



*Ministère de l'enseignement supérieure
et de la recherche scientifique*

Université Mohamed Boudiaf - M'sila



Faculté de technologie

Département de GENIE CIVIL

FILIERE : Génie Civil

SPECIALITE : Matériaux.

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de **MASTER**

Par : Diaf Oussama

THEME

*Valorisation de la brique de terre comprimée et
stabilisée par du ciment et de la chaux*

Soutenu le 18/06/2018 devant le jury.

Pr.Nasri A/Ghani

Université M'SILA

Président

Pr.bencheikh Mohamed

Université M'SILA

Rapporteur

Dr. Siline Mohamed

Université M'SILA

Examineur

Dr. Belouadheh Messaouda

Université M'SILA

Examineur

Promotion : juin 2018



REMERCIEMENT

D'abord je remercie Allah de m'avoir donné le courage et la détermination nécessaires pour finaliser ce travail.

Il ne m'aurait été possible, à moi seul, d'achever le présent travail sans l'assistance, l'appui et le suivi minutieux de mon encadreur le professeur **BENCHEIKH MOHAMED.**

Je tiens aussi à remercier l'ingénieur de laboratoire de développement Géomatériaux Université de M'sila **CHOUKEIR SAWSEN** pour leur conseil, leur soutien et leur aide précieuse pendant la durée de mes travaux.

Mes sincères remerciements vont au chef de département de génie civil **Mr. BAALI LAÏD**, mes remerciements vont aussi au président et aux membres du jury de soutenance qui m'ont fait l'honneur d'examiner ce travail.



DIAFOUSSAMA





DEDICACE

Je dédie ce modeste travail en premier lieu à la personne la plus chère pour moi dans ce monde, ma mère qui est la fleur de ma vie, le symbole de l'amour et la tendresse qui s'est sacrifié pour mon bonheur et ma réussite.

Mon père pour leurs sacrifices.

Ma chère sœur et mes chers frères

Je remercie aussi toute personne qui m'a aidé et soutenue, de près ou de loin. et en particulier, ma chère Meriem, et son amie Bouthaina, à tous mes amis et à toute la promotion 2018.



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بِسْمِ اللَّهِ

RÉSUMÉ :

La recherche présentée porte sur l'application de la méthode des plans d'expériences (MPE), à l'étude des caractéristiques mécaniques et ultrasoniques des briques de terre comprimée et stabilisée au ciment. Contrairement aux autres matériaux de construction, tels que le béton et l'acier, la composition relativement non précise et non normalisée de la terre rend ce matériau difficile à identifier et à caractériser. En effet, le matériau terre devrait passer par une série d'essais pour caractériser son aptitude à l'emploi dans le secteur de la construction.

L'étude porté sur des briques en argile choisi comme matériau de référence au quel nous avons associé le ciment, la chaux, le sable dune. Nous avons fait varier le pourcentage de ces matériaux en masse.

MOTS-CLÉS:

La méthode des plans d'expériences, caractéristiques mécaniques, ultrasonique, terre comprimée, terre stabilisée au ciment, brique en terre, argile, chaux, sable de dune.

ABSTRACT

Our work deals with the application of experimental design method (EDM) to the study the mechanical and ultrasonic characteristics of the earth compressed stabilised with the cement.

On the opposite of the other building materials, such as the concrete and the steel, the composition relatively not accurate and not normalized of the earth makes this material difficult to be identified and characterized. Indeed, the earth should pass by a series of tests to characterize its aptitude for the particular use in the construction sector.

The study focused on the bricks of clay chosen as reference material to which we associate the cement, lime, sand dune. We have varied the percentage of these materials in mass.

KEYWORDS

Experimental design method, mechanical characteristics, ultrasonic, earth compressed, stabilised with the cement, the bricks of earth, clay, lime, sand dune.

ملخص

يتناول البحث المقدم تطبيق طريقة التصميم التجريبية لدراسة للخصائص الميكانيكية و الموجات فوق الصوتية لأجر الطين المضغوط و المستقر بالاسمنت. عكس مواد البناء التقليدية (الخرسانة , الحديد...) فان مكونات التربة الغير مستقرة تجعل منها مادة من الصعب تحديد مواصفاته و خصائصه, و لهذا يجب تطبيق عدة تجارب على التربة لجعلها صالحة للاستخدام في قطاع البناء.

