matériau rocheux

Annexes



MINISTÈRE DE L'HABITAT, DE L'URBANISME ET DE LA VILLE

المختبر الوطني للسكن والبناء

LABORATOIRE NATIONAL DE L'HABITAT ET DE LA CONSTRUCTION

E.P.E. / S.P.A. AU CAPITAL DE 800.000.000 DA – R.C. N°00B 13183-16/00

Direction Régionale Est

UNITE DE BEJAIA

Structure : Laboratoire

TABLEAU RECAPITULATIF DES RESULTATS D'ESSAIS

N° Dossier : /		Intitulé du			
Sondage / Puits					
Profondeur (m)		/			
Densité sèche	γ_d (t/m ³)	1.2			
Teneur en eau pondérale	W (%)	8.69			
Degré de saturation	Sr (%)	/			
Densité humide	γ_h (t/m ³)	1.3			
Granulométrie	5 mm	100			
	2 mm	99.8			
	0.08 mm	98.4			
Sédimentométrie	20 μ m	94			
	2 μ m	56.37			
Limites d'Atterberg	W _L (%)	62.4			
	I _p	31.49			
	LR (%)	/			
Indice de consistance	IC				
Équivalent de sable	E.S				
Poids spécifique	γ_s (t/m ³)	2.68			
Résultats œdométriques	P _c (Bar)	0.53			
	C _t	29.14			
	C _g	4.11			
Perméabilité	K (cm/s)				
Courbe de consolidation	E				
	C _v (cm ² /s)				
Gonflement Libre	GL (Bar)				
Références Proctor	$\gamma_{d\ max}$ (t/m ³)				
	W _{OPT} (%)				
Indice C.B.R à 95 % de l'OPM	I _{CBR} (%)				
Résistance à la compression	R.C.S (Bar)				
Cisaillement rectiligne ou Triaxial	Type d'essai				
	C (bar)				
	φ (°)				



MINISTÈRE DE L'HABITAT, DE L'URBANISME ET DE LA VILLE

المخبر الوطني للسكن والبناء

LABORATOIRE NATIONAL DE L'HABITAT ET DE LA CONSTRUCTION

E.P.E. / S.P.A. AU CAPITAL DE 800.000.000 DA – R.C. N°00B 13183-16/00

Direction Régionale Est

UNITE DE BEJAIA

Structure : Laboratoire

Le :

**LA MASSE VOLUMIQUE DES PARTICULES
SOLIDE SELON NF P 94-54**

N°

Dossier : /

Projet: /

Date : /

PROFONDEUR (m)	Argile de Djelfa	
γ_s (t/m)	2.52	2.68
Moyenne	2.68	



Client :

N° Projet : -22-7

Projet : SID AHMED CHIRAME

Endroit :

