

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie
Département de Génie Civil

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme Master en Génie civil

Option : Structures

Thème :

Élaboration de terre stabilisée

Réalisé par :

-Mr. Benkerrou Mohand Seghir
-Mr. Chibout Yanis

Encadré par :

-Dr. Bouzidi Mohamed Amin

Membres du jury :

-Mr. A.Tahakourt
-Mme R.Sedira

2023/2024

Remerciements

On remercie Dieu de tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

En premier lieu, nous exprimons notre gratitude envers notre promoteur, M. Bouzidi Mohamed Amin, pour la qualité de son encadrement, sa patience et sa disponibilité tout au long de la préparation de ce mémoire.

Nous n'oublions pas de remercier M. Si Ahmed Chabane et M. Ould Amer Ahmed pour leur soutien tout au long de cette période.

Un grand merci à M. Lillouch Samir, chef du département de Génie Civil, pour ses conseils et sa disponibilité.

Un grand merci au technicien du laboratoire, M. Zoubiri Djamel, ainsi qu'à Mme Saci pour leur disponibilité et leur compréhension au sein du laboratoire.

Nous remercions également tous les membres du jury qui ont accepté d'examiner notre travail.

Nous tenons aussi à remercier tous nos amis pour leur soutien et leur encouragement tout au long de cette période.

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.

Merci infiniment.

Mohand Seghir&Yanis

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

- Mes chers parents qui ont toujours été à mes côtés et m'ont soutenu tout au long de ces longues années d'étude.

- Ma tante **Mekyoussa**.

- Mon cher frère **Samir** et ma chère sœur **Lynda** : je vous remercie et je n'oublierai jamais votre soutien.

- Toute ma famille.

- Mon binôme **Mohand** ainsi que

(**Billal, Massi, Karima, Ouardia, Thafath, Amel, Ludmila, Yousra, Houda, Meziane, Kokos**)

- Tous mes enseignants, du primaire à l'université.

- Mes chers amis, sans exception.

- Toute la promotion *Génie Civil*.

- Tous ceux qui ont contribué à ma réussite.

- Tous ceux qui sont dans mes pensées et que je n'ai pas cités.

-A la mémoire de notre camarade **Baar Khalissa** paix a son âme.

-Et enfin, je dédie ce mémoire à moi-même, en reconnaissance de mes efforts et de ma persévérance.

Yanis Chibout

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

Aux meilleurs parents au monde

Mon père **Boussaad Benkerrou**, ma mère **Taous Djaoudene**, ainsi que mes grands-parents **Tayeb Benkerrou**, **Said Djaoudene**, **Fatima Benkerrou** et à la mémoire de **Tassadit Djaoudene**, vous êtes pour moi un exemple, un guide, le repère, l'exemple concret du respect, honnêteté, naïveté, je tiens énormément à honorer les merveilleux êtres que vous êtes. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime et le respect que j'ai eu toujours pour vous. Ce travail est le fruit de tous les sacrifices que vous aviez déployés pour mon éducation et ma formation, longue et heureuse vie à vous mes chers parents bonne santé.

A mes frères et sœur

Rafik, Aoudia, Djaafar et Nassima, Je voudrais vous remercier pour votre soutien indéfectible et votre amour inconditionnel qui m'ont donné la force et la détermination nécessaires pour mener à bien ce projet. Votre encouragement constant et votre confiance en moi ont été des piliers tout au long de mon parcours.

A tout ma famille

Je tiens également à exprimer ma gratitude envers ma famille, dont le soutien et l'affection m'ont été précieux durant toutes ces années. Votre présence à mes côtés a été une source de réconfort et de motivation.

A mes chers amis sans exception.

A mon binôme **Yanis** ainsi que
(**Billal, Karima, Massi, Ouardia, Ludmila, Amel, Thafath, Yousra, Houda, Meziane**)

A la mémoire de notre camarade de promotion **Baar Khalissa** paix a son âme.

A toute la promotion *Génie Civil*.

A tous mes enseignants qui m'ont servi du primaire à l'université.

A tous ceux qui ont contribué à ma réussite.

A tous ceux qui sont dans mes pensées et que Je n'ai pas cité.

Et enfin je dédie ce mémoire à moi-même, en reconnaissance de mes efforts et de ma persévérance.

Benkerrou Mohand Seghir

Table des matières :

Introduction générale	1
Chapitre I : Synthèse bibliographique	
1. Introduction	3
2. La terre crue.....	3
2.1. Les intérêts de la construction en terre crue	4
2.2. Technique de construction en terre crue	4
2.3. La construction en terre crue dans le monde	6
2.4. La construction en terre crue en Algérie	7
2.5. Les argiles.....	9
2.5.1. Définition.....	9
2.5.2. Classification des minéraux argileux	10
2.5.3. Principaux types d`argile	11
2.5.3.1. La kaolinite	11
2.5.3.2. Les montmorillonites	11
2.5.3.3. L`illite	12
2.6. Stabilisation des sols	13
2.6.1. Définition.....	13
2.6.2. Objectifs.....	13
2.6.3. Stabilisation mécanique.....	13
2.6.4. Stabilisation physique.....	14
2.6.4.1. Sable	14
2.6.4.2. Fibres végétales	14
2.6.5. Stabilisation chimique	15
2.6.5.1. La chaux.....	15
2.6.5.2. Le ciment	15
2.7. Interactions Argile-Liants.....	16
2.7.1. Echelle microscopique.....	16
2.7.1.1. Cas du ciment.....	16

2.7.1.2. Cas de la chaux	17
2.7.2. Echelle macroscopique	17
2.7.2.1. Cas du ciment.....	17
2.7.2.2. Cas de la chaux	17
2.8. Le béton de terre stabilisée et compressée	17
2.8.1. Définition.....	17
2.8.2. Domaine d'application	18
2.8.3. Avantages et inconvénients du béton de terre stabilisée	18
2.8.3.1. Les avantages	18
2.8.3.2. Les inconvénients.....	18
3. Etat de l'art sur le béton de terre.....	19
4. Conclusion.....	22
Chapitre II : Matériaux et Méthodes Expérimentale	
1. Introduction	23
2. Matériaux utilisés.....	23
2.1. Argile	23
2.2. Le Sable.....	24
2.3. Le ciment.....	24
2.4. L'eau de gâchage	24
3. Méthode de travail et matérielles spécifique	24
3.1. Caractérisation géotechnique.....	24
3.1.1. Analyse granulométrique par tamisage	24
3.1.2. Analyse granulométrique par sédimentation	26
3.1.3. Détermination des limites d'Atterberg	28
3.2. Caractéristiques physiques	30
3.2.1. Masse volumique	30
3.2.1. Masse volumique apparente.....	30
3.2.2. Masse volumique absolue.....	31
3.2.3. La pesée hydrostatique	33

3.3. Confection des échantillons	34
3.3.1. Préparation de matière première	34
3.3.2. Malaxage des mélanges	35
3.3.3. Mise en forme	35
3.3.4. Compactage des mélanges	36
3.3.5. Conservation au laboratoire	37
3.4. Caractéristiques minéralogiques	37
3.4.1. Méthode par diffraction aux rayons X (DRX)	37
3.5. Caractéristiques chimiques... ..	38
3.5.1. La fluorescence X (FRX)	38
3.5.2. Analyse par spectrométrie infrarouge (IRTF).....	39
3.6. Résistances mécaniques	40
3.6.1. Résistance à la compression	40
3.7. Essai de durabilité	41
3.7.1. Séchage/ mouillage	41
4. Conclusion.....	43
Chapitre III : Exploitation des résultats	
1. Introduction	44
2. Caractérisation géotechnique de la matière première	44
2.1. Analyse granulométrique par tamisage du sable.....	44
2.2. Analyse granulométrique par tamisage et sédimentation.....	45
2.3. Limite d'Atterberg	45
3. Caractéristiques physiques de la matière première.....	46
3.1. La masse volumique apparente (ρ_{app}) du sable est d'argile	46
3.2. La masse volumique absolue (ρ_{abs}) du sable est d'argile.....	46
4. Les caractéristiques du ciment.....	46
5. Caractéristiques chimiques des échantillons	47
5.1. La fluorescence X (FRX)	47
5.2. Analyse par spectrométrie infrarouge (FTIR)	49

6. Caractéristiques physiques des échantillons.....	51
6.1. Masse volumique	51
6.2. Porosité et absorption.....	52
7. Caractéristiques mécaniques des échantillons	53
7.1. Résistance à la compression	53
8. Caractéristiques minéralogiques des échantillons	54
8.1. Méthode de la diffraction au rayon x(DRX)	54
9. Durabilité.....	55
10. Conclusion.....	57
Conclusion générale.....	58

Liste de figure :

Figure I-1 : Roue des techniques de construction en terre.....	4
Figure I-2 : un mur construit en pisé	5
Figure I-3 : Foulage du mélange en piétinant	5
Figure I-4 : Maçonnerie en torchis	6
Figure I-5 : Un mur construit en Adobe	6
Figure I-6 : Architecture de terre dans le monde	7
Figure I-7 : Casbah d'Alger	7
Figure I-8 : Les ruines romaines de Timgad.....	8
Figure I-9 : Mausolée royal de Maurétanie.....	8
Figure I-10 : Tassili N'Ajjer	8
Figure I-11 : Les ruines de Djemila	8
Figure I-12 : La vallée du Mزاب.....	9
Figure I-13 : Kalaa des Beni Hammad	9
Figure I-14 : Une argile	10
Figure I-15 : Schéma de la structure de la kaolinite.....	11
Figure I-16 : Schéma de la structure de la montmorillonite.....	12
Figure I-17 : Schéma de la structure de l'illite.....	12
Figure II-1 : Aspect visuel du sol.....	23
Figure II-2 : Aspect visuel du sable	24
Figure II-3 : la tamiseuse est les tamis utilisés	25
Figure II-4 : Matériaux utilisée dans l'analyse de sédimentation.....	28
Figure II-5 : Appareil casa grande	30
Figure II-6 : les outils utilisés	30
Figure II-7 : Masse du moule vide	31
Figure II-8 : Entonnoir+moule remplis avec le sable	31
Figure II-9 : Masse du sable+moule.....	31
Figure II-10 : Eprouvette remplis avec l'eau.....	32

Figure II-11 : Epruvette remplis avec l'eau+ argile	32
Figure II-12 : Un échantillon pesé.....	34
Figure II-13 : un échantillon émergé dans l'Ethanol.....	34
Figure II-14 : Moule cylindrique utiliser pour la fabrication des échantillons	34
Figure II-15 : Malaxages des mâtreaux	35
Figure II-16 : Aspect visuel du mélange	35
Figure II-17 : Mise en place du matériau dans le moule	35
Figure II-18 : Compactage de l'échantillon.....	36
Figure II-19 : Démoulage de l'échantillon	36
Figure II-20 : L'échantillon après le démoulage.....	36
Figure II-21 : Conservation des échantillons au laboratoire.....	37
Figure II-22 : Appareil DRX CRPC Bejaia.....	38
Figure II-23 : Les échantillons mis dans l'appareil.....	38
Figure II-24 : Appareil FRX CRAPC Bejaia.....	38
Figure II-25 : Préparation de l'échantillon+ + sel purifié KBr	40
Figure II-26 : Compactage de la pastille.....	40
Figure II-27 : les pastilles obtenues.....	40
Figure II-28 : Appareil (IR)	40
Figure II-29 : Un échantillon dans la presse utilisée	41
Figure II-30 : Un échantillon après l'essai de compression.....	41
Figure II-31 : Echantillons séchée dans l'étuve.....	42
Figure II-32 : Echantillons émergée dans l'eau.....	42
Figure II-33 : les échantillons dans l'étuve à 70°C	42
Figure III-1 : La courbe granulométrique du sable.....	44
Figure III-2 : La courbe granulométrique d'argile.....	45
Figure III-3 : Classification de l'argile dans l'abaque CASAGRANDE.....	45
Figure III-4 : Spectre infrarouge d'un échantillon	49

Figure III-5 : Spectre infrarouge d'un échantillon	49
Figure III-6 : Spectre infrarouge d'un échantillon	50
Figure III-7 : L'influence du ciment et du sable sur la masse volumique	51
Figure III-8 : L'influence du sable est du ciment sur la porosité	51
Figure III-9 : L'influence du sable est du ciment sur l'absorption	52
Figure III-10 : L'influence du ciment et du sable sur la résistance à la compression	53
Figure III-11 : Un échantillon après l'essai de compression	54
Figure III-12 : Analyse de la diffraction au rayon x (DRX) de 4 échantillons	54
Figure III-13 : La perte de masse en fonction des cycles	55
Figure III-14 : L'évolution de la dégradation de l'échantillon.....	56
Figure III-15 : L'évolution de la dégradation de l'échantillon.....	56
Figure III-14 : L'évolution de la dégradation de l'échantillon.....	57

Liste des tableaux :

Tableau I-1 : Résumé des différents types d'argile.....	12
Tableau II-1 : Classement de sable	26
Tableau III-1 : Résultats du module de finesse de sable et ça qualité	44
Tableau III-2 : Résultats limite d'Atterberg.....	45
Tableau III-3 : Les résultats obtenus pour le sable	46
Tableau III-4 : Les résultats obtenus pour l'argile	46
Tableau III-5 : les résultats obtenus pour le sable	46
Tableau III-6 : Les résultats obtenu pour l'argile	46
Tableau III-7 : La composition potentiel du clinker	47
Tableau III-8 : La compositions chimique du ciment	47
Tableau III-9 : Analyse FRX de 4 échantillons	48
Tableau III-10 : Analyse des Composés par Spectroscopie Infrarouge.....	50

Liste des abréviations :

- Unesco** : Organisation des nations unies pour l'éducation, la science et la culture.
- AIPEA** : Association internationale pour l'étude des argiles.
- CPA** : Ciment portland.
- CPJ** : Ciment portland composé.
- CHP** : Ciment de haut fourneau.
- CPZ** : Ciment pouzzolanique.
- CLC** : Ciment au laitier et aux cendres.
- CSH** : Gel de silicate de calcium hydraté.
- CH** : Hydroxyde de calcium.
- Aft** : Ettringite.
- C-Ŝ-H** : Cristaux de sulfate de calcium hydraté.
- EA** : Emission acoustique.
- BTSC** : Blocs de terre stabilisée et comprimée.
- CV** : Cendres volants.
- RS** : Sable recyclé.
- CEB** : Blocs de terre comprimée.
- RC** : Ciment recyclé thermoactive.
- OPC** : Ciment portland classique.
- DIC** : Méthode de corrélation d'images numériques.
- MF** : Module de finesse.
- Ip** : Indice de plasticité.
- Wl** : Limite de liquidité.
- Wp** : Limite de plasticité.
- ρ** : Masse Volumique.
- ρ_{app}** : Masse volumique apparente.
- ρ_{abs}** : *Masse volumique* Absolue.
- Drx** : Diffraction aux rayons X.
- FRX** : la fluorescence X.
- FTIR** : Spectrométrie infrarouge.
- Re** : Résistance à la compression.
- CRAPC** : Centre de recherche scientifiques et techniques en analyse physico-chimiques.

Résumé :

L'industrie de la construction accorde une importance croissante à la conception écologique des structures et au développement durable. Les matériaux de construction respectueux de l'environnement, comme le béton de terre, qui intègre divers composants écologiques, sont particulièrement valorisés de nos jours. La production de ce type de béton vise à diminuer l'utilisation de ciment, contribuant ainsi à la réduction des émissions de CO₂.

L'objectif principale de cette recherche est de déterminer les conditions optimales de stabilisation pour améliorer la durabilité et la résistance à la compression du béton de terre, pour cela différents pourcentages du ciment et du sable sont explorés. Les échantillons confectionnés ont été soumis à des essais de compression après 28 jours de cure afin de déterminer leur résistance mécanique ainsi que des essais pour évaluer leur caractéristique physique, chimique et minéralogique. De plus, un essai de séchage /mouillage a été réalisé pour déterminer leur durabilité.

Les résultats indiquent que la résistance à la compression est optimale pour un taux de sable de 55%, avec une augmentation régulière de la résistance en fonction de l'augmentation du pourcentage de ciment. Par ailleurs, en augmentant les proportions de sable et de ciment, la durabilité des échantillons s'améliore.

Mots clés : béton de terre, résistance à la compression, durabilité. Terre stabilisée

Abstract :

The construction industry is increasingly prioritizing the ecological design of structures and sustainable development. Eco-friendly building materials, such as earth concrete incorporating various ecological components, are particularly valued today. The production of such concrete aims to reduce cement usage, thereby contributing to CO₂ emissions reduction. The main objective of this research is to determine the optimal stabilization conditions to enhance the durability and compression strength of earth concrete. To achieve this, variations in the percentages of cement and sand were tested. Samples were subjected to compression tests after 28 days to assess their mechanical strength, as well as other tests to evaluate their physical, chemical, and mineralogical characteristics. Additionally, a drying-wetting test was conducted to determine their durability.