أجريت الدراسة على أجر الطين المصنوع في المختبر و الذي أضفنا إليه الاسمنت, الجير, الرمل, مع تغيير نسب هذه المواد من مزيج لأخر

الكلمات المفتاحية

طريقة التصميم التجريبية, الخصائص الميكانيكية, الموجات فوق الصوتية, التربة المضغوطة, التربة المستقرة بالاسمنت, طوب التربة, الطين, الجير, الرمل.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	
I-1 : Introduction :	5
I-2 : Histoire :	5
I-3 : La terre :	5
I-4 : Techniques de construction en terre :	6
I.5 : Avantages de La Terre Crue :	9
I.5.1 : Avantages Constructifs :	10
I.5.2 : Avantages Environnementaux :	10
I.5.3 : Avantages Economiques :	10
I.5.4 : Avantages Sociétaux :	10
I.6 : Blocs de terre comprimée (BTC) :	11
I.6.1 : Définition :	11
I.6.2 : Constituants :	11
I.6.2.1 : L'argile :	11
I.6.2.2 : Ciment:	11
I.6.2.3 : La chaux :	14
I.6.2.4 : Sable :	15
I.7 : Les propriétés fondamentales pour la stabilisation de la terre :	15
I.7.1 : Texture ou Granularité:	16
I.7.2 : La plasticité:	16
I.7.3: La compressibilité:	17
I.7.4 : La cohésion :	17
I.8 : Stabilisation:.....	17
I.8.1 Définition:	17
I.8.2 Objectifs:	17
I.8.3 Procédés :	18
I.8.3.1 Stabilisation mécanique :	18
I.8.3.2 Stabilisation physique :	18

I.8.3.3 Stabilisation chimique :.....	18
I.8.4 : Stabilisation au ciment :.....	18
I.8.4.1 : Généralités :.....	18
I.8.4.2 Mécanisme de stabilisation :.....	19
I.8.5 : Stabilisation à la chaux :.....	20
I.8.6: Stabilisation mixte chaux-ciment :.....	21
Conclusion.....	22

CHAPITRE II: METHODE DES PLANS D'EXPERIENCES

II.1 : Introduction :	24
II.2 : Choix de la méthode d'expérimentation :.....	24
II.3 : Les différents types de facteurs :	24
II.4 : Notion d'espace expérimental.....	25
II.5 : Logiciel utilisé :	27
II.5.1 : Présentation de logiciel « Minitab ».....	27
Conclusion	27

CHAPITRE III: MATERIAUX DE L'ETUDE ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

III.1 : Introduction :.....	29
III.2 : Matériaux utilisés :.....	29
III.2.1 : Sol :.....	29
III.2.1.1 : Analyse granulométrique tamisage (NF P 94-056) :.....	29
III.2.1.2 : Les limites d'Atterberg (NF P 94-051):.....	32
III.2.2 : Sable	33
III.2.2.1 : Analyse granulométrique par tamisage (NF 18-304) :.....	33
III.2.2.2 : Le module de finesse :.....	34
III.2.2.3 : Equivalent de sable (NF P 18-598) :	35
III.2.2.4 : La masse volumique :.....	36
a- Masse volumique absolue : NF P 18-555.....	36
b- Masse volumique apparente : NF P 18-554.....	37
c- Porosité :	37
d- Compacité :.....	38

e- L'indice des vides :	38
III.2.3 Ciment :	38
II.2.4 La chaux :	39
III.2.5 l'adjuvant :	39
III.2.6 l'eau de gâchage :	40
Conclusion :	40

CHAPITRE IV: LES ESSAIS SUR LES BLOCS DE TERRE COMPRIMEE "BTC"

IV.1 : Introduction :	42
IV.2 : Confection des blocs :	42
IV.2.1 : Mélanges :	42
IV.2.2 : Préparation des mélanges :	42
IV.2.2.1 : Etapes de préparation :	42
IV.2.2.2 : Préparation du mélange :	43
IV.3 : La cure des éprouvettes :	46
IV.4: Essai de compression (la norme P 18-406) :	46
IV.5 : Essai d'auscultation dynamique (ultrason) P 18-414 et P 18-418:	47