Sondage n° : 03

Date essais : 21/03/22

Profondeur : /

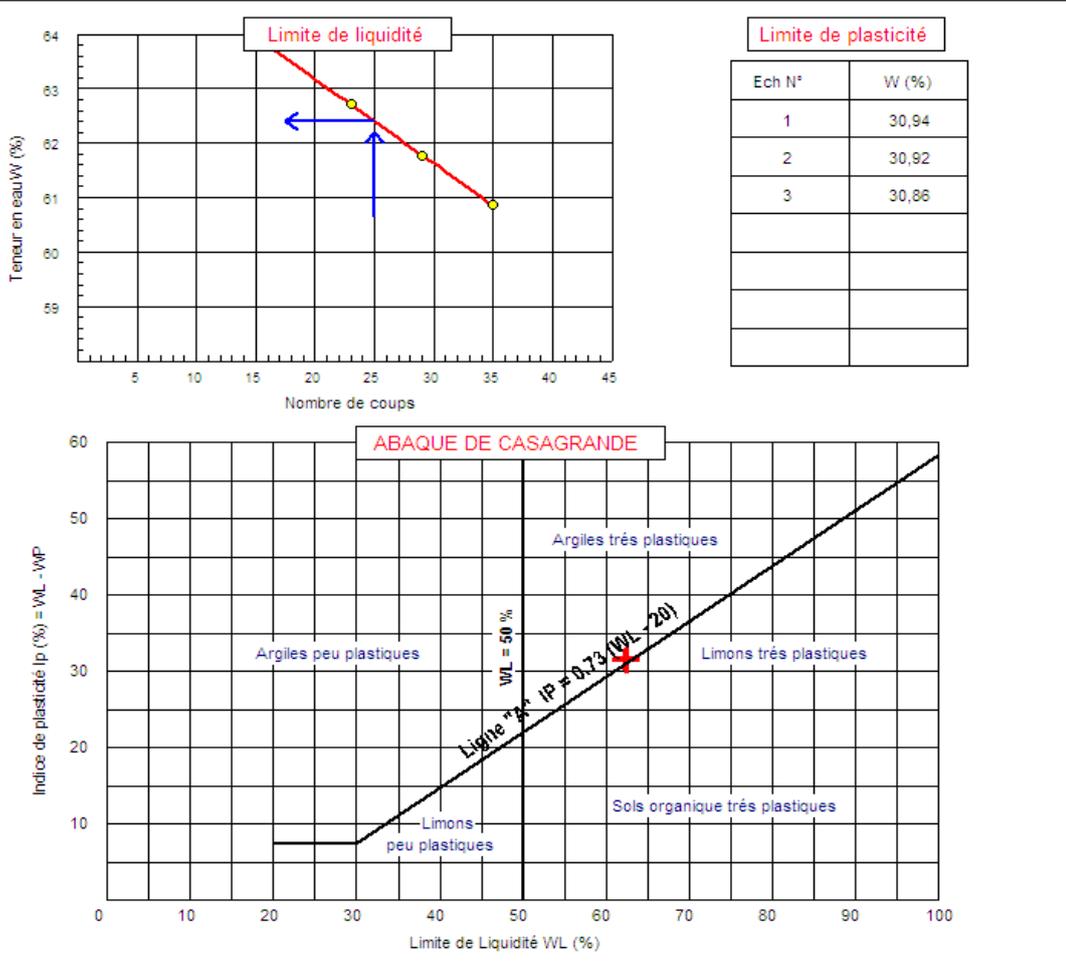
Nature : ARGILE 03 W DJELFA

Limite de Liquidité (%) : WL = 62,40

Teneur en eau naturelle (%) : Weau = /

Limite de Plasticité (%) : WP = 30,91

Indice de Plasticité (%) : IP = 31,49



Sollec 45 2013

Remarque :

Préparé par : /

Approuvé par : /

Date : 23/03/22

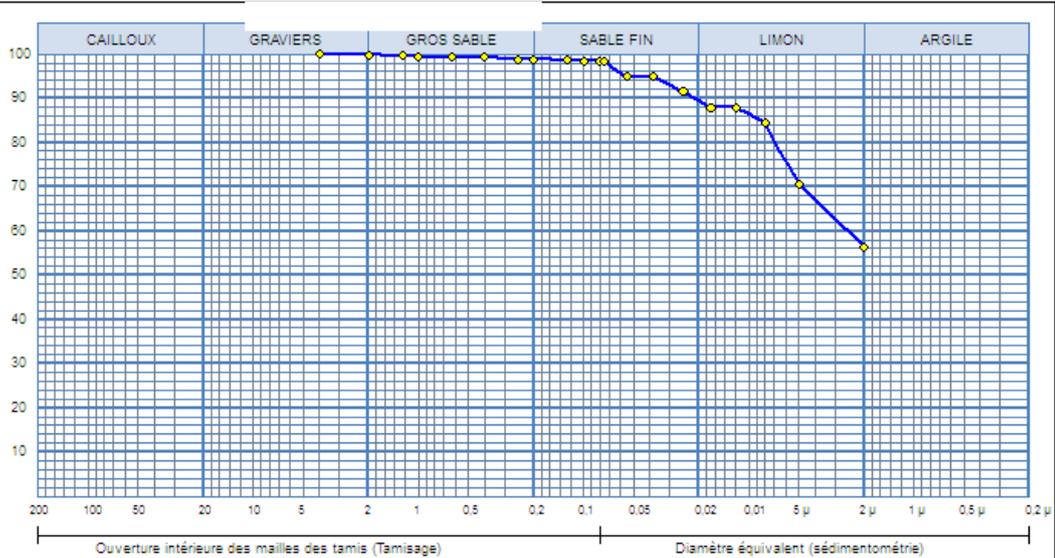


Client :
Projet : SID AHMED CHIRAMP
Endroit :