The results indicate that the compression strength is optimal at a sand content of 55%, with a consistent increase in strength with higher cement percentages. Furthermore, increasing the proportions of sand and cement improves the durability of the samples.

Introduction générale :

Le secteur de la construction est responsable de la moitié des émissions mondiales annuelles de dioxyde de carbone CO₂ due principalement à la production du ciment. L'objectif principale de cette industrie est de réduire la consommation de ciment et donc la réduction de l'émission de CO₂, d'où la nécessité d'utilisation des matériaux écologiques et durables. [1]

La recherche de matériaux écologiques et durables est devenue une priorité dans les efforts visant à réduire l'empreinte environnementale et à promouvoir des solutions plus respectueuses de l'environnement. La terre stabilisée, est un matériau composite constitué de terre naturelle renforcée par divers stabilisants, est particulièrement prometteuse en raison de ses caractéristiques environnementales et économiques.

Ce mémoire se concentre sur l'élaboration de béton de terre stabilisée avec l'objectif de maximiser ses performances en termes de durabilité et de résistance. La problématique principale de cette recherche est de déterminer les conditions optimales de stabilisation pour améliorer la durabilité et les propriétés mécaniques de la terre stabilisée. Bien que ce matériau présente de nombreux avantages, il pose également des défis significatifs en termes de résistance aux variations climatiques et aux charges mécaniques.

Pour atteindre ces objectifs, une méthodologie rigoureuse a été adoptée, combinant les expérimentations en laboratoire, les analyses théoriques. Les essais mécaniques, physique ainsi que l'essai de durabilité permettent d'évaluer les performances des échantillons de terre stabilisée sous diverses conditions.

Le mémoire est structuré en trois chapitres principaux :

Le premier chapitre Synthèse Bibliographique : Ce chapitre présente une revue exhaustive de la littérature sur la terre crue ses différentes techniques de stabilisation (chimique, physique et mécanique), les argiles, ainsi que les propriétés et les applications potentielles du béton de terre.

Le deuxième chapitre Matériaux et Méthodes Expérimentales : Ce chapitre décrit les matériaux utilisés, les protocoles expérimentaux mis en œuvre, et les techniques de caractérisation des échantillons de terre stabilisée. Il inclut les méthodes de préparation des échantillons, et les procédures des différents teste.

Le troisième chapitre Résultats et discussions : Ce chapitre présente les résultats des essais, analyse les données obtenues et discute les performances des différentes formulations de terre

stabilisée. Les corrélations entre les types de stabilisants, leurs proportions et les propriétés mécaniques du matériau sont examinées.

En conclusion, ce mémoire vise à apporter une contribution à l'innovation dans le domaine des matériaux écologiques et durables. En développant un béton de terre stabilisée performant, nous espérons offrir une solution viable et respectueuse de l'environnement, capable de répondre aux défis techniques actuels en matière de durabilité et de résistance.

Chapitre I :
Synthèse bibliographique

Chapitre I : Synthèse bibliographique

1. Introduction :

Depuis des millénaires d'années, la terre est l'un des principaux matériaux de construction utilisés par les êtres humains. Elle possède une longue histoire d'utilisation comme matériau de construction, qui remonte aux Sumériens de Mésopotamie vers 7 000-6 000 avant notre ère [2]. Les premières structures humaines en terre connues, datant d'environ 10 000 avant notre ère, étaient construites avec des briques de terre empilées, mettant en évidence la relation étroite entre les humains et la terre dans la construction [3]. Pour de nombreuses civilisations, la terre a joué un rôle essentiel dans la construction de structures religieuses et résidentielles, ce qui démontre sa polyvalence et son rôle essentiel dans l'histoire de l'architecture [1]. De nos jours, les techniques de construction basées sur la terre demeurent en vigueur, permettant d'abriter près d'un tiers de la population mondiale [4]. Les pays en développement sont particulièrement touchés par cette tendance, où plus de la moitié des habitants résident dans des constructions en matériaux terreux [5]. Dans les pays développés, la construction en terre est de plus en plus appréciée, notamment pour ses bénéfices environnementaux. Ces éléments comprennent une diminution de l'empreinte carbone, une conductivité thermique optimale et des caractéristiques hygroscopiques [6], ces attributs répondent parfaitement aux inquiétudes environnementales actuelles et à la tendance mondiale vers des méthodes de construction durables [7].

2. La terre crue :

La terre crue est un matériau de construction naturel ancien qui nécessite simplement d'être extrait et transformé afin d'être utilisé. Comme son nom l'indique, la terre crue se distingue de la terre cuite parce qu'elle n'a pas été cuite. Depuis longtemps, la terre crue est employée comme matériau de construction, en particulier pour la construction de maisons individuelles. D'après un rapport du Centre international de la construction en terre plus de la moitié des personnes sur terre vivent toujours dans des maisons en terre. Effectivement, la terre crue est un matériau abordable et simple d'utilisation lorsqu'il n'y avait pas encore de technologie de construction.[8]

Dans le domaine de la construction, il est fréquent de compacter le sol en blocs afin d'améliorer ses caractéristiques telles que la résistance mécanique, les isolations, la résistance thermique et acoustique, et bien d'autres encore. Dans cette optique, les sols argileux ont été fréquemment employés car ils ont de bonnes caractéristiques de cohésion.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Les principales méthodes de construction en terre crue :

- **Le pisé :**

Dans les régions où la terre est graveleuse, le pisé est indispensable. Il est composé d'un mélange simple de terre, de sable et d'eau, bien comprimé et lié par des argiles, ce qui permet de créer un matériau isolant et modulable à tout moment. Son mécanisme repose sur la compaction.

Les couches successives de terre crue d'environ 12 cm sont placées à l'intérieur du coffrage en utilisant un pilon afin de créer un mur. Dès la fin du compactage des couches de terre, il est possible de procéder au décoffrage.



Figure I-2 : un mur construit en pisé.

- **La bauge :**

La bauge est fabriquée en mélangeant de la terre argilo-limoneuse, de la fibre végétale et de l'eau. Traditionnellement, le mélange était foulé à l'aide de sabots d'animaux ou en piétinant des pieds jusqu'à ce qu'il atteigne l'élasticité souhaitée. Il est mis en place par assises successives, puis il est compacté au pilon et laissé sécher pendant plusieurs semaines avant de commencer la levée.



Figure I-3 : Foulage du mélange en piétinant [9]

Chapitre I : Synthèse bibliographique

- **Le torchis :**

Le torchis est un matériau de remplissage non porteur qui ne sert qu'à protéger contre le froid et les précipitations [10]. Cette méthode implique l'utilisation d'une structure en bois dont les interstices sont remplis par un mélange de terre et de paille qui devient plastique par le piétinement. Leur épaisseur varie habituellement de 15 à 20 cm.



Figure I-4 : Maçonnerie en torchis.

- **L'adobe :**

Une méthode ancienne, où la quantité d'argile dans la terre est élevée. Préparée sous forme liquide (avec une teneur en eau d'environ 30 %) [11]. Il s'agit d'une brique de terre crue fabriquée à la main, puis compactée dans des coffrages prismatiques en bois ou en métal à l'aide d'un pilon. Ensuite, ces blocs seront séchés au soleil avant d'être transportés sur le chantier et utilisés comme matériau de remplissage ou matériau porteur.



Figure I-5 : Un mur construit en Adobe.

2.3. La construction en terre crue dans le monde :

Différentes constructions contemporaines en terre réparties à travers le monde témoignent de l'intérêt continu pour la construction en terre. La terre a été et est encore un matériau de construction privilégié dans les régions rurales d'Amérique Latine, d'Asie ou d'Afrique. En revanche, l'importance de la terre crue a diminué en Europe, tout comme dans

Chapitre I : Synthèse bibliographique

d'autres pays industrialisés, avec l'industrialisation au XIXe siècle. Cela a entraîné une diminution des compétences. La terre crue a progressivement retrouvé l'intérêt des architectes à la suite de la crise énergétique des années 1980. Cependant, il est encore nécessaire que la terre crue soit intégrée dans la gamme des matériaux de construction existants.

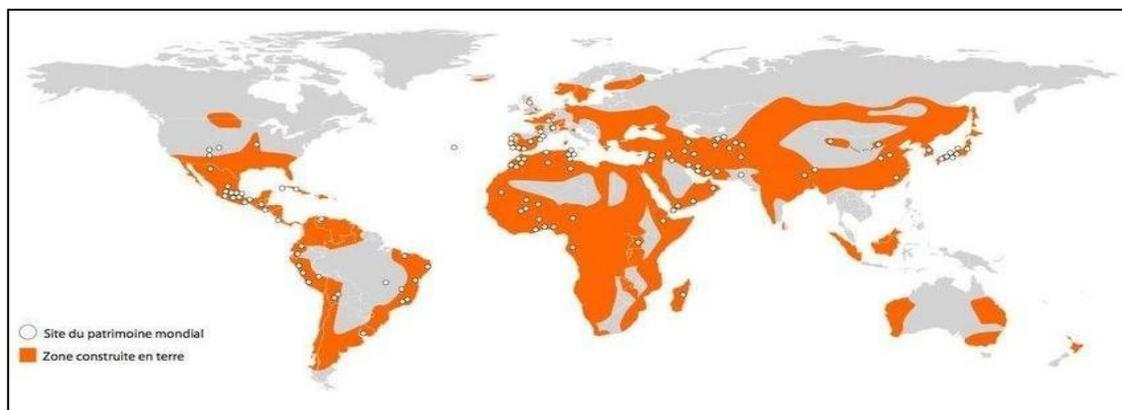


Figure I-6 : Architecture de terre dans le monde.[8]

2.4. La construction en terre crue en Algérie :

Le prestige de la terre crue en Algérie remonte à des millénaires. Plusieurs édifices majestueux tels que la casbah d'Alger et de Bejaia et les édifices religieux ont été construits en terre crue.

Sept sites sont classés au « patrimoine mondial » de l'UNESCO en Algérie. Du désert du Tassili à la casbah d'Alger, en passant par les ruines de Tipasa ou les édifices remarquables de la vallée du M'Zab. [12]

La liste des sites inscrits au patrimoine mondial de l'Unesco [12] :

- Casbah d'Alger (Wilaya d'Alger).



Figure I-7 : Casbah d'Alger.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

- Les ruines romaines de Timgad (Wilaya de Batna).



Figure I-8 : Les ruines romaines de Timgad.

- Mausolée royal de Maurétanie (Wilaya de Tipaza).



Figure I-9 : Mausolée royal de Maurétanie.

- Tassili N'Ajjer (Wilaya de Illizi, Wilaya de Tamanrasset)

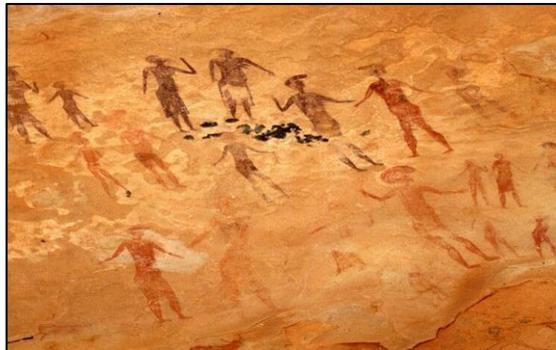


Figure I-10 : Tassili N'Ajjer.

- Les ruines de Djemila (Wilaya de Sétif).



Figure I-11 : Les ruines de Djemila.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

- La vallée du Mزاب(W-Ghardaïa).



Figure I-12 : La vallée du Mزاب.

- Kalaa des Beni Hammad (M'sila).



Figure I-13 : Kalaa des Beni Hammad.

2.5. Les argiles :

2.5.1. Définition :

L'argile est une roche sédimentaire meuble, composée de particules fines de moins de $2\mu\text{m}$. Les argiles sont formées par l'altération et la détérioration des roches qui se trouvent à la surface de l'écorce terrestre en contact avec l'eau et sous l'influence des variations de température en surface. Les argiles sont présentes sur la surface, dans les dépôts sédimentaires, qui proviennent de roches magmatiques, métamorphiques ou sédimentaires rencontrées dans le substratum régional. Les phyllosilicates (silicates en feuillets, silicates d'aluminium et parfois de silicates de magnésium) constituent la majorité des particules argileuses. Elles se présentent sous la forme de fines plaquettes développées dans un plan de l'espace avec des couches tétraédriques et octaédriques. [13]

Chapitre I : Synthèse bibliographique



Figure I-14 : Une argile.

2.5.2. Classification des minéraux argileux :

Les argiles sont composées de minéraux principalement composés de phyllosilicates. On distingue principalement deux types de structures :

-Les phyllosilicates 1 :1 (ou TO) : Les feuillets sont constitués d'une couche T (tétraédrique) et d'une couche O (octaédrique).

-les phyllosilicates 2 :1 (ou TOT) : Les feuillets sont constitués d'une couche O (octaédrique) entourée de deux couches T (tétraédriques).

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

- Type de feuillets 2 :1 ou 1 :1.
- Charge globale de feuillets.
- Nature des cations inter foliaires. [14], [15]

Les phyllosilicates se divisent en trois grandes familles :

-La famille des Kaolins de type T/O : Les kaolinites ou T-O, Ils sont reliés par une couche octaédrique d'Al (OH)₆ et une couche tétraédrique de SiO₄ en forme de feuillets, avec les atomes O et OH associés. L'équidistance typique est d'environ 7 Å (1 Å = 10⁻¹⁰m).

- La famille des Smectites de type T/O/T : La famille des smectites, également connue sous le nom de T-O-T, Le feuillet se compose de deux couches tétraédriques et d'une couche d'octaèdres. L'équidistance typique s'élève à environ 10 Å (1 Å = 10⁻¹⁰m). Ce genre est principalement caractérisé par les illites et les smectites.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

- **La famille de Chlorite de type T/O/T/O** : chlorite, également appelés T-O-T, elle est formée par un empilement de feuillets de type T/O/T, la famille des smectites est similaire au type précédent mais l'espace inter foliaire est occupé par une couche octaédrique. L'équidistance caractéristique est alors de 14 Å ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$) environ.

2.5.3. Principaux types d'argile :

Il existe plusieurs familles d'argiles, regroupant des dizaines d'espèces. Mais ceux-là il existe trois principaux types d'argiles que l'on trouve le plus couramment dans le sol : Kaolinite, illite et montmorillonite.

2.5.3.1. La kaolinite :

La kaolinite est un phyllosilicate de type 1 :1, est composée d'une alternance de couches de feuillets en tétraèdre (Silice) et d'octaèdre (Aluminium), Sa formule théorique est $\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$.

Les deux feuillets sont rapprochés de manière à créer une couche unique d'une épaisseur d'environ 7 Å (0,7 nm) qui s'étend indéfiniment dans les deux autres directions [16]. Les liaisons hydrogène sont utilisées pour relier deux feuillets. Les hydroxyles de la couche octaédrique et les oxygènes de la couche tétraédrique sont liés sur ces liaisons. Ces phénomènes font que les feuillets se rapprochent, ce qui empêche toute intrusion de molécules d'eau, de molécules organiques ou d'ions minéraux.

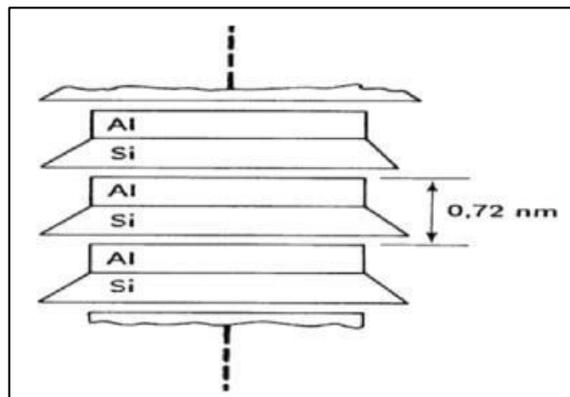


Figure I-15 : Schéma de la structure de la kaolinite.

2.5.3.2. Les montmorillonites :

Les montmorillonites est un phyllosilicate de (type 2 :1, T :O : T), de la famille des smectites, est formé de trois couches, chaque une constituée de deux feuillets de silice et d'un feuillet en

Chapitre I : Synthèse bibliographique

aluminium, Chaque couche a une épaisseur d'environ 10 Å (1 nm). De faibles forces de Van der Waals rattachent les sommets des feuillets de silice, ce qui permet aux ions échangeables de pénétrer dans la structure et de séparer les couches.

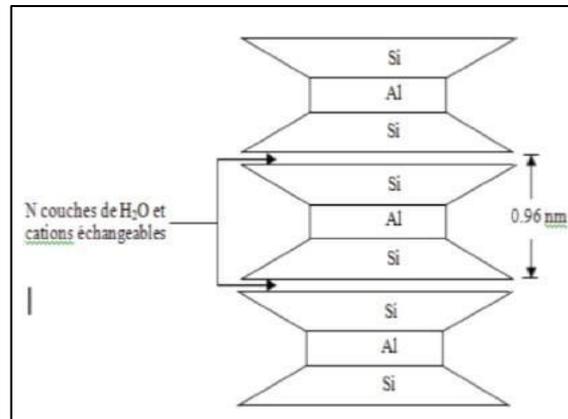


Figure I-16 : Schéma de la structure de la montmorillonite.