CHAPITRE V: RESULTATS ET INTERPRETATIONS

V-1 Introduction :	50
V-2 résultats des essais de la 1 ^{ère} expérience :	50
V-2-1 résistances mécaniques et ultrasoniques des BTC :	50
V-2-2 : les diagrammes et les graphes donnez par logiciel Minitab :	51
V.2.2.1 : diagramme de Perto des effets pour C10 (Rc) :	51
V.2.2.2 : graphique en cube :	52
V.2.2.3 : Les effets principaux pour C10 :	53
V.2.2.4 : Interactions des facteurs :	53
V-2-3 : Conclusion :	54
V-3 résultats des essais de la 2 ^{ème} expérience :	55
V-3-1 résistances mécaniques et ultrasoniques des BTC :	55
V-3-2 : les diagrammes et les graphes donnez par logiciel Minitab :	56
V.3.2.1 : diagramme de Perto des effets pour C11 :	56
V.3.2.2 : graphique en cube :	57

V.3.2.3 : Les effets principaux pour C11:	57
V.3.2.4 : Interactions des facteurs :	58
V-3-3 : Conclusion :	58
Liste des références	61

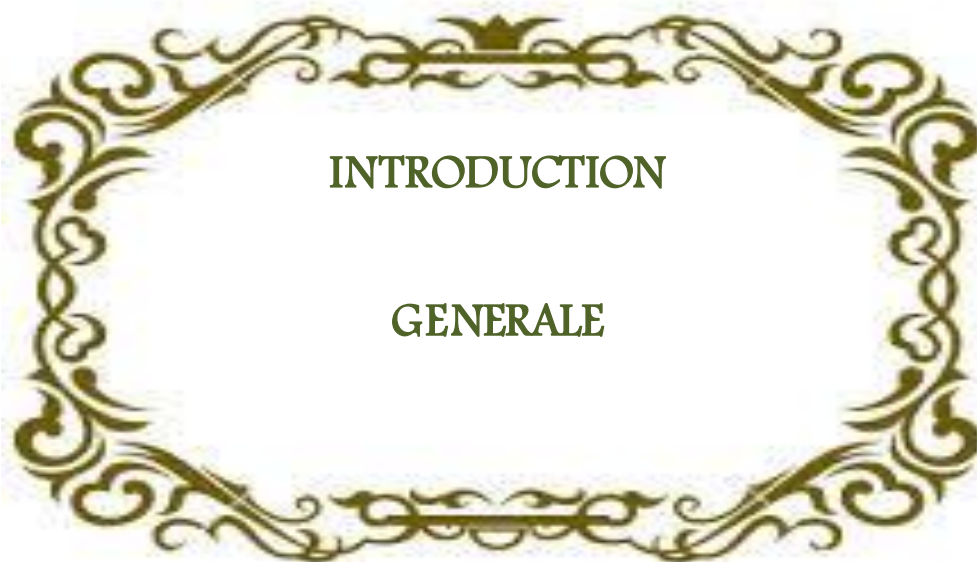
Liste des figures

Figure I. 1 : (a) Arche De Ctésiphon ; (b) Pyramide d'El-Lahoun ; (c) Ziggourat d'Etemenanki; (d) Cité Chan-Chan.....	5
Figure I. 2 : Exemple de Fabrication d'Adobe (Kaddour B A & Benchenna, 2017)	6
Figure I. 3 (a), (b) maison traditionnelle en adobe, (c) Mosquée Cité de Ghadamès en Libye	6
Figure I. 4 Les Etapes de construire un mur en pisé.	7
Figure I. 5: techniques de construction en torchis alsace France.	8
Figure I. 6: exemple de mur en terre coulée.....	8
Figure I. 7: construction en terre empilée: (a) maison à sadah Yémen, (b) Bourrine de Vendée; (c) mosquée deBobo Dioulasso.....	9
Figure I. 8: "Roue" des techniques de construction en terre (Houben H, 2006).	9
Figure II. 1 : le niveau bas, le niveau haut, et le domaine d'un facteur.....	25
Figure II. 2: l'espace expérimental d'un facteur.	26
Figure II. 3: les points expérimentaux dans un espace expérimental.	26
Figure II. 4: les points expérimentaux dans un domaine d'etude.	27
Figure III. 1: Argile n°1 Arg _{virt}	29
Figure III. 2: Argile n°2 Arg _{grs}	29
Figure III. 3: Appareillage de l'analyse granulométrique par tamisage.	30
Figure III. 4: Courbe granulométrique d'argile Arg _{virt}	31
Figure III. 5: Courbe granulométrique d'argile Arg _{grs}	32
Figure III. 6: Appareillage de limites d'Atterberg.	32
Figure III. 7: Diagramme de casagrande.	33
Figure III. 8: Courbe granulométrique du sable Boussaada.	34
Figure III. 9: Appareil de l'essai d'équivalent de sable.	36
Figure IV. 1: le malaxeur utilisé.	43
Figure IV. 2: les matériaux et les éprouvettes.	43
Figure IV. 3: la presse manuelle au laboratoire de développement Géomatériaux M'sila.....	43
Figure IV. 4: l'étuve utilisée pour la cure au laboratoire de développement Géomatériaux M' sila.....	46

Figure IV. 5: la presse hydraulique pour la compression.....	46