N° Projet : -22-7

Sondage n° : 03
Profondeur :
Matériaux : ARGILE 03 W DJELFA
Provenance :
Date essais : 20/03/22

—◆— Sondage: 03 :



Analyse Granulométrique		Analyse sédimentométrique	
Tamis (mm)	Tamisé (%)	Diamètre équivalent	Tamisé (%)
4,00	100,00	75,00 μm	98,40
2,00	99,80	55,00 μm	94,90
1,25	99,80	38,00 μm	94,90
1,00	99,40	25,00 μm	91,41
0,83	99,20	17,00 μm	87,91
0,40	99,20	12,00 μm	87,91
0,25	98,80	8,00 μm	84,42
0,20	98,80	5,00 μm	70,51
0,13	98,80	2,00 μm	58,37
0,10	98,40		
0,08	98,40		

© Softe4s 2013

Remarque :

Préparé par :
/

Approuvé par :
/

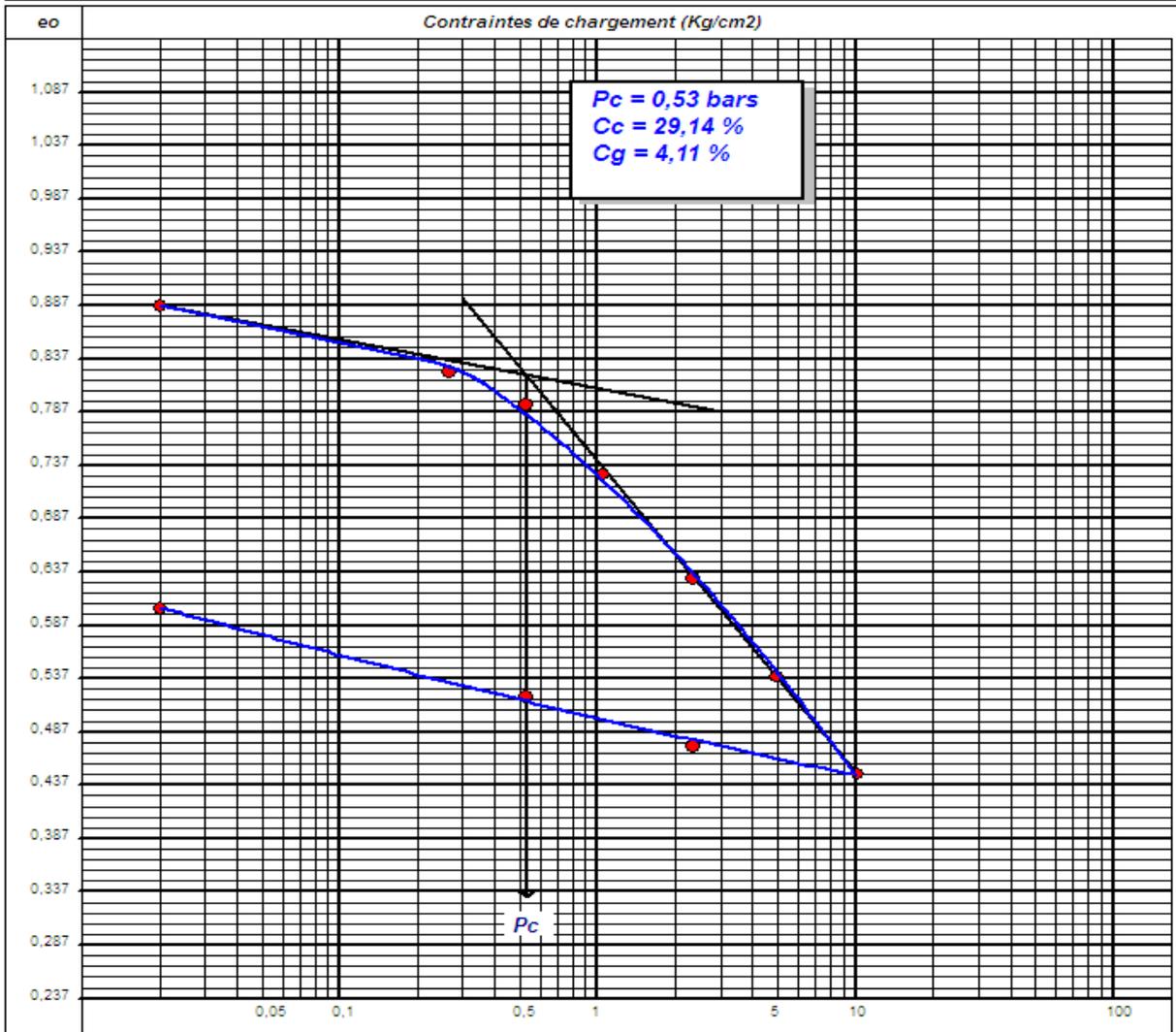
Date :
23/03/22



Client :
Projet : SID AHMED CHIBANE
Endroit :

N° Projet : -22-7

Sondage n° : 03
Profondeur :
Nature : ARGILE 03 W DJELFA
Date essais :



© Softests 2013

Remarque :

Préparé par :
/

Approuvé par :
/

Date :
16/05/22

Eau (%)	Ciment (%)	RC (Mpa)	Conductivité	Retrait (%)
25	0	22,6	1,05	15,09
	4	23,59	0,86	10,61
	8	24,95	0,77	8,32
35	0	22,18	1,07	15,47
	4	22,75	0,76	10,65
	8	23,68	0,54	8,01
40	0	22,85	1,11	18,04
	4	22,99	0,68	12,87
	8	23,5	0,34	9,89

Eau (%)	Chaux (%)	RC (Mpa)	Conductivité	Retrait (%)
25	0	22,6	1,05	15,09
	4	23,14	0,89	10,57
	8	24,55	0,79	8,49
35	0	22,18	1,07	15,47
	4	22,42	0,92	10,3
	8	23,53	0,85	7,56
40	0	22,85	1,11	18,04
	4	22,79	0,99	12,21
	8	23,6	0,94	8,82



FICHE TECHNIQUE CIMENT