2.5.3.3. L'illite :

L'illite sa structure (type 2 :1, T :O : T), est composée de trois couches de phyllosilicates, L'espace entre cette séquence de couches TOT est occupé par des cations potassium faiblement hydratés qui sont responsables de l'absence de gonflement.

Ça formule chimique est : $(K, H_3O) (Al, Mg, Fe)_2 (Si, Al)_4 O_{10} [(OH)_2, (H_2O)]$,

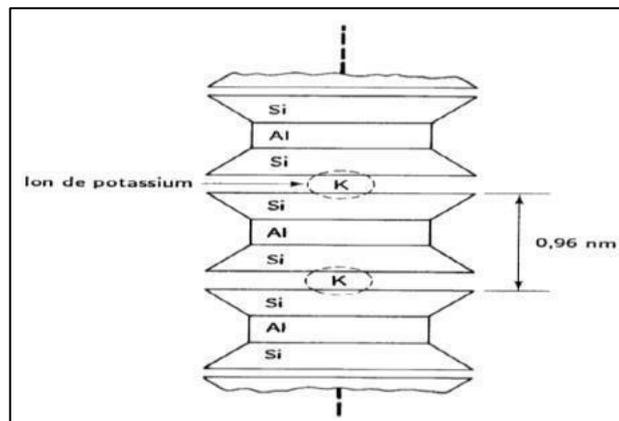


Figure I -17 : Schéma de la structure de l'illite.

Dans le tableau I-1 un résumé des différents types d'argile.

Tableau I-1 : Résumé des différents types d'argile

TYPE DE L'ARGILE	Combinaison des feuillets	Formule chimique	Espace inter foliaire
Kaolinite	T-O	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Liaison hydrogène forte

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Illite	T-O-T	$(K,H_3O)(Al,Mg,Fe)_2(Si,Al)_4O_{10}[(OH)_2,(H_2O)]$	Présence de K^+
Montmorillonite	T-O-T	$(Na,Ca)_{0.3}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2.nH_2O$	Présence ou pas des cations hydrates (Na^+ et Ca^{2+})

2.6. Stabilisation des sols :

Afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques ainsi que la durabilité des bétons de terre il existe différentes techniques de stabilisation telles que mécanique, chimique et physique.

2.6.1. Définition :

La stabilisation consiste à modifier les caractéristiques du matériau de base pour améliorer ses performances. Il peut s'agir de mécanique, de chimique ou de physique.

Cependant, la stabilisation est un processus complexe en raison de l'intervention de plusieurs paramètres. Plusieurs facteurs doivent être pris en considération, tels que les caractéristiques du sol, les améliorations envisagées, l'économie du projet, les méthodes de mise en œuvre de la terre choisie pour le projet et la maintenance du projet réalisé. [17]

2.6.2. Objectifs :

Les principaux objectifs de la stabilisation des sols ont été identifiés par **Winterkorn** (1975), **les Nations Unies** (1992) et **Symons** (1999). Il est prévu d'améliorer les caractéristiques mécaniques du sol en augmentant les résistances à la compression et à la traction, parmi ces objectifs :

La résistance à l'érosion due au vent et à la pluie est améliorée en réduisant la porosité et les variations de volume afin de limiter le retrait et le gonflement à l'eau. De plus, cela permet d'améliorer la résistance à l'érosion en réduisant l'abrasion de surface et la perméabilité à l'eau. L'atteinte de ces objectifs revêt une importance capitale afin d'assurer la stabilité et la pérennité des infrastructures et des constructions édifiées sur le sol, tout en préservant l'environnement en diminuant les conséquences de l'érosion.

2.6.3. Stabilisation mécanique :

On utilise cette méthode pour compacter les terres à l'aide de presses manuelles ou mécaniques. Le resserrement des grains permet de diminuer la porosité du matériau.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Seul le processus de compactage permet d'obtenir un matériau avec des caractéristiques mécaniques satisfaisantes [18]. Cependant, le degré de compactage du matériau varie en fonction du type de sol, de sa teneur en eau pendant le compactage et de la force de compression appliquée. Il existe principalement quatre méthodes de compactage :

- ✓ Le compactage dynamique par vibration.
- ✓ Le compactage dynamique par impact.
- ✓ Le compactage par pétrissage.
- ✓ Le compactage statique.

Selon Les études menées par Mesbah et al, il a démontré que le compactage statique est plus approprié pour les sols argileux. [19]

2.6.4. Stabilisation physique :

La stabilisation physique implique de modifier la structure et la répartition granulométrique des sols en introduisant de manière contrôlée des fractions de grains d'autres matériaux (principalement du sable et des fibres végétales) [20]. Ce processus altère la composition des sols et améliore leur qualité. Les caractéristiques physico-mécaniques des sols à traiter. Cela renforce la structure du matériau en l'empêchant de se fissurer au moment du retrait de l'argile lorsque la terre sèche.

2.6.4.1. Sable :

Le sable est un matériau granulaire composé de particules de roche de petite taille. Ces particules sont principalement formées par la fragmentation et l'érosion de roches telles que le quartz, le calcaire, le granit, ...

On utilise le sable pour stabiliser la terre afin de réduire les risques de fissuration, il comble les vides entre les particules de la terre ...

2.6.4.2. Fibres végétales :

Les fibres végétales sont des structures fibrillaires biologiques constituées de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine. Une proportion relativement faible d'extractibles non azotés, de matière protéique brute, de lipides et de matières minérales. Les proportions de ces composants varient considérablement en fonction de l'espèce, de l'âge et des organes de la plante.[21]

Chapitre I : Synthèse bibliographique

2.6.5. Stabilisation chimique :

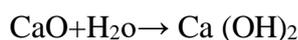
La stabilisation chimique implique l'incorporation d'un liant minéral ou organique dans la terre, ce qui altère ses caractéristiques. Cette réaction physico-chimique entre les particules et le matériau d'adjonction entraîne la formation d'une matrice qui se lie ou enrobe les particules représentant le matériau fondamental. Le ciment et la chaux sont les additifs les plus couramment employés pour stabiliser les bétons de terre [22]. En plus de ces deux liants, il est également possible d'utiliser divers autres stabilisants d'origines différentes (animales, végétales ou sous-produits industriels), comme la bouse de vache, les fibres de palmier le bitume et le liant géopolymère. La sélection et le volume du liant à ajouter varient en fonction de la nature du sol.

2.6.5.1. La chaux :

La chaux est fabriquée en décomposant thermiquement un calcaire (CaCO_3 et autres minéraux) à une température d'environ 1000°C . La décomposition du calcaire en chaux vive et en dioxyde de carbone est la suivante :

Calcaire (CaCO_3) (Cuisson à une température de 1000°C) \rightarrow Chaux Vive (CaO) + CO_2

Pour la chaux éteinte est le produit de l'hydratation de la chaux vive avec de l'eau. Lorsque la chaux vive est mélangée avec de l'eau, elle réagit pour former de la chaux éteinte selon la réaction suivante :



On utilise de la chaux pour réduire la concentration d'eau dans les sols argileux et faciliter sa mise en place. Les caractéristiques définies par les normes NF P98-101 et NF EN 459-1 sont établies.

2.6.5.2. Le ciment :

Le ciment est un liant hydraulique constitué de poudres minérales qui forme une pâte qui fait prise et durcit suite à un processus d'hydratation [23]. Il existe plusieurs types de ciment selon leur composition. Les ciments Portland normalisés sont à base de clinker, d'autres constituants (d'origine naturelle ou de sous-produits industriels) et de sulfate de calcium ajouté pour réguler la prise du ciment. Le clinker est obtenu par cuisson à 1450°C d'un mélange d'argile et de calcaire. Il contient des minéraux anhydres hydrauliques qui, en présence d'eau, produisent des hydrates responsables de la prise et du durcissement de ce liant.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Le ciment portland a quatre composés anhydres :

- Le silicate bicalcique 2CaO , SiO_2 (ou C2S).
- Le silicate tricalcique 3CaO , SiO_2 (ou C3S).
- L'aluminate tricalcique 3CaO , Al_2O_3 (ou C3A).
- L'alumino-ferrite tétracalcique 4CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 (ou C4AF).

Et d'autres éléments tels que les sulfates, les alcalins ... etc.

Les normes NF P15-301 et ENV 197-1 classent les ciments composés de clinker et de composés secondaires en cinq types principaux en fonction de leur composition. Dans leur notation européenne, ils sont numérotés de 1 à 5 en chiffres romains (la notation française est mentionnée entre parenthèse) [24] :

CEM I : Le ciment portland (CPA).

CEM II : Le ciment portland composé (CPJ).

CEM III : Le ciment de haut fourneau (CHF).

CEM IV : Le ciment pouzzolanique (CPZ).

CEM V : Le ciment au laitier et aux cendres (CLC).

L'utilisation du ciment pour stabiliser la terre afin d'améliorer sa résistance, contrôle de l'humidité, l'augmentation de sa durabilité ...

2.7. Interactions Argile-Liants :

La présence de liants dans le sol argileux entraîne des interactions à l'échelle microscopique et macroscopique.

2.7.1. Echelle microscopique :

2.7.1.1. Cas du ciment [25] :

Les réactions entre l'argile et les liants ciment (comme le clinker) se produisent principalement lors de l'hydratation du ciment en présence d'eau. À l'échelle microscopique, ces réactions se déroulent comme suit :

- **Formation de gel de silicate de calcium hydraté (CSH) :**

L'argile dans le clinker réagit avec l'eau pour former du gel de silicate de calcium hydraté. Ce gel est responsable de la cohésion et de la force initiale du ciment.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

- **Formation d'hydroxyde de calcium (CH) :**

L'hydroxyde de calcium se forme également lors de l'hydratation et réagit avec le sulfate pour former des cristaux de sulfate de calcium hydraté (et d'autres composés).

- **Formation d'ettringite (Aft) :**

Les sulfates dans le ciment réagissent avec l'alumine pour former de l'ettringite, un hydrate qui contribue à la stabilité à court terme du ciment.

- **Formation de cristaux de sulfate de calcium hydraté (C-Ŝ-H) :**

Les cristaux de sulfate de calcium hydraté et d'autres hydrates se forment, remplissant les vides et consolidant la structure.

2.7.1.2. Cas de la chaux :

Lorsqu'on mélange la chaux avec le sol argileux, des réactions successives avec les particules d'argiles se produisent en deux phases : les réactions à court terme et les réactions à long terme. La réaction à court terme est causée par l'échange cationique, la floculation et l'agglomération, tandis que la réaction à long terme est causée par les réactions pouzzolaniques et la carbonatation.

2.7.2. Echelle macroscopique :

2.7.2.1. Cas du ciment :

Le rôle du ciment comme liant hydraulique entraîne la floculation des argiles, lorsque le ciment est mélangé avec de l'eau et des agrégats tels que des particules d'argile, il forme une matrice cimentaire qui lie les particules ensemble pour former un matériau solide et cohésif. [25]

2.7.2.2 Cas de la chaux :

L'ajout de chaux modifie la texture du sol, selon **Osula D.O.A**, l'incorporation de chaux entraîne une réduction des particules de taille inférieure à $2\mu\text{m}$ et une augmentation des particules de taille supérieure. Cela conduit à une meilleure texture du sol et à une durée de cure accrue. [26]

2.8. Le béton de terre stabilisée et compressée :

2.8.1. Définition :

Le béton de terre stabilisée et compressée est un matériau de construction qui est produit en mélangeant de la terre crue avec des stabilisants tels que le ciment, la chaux ou des adjuvants

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Spécifiques, puis en le compactant sous pression afin de créer une masse solide et résistante, l'objectif de cette méthode de compression est d'augmenter la résistance mécanique et la durabilité du matériau.

2.8.2. Domaine d'application :

Le béton de terre stabilisée est utilisé dans divers domaines, voici une liste de quelques-uns de ces domaines d'utilisation :

- On peut utiliser le béton de terre stabilisée et compressée pour la réalisation de chaussées et de trottoirs.
- Le béton de terre stabilisée et compressée peut servir à la restauration et à la rénovation des structures traditionnelles existantes, proposant une solution durable aux matériaux de construction traditionnelles.
- Le béton de terre stabilisée et compressée est également utilisé dans la construction écologique, notamment pour les maisons écologiques et durables.
- Le béton de terre stabilisée et compressée est aussi employé pour la construction de bordures et de pavés.

2.8.3. Avantages et inconvénients du béton de terre stabilisée :

2.8.3.1. Les avantages :

- Les matériaux utilisés pour fabriquer le béton de terre stabilisée sont souvent abondants et peu coûteux, ce qui peut en faire une option économique pour la construction.
- Le béton de terre stabilisée utilise des matériaux naturels et locaux, réduisant ainsi l'empreinte écologique associée au transport de matériaux de construction.
- Le béton de terre peut être utilisé dans une variété d'applications de construction.

2.7.8.2. Les inconvénients :

- Le béton de terre stabilisée peut être sensible à l'eau, ce qui peut entraîner des problèmes de durabilité. Sa durabilité à long terme peut être moins prévisible.
- En raison de sa composition et de ses propriétés, le béton de terre stabilisée peut limiter les possibilités architecturales par rapport à d'autres matériaux de construction.
- Le béton de terre stabilisée peut demander des compétences spécialisées et une formation adéquate pour être mis en place. Il est important de maîtriser les méthodes de fabrication et de construction afin de garantir la qualité et la durabilité du matériau.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

3. Etat de l'art sur le béton de terre :

De nombreuses recherches sont menées de nos jours sur les caractéristiques des bétons de terre et sur les possibilités d'améliorer sa résistance et sa durabilité :

D'après le travail de **(Messaoudene, I., Et al, 2020)** qui consiste à la production d'un béton de terre stabilisée et compressée dans le but de voir l'effet du sable de dune sur la durabilité des bétons de terre compressée et stabilisée confectionnés avec des pourcentages différents de sable et d'argiles avec 10% de ciment pour le stabiliser. Le mélange est compacté avec deux contraintes différentes (10 et 20MPa).

Des éprouvettes ont été construites avec des moules cylindriques de l'essai Proctor. Le poids du mélange global sec est pris égale à 2Kg. Le rapport Eau/Ciment diminue à chaque fois que le pourcentage du sable augmente. Les différents essais effectués sont consacrés à l'étude de l'effet du sable sur la durabilité des bétons de terre compressée et stabilisée après 12 cycles de séchage/mouillage, de point de vue : résistance à la compression, perte de masse et absorption totale en eau.