Figure IV. 6: appareil d'auscultations dynamique.....	47
Figure IV. 7: mesure en transparence (directe).	47
Figure IV. 8: mesure en surface (indirecte).	48
Figure IV. 9: mesure semi directe.	48
Figure V. 1: Diagramme des résultats de l'essai d'auscultations dynamique (ultrason) pour la 1 ^{ère} expérience.....	51
Figure V. 2: Diagramme des effets pour C10.	51
Figure V. 3: Graphique en cube (moyennes ajustées)de C10.	52
Figure V. 4: Graphique des effets principaux pour C10.	53
Figure V. 5: Diagramme des interactions entre les constituants pour C10.	53
Figure V. 6: Diagramme des résultats de l'essai d'auscultation dynamique (ultrason) de la 2 ^{ème} expérience.....	56
Figure V. 7: Diagramme de Pareto des effets pour C11.	56
Figure V. 8: Graphique en cube (moyennes ajustées) de C11.	57
Figure V. 9: Graphique des effets principaux pour C11.	57
Figure V. 10: Diagramme des interactions pour C11.....	58

Liste des tableaux

Tableau I. 1: liste des différents types des ciments courants normalisés par la norme NF P 15-301.	13
Tableau I. 2: les classes du ciment selon la norme NF EN 196-1.	14
Tableau I. 3: la classification des fractions de grains selon les normes (A.S.T.M, AFNOR). (Houben, 2006):.....	16
Tableau III. 1: analyse granulométrique pour le type d'argile Arg _{vit}	30
Tableau III. 2: analyse granulométrique pour le type d'argile Arg _{grs}	31
Tableau III. 3: les résultats obtenus par l'essai de la limite d'Atterberg pour les 2 types des argiles.	33
Tableau III. 4: analyse granulométrique du sable de dune (Boussaâda).	34
Tableau III. 5: module de finesse du sable.	35
Tableau III. 6: la nature du sable en fonction des mesures par l'équivalent de sable selon la norme (NF P 18-598).....	35
Tableau III. 7: équivalent du sable de dune.....	36
Tableau III. 8: la masse volumique absolue de sable de dune (Boussaâda).	37
Tableau III. 9: la masse volumique apparente à l'état lâche.	37
Tableau III. 10: la masse volumique apparente à l'état compact.	37
Tableau III. 11: la porosité, la compacité et l'indice de vide pour le sable.	38
Tableau III. 12: fiche technique des propriétés physique et chimiques de la chaux de Saida.	39
Tableau IV. 1: facteur et domaine d'étude pour la 1 ^{ère} expérience.	44
Tableau IV. 2: matrice d'expérience pour la 1 ^{ère} expérience.	44
Tableau IV. 3: facteurs et domaine d'étude de la 2 ^{ème} expérience.	45
Tableau IV. 4: matrice d'expérience pour la 2 ^{ème} expérience.	45
Tableau V. 1: les résultats des résistances mécaniques et ultrasoniques des BTC de la 1 ^{ère} expérience.	50
Tableau V. 2: les résultats des résistances mécaniques et ultrasoniques des BTC de la 2 ^{ème} expérience.	55