Ref :	FTBSA 01
Date	02/07/2018
Rev :	1.1

CEM II/A-L 42.5 R PM-CP2

Répond aux exigences des normes NF P 15-317 et NF P 15-318

CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DU CLINKER

Caractéristiques du Clinker (Formule de Bogue)		Recette Du Ciment		Indicateur	Valeurs moyenne
C ₃ S (%)	62.20%	Clinker	88%	CaOI	1.15
C ₂ S (%)	16.81%	Coquillage (Calcaire)	8.2%	SR	2.52
C ₃ A (%)	4.26% <8% conforme PM	Gypse	3.8%	AFR	1.47
C ₄ AF (%)	10.32%				

Indice Sardan= (C₃A + 0.27*C₃S)= 21.05% <23.5% → Conforme au PM

CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DU CIMENT

Propriétés	Valeurs Moyennes	Valeurs limites	Normes d'essai
Début de prise	170 MIN	≥60MIN	NF EN 196-3
Eau de gâchage	27.1%	---	NF EN 196-3
Le Chatelier	1 mm	<10mm	NF EN 196-3
SSB (Finesse)	4350	---	NF EN 196-6

Teneur en SO ₃	2	≤3	NF EN 196-2
Perte au feu	5.37	---	NF EN 196-2
Teneur en Chlorures	0.06%	≤0.10	NF EN 196-2

RESISTANCES A LA COMPRESSION SUR MORTIER

Échéances	Valeurs moyennes	Ecart-type	Valeurs Limites NF EN 197-1	Normes d'essai
2 Jours	23	1.2	≥20 MPa	NF EN 196-1
7 Jours	35.2	1.65	---	NF EN 196-1
28 Jours	45	2.45	42.5 à 62.5 MPa	NF EN 196-1

(PM) : Ciment pour travaux à la mer (prise mer)

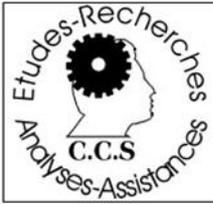
(CP2) : Il présente une teneur en sulfures limitée, nécessaire pour le béton précontraint.