D'après l'analyse des résultats, ils ont constaté que la résistance à la compression et la durabilité meilleure pour un taux de sable de 20% et une contrainte de compactage de 20MPa. [27]

Le travail de **(Saliba, J., et al ,2020)** a examiné le retrait à long terme (à partir de 24 heures) et l'impact des conditions de cure sur la résistance mécanique du béton de terre. Une étude expérimentale a été menée sur l'évolution de l'endommagement lors du retrait de dessiccation en utilisant la technique d'émission acoustique (EA). Grâce à cette méthode, il est possible de suivre en permanence les dommages en fonction du temps. D'après les résultats le béton de terre perd de sa résistance lorsque les éprouvettes sont conservées à une humidité relative faible. En outre, les données d'EA liées au retrait et à la mesure de la perte de masse ont permis de décrire de manière qualitative le processus de séchage, avec une activité acoustique fortement liée au taux de retrait. [1]

(Elahi, T. E.,et al., 2021) l'analyse des résultats des blocs de terre stabilisée et comprimée (BTSC) utilisant du ciment et des cendres volantes (CV). Les BTSC ont été évalués en ce qui concerne leur résistance à la compression, à la traction, à la flexion et au cisaillement. Afin d'assurer la durabilité, ils ont effectué des tests cycliques de séchage-mouillage, de résistance à l'humidité, de submersion et d'efflorescence pour évaluer la perte de masse accumulée. Dans le

Chapitre I : Synthèse bibliographique

cadre de cette étude, 270 BTSC et 192 échantillons cylindriques sont préparés en utilisant 0 à 10 % de ciment et 0 à 30 % de CV. L'ajout de 10 à 30 % de CV avec du ciment augmente la résistance à la compression, la résistance à la flexion et la résistance à la traction fendue de différentes tailles en fonction de la teneur en ciment utilisée. L'inclusion de CV 20% avec 5% et 7% de ciment satisfait au critère de résistance suggéré par différentes normes. De plus, la CV s'est avéré, efficace pour réduire la teneur en ciment du mélange sans sacrifier la résistance. Selon l'analyse de séchage-mouillage cyclique, il est observé que lorsque la quantité de CV avec le ciment augmente, la perte de masse accumulée diminue, ce qui est en accord avec les observations en microstructure. Après un test de séchage-mouillage cyclique, la résistance des échantillons était comprise entre 51 et 88 %, ce qui témoigne des performances durables de la terre stabilisée ciment-CV. Les résultats de l'essai triaxial indiquent que la CV améliore la contrainte-déformation dévia torique maximale et la contrainte-déformation de rupture, indépendamment de la teneur en ciment et des contraintes de construction. Avec l'ajout de 0 à 30 % de CV avec 5 % et 7 % de ciment, le paramètre de cohésion varie entre 159 et 315 kPa et l'angle de frottement interne varie entre 38,1 et 57,1, indiquant une réponse améliorée au cisaillement du ciment CV. L'analyse du cycle de vie montre que compte tenu de la consommation d'énergie, du potentiel de réchauffement climatique et d'autres impacts environnementaux, les BTSC sont supérieurs aux BTC traditionnels. [28]

Saliba, J., et al, (2021) : Dans ce travail, ils ont examiné l'impact des cycles d'humidification/séchage sur les bétons de terre avec et sans fibres de lin en utilisant deux méthodes : les ultrasons et l'émission acoustique. Dans ces dernières ils ont évalué le taux de détérioration du béton pendant et à la fin des 25 cycles d'humidification/séchage. La rapidité de transmission des ultrasons a été utilisée pour observer la dégradation progressive du béton au fil des cycles. À la fin des cycles, des expériences de compression ont été effectuées, suivies par la méthode d'émission acoustique. Les résultats indiquent que la détérioration du béton débute lors des premiers cycles d'humidification/séchage, avec des fissures visibles à la surface des échantillons de béton de terre. La dégradation est plus rapide pour les échantillons sans fibres. Ils ont également constaté une diminution significative de la résistance après 25 cycles. Les cycles avec des paramètres acoustiques différents (coups, énergie, amplitude, ...) ont également modifié l'évolution de l'activité acoustique, ce qui suggère un endommagement prématuré des éprouvettes. [29]

(Fardoun, H., et al ,2023) : Dans leur travail ils ont effectué des tests de compression cycliques sur des mélanges de béton de terre et de sable recyclé (RS) avec des quantités

Chapitre I : Synthèse bibliographique

d'argile préalablement conservées dans des conditions de durcissement humide et sec (HR = 90 % et 50 % le plus souvent). Ils ont examiné les boucles des courbes contrainte-déformation. De plus, ils ont mené une étude sur l'effet Kaiser et une évaluation des dégâts causés par les émissions acoustiques (AE). L'analyse a révélé une corrélation efficace entre les indices AE et l'évolution des fissures, qui a été enregistrée en utilisant la méthode de corrélation d'images numériques (DIC). L'effet Kaiser a été obtenu dans des conditions de durcissement humide, mais n'a pas été atteint dans des conditions sèches, comme le montrent les résultats. Lors du durcissement à sec, la concentration d'argile la plus élevée dans l'échantillon RS a montré le niveau de dommage le plus élevé. Conformément aux objectifs et à la portée de la revue, cet article étudie enfin l'effet Kaiser à l'aide du DIC. Il a été démontré que cet aspect, qui est généralement lié à l'apparition des dommages, n'est pas nécessairement influencé par l'évolution de la largeur des fissures. [30]

(Bogas, J. A., et al.,2023) : Dans cette étude, ils ont examiné à la fabrication et l'analyse mécanique de blocs de terre comprimée (CEB) stabilisés en utilisant du ciment recyclé thermoactive (RC) en tant qu'alternative plus écologique au ciment Portland classique (OPC). Les CEB contenant entre 5 et 10 % de stabilisant, en prenant en considération les différents pourcentages de substitution d'OPC par du RC, ont été analysés en ce qui concerne leurs principales caractéristiques physiques et mécaniques dans diverses conditions d'humidité. Une grande capacité de réhydratation et de stabilisation a été mise en évidence par RC, ce qui a considérablement amélioré la résistance mécanique du CEB. Après la stabilisation RC, la résistance mécanique a augmenté jusqu'à deux fois, et les nouveaux blocs éco-efficaces répondaient aux normes requises. La résistance mécanique était légèrement impactée jusqu'à ce que l'OPC soit remplacé à 50%. Le RC a démontré son potentiel considérable en tant qu'alternative écologique à l'OPC pour stabiliser les terres. [31]

(Mustafa, Y. M. H., et al, 2023) : L'objectif de cette étude est d'examiner si les matières terrestres disponibles peuvent être utilisées comme une solution potentielle et un remplacement aux matériaux conventionnels actuels dans la région de Najd, en Arabie saoudite. Quatre sols de la région de Najd ont été collectés et analysés afin de déterminer leurs caractéristiques physiques et chimiques. On a stabilisé les sols avec des quantités de ciment ou de calcaire hydraté (mélangés à 0 %, 2,5 %, 5 %, 7,5 %, 10 %, 12,5 % et 15 % par rapport au poids sec du sol) et on a évalué la force de compression et la durabilité illimitée. Les résultats ont démontré que la stabilisation du ciment est plus efficace pour créer des mélanges solides et durables qui peuvent servir de matériaux de construction. De plus, la résistance des sols a été renforcée grâce à l'incorporation de différents stabilisateurs. La comparaison des

Chapitre I : Synthèse bibliographique

résultats avec les normes existantes a démontré que les sols choisis sont résistants et durables et qu'ils peuvent être utilisés comme matériaux de construction. Enfin, diverses relations ont été établies en utilisant des analyses statistiques afin de prendre en compte les caractéristiques mécaniques des sols stabilisés, telles que le module d'élasticité, la densité et la quantité de stabilisants. Les propriétés mécaniques des sols stabilisés pourraient être prédictibles grâce à de telles corrélations, ce qui permettrait d'analyser le comportement des matières terrestres. [32]

4. Conclusion :

En conclusion, la construction en terre crue représente une tradition millénaire qui continue de jouer un rôle crucial dans l'architecture contemporaine. De la Mésopotamie antique aux techniques modernes de construction durable, la terre crue a su s'adapter aux besoins des populations du monde entier, offrant un abri solide et respectueux de l'environnement. En favorisant une utilisation judicieuse des ressources locales, la construction en terre crue contribue à la réduction de l'empreinte carbone et à la promotion d'une construction plus durable.

Les différentes techniques de construction en terre crue, telles que le pisé, la bauge, le torchis et l'adobe, reflètent la diversité des approches culturelles et géographiques à travers les âges. De plus, les méthodes de stabilisation mécanique, physique et chimique ont permis d'améliorer les performances de ce matériau traditionnel, ouvrant la voie à de nouvelles possibilités de construction. Les interactions entre les argiles et les liants jouent un rôle essentiel dans le processus de construction, renforçant et stabilisant les structures en terre pour assurer leur durabilité et résistance.

Enfin, le béton de terre stabilisée et compressée offre une alternative intéressante dans le domaine de la construction durable. Ses avantages économiques et environnementaux sont indéniables, bien que quelques inconvénients subsistent. Avec une expertise adéquate et une gestion appropriée des défis potentiels, ce matériau a le potentiel de jouer un rôle important dans la construction écologique et économique

Chapitre II :
Matériaux et Méthodes
Expérimentale.

Chapitre II : Matériaux et Méthodes Expérimentale

1. Introduction :

Le béton de terre stabilisé et compressée est composé principalement de sable, d'argile, d'eau et de ciment ou de chaux. Les caractéristiques de chaque composant influencent fortement sa qualité, il est donc essentiel de réaliser plusieurs essais pour déterminer les caractéristiques de ses composants et trouver la meilleure combinaison de matériaux. Cela permet d'assurer une bonne résistance à la compression et une durabilité optimale.

Dans ce chapitre, nous présentons les méthodes utilisées pour nos expériences et le matériel utilisé pour fabriquer ce béton. Nous décrirons également les tests effectués sur les échantillons pour évaluer leurs performances.

2. Matériaux utilisés :

Les matériaux utilisés dans cette recherche sont : l'argile, le sable, le ciment, et l'eau.

2.1. Argile :

Pour notre étude on a utilisé et analysé une argile de la région d'Akbou (Bejaia). La sélection de cette argile est justifiée par une configuration minéralogique, un stock suffisamment abondant, et sa granulométrie qui peut jouer un rôle important dans les propriétés de béton de terre.

➤ Origine :

Cette terre est récupérée sur le terrain par nous-mêmes. Ce sol est de couleur beige (Figure II-1) et se situe à la commune d'Akbou (Béjaïa).



Figure II-1 : Aspect visuel du sol

Chapitre II : Matériaux et Méthodes Expérimentale

➤ **Collecte de l'échantillon :**

On récupère et dégagé l'échantillon de manière nette dans une zone bien située, sans extraire ou ajouter quoi que ce soit de son état naturel. Sans matière organique comme des racines vivantes, des graines ...

2.2. Sable :

• **Origine :**

Dans notre étude on a utilisé le sable de la commune d'Oued Zhour wilaya de Jijel disponible sur le marché Algérien.



Figure II-2 : Aspect visuel du sable

2.3. Le ciment :

Le ciment utilisé est un ciment CEM II /A-L 42.5 R disponible sur le marché Algérien fabriqué par la cimenterie Ain EL Kebira (Sétif).

2.4. L'eau de gâchage :

L'eau utilisée est celle du robinet du laboratoire pédagogique MDC 1 de Génie Civil, l'université de Bejaia.

3. Méthode de travail et matériels spécifiques :

3.1. Caractérisation géotechnique :

3.1.1. Analyse granulométrique par tamisage (NF EN 933-1 :2012)

➤ **But de l'essai :**

L'objectif de l'analyse granulométrique est de déterminer la distribution des tailles et le pourcentage pondéral respectif des différents grains dans un échantillon donné.

Chapitre II : Matériaux et Méthodes Expérimentale

➤ Le principe de l'essai :

Le tamisage est l'une des méthodes les plus simples et les plus couramment utilisées pour séparer les particules en fonction de leur taille. L'échantillon doit passer à travers une série de tamis de mailles décroissantes, la grosseur de mailles et le nombre des tamis sont choisies en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision requise, Les masses de grains retenues sur les différents tamis sont rapportées à la masse initiale de matériau. Les pourcentages cumulés passant à travers chaque tamis sont présentés sous forme numérique et si nécessaire sous forme graphique.

➤ Matériel utilisé :

- Tamis avec des ouvertures comme spécifiées dans l'EN 933-2.
- Fonds et couvercles s'adaptant aux tamis.
- Étuve, réglée à une température de 105 °C.
- Balances précises à $\pm 0,1$ % de la masse de la prise d'essai.
- Tamiseuse.

➤ Mode opératoire :

Il est nécessaire de préparer l'échantillon conformément aux exigences de la norme [NF EN933-1]. Il est nécessaire que la masse M de l'échantillon pour l'essai dépasse $(D/10)^2$, avec M représenté en grammes et D représentant une dimension plus grande spécifiée en millimètres. Le tamisage du sable et d'argile est effectué à l'aide d'une tamiseuse, où la série des tamis est placée sur le cercle inférieur du cadre de l'appareil. Ensuite, l'ensemble est fixé aux montants par la couronne supérieure, à l'aide de deux jeux de force et de vis de blocage. L'essai ne dure que 3 minutes.



Figure II-3 : la tamiseuse utilisée

Chapitre II : Matériaux et Méthodes Expérimentale

➤ Le module de finesse du sable :

Le module de finesse (MF) est un facteur très important pour évaluer la qualité du sable, le module de finesse est égal au 1/100 de la somme de refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivant : 0,16 – 0,315 – 0,63 – 1,25 – 2,5 – 5mm. Il est donné par la relation suivant :

$$MF = 1/100 (\sum \text{refus cumulés en\% des tamis } 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5).$$

-Pour $1,8 < MF < 2,2$ le sable est à utiliser si l'on recherche particulièrement la facilité de mise en œuvre au détriment probable de la résistance.

- Pour $2,2 < MF < 2,8$ le sable est à utiliser si l'on recherche une bonne ouvrabilité et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités.

- Pour $2,8 < MF < 3,2$ le sable est à utiliser si l'on recherche des résistances élevées au détriment de l'ouvrabilité avec risque de ségrégation.

-Pour $MF > 3,2$ le sable est à rejeter.

Tableau II-1 : Classement de sable.

Module de finesse	Qualité de sable
$\geq 2,6$	Grossier
$2,2 \leq MF < 2,6$	Moyen
$1,6 \leq MF < 2,2$	Fin
$< 1,6$	Très fin

3.1.2. Analyse granulométrique par sédimentation (NF P 94-057 :2018) :

➤ But de l'essai :

La détermination de la distribution pondérale de la taille des particules de sols de dimension inférieure à 80 micromètres.

➤ Le principe de l'essai :

L'analyse consiste à mesurer la sédimentation des particules au cours du temps au sein d'un cylindre gradué. Les lectures sont effectuées à l'aide d'un densimètre spécifique.

Chapitre II : Matériaux et Méthodes Expérimentale

➤ **Matériel utilisé :**

- Cylindre de Sédimentation
- Balance Précise
- Disperser Mécanique
- Thermomètre
- Chronomètre
- Pipettes ou Préleveurs Automatiques
- Appareil de Mesure Optique (Turbidimètre)
- Eau Distillé

➤ **Mode opératoire :**

Dans un cylindre de sédimentation rempli d'eau distillée, on prépare une suspension homogène de l'échantillon avec un agent dispersant.

La température de la suspension est mesurée, car elle influence la viscosité du liquide et la vitesse de sédimentation

On laisse les particules sédimenter et on prélève des échantillons à intervalles réguliers à différentes profondeurs.

On mesure la concentration des particules en suspension avec un hydromètre et on utilise la loi de Stokes pour analyser les données collectées afin de déterminer la vitesse de sédimentation et, par conséquent, la répartition granulométrique des particules.



Figure II-4 : Matériaux utilisée dans l'analyse granulométrique par sédimentation

3.1.3. Détermination des limites d'Atterberg (NF P 94-051 :2018) :

➤ **But de l'essai :**

Les limites d'Atterberg sont une série de tests, Leur principale utilité est de caractériser le comportement des sols en fonction de leur teneur en eau, s'est principaux objectifs permettent de déterminer les propriétés de plasticité, Identification des limites de liquéfaction et le contrôle de qualité des sols.

➤ **Principe de l'essai :**

Les limites d'Atterberg s'effectuent en deux phases :

- Recherche de la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol placé dans une coupelle de caractéristiques imposées se ferme lorsque la coupelle et son contenu sont soumis à des chocs répétés.
- Recherche de la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée et confectionné manuellement se fissure.

➤ **Matériel utilisé :**

- Un récipient d'eau moins de 2L.
- Un bac.

Chapitre II : Matériaux et Méthodes Expérimentale

- Un tamis de 400 μm .
- Un appareil de casa grande.
- Un outil à rainurer.
- Une étuve.
- Balances précises à $\pm 0,1$.
- Capsule en acier.
- Une plaque de verre lisse.

➤ **Mode opératoire :**

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

$$I_p = W_l - W_p$$

✓ **Détermination la limite de liquidité :**

La totalité du tamisât est malaxée afin d'obtenir une pâte homogène et presque fluide, on a fait répartie une masse d'environ 70 g de pâte avec une spatule, dans la coupelle propre et sèche, cette pâte étalée en plusieurs couches afin d'éviter d'emprisonner des bulles d'air, présente en fin d'opération un aspect symétrique, en suite on partage la pâte en deux, au moyen de l'outil à rainurer.

Fixer la coupelle sur le support de l'appareil de casa grande, en suite actionner la came de façon à soumettre la coupelle à une sérié de chocs à la cadence de 2 coups par seconde, le nombre de coups nécessaire pour la fermeture est noté.

✓ **Déterminer la limite de plasticité :**

Une boulette est formée à partir de la pâte précédente, puis roulée sur une plaque lisse de façon à obtenir un rouleau qui est aminci progressivement jusqu'à ce qu'il atteigne 3 mm de diamètre et d'environ 10 cm de longueur, limite de plasticité est obtenue lorsque, simultanément, le rouleau se fissure et que sons diamètre attient 3mm.

Une fois les fissures apparus, la partie centrale du rouleau est placé dans une capsule de masse connue, la peser immédiatement et introduire dans l'étuve, afin de déterminer sa teneur en eau.



Figure II-5 : Appareil casagrande



Figure II-6 : les outils utilisés

3.2. Caractéristiques physiques :

3.2.1. Masse volumique :

➤ Le but de l'essai :

La Masse volumique a pour but de mesure la masse d'un corps par unité de volume. Elle est définie comme la masse de ce corps divisée par son volume. La formule générale pour calculer la masse volumique est :

$$\rho = M/V$$

Où :

ρ : la masse volumique en kilogrammes par mètre cube (kg/m^3).

M : la masse de la substance en kilogrammes (kg).

V : le volume de la substance en mètres cube (m^3).

3.2.1.1. Masse volumique apparente (NF EN 1097-6 :2013) :

➤ Principe de l'essai :

Le principe de cet essai repose sur la mesure du volume occupé par une masse connue de matériau, y compris les vides des granulats étudiés.

La masse volumique apparente est la masse par unité de volume d'un matériau (y compris les vides),

Notée ($\rho_{\text{app}} = M/V$), exprimée en (g/cm^3 , Kg/m^3 ou T/m^3).