Introduction générale :

Pour s'abriter des intempéries, l'homme s'est dans un premier temps réfugié dans les sites ou des abris naturels, tels que les grottes. Mais au fur et à mesure de l'accroissement des effectifs, il s'est vu obligé de concevoir lui-même son habitation. (Talla, 2010)

La terre, la pierre et le bois ont été les premiers matériaux de construction utilisés par l'homme. Avec l'évolution des techniques, de nouveaux matériaux ont été développés comme le béton... etc. reléguant ainsi les matériaux originaux au rang de "primitifs". L'on est peu à peu arrivé à oublier les avantages de la terre comme matériau de construction. Devant les problèmes écologiques et sociaux, on y revient progressivement. D'autre part, il est estimé à 30% la part de construction en terre dans le monde, essentiellement concentrée dans les pays dits "pauvres". (Mahamat S, 2010)

En Algérie, la construction en terre est très répandue dans toute sa longue histoire, particulièrement dans les zones rurales et les régions arides. Aujourd'hui, on assiste à un regain d'intérêt pour ce matériau, qui s'explique d'abord par la volonté de réaliser une partie du programme consacrée au logement rural (environ 40%), ensuite par le souci d'adapter la législation au nouveau contexte international en matière du développement durable. (Boucif & Ayad, 2017)

La brique est l'élément le plus utilisé dans la construction, mais sa fragilité reste un handicap de son comportement mécanique. Aussi sa résistance thermique faible donne un mauvais confort thermique aux usagers des bâtiments. (Krami A & reggadi S, 2011). L'utilisation du ciment ou de la chaux dans la stabilisation de la terre en général est un domaine assez connu grâce aux importants travaux de laboratoire et réalisations sur le terrain. Ces travaux ont permis de connaître les mécanismes de réactions entre la terre et ces liants, leurs effets sur les propriétés de la terre. (Mahamat S, 2010)

Objectifs et organisation de l'étude :

L'objectif de ce travail consiste à apporter notre contribution à la valorisation de la brique de terre comprimée et stabilisée par du ciment dans le but d'économiser les ressources naturelles, de limiter les émissions de gaz (transports, fabrication, etc.) et veiller à la santé des occupants.

Outre l'introduction générale, cette thèse est structurée comme suit :

Le chapitre I est consacré à la synthèse bibliographique, en vue de donner un aperçu général sur les techniques de construction en terre, en particulier le bloc de terre comprimée (BTC), les différents matériaux utilisés, et les critères de choix des sols à stabiliser et les différents modes de stabilisation.

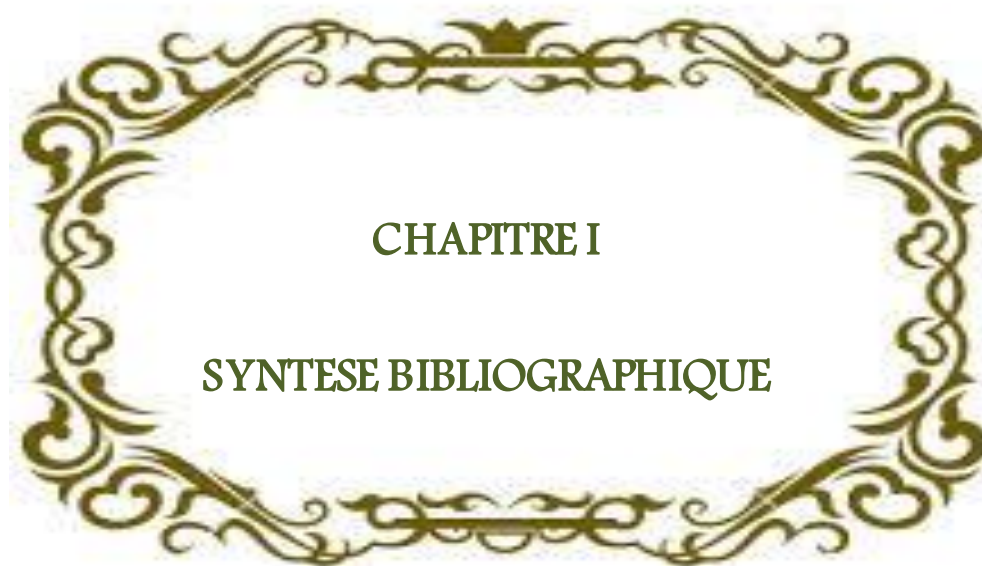
Dans le chapitre II nous avons présentée petite présentation sur le plan d'expérience et une définition de logiciel utilisé dans notre recherche « Minitab ».