Les valeurs indiquées sont des valeurs moyennes, elles peuvent varier légèrement dans les limites autorisées par les normes. Le succès des travaux entrepris avec ce ciment reste naturellement conditionné par le respect des règles de bonne pratique en matière de préparation, mise en œuvre et conservation des mortiers et bétons.

Vérifiez que ce ciment est bien adapté à l'usage auquel vous le destinez.

Vérifiez que les produits éventuellement ajoutés au ciment (adjuvants,...) sont compatibles avec le résultat escompté.

Document conforme, édité le : 02/07/2018



SYSTEME QUALITE
FICHE TECHNIQUE

Date de création :
21/01/07

Date d'ajout :
08/08/2019

Page 1 sur 1

***CARACTERISTIQUES TECHNIQUES
DE LA CHAUX HYDRATEE***

CCS3103

La composition chimique :

- ✓ $\text{Ca(OH)}_2 > 80\%$
- ✓ $\text{CO}_2 : < 5,00\%$
- ✓ $\text{MgO} : < 0,4\%$
- ✓ $\text{SiO}_2 : < 2,2\%$
- ✓ $\text{Al}_2\text{O}_3 < 1,00\%$
- ✓ $\text{Fe}_2\text{O}_3 : < 2,00\%$
- ✓ Equivalent CaO : 67,4 à 73,25%
- ✓ H_2O hydratée 19,45 à 23,29%
- ✓ Densité : 500 g/l
- ✓ CONSTANTE VOLUMIQUE : BONNE :
- ✓ $\text{K}_2\text{O} + \text{NaO} : < 0,4\%$
- ✓ INSOLUBLE : < 0,35%

EMBALLAGE : sac de 25 Kg.

C.C.S. SANTE & ENVIRONNEMENT

CCS ALGER :

Tél : 021 557 939 **Fax :** 021 557 923

Site WEB : <https://www.ccsdz.com> - **E-MAIL :** ccs@ccsdz.com

Résumé :

Cette étude présente une méthode de stabilisation chimique respectueuse de l'environnement pour les briques en terre crue. En incorporant du ciment et de la chaux à de différents pourcentages, cette méthode améliore les propriétés mécaniques et durables des briques. Les briques en terre crue, combinées à cette technique, offrent une alternative écologique et économique aux matériaux de construction conventionnels. Les tests ont montré que l'argile utilisée est adaptée à la fabrication de ces briques. L'ajout de ciment ou de chaux renforce les briques, réduit le retrait et améliore l'isolation thermique. Les résultats encouragent l'utilisation de ces briques dans la construction durable.

Mots clés : Adobe, terre crue, stabilisation, ciment, chaux.

Abstract :

This study presents an environmentally friendly method of chemical stabilization for adobe bricks. By incorporating cement and lime at different percentages, this method enhances the mechanical and durable properties of adobe bricks. Adobe bricks, combined with this technique, offer an eco-friendly and cost-effective alternative to conventional building materials. Tests have shown that the clay used is suitable for manufacturing these bricks. The addition of cement or lime strengthens the bricks, reduces shrinkage, and improves thermal insulation. The results encourage the use of these bricks in sustainable construction.

Keywords: Adobe, raw earth, stabilization, cement, lime.

ملخص :

تقدم هذه الدراسة طريقة صديقة للبيئة لتثبيت الطوب الطيني بواسطة الاستخدام الكيميائي. من خلال إضافة الإسمنت والجير بنسب مختلفة، تعزز هذه الطريقة الخصائص الميكانيكية والمتانة للطوب الطيني. الطوب الطيني، عند استخدام هذه التقنية، يقدم بديلاً صديقاً للبيئة واقتصادياً للمواد البنائية التقليدية. أظهرت الاختبارات أن الطين المستخدم مناسب لصنع هذه الطوب. إضافة الإسمنت أو الجير يعزز من قوة الطوب، ويقلل من انكماشه، ويحسن العزل الحراري. النتائج تشجع على استخدام هذه الطوب في البناء المستدام.

الكلمات المفتاحية: طوب، التربة الخام، التثبيت، الأسمنت، الجير