Chapitre II : Matériaux et Méthodes Expérimentale

➤ Matériel utilisé :

- Balance avec une précision de ± 1 g.
- Un récipient de 1L.
- Un entonnoir.
- Une petite règle plate métallique.

➤ Mode opératoire :

L'essai est réalisé après passage du matériau à l'étuve à 105 °C.

- Peser le récipient de 1L de volume vide soit M1.
- Remplir le récipient par l'entonnoir avec une distance de chute de 15cm (pour le sable et pour l'argile).
- Araser la couche supérieure du récipient à l'aide d'une règle.
- Peser le récipient plein : soit M2 (g) sa masse.
- Calculer la masse volumique apparente du matériau : $\rho_{app} = (M2 - M1)/V$



Figure II-7: Masse du moule vide



Figure II-8 : Entonnoir+moule remplis avec le sable



Figure II-9 : Masse du sable+moule

3.2.2. Masse volumique absolue (NF EN 1097-6 :2013) :

- **Principe de l'essai :** L'essai consiste à déterminer la densité réelle d'un matériau, en mesurant sa masse par rapport à son volume réel, sans tenir compte des vides ou des pores à l'intérieur du matériau.

Chapitre II : Matériaux et Méthodes Expérimentale

La masse volumique absolue est la masse par unité de volume d'un matériau sans tenir compte des vides entre les grains

Notée ($\rho_{abs} = M/V$), exprimée en (g/cm^3 , Kg/m^3 ou t/m^3).

➤ Matériel utilisé :

- Éprouvette graduée.
- Balance avec une précision de 1 g.
- Une petite règle plate métallique.

➤ Mode opératoire :

En utilisant une éprouvette graduée et par mesure de la différence de volumes.

- Remplir une éprouvette graduée avec un volume V_1 d'eau.
- Peser un échantillon sec M de l'échantillon et l'introduire dans l'éprouvette en prenant soin d'éliminer toutes les bulles d'air : le liquide monte dans l'éprouvette. Lire le nouveau volume V_2 .
- La masse volumique se calcul avec la formule suivante : $\rho_{abs} = M/(V_2 - V_1)$

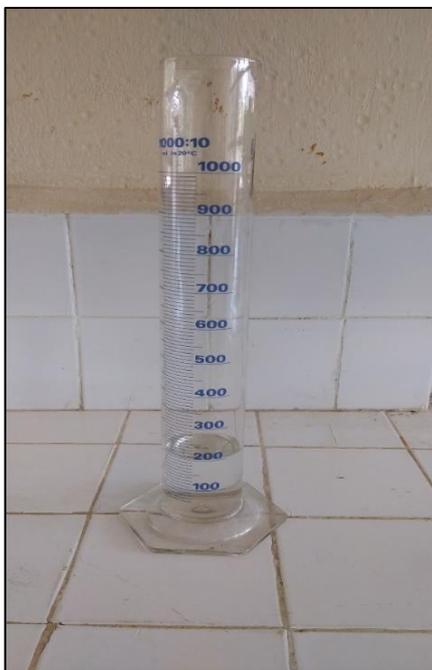


Figure II-10 : Eprouvette remplis
avec l'eau

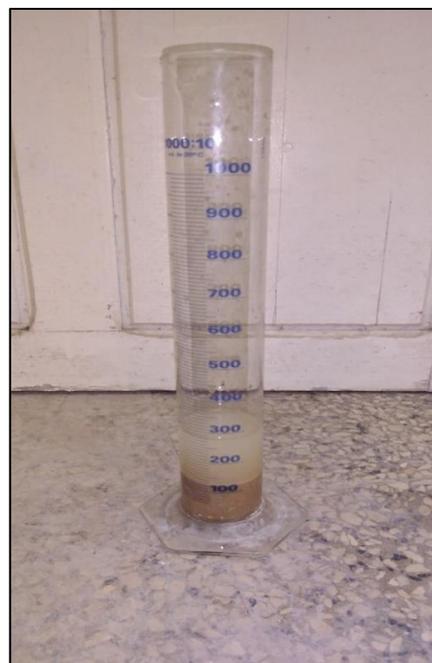


Figure II-11 : Eprouvette remplis
avec l'eau+ argile

Chapitre II : Matériaux et Méthodes Expérimentale

3.2.3. La pesée hydrostatique (NF P94-064 :1993) :

➤ Le but de l'essai :

Le but de l'essai de la pesée hydrostatique est de déterminer la porosité la masse volumique est l'absorption. Cette méthode est particulièrement utile pour les matériaux irréguliers ou poreux qui peuvent être difficiles à mesurer avec d'autres techniques.

➤ Principe de l'essai :

La pesée hydrostatique utilise la loi d'Archimède pour mesurer la densité des objets solides. On pèse d'abord l'objet dans l'air, puis lorsqu'il est immergé dans l'eau. La différence de poids entre ces deux mesures permet de calculer le volume de l'objet et donc sa densité. Cette méthode est précise, non destructive et utile pour analyser les propriétés des matériaux.

➤ Matériel utilisé :

-Balance analytique précise-Éthanol-Béchers-Une étuve.

➤ Mode opératoire :

Vu que l'éprouvette est fragile à l'humidité en remplace l'eau avec l'éthanol pour poursuivre notre essai. Premièrement peser 1 centimètre cube de chaque échantillon saturé sur la balance analytique et noter la masse ($M_{\text{saturé}}$).

Ensuite on remplit un Béchers avec de l'éthanol pour immerger complètement l'échantillon, et le suspendre à l'aide d'un fil fin et non absorbant sans toucher les parois et le fond du Béchers.

Peser l'échantillon lorsqu'il est complètement immergé dans l'éthanol, pour mesurer la masse apparente de l'échantillon et notez cette valeur (M_{Hydro}).

Après avoir mis l'échantillon à l'étuve pendant 24 heures à une température de 105 °C afin de les peser à sec, et noter sa valeur (M_{sec}).

Les formules utilisées pour calculer l'absorption, porosité et la masse volumique des échantillons :

$$\text{Absorption} = \frac{(M_{\text{saturé}} - M_{\text{sec}})}{M_{\text{sec}}}$$

$$\text{Porosité} = \frac{(M_{\text{saturé}} - M_{\text{sec}})}{(M_{\text{st}} - M_{\text{Hydro}})} \times 100$$

$$\text{Masse volumique} = \frac{M_{\text{sec}}}{M_{\text{st}} - M_{\text{Hydro}}} \times 100$$



Figure II-12 : Un échantillon pesée



Figure II-13 : un échantillon émergé
dans l'Ethanol

3.3. Confection des échantillons :

Le moule cylindrique de l'essai Proctor ($D=10$ cm $H=16.5$ cm) utilisées pour la détermination des différents essais fixés par notre programme expérimental.



Figure II-14 : Moule cylindrique utiliser pour la fabrication des échantillons

3.3.1. Préparation de matière première :

Avant de procéder à la préparation des échantillons il faut tout d'abord broyer l'argile il le tamiser avec un tamis de 0,125mm.

Pour la préparation des mélanges on prépare à chaque fois le sable, l'argile, ciment et l'eau.

Chapitre II : Matériaux et Méthodes Expérimentale

3.3.2. Malaxage des mélanges :

Les matériaux (argile + sable + ciment) sont d'abord mélangés à sec pendant deux minutes, puis malaxés avec l'eau.

Le malaxage avec l'eau a été effectué pendant deux minute



Figure II-15 : Malaxages des matériaux



Figure II-16 : Aspect visuel du mélange

3.3.3. Mise en forme :

On met une première couche du mélange dans le moule Proctor puis on la compacte manuellement avec 5 coups afin que le mélange prenne forme. On refait ce processus pour deux autres fois avant de passer au compactage avec l'appareil.



Figure II-17 : Mise en place du matériau dans le moule

Chapitre II : Matériaux et Méthodes Expérimentale

3.3.4. Compactage des mélanges :

Les échantillons sont compactés de manière statique à simple effet : le plateau inférieur de la presse se déplace, ce qui entraîne le déplacement de l'ensemble (moule + mélange + piston), tandis que le plateau supérieur reste immobile. On effectue cette opération jusqu'à ce que l'écran affiche la lecture de la pression souhaitée. Dans cette étude on a appliqué une contrainte de 10 MPa.



Figure II-18 : Compactage de l'échantillon

Le démoulage se fait directement après le compactage.



Figure II-19 : Démoulage de l'échantillon



Figure II-20 : L'échantillon après le
démoulage

Chapitre II : Matériaux et Méthodes Expérimentale

3.3.5. Conservation au laboratoire :

Après le démoulage, l'échantillon est pris avec précaution à la main, sans toucher les arêtes en raison de sa fragilité, puis il est couvert dans des sachets en plastique pour garantir son étanchéité. Afin de favoriser l'hydratation optimale du liant, le bloc est stocké en laboratoire à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ pendant 28 jours avant d'être soumis aux divers tests.



Figure II-21 : Conservation des échantillons au laboratoire

3.4. Caractéristiques minéralogiques :

3.4.1. Méthode par diffraction aux rayons X (DRX) :

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

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

Cette analyse consiste à appliquer un rayonnement sur un échantillon, ce rayonnement est renvoyé dans des directions spécifiques, qui dépend de la longueur d'onde des rayons X et de la distance entre des plans d'atomes ordonnés sur le réseau cristallin. Après la pénétration du cristal par le rayonnement il y'aura absorption d'une partie d'énergie et d'excitation des atomes avec émission des radiations dans toutes les directions. Les radiations émises par des plans atomiques qui sont en phase vont engendrer un faisceau qui pourra être détecté.



Figure II-22 : Appareil DRX Bejaia



Figure II-23 : Les échantillons mis dans l'appareil

3.5. Caractéristiques chimiques :

3.5.1. La fluorescence X (FRX) :

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

Les majeurs s'expriment en oxydes et dénote de la présence de certains éléments du tableau périodique plus lourds que le fluor (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O et P_2O_5).



Figure II-24 : Appareil FRX CRAPC Bejaia

Chapitre II : Matériaux et Méthodes Expérimentale

3.5.2. Analyse par spectrométrie infrarouge (FTIR) :

Les échantillons à analyser par IRTF sont des poudres qui sont obtenues par broyage des morceaux des échantillons durcis.

➤ **But de l'essai :**

La spectroscopie infrarouge de Fourier est une méthode employée afin de caractériser et d'identifier les molécules.

➤ **Principe :**

La spectrométrie infrarouge est une méthode d'analyse utilisant un échantillon exposé à un rayonnement infrarouge. Les molécules qui subissent ce rayonnement absorbent ces radiations en modifiant leurs énergies de vibration, suivant les types de liaisons et de fonctions chimiques présentes dans le milieu, donc l'obtention de spectre infrarouge.

Il est essentiel de procéder à un traitement par ordinateur afin de transformer les données brutes en données directement exploitables (lumière absorbée en fonction de la longueur d'onde).

L'essai de l'infrarouge a été effectué au niveau du laboratoire de génie des procédés de l'université de Bejaia.

➤ **Matériel utilisé :**

-Une balance

- Échantillon

- Un sel purifié KBr

-Moule

-Presse

- Spectroscopie Infrarouge (IR).

➤ **Mode opératoire :**

Tout d'abord, nous préparons une pastille. Pour la préparer, nous prenons 80 mg de sel purifié KBr et 2 mg de l'échantillon. Nous les mélangeons soigneusement. Ensuite, nous mettons le mélange dans un moule, puis nous le mettons dans la presse pour le compacter. Ensuite, nous démoulons la pastille et la passons à l'appareil de spectroscopie infrarouge (IR).

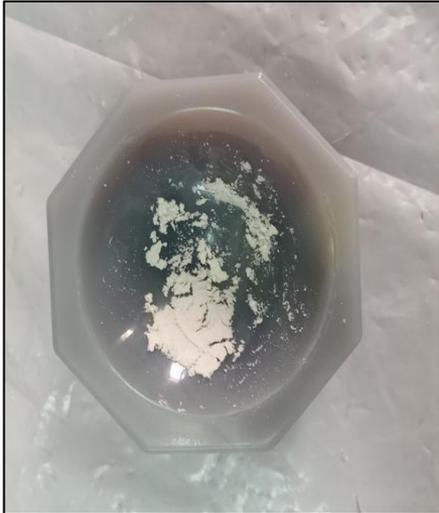


Figure II-25 : Préparation de l'échantillon + sel purifié KBr



Figure II-26 : Compactage de la pastille



Figure II-27 : les pastilles obtenues



Figure II-28 : Appareil (IR)

3.6. Résistances mécaniques :

3.6.1. Résistance à la compression :

C'est l'essai le plus couramment utilisé sur les bétons à l'état durci. Le but de cet essai est de suivre la résistance de chaque échantillon à 28 jours. Les échantillons étudiés sont soumis à une charge croissante jusqu'à la rupture. La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section de l'éprouvette.

➤ Conduite de l'essai :

- Centrer l'éprouvette sur la presse d'essai.
- Appliquer un chargement croissant jusqu'à la rupture de l'échantillon.



Figure II-29 : Un échantillon dans
la presse



Figure II-30 : Un échantillon après l'essai
de compression

La résistance à la compression est donnée par la formule suivante :

$$R_c = F/S$$

Où :

R_c : Résistance à la compression du bloc en (MPa).

F : Charge maximale supportée par le bloc en (N).

S : Surface d'une face du bloc en (mm).

3.7. Essai de durabilité :

3.7.1. Séchage/ mouillage :

Dans le but d'évaluer la résistance et le comportement du béton de terre comprimée lorsqu'il est soumis à des variations de pluviométrie (saturation en hiver et séchage en été), nous avons réalisé un ensemble d'essais de séchage/ mouillage sur les différents échantillons étudiés en respectant la norme (ASTM D559-57). Le principe de l'essai est le suivant :

Chapitre II : Matériaux et Méthodes Expérimentale

- On a fait sécher les échantillons jusqu'à un poids constant à une température de 70°C.



Figure II-31 : Échantillons séchés dans l'étuve

- Ces échantillons sont pesés après le séchage puis soumis à une série de 12 cycles comprenant

-05 heures d'immersion au bout desquelles le bloc pesé.



Figure II-32 : Échantillons émergés dans l'eau

-42 heures de séchage à l'étuve à une température de 70°C.



Figure II-33 : les échantillons dans l'étuve à 70°C.

-Les blocs sont brossés et pesés.

Chapitre II : Matériaux et Méthodes Expérimentale

Ce processus est répété douze (12) fois de suite, puis les échantillons sont séchés à une température de 70°C jusqu'à obtenir une masse constante. Les résultats de cet essai donnent la perte en masse maximum admise après 12 cycles de mouillage / séchage.

Selon ASTM D559, les constructions rurales peuvent subir une perte en masse de :

- 5% pour tout climat avec une pluviométrie annuelle supérieure à 500mm.
- 10% pour les régions où les précipitations annuelles sont inférieures à 500mm.

4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présentée de manière détaillée les matériaux utilisés, les méthodes de confection des échantillons, ainsi que les divers essais effectués pour évaluer leurs performances. La confection des échantillons a été réalisée avec une attention particulière à chaque étape, depuis la préparation initiale des matériaux bruts jusqu'à la fabrication des échantillons finaux. Les essais réalisés après la confection des échantillons ont inclus une série de tests, visant à mesurer différentes propriétés des matériaux, telles que leur résistance mécanique et leur durabilité.

Chapitre III :
Résultats et discussions.

Chapitre III : Résultats et discussions

1. Introduction :

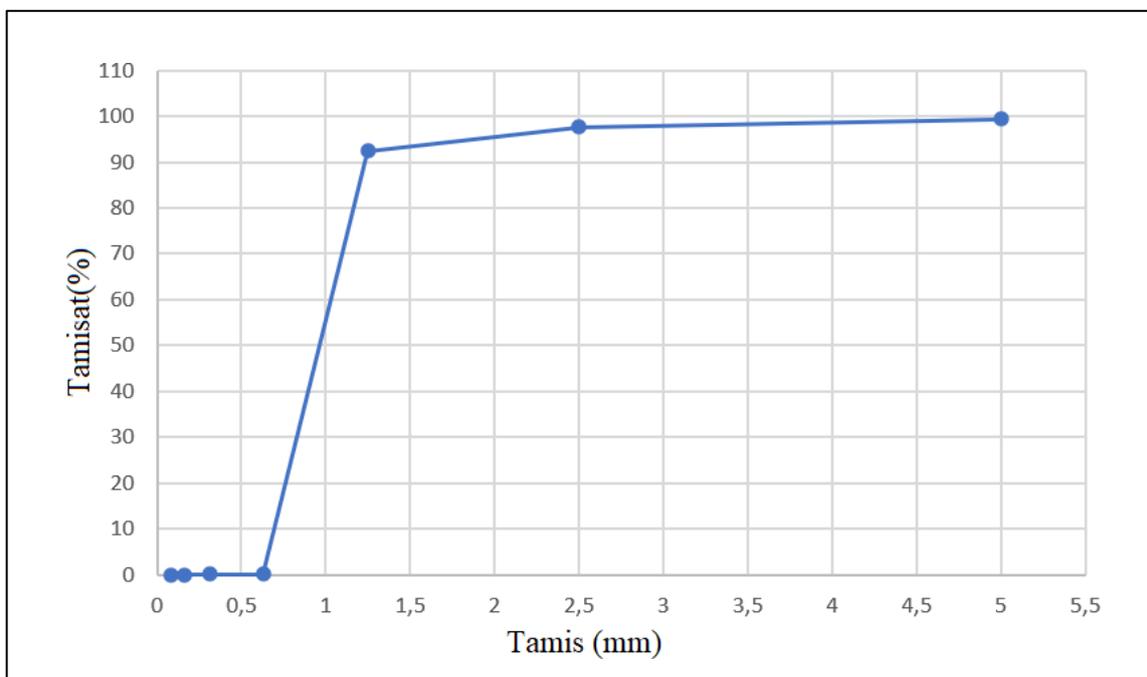
Dans le cadre de cette étude, une attention particulière a été portée à l'analyse détaillée des caractéristiques de la matière première. Ce chapitre se propose de présenter les résultats des essais effectués, en mettant en lumière les propriétés fondamentales et spécifiques de cette matière première.