Le chapitre III fait le point sur les caractéristiques physiques, chimique, mécaniques, et minéralogiques des matériaux utilisés (le sol, le sable fin, le ciment, la chaux et l'adjuvant).

Le chapitre IV présente les essais réalisés sur la brique de terre comprimée BTC, Ce chapitre présente aussi les mélanges et les procédures de confection les éprouvettes

Les résultats et les discussions de l'étude expérimentale sont donnés dans le chapitre V.

Enfin, la conclusion générale est une synthèse des résultats obtenus aux chapitres précédents ainsi que des recommandations.



I-1 : Introduction :

Construire en terre, c'est construire avec un matériau que l'on foule aux pieds tous les jours. Mais la terre ne peut être employée en construction que si elle offre une bonne cohésion propre, principalement due à la présence d'argile qui joue le rôle de liant naturel ; (Houben H, 2006)

I-2 : Histoire :

La Terre, utilisée depuis plus de onze millénaires, est sans aucun doute un des matériaux de construction les plus anciens de l'histoire de l'humanité. En effet, les fouilles archéologiques ont montré que les civilisations perses, assyriennes, égyptiennes et babyloniennes édifiaient déjà de nombreux bâtiments à l'aide de ce matériau.

Certains étaient même monumentaux tout comme l'arche de Ctésiphon en Irak (Fig. I.1a), certaines pyramides en Égypte (pyramide d'El-Lahoun (Fig. I.1b) par exemple), la ziggourat d'Etemenanki à Babylone (Fig. I.1c), la cité précolombienne de Chan-Chan au Pérou (Fig. I.1d).



Figure I. 1 : (a) Arche De Ctésiphon ; (b) Pyramide d'El-Lahoun ; (c) Ziggourat d'Etemenanki; (d) Cité Chan-Chan.

I-3 : La terre :

La terre est définie comme la couche d'épaisseur variable de matière meuble disponible sur la surface terrestre. Cette fine couche est issue de la dégradation des roches mères par des procédés d'altération sur des périodes géologiques. A l'épreuve des années d'érosion causée par le vent, la pluie, le soleil ou encore le gel, les particules de roches solides se fragmentent progressivement pour former des grains de plus en plus petits, les sédiments. Les matières organiques présentes dans le sol contribuent également à sa dégradation.(Miraucourt, 2017)

I-4 : Techniques de construction en terre :

A travers le patrimoine mondial des traditions de la construction en terre crue, on dénombre de très nombreuses techniques de construction avec une infinité de variantes adaptées à la qualité de la terre et au degré d'élaboration du savoir-faire, traduisant l'identité des lieux et des cultures. Il existe douze techniques d'utilisation de terre pour la construction présentées sur le diagramme établi par le groupe CRATerre en 1986 (Houben H, 2006) Parmi celle-ci huit sont d'un usage courant et constituent les techniques principales:

- **Adobe** : L'adobe est un matériau de construction fait d'un mélange de sol, d'eau et de chaume. Le sol utilisé doit contenir une proportion déterminée d'argile et de sable. Chaque élément du mélange joue son rôle. Le sable réduit la probabilité de microfissures dans le bloc de terre, l'argile agglutine les particules et le chaume de blé, quant à lui, donne un certain grade de flexibilité à l'ensemble.(Krami A & reggadi S, 2011)