Et nous nous focalisons sur l'importance et l'application concrète des résultats obtenus dans le cadre de notre étude. En analysant attentivement les conséquences pratiques de nos découvertes et en les confrontant aux recherches existantes, nous ouvrons la voie à une utilisation plus efficace et novatrice des connaissances.

2. Caractérisation géotechnique de la matière première :

2.1. Analyse granulométrique par tamisage du sable :

La figure III-1 représente la courbe tracée après l'analyse granulométrique par tamisage du sable



La figure III-1 : La courbe granulométrique du sable

Tableau III-1 : Résultats du module de finesse de sable et ça qualité

	Module de finesse
Sable	2,1

D'après les résultats du module de finesse dans le tableau III-1, ce sable est fin. Le sable est à utiliser si l'on recherche une bonne ouvrabilité et une bonne résistance avec des risques de ségrégation limités.

Chapitre III : Résultats et discussions

2.2. Analyse granulométrique par tamisage et sédimentation d'argile :

La figure III-2 représente la courbe tracée après l'analyse granulométrique par tamisage et sédimentation de l'argile

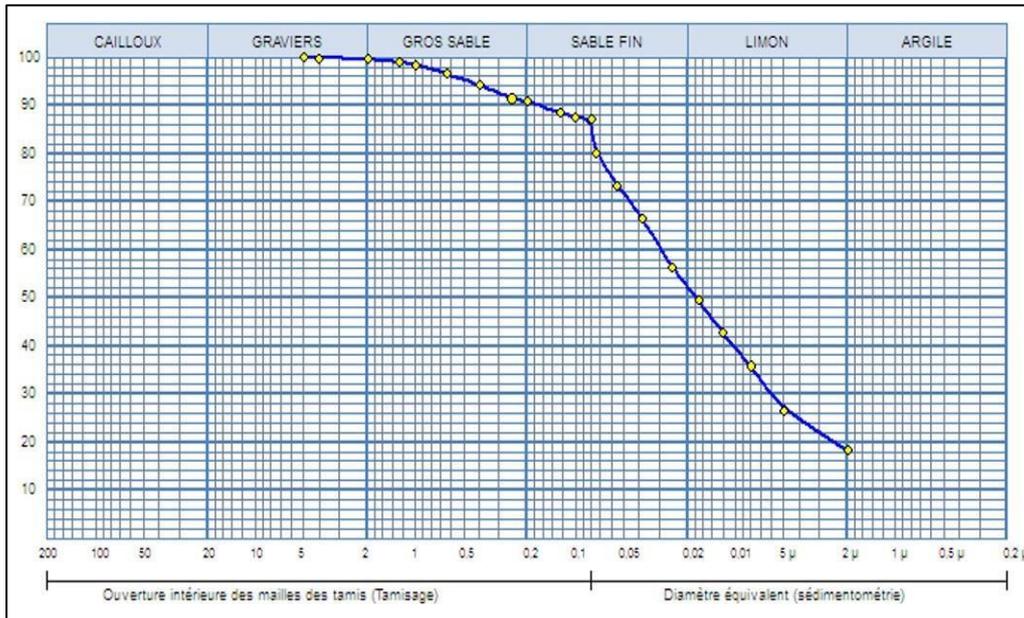


Figure III-2 : La courbe granulométrique d'argile

D'après la courbe de l'analyse granulométrique, on voit que l'échantillon est principalement constitué d'argile, avec une prédominance de particules de petite taille.

2.3. Limite d'Atterberg :

Le tableau III-3 fournit les résultats des limites d'Atterberg :

Tableau III-2 : Résultats limite d'Atterberg.

	Limite de liquidité (WL) %	Limite de plasticité (Wp) %	Indice de plasticité (Ip) %
Argile	38,71	19,73	18,98

Après avoir obtenu les résultats du tableau, nous avons classé l'argile en utilisant l'abaque de CASAGRANDE.

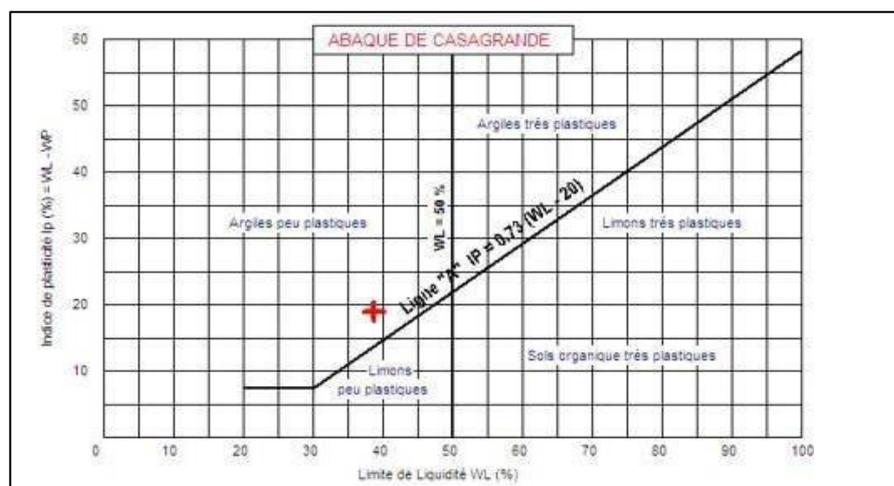


Figure III-3 : Classification de l'argile dans l'abaque CASAGRANDE

Chapitre III : Résultats et discussions

D'après l'abaque, on constate que cette argile se situe dans la zone des argiles peu plastiques.

3. Caractéristiques physiques de la matière première :

3.1. La masse volumique apparente (ρ_{app}) du sable et d'argile :

Les résultats obtenus de la masse volumique apparente du sable et de l'argile sont présentés dans les deux tableaux III-3 et III-4 :

Tableau III-3 : Les résultats obtenus pour le sable

M1 (g)	M2 (g)	(M2-M1) (g)	V (Cm ³)	ρ_{app} (g/Cm ³)
488	2076	1588	1000	1,588

Tableau III-4 : Les résultats obtenus pour l'argile

M1 (g)	M2 (g)	(M2-M1) (kg)	V (Cm ³)	ρ_{app} (g/Cm ³)
488	1480	992	1000	0,992

Ces valeurs indiquent que le sable a une masse volumique apparente plus élevée que celle de l'argile. Cela suggère que le sable est plus dense.

3.2. La masse volumique absolue (ρ_{abs}) du sable et d'argile :

Les résultats obtenus de la masse volumique absolue du sable et de l'argile sont présentés dans les deux tableaux III-5 et III-6 :

Tableau III-5 : les résultats obtenus pour le sable

V1(Cm ³)	V 2(Cm ³)	(V2-V1) (Cm ³)	M (g)	ρ_{abs} (g/ Cm ³)
200	275	75	200	2,66

Tableau III-6 : Les résultats obtenus pour l'argile

V1(Cm ³)	V2 (Cm ³)	(V2-V1) (Cm ³)	M(g)	ρ_{abs} (g/ Cm ³)
200	279,5	79,5	200	2,52

Pour le sable, la masse volumique absolue est de 2,66 g/cm³, tandis que pour l'argile, elle est de 2,52 g/cm³. Ces valeurs indiquent que le sable est plus dense que l'argile.

4. Les caractéristiques du ciment (voir fiche technique en annexe 1) :

Les caractéristiques de ciment sont présentées dans les tableaux III-7 et III-8 :

Chapitre III : Résultats et discussions

Tableau III-7 : La composition potentiel du clinker.

Composition potentiel du clinker (BOGUE)		
C3S	%	55,46
C2S	%	18,85
C3A	%	8,56
C4AF	%	12,43

Le silicate tricalcique (C3S) est le principal composant du clinker.

Tableau III-8 : La compositions chimique du ciment.

Compositions chimiques Norme (en 196-2)		
Eléments		Mesure
SiO ₂ -T	%	21,15
Al ₂ O ₃	%	4,80
Fe ₂ O ₃	%	4,16
CaO-T	%	62,36
MgO	%	1,21
SO ₃	≤ 4%	2,15
K ₂ O	%	0,33
Na ₂ O	%	0,13
CL	≤0,1%	0,02
P.A. F	%	3,69
CAO LIBRE (PT207 CERILH 1970	%	1,06
Insoluble	%	2,12

La composition chimique du ciment selon la norme EN 196-2 offre un aperçu détaillé de ses propriétés et des pourcentages de ses différents éléments chimiques.

5. Caractéristiques chimiques des échantillons :

5.1. La fluorescence X (FRX) :

La composition chimique des échantillons est déterminée par la technique de la spectrométrie de fluorescence X.

Le tableau III-9 présente l'analyse par FRX de 4 échantillons

Chapitre III : Résultats et discussions

Tableau III-9 : Analyse FRX de 4 échantillons

	S :32 %-E :10% - C :10%	S :43%-E :12%- C :10%	S :56%- E :10% C :10%
Leger (E.L)	40 ,06%	40,16%	44,33%
Silice (Si)	24,79%	26,84%	28,95%
Potassium(K)	1,33%	1,45%	1,25%
Aluminium (Al)	6,2%	6,41%	4,55%
Soufre(S)	1,19%	1,16%	1,36%
Calcium (Ca)	20,66%	18,35%	15,63%
Fer (Fe)	3,13%	3,2%	2,15%
Magnésium (Mg)	2,2%	1,89%	1,4%

S : Sable ; **C** : Ciment ; **E** : Eau

D'après le tableau III-9, les résultats de l'analyse par FRX indiquent des variations dans la composition chimique des échantillons, avec des concentrations différentes de Silice (Si), Calcium (Ca), Aluminium (Al) et autres éléments.

On observe que l'augmentation de la proportion de sable dans les échantillons entraîne des quantités de Silice plus élevées.

Chapitre III : Résultats et discussions

5.2. Analyse par spectrométrie infrarouge (FTIR) :

La courbe de la figure III-4 représente un spectre infrarouge de l'échantillon avec la composition : S :56%- E :10%-C :10%

S : sable ; E : eau ; C : Ciment

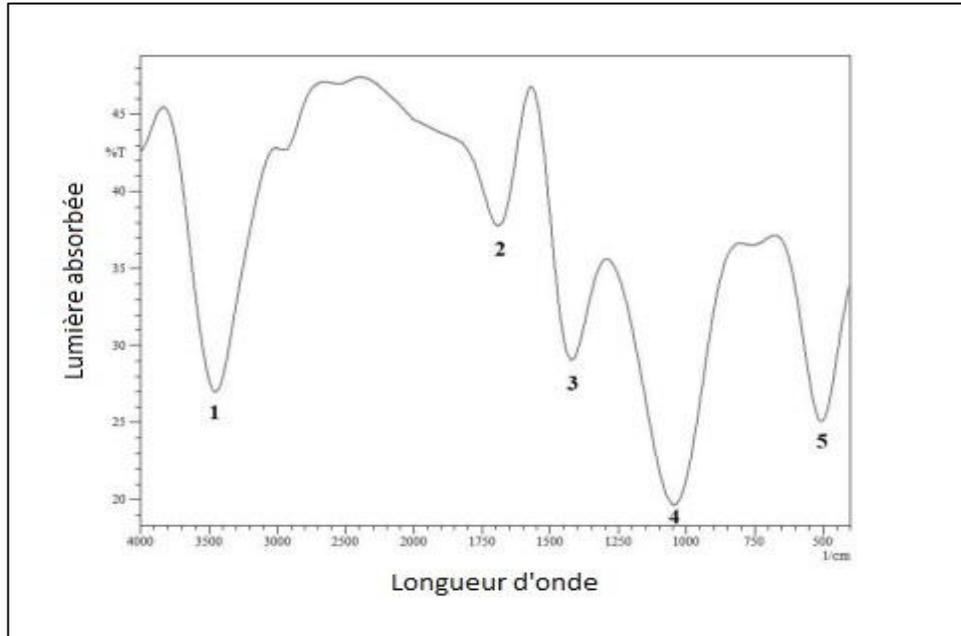


Figure III-4 : Spectre infrarouge d'un échantillon

La courbe de la figure III-5 représente un spectre infrarouge de l'échantillon avec la composition :56%- E :10%- C :10%

S : sable ; E : eau ; C : Ciment

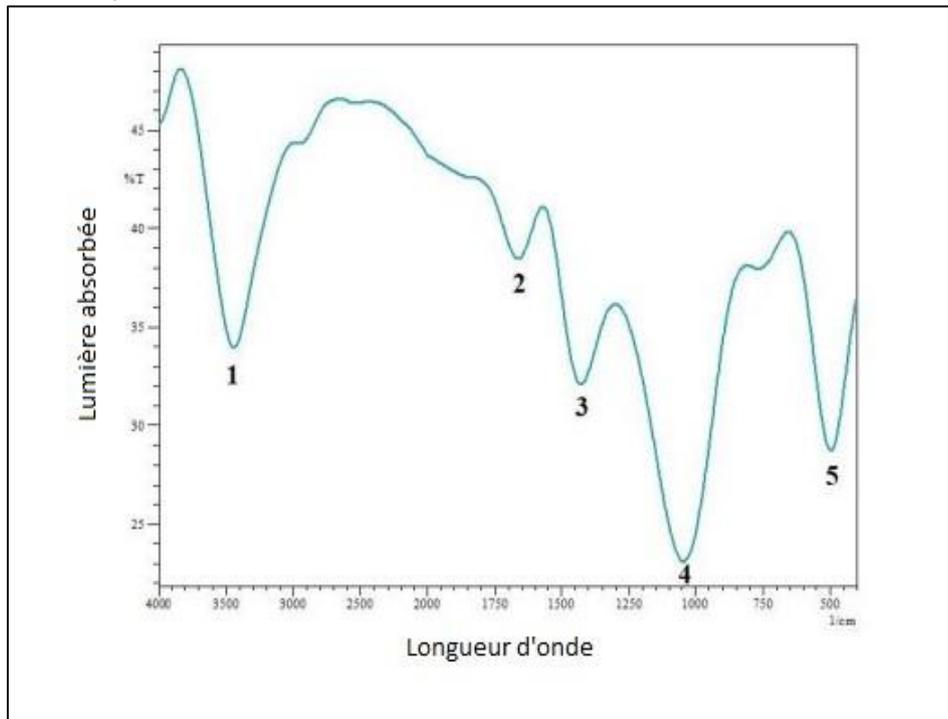


Figure III-5 : Spectre infrarouge d'un échantillon

Chapitre III : Résultats et discussions

La courbe de la figure III-6 représente un spectre infrarouge de l'échantillon avec la composition : S :32 % -E :10% - C :10%

S : sable ; E : eau ; C : Ciment

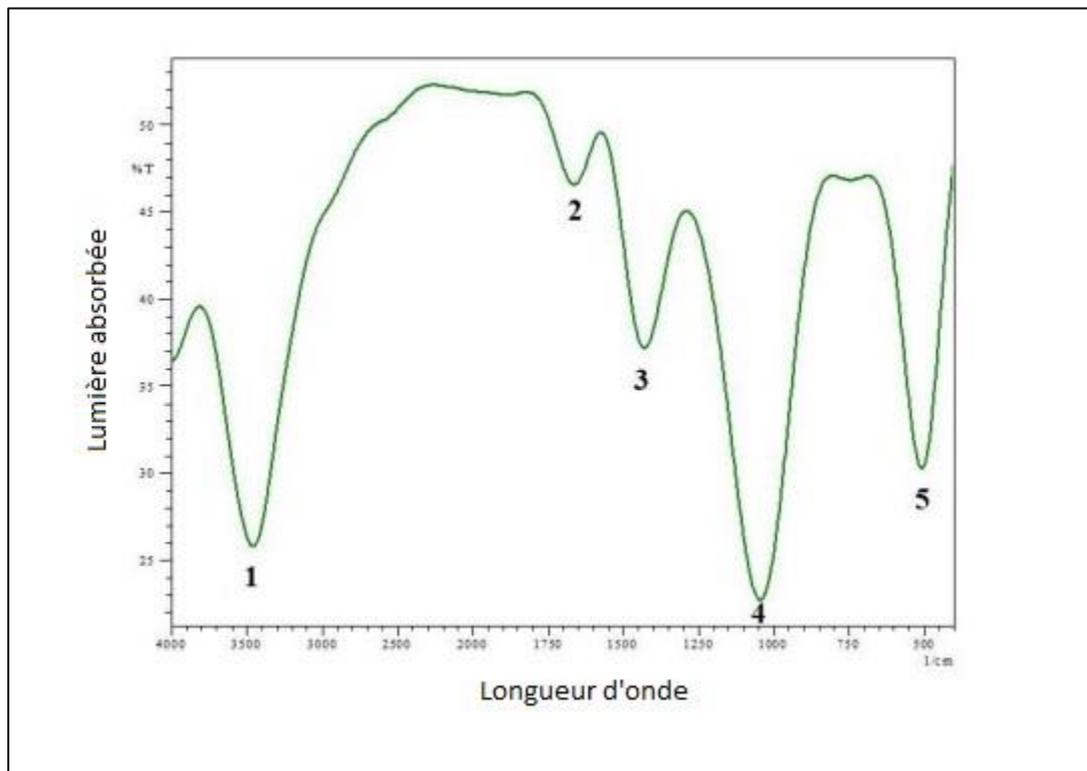


Figure III-6 : Spectre infrarouge d'un échantillon

Tableau III-10 : Analyse des Composés par Spectroscopie Infrarouge

Numéro du Pic	Liaison	Origine
1	O-H	Portlandite, Eau
2	C=O	CaCO ₃
3	C=O	CaCO ₃
4	Si-O	Argile, Sable
5	Al-O	Argile

Le tableau III-10 présente les liaisons chimiques et leurs origines. Le premier pic (O-H) se trouve dans la portlandite et l'eau. Le deuxième et le troisième pics (C=O) sont typiques du carbonate de calcium (CaCO₃). Le quatrième pic (Si-O) provient de l'argile et du sable, tandis que le cinquième pic (Al-O) se trouve dans l'argile.

Chapitre III : Résultats et discussions

6. Caractéristiques physiques des échantillons :

6.1. Masse volumique :

La courbe de trois dimensions de la figure III-7 représente l'influence du ciment et du sable sur la masse volumique des échantillons. Le pourcentage de sable varie de 40% à 70 % et celui de ciment de 8 % à 12 %. Ces résultats ont été obtenus par la méthode de la pesée hydrostatique.

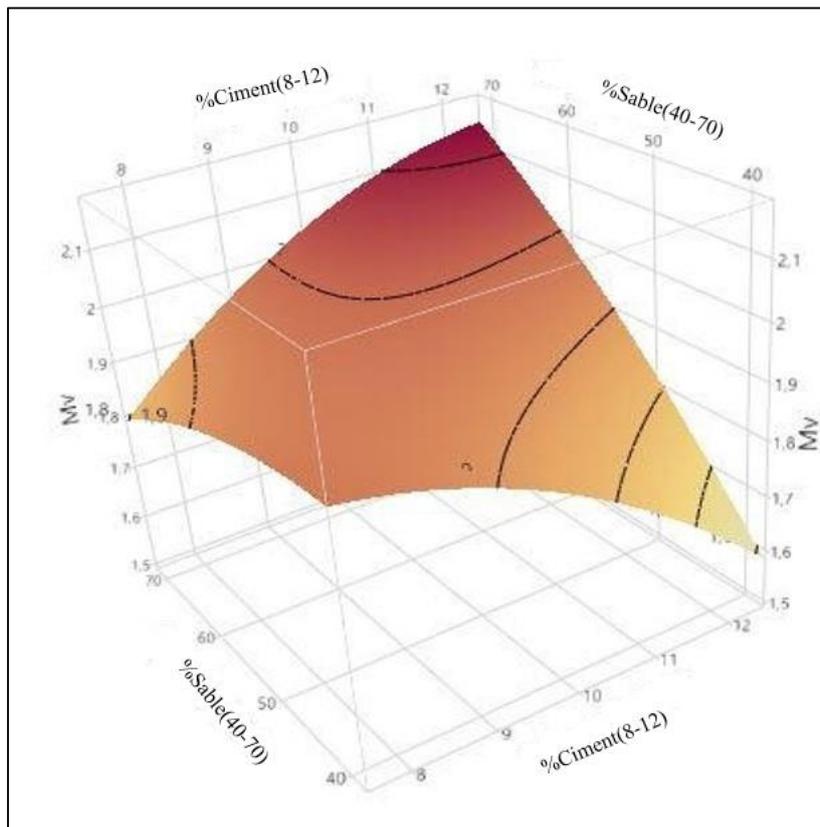


Figure III-7 : L'influence du ciment et du sable sur la masse volumique

Sachant que le sable est plus dense que l'argile, plus on augmente les pourcentages de sable, plus l'échantillon devient lourd. De plus, l'augmentation du pourcentage de ciment entraîne une augmentation de la masse volumique due à la densification de la structure lors de l'hydratation du ciment.

La combinaison qui donne la valeur la plus élevée se situe vers 70 % de sable et 12 % de ciment, correspondant à la zone rouge foncé.

Chapitre III : Résultats et discussions

6.2. Porosité et Absorption :

La courbe représentée dans la figure III-8 montre l'impact de sable et de ciment en pourcentage sur la porosité.

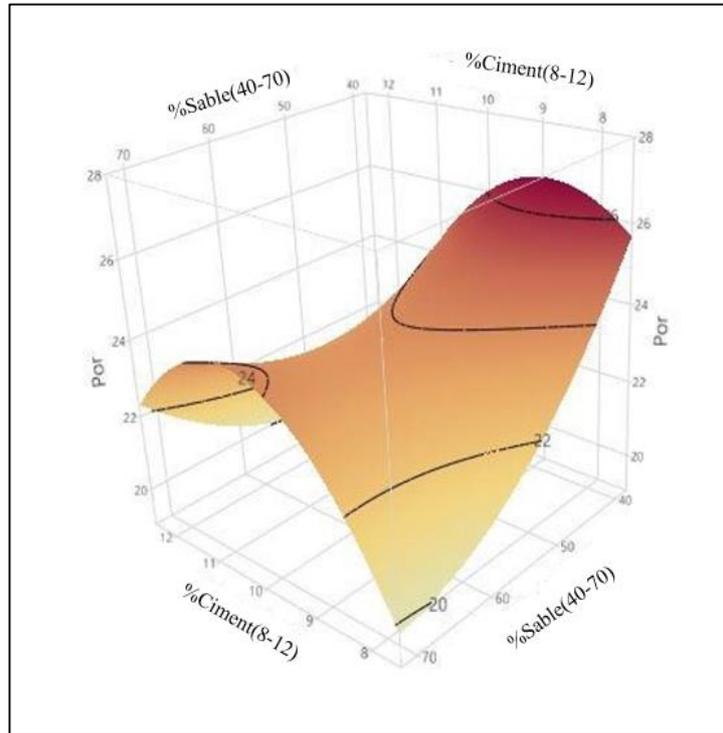


Figure III-8 : L'influence du sable et du ciment sur la porosité

La courbe dans la figure III-9 montre les variations des pourcentages de sable et de ciment sur l'absorption, permettant de voir comment les différentes combinaisons de sable et de ciment modifient cette mesure.

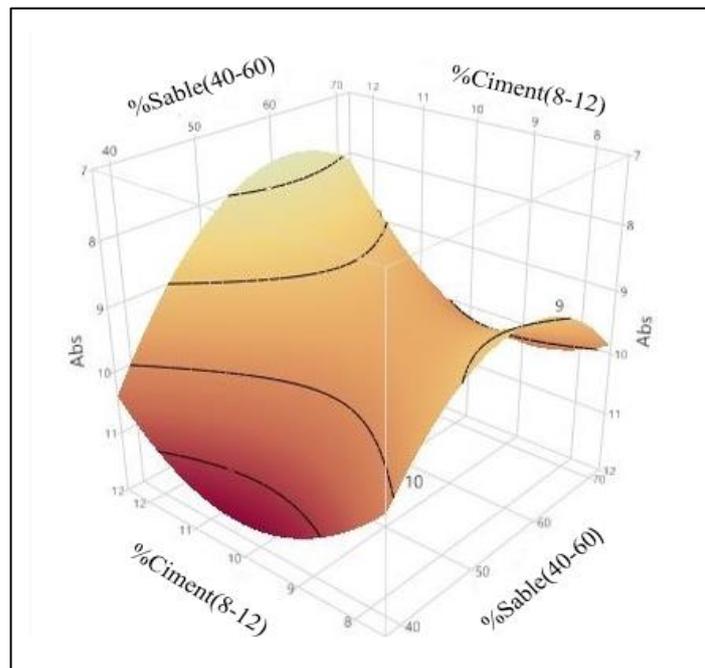


Figure III-9 : L'influence du sable et du ciment sur l'absorption

Chapitre III : Résultats et discussions

On observe d'après les deux figures III-8 et III-9 que l'absorption et la porosité ont le même comportement. Les valeurs les plus faibles sont représentés par une couleur claire correspondant à un pourcentage de sable de 55 % et un pourcentage de ciment de 12 %, des taux plus faibles de ciment conduisent à une absorption et une porosité plus importante.

7. Caractéristiques mécaniques des échantillons :

7.1. Résistance à la compression :

La courbe de la figure III-10 représente une surface en trois dimensions illustrant l'influence du ciment et du sable sur la résistance à la compression des échantillons, le sable varie de 40% à 70 % et le ciment de 8 % à 12 %.

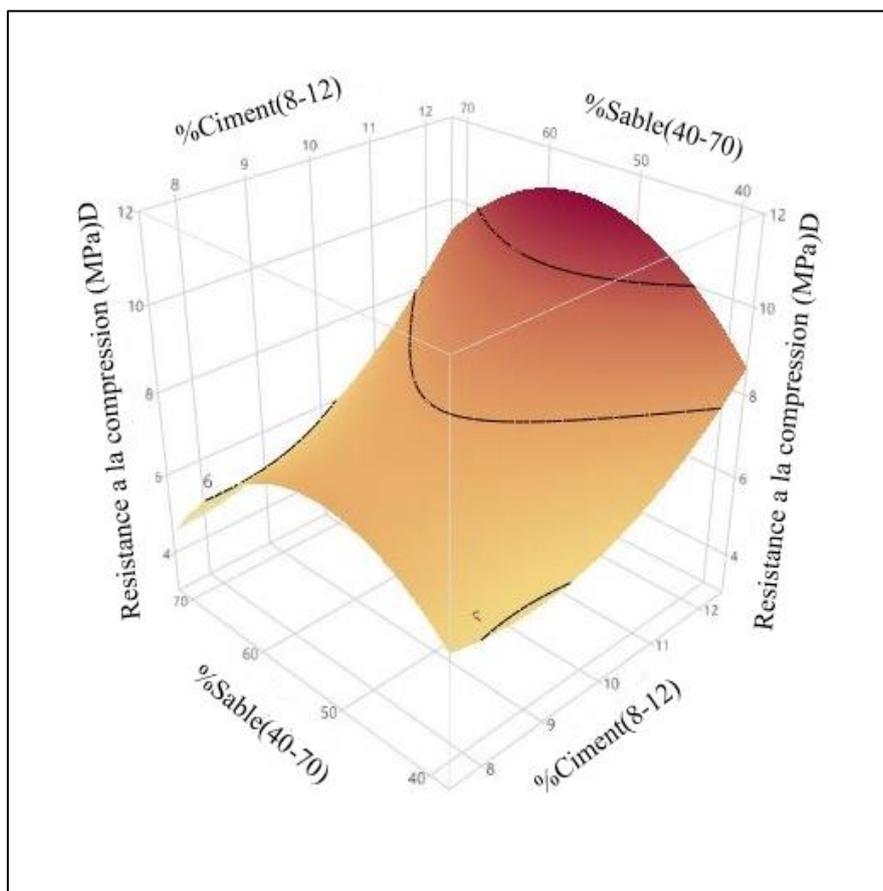


Figure III-10 : L'influence du ciment et du sable sur la résistance à la compression

On observe que la résistance à la compression atteint son maximum pour 55 % de sable, puis diminue au-delà de ce pourcentage. Par ailleurs, l'augmentation du pourcentage de ciment entraîne une augmentation régulière de la résistance.

La zone rouge foncé de la courbe montre que la combinaison de 55 % de sable et 12 % de ciment offre la plus grande résistance à la compression.

Chapitre III : Résultats et discussions

La Figure III-11 présente un échantillon après l'essai de compression



Figure III-11 : Un échantillon après l'essai de compression

8. Caractéristiques minéralogiques des échantillons :

8.1. Méthode de la diffraction au rayon X (DRX) :

Le graphe de la figure III-12 illustre les diagrammes de diffraction des rayons X de différents échantillons. Les pics observés correspondent à des phases cristallines, distinguées par leurs angles de diffraction caractéristiques.

S : Sable ; E : Eau ; C : Ciment

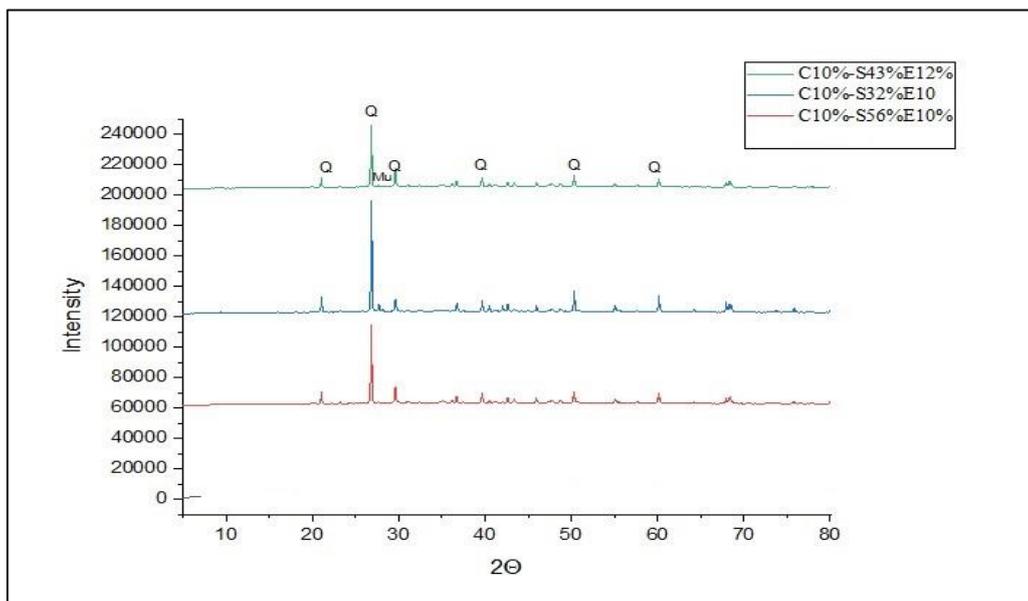


Figure III-12 : Analyse de la diffraction au rayon x (DRX) de 4 échantillons

Chapitre III : Résultats et discussions

D'après la figure III-12 les résultats montrent des variations significatives entre les échantillons. Notamment dans les intensités des pics de diffraction. Les pics marqués par 'Q' représentent le quartz. 'Mu' correspond à la muscovite un minéral fréquemment observé dans la composition des argiles.

9. Durabilité :

Le graphique de la figure III-13 présente la perte de masse en pourcentage en fonction du nombre de cycles pour trois compositions différentes de matériaux, représentées par les courbes bleue, grise et rouge.

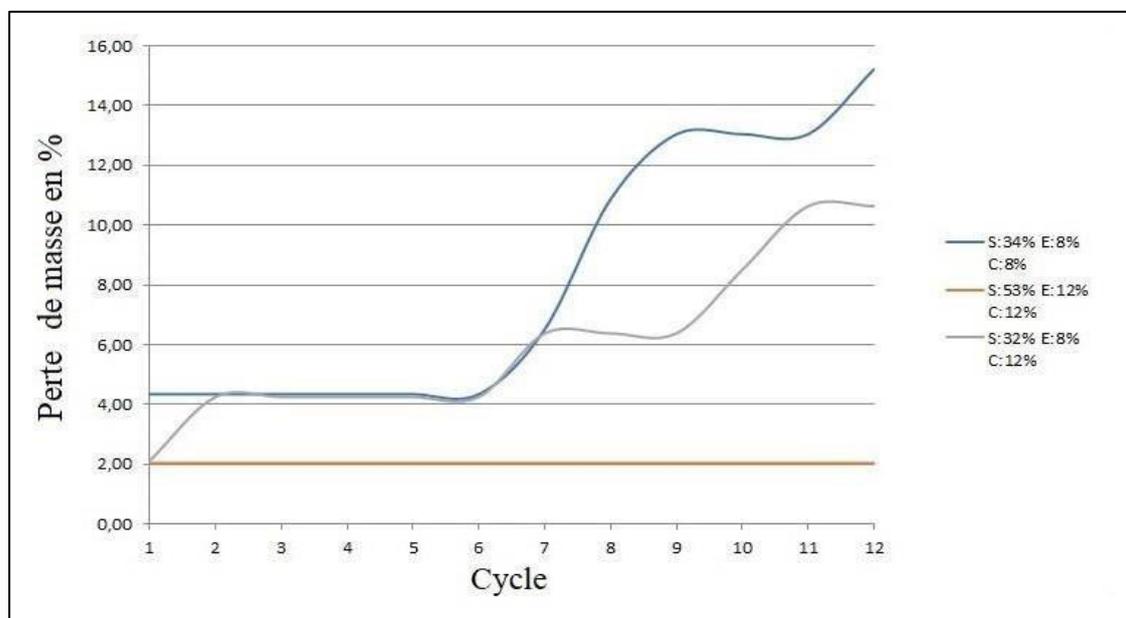


Figure III-13 : La perte de masse en fonction des cycles

S : Sable ; **E** : Eau ; **C** : Ciment

D'après la figure on remarque que la courbe orange montre une stabilité remarquable avec une perte de masse constant d'environ 2 %.