Figure I. 2 : Exemple de Fabrication d'Adobe (Kaddour B A & Benchemma, 2017)



Figure I. 3 (a), (b) maison traditionnelle en adobe, (c) Mosquée Cité de Ghadamès en Libye

- **Pisé** : De nature très sableuse et graviers et cailloux, à peine argileuse (10 à 20%) ,la terre est plus souvent conservée à son d'humidité naturelle (teneur en eau modifiée si elle est trop sèche ou trop humide) puis déversée dans un coffrage et compactée (à l'aide d'un pilon manuel) jusqu'à constituer un béton maigre de terre qui durcit en séchant. Les coffrages traditionnels sont en bois. (Djoughri M, 2009) Elle « consiste à construire des murs massifs en compactant de la terre humide et pulvérulente dans des coffrages » (Anger & Fontaine, 2009).



Figure I. 4 Les Etapes de construire un mur en pisé.

- **Terre-paille** : la terre est dispersée dans de l'eau jusqu'à l'obtention d'un liquide épais homogène que l'on mélange à la paille afin de former un film sur chaque brin. Le matériau ainsi obtenu conserve l'aspect de la paille et est banché pour ériger un mur monolithique qui nécessite une structure porteuse.
- **Torchis** : La technique du torchis est «mise en œuvre à l'état plastique, la terre recouvre une structure en lattis de bois fixée entre des poteaux, appelés colombes. La structure en bois est en général extrêmement légère et rapide à monter, tandis que la terre constitue un excellent matériau de garnissage, facile à poser » (Anger & Fontaine, 2009).



Figure I. 5: techniques de construction en torchis alsace France.

- **Terre façonnée** : la terre, souvent amendée de paille ou autres fibres, est façonnée sous forme de murs de la même façon que pour la technique de poterie, sans outil. Elle met en œuvre la terre à l'état de boue liquide dont la granularité est de préférence sableuse ou graveleuse. Les avantages de cette technique sont multiples : préparation aisée du matériau, facilité de mise en œuvre et large registre d'applications, mais elle comporte également un gros désavantage : le retrait au séchage est important. La stabilisation peut néanmoins résoudre ce problème.



Figure I. 6: exemple de mur en terre coulée.

- **Terre extrudée** : la terre est extrudée par une puissante machine proche ou dérivée du matériel utilisé pour la fabrication de produits destinés à être cuits.
- **Bauge** : la terre, généralement amendée de paille ou autres fibres, est mise sous forme de boules grossières, qui sont empilées les unes sur les autres et entassées légèrement à l'aide des mains ou des pieds jusqu'à ériger des murs monolithiques façonnés. Dans d'autres cas, la bauge est incorporée dans une structure en bois. (Houben H, 2006)



Figure I. 7: construction en terre empilée: (a) maison à sadah Yémen, (b) Bourrine de Vendée; (c) mosquée deBobo Dioulasso.

Bloc de terre comprimée: Cette technique est une évolution moderne du bloc de terre moulée, plus communément dénommé bloc d'adobe. (CRATerre, 1991) .

H. Guillaud et H. Houben (1995) ont schématiquement répertorié les douze techniques principales dans une « roue » des techniques de construction en terre, mais ils précisent tout de même qu'il en existe environ une centaine dans la réalité.