Pour la courbe bleue on remarque une perte de masse initialement stable à environ 4% pendant les six premiers cycles, cependant à partir du cycle 6, la courbe bleue commence à afficher une augmentation rapide de la perte de masse, atteignant environ 9% au cycle 9. Après cette phase, la perte de masse se stabilise entre les cycles 9 et 11. Toutefois, cette stabilité est de courte durée, car au cycle 12, la perte de masse augmente de nouveau de manière significative pour atteindre environ 15%.

Pour la courbe grise on observe que la perte de masse commence à environ 2% dès le premier cycle, puis augmente légèrement pour atteindre environ 4% au deuxième cycle. La perte de masse reste stable jusqu'au cycle 6, avant d'augmenter significativement à environ 7% au cycle

Chapitre III : Résultats et discussions

7. Entre les cycles 7 et 9, la perte se stabilise, mais elle augmente de nouveau pour atteindre environ 11% au cycle 11. Enfin, une stabilisation est observée entre les cycles 11 et 12.

En conclusion la composition de la courbe orange montre la plus grande stabilité, avec une perte de masse constante d'environ 2% sur 12 cycles. Ceci démontre que l'augmentation des proportions de sable et de ciment renforce la durabilité des échantillons.

La figure III-14 illustre l'évolution de la dégradation de l'échantillon avec les compositions Ciment : 8% - Sable : 34% - Eau : 8% à travers différents cycles : Cycle 1, Cycle 6, Cycle 9 et Cycle 12.

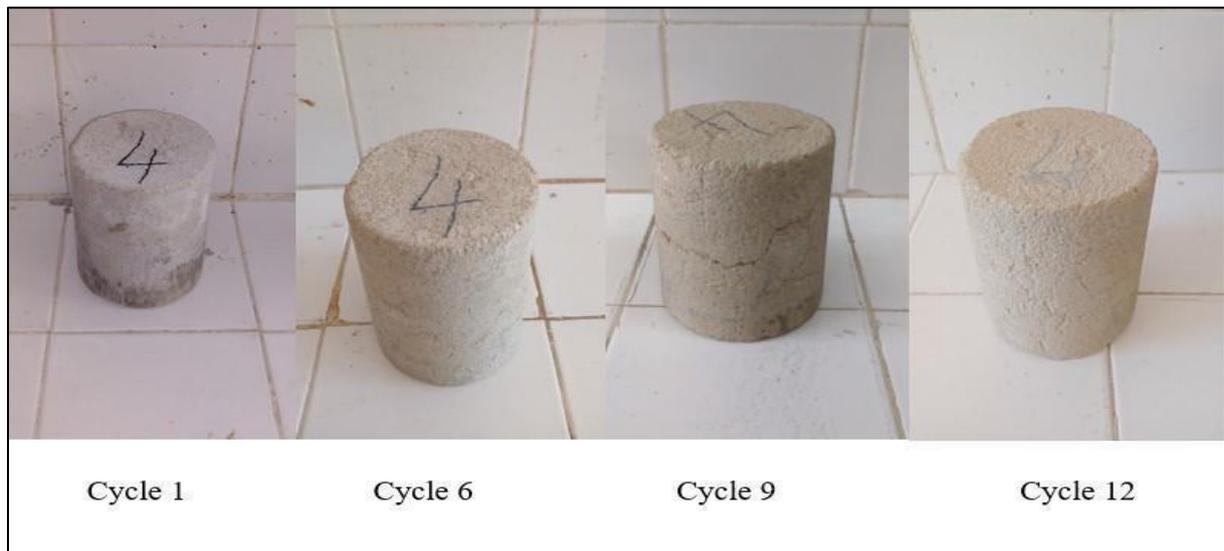


Figure III-14 : L'évolution de la dégradation de l'échantillon.

La figure III-15 illustre la dégradation progressive d'un échantillon composé de Ciment : 12% - Sable : 53% - Eau : 12% à travers les cycles suivants : Cycle 1, Cycle 6, Cycle 9 et Cycle 12.



Figure III-15 : L'évolution de la dégradation de l'échantillon

Chapitre III : Résultats et discussions

La figure III-16 montre l'évolution de la dégradation d'un échantillon avec les compositions Ciment : 12% - Sable : 32% - Eau : 8% à travers différents cycles : Cycle 1, Cycle 6, Cycle 9 et Cycle 12."



Figure III-16 : L'évolution de la dégradation de l'échantillon

10. Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté les caractéristiques géotechniques et physiques de la matière première, puis évalué les échantillons pour leurs propriétés chimiques, physiques minéralogiques, mécaniques et leur durabilité. Les résultats de l'analyse FRX indiquent que l'augmentation de la proportion de sable entraîne des quantités plus élevées de Silicium. L'analyse DRX révèle la présence prédominante de quartz (Q) et de muscovite (Mu). Lors de l'analyse par spectrométrie infrarouge, les liaisons suivantes ont été identifiées : C=O, O-H, Si-O et Al-O.

Ajouter du sable augmente la masse des échantillons, tandis qu'augmenter le pourcentage de ciment les rend plus denses. La porosité et l'absorption sont les plus faibles avec 55 % de sable et 12 % de ciment, indiquant qu'une diminution du pourcentage de ciment entraîne une absorption plus élevée. La résistance à la compression atteint un maximum avec 55 % de sable, diminuant au-delà de ce seuil, et augmente constamment avec un pourcentage plus élevé de ciment. Enfin, l'augmentation des proportions de sable et de ciment améliore la durabilité des échantillons.

La formulation optimale correspond à un maximum de résistance et une durabilité suffisante est 55% de Sable% est 12% Ciment et 8 % Eau.

Conclusion générale :

Ce mémoire de recherche avait pour but principal de développer un béton de terre stabilisée en maximisant ses performances en termes de durabilité et de résistance.

Des échantillons ont été confectionnés en variant les quantités de sable et de ciment. Ces échantillons ont ensuite été soumis à des essais de compression à 28 jours afin de déterminer leur résistance mécanique, ainsi qu'à d'autres essais pour évaluer leurs caractéristiques physiques telles que l'absorption d'eau. De plus, un essai de séchage/mouillage a été réalisé pour mesurer leurs pertes de masse afin de voir leurs durabilités.

Les résultats obtenus montrent que :

- La résistance à la compression atteint son maximum avec un taux de sable de 55%. De plus, l'augmentation du pourcentage de ciment entraîne une augmentation continue de cette résistance.

- Des taux plus faibles de ciment et de sable conduisent à une porosité et une absorption plus importante.

- En termes de durabilité, il est démontré que l'augmentation des proportions de sable et de ciment renforce la durabilité des échantillons.

En perspectives :

- On prévoit de stabiliser d'autres échantillons avec d'autres liants (la chaux, fibres végétales...) et d'effectuer les mêmes essais de résistance et de durabilité.

- Étudier la durabilité des échantillons dans des conditions hivernales rigoureuses.

En conclusion, cette étude a permis de développer un béton de terre stabilisée avec des performances optimisées en termes de résistance et de durabilité.

La formulation optimale correspond à un maximum de résistance et une durabilité suffisante est 55% de Sable, 12% Ciment et 8 % Eau.

Références bibliographiques

- [1] : Saliba, J. (2020). Suivi de l'endommagement du béton de terre induit par le séchage. *Academic Journal of Civil Engineering*, 38(1), 113-116
- [2] : G. Minke, *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture*, 2013.
- [3] : Vyncke, J., Kupers, L., & Denies, N. (2018). Earth as Building Material—an overview of RILEM activities and recent Innovations in Geotechnics.
- [4] : Costa, C. S., Rocha, F., & Velosa, A. L. (2016). Sustainability in earthen heritage conservation.
- [5] : Araya-Letelier, G., Gonzalez-Calderon, H., Kunze, S., Burbano-Garcia, C., Reidel, U., Sandoval, C., & Bas, F. (2020). Waste-based natural fiber reinforcement of adobe mixtures : Physical, mechanical, damage and durability performance assessment.
- [6] : Paul, S., Islam, M. S., & Hossain, M. I. (2023). Suitability of Vetiver straw fibers in improving the engineering characteristics of compressed earth blocks.
- [7] : Hall, M. R., & Casey, S. (2012). Hygrothermal behaviour and occupant comfort in modern earth buildings.
- [8] : CRATerre, *Traité de construction en terre*, Marseille, 1989.
- [9] : « Construire en terre crue » produite par amàco amàco - l'atelier matières à construire.
- [10] : Parc naturel régional Marais du Cotentin et du Bessin.
- [11] : DEAL Guyane - Ministère de l'Environnement. Document préparatoire au séminaire-formation " Construire en terre crue de Guyane.
- [12] : Déclare Pierre Magnan Rédaction Afrique France Télévisions, Les sept merveilles de l'Algérie distinguée par l'UNESCO.
- [13] : Aillère S., Henin S. et Rautureau M., 1982. Minéralogie des argiles : Classification et nomenclature.
- [14] : B. Tyagi, Ch. D. Chudasama, R. V. Jasra, Determination of structural modification in acid activated montmorillonite clay by FT-IR spectroscopy, *Spectrochimica Acta Part A* 64
- [15] : J. Pan, Ch. Wang, Sh. Guo, J. Li, Z. Yang, Cu supported over Al-pillared interlayer clays catalysts for direct hydroxylation of benzene to phenol, *Catalysis Communications* 9
- [16] : Fabian Valencia CARACTERISATION DES PARTICULES FINES D'UN MATÉRIAU GRANULAIRE DE FONDATION PAR L'ESSAI AU BLEU DE MÉTHYLÈNE.
- [17] : Guillaud H., Houben H. 2006. *Traité de construction en terre* (Vol. 2006)
- [18] : P.Meukan, valoration des briques de terre stabilisée en vue de l'isolation thermique de bâtiments, Université de Yaoundé ,2004.
- [19] : A.Mesbah, J.Morel, P,Walker,K.Ghavani,Development of a direct ensile teste for compacted earth bloks reinforced with naturel fibres,J.Mater civ.eng 16(2004)95-98.

- [20] : B. Taallah, Etude du comportement physico-mécanique du bloc de terre comprimée avec fibres, Université Mohamed Khider Biskra, 2014
- [21] : F. Michaud, "Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique : Aptitude post formage" thèse Phd, univ Laval, 2003.
- [22] : H.B Nagarj, M.V. Sarvan, T.G Arun, K.S. Jagadisk ,role of lime with cement in longterme strength of compressed stabilized earth bloks,Int.j sustain , bult envirom 3(2014)
- [23] : Govin.A, « Aspect physico-chimiques de l'interaction bois-ciment, Modification de l'hydratation du ciment par le bois », thèse de doctorat, Ecole Nationale supérieure des Mines de Saint –Etienne, 2004.
- [24] : Noui.A, cour de matériaux de construction 3ème année génie civil, université de Bordj Bou Arreridj année 2012.
- [25] : Taylor, H.F.W. "Cement Chemistry." Thomas Telford Publishing, 1997.
- [26] : Osula D.O.A., « A comparative evaluation of cement and lime modification of laterite», Engineering Geology.
- [27] : Ibrahim Messaoudene, Laurent Molez, Abderrachid Amriou. Effet du Sable de dune sur la Durabilité du Béton de Terre Stabilisée et Compressée. Academic Journal of Civil Engineering, 2020, 38 (1), pp.101-104. Ffhal-03330654
- [28] : Elahi, T. E., Shahriar, A. R., & Islam, M. S. (2021). Engineering characteristics of compressed earth blocks stabilized with cement and fly ash. *Construction and Building Materials*, 277, 122367
- [29] : Saliba, J. (2021). Effet des cycles humidification/séchage sur le comportement mécanique des bétons de terre. *Academic Journal of Civil Engineering*, 38(2), 125-129
- [30] : Fardoun, H., Saliba, J., & Saiyouri, N. (2023). Earth concrete under cyclic loadings : Stress-strain curves and damage assessment by means of acoustic emission and digital image correlation techniques. *Mechanics Research Communications*, 131, 104158.
- [31] : Bogas, J. A., Real, S., Cruz, R., & Azevedo, B. (2023). Mechanical performance and shrinkage of compressed earth blocks stabilised with thermoactivated recycled cement. *Journal of Building Engineering*, 79, 107892.
- [32] : Mustafa, Y. M. H., Al-Amoudi, O. S. B., Zami, M. S., & Al-Osta, M. A. (2023). Strength and durability assessment of stabilized Najd soil for usage as earth construction materials. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 82(2), 55

Références normatives

- NF EN 933-1 (2012)** : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage
- NF EN 933-2 (2020)** : Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 2 : Détermination de la granularité - Tamis de contrôle, dimensions nominales des ouvertures

NF P 94-057 (2018) : Traite de l'analyse granulométrique par sédimentation des éléments passant à travers le tamis de 80 µm d'ouverture.

NF P 94-051(2018) : Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 12 : détermination des limites de liquidité et de plasticité.

NF EN 1097-6(2013) : Cette norme, intitulée "Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : Détermination de la masse volumique absolue et de la masse volumique apparente des granulats fins"

NF P94-064 (1993) : (Sols : reconnaissance et essais-Masse volumique sèche d'un élément de roche- Méthode par pesée hydrostatique).

ASTM D559-57 : « Méthodes d'essai standard pour le mouillage et le séchage des mélanges sol-ciment compactés »

Annexe 1



المجمع الصناعي لإسمنت الجزائر
GRUPE INDUSTRIEL DES CIMENTS D'ALGERIE

SOCIETE DES CIMENTS D'AIN EL KEBIRA
« S.C.A.E.K »

S.P.A au Capital Social de : 2 200 000 000,00 DA ش.ذ.أ. رأسمال الاجتماعي

N° Identification fiscale : 0998 19008236319 / N° Article d'imposition : 1902.20.10.011 / N° Registre de commerce : 98 B 0082363

Réf: 0235 /DQ/DDDS/SCAEK/2021

Ain El Kebira le : 03/08/2021

FICHE TECHNIQUE CIMENT « ligne 2 »

MOIS : Juin 2021

CEM II/A - L 42.5 R

Conformément à la norme NA 442 édition 2013 « NF EN 197-1 :2012 »

COMPOSITIONS CHIMIQUES Norme (EN 196-2)			Essais physiques Norme (NF EN « 196-3 :2017 et 196-6 :2018 »)		Garantie NA 442 :2013	Mesures
ELEMENTS	Mesures		P.S	(g / Cm ³)	/	3.12
SiO ₂ -T	%	21.15	SSB	cm ³ /g	/	4066
Al ₂ O ₃	%	4.80	Début De Prise	minute	≥ 60	201
Fe ₂ O ₃	%	4.16	Fin De Prise		/	322
CaO-T	%	62.36	Expansion A. Chaud	Millimètre	≤ 10	0.27
MgO	%	1.21	Refus 45 µ	%	/	2.8
SO ₃	≤ 4 %	2.15	Consistance Normale	%	/	28.7
K ₂ O	%	0.33	Type d'ajout	Calcaire (L) %	06 ≤ L ≤ 20	7.0
Na ₂ O	%	0.13	S.C.A.E.K			
Cl	≤ 0,1%	0.02				
P.A.F.	%	3.69				
CaO Libre (PT207 CERILH 1970)	%	1.06				
R.Insoluble	%	2.12				
COMPOSITION POTENTIELLE DU CLINKER (BOGUE)			CARACTERISTIQUES MECANIQUE Norme (NF EN 196-1 : 2016)			
C ₃ S	%	55.46	R. Flexion MPa	02 JOURS	/	5.1
C ₂ S	%	18.85		28 JOURS	/	8.8
C ₃ A	%	8.56	R. Compression MPa	02 JOURS	Li ≥ 20.0	22.6
C ₄ AF	%	12.43		28 JOURS	Li ≥ 42.5	58.7

Le chef de service contrôle de qualité

K. BELARBI
 Chef de Service
 Contrôle Qualité

CB