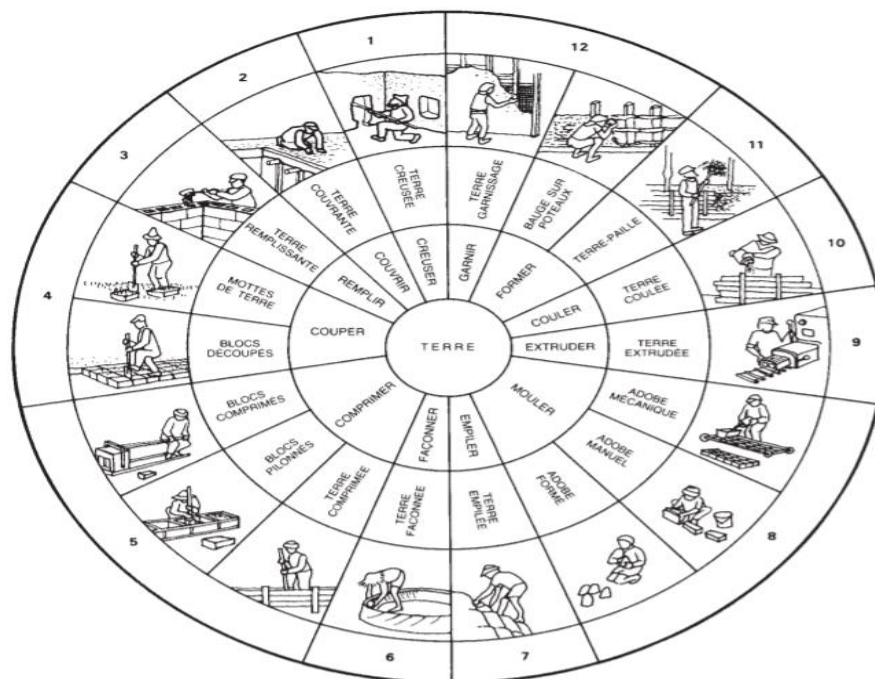


Figure I. 8: "Roue" des techniques de construction en terre (Houben H,

I.5 : Avantages de La Terre Crue :

Aujourd'hui, la terre crue réapparaît de plus en plus dans les constructions non seulement à cause de ses qualités constructives indéniables, mais également car ses propriétés permettent de répondre aux enjeux environnementaux actuels. La terre

contribue ainsi pleinement à une réelle démarche de développement durable. (Kaddour B A & Benchenna, 2017)

I.5.1 : Avantages Constructifs :

Elle présente une masse volumique élevée, ce qui lui confère de précieuses qualités d'inertie thermique pour le stockage de la chaleur et la régulation des changements de températures entre jour et nuit.

- C'est un bon régulateur de l'humidité ambiante grâce à sa perméabilité à la vapeur d'eau.
- Elle possède de bonnes qualités phoniques (absorption).
- Elle résiste bien au feu.

I.5.2 : Avantages Environnementaux :

- Comme elle n'est pas cuite, la terre crue nécessite peu d'énergie pour sa fabrication par rapport aux briques cuites ou au ciment et génère très peu d'émissions de CO₂.
- Ce matériau est abondant et renouvelable.
- Il est souvent possible d'utiliser une terre disponible localement, voire prélevé sur le site même de la construction.
- La construction en terre peut ne produire aucun déchet et son recyclage se fait sous la forme d'une réutilisation ou une simple restitution aux milieux naturels locaux, si l'argile n'a pas été stabilisée.
- C'est un matériau qui n'a pas d'impact négatif sur la santé des occupants.

I.5.3 : Avantages Economiques :

- Elle permet la réduction de la fuite des devises par une substitution aux matériaux importés (ciment, acier, bois).
- Sa production manuelle est caractérisée par une Haute Intensité de Main d'œuvre (HIMO), ce qui favorise l'économie locale, la création d'emplois et participe concrètement à la lutte contre la pauvreté.

I.5.4 : Avantages Sociétaux :

- Elle valorise le patrimoine et le savoir-faire ancestral
- Elle permet de répondre à la demande d'habitat dans les pays du Sud et de lutter contre la précarité des populations.

I.6 : Blocs de terre comprimée (BTC) :

I.6.1 : Définition :

Cette technique est une évolution moderne du bloc de terre moulée, plus communément dénommé bloc d'adobe. Au lieu qu'ils soient moulés à la main dans un cache en bois, les blocs sont obtenus par compression de la terre, légèrement humide dans une presse métallique. Comparé au bloc moulé à la main, le BTC est très régulier en formes et en dimensions, plus dense et présente une meilleure résistance à la compression et à l'eau (CRATerre, 1991)

I.6.2 : Constituants :

Généralement, les additifs utilisés servent à la stabilisation de la terre, c'est-à-dire qu'ils « neutralisent la sensibilité à l'eau de la fraction des fines et maintiennent ainsi la cohésion à un niveau acceptable même à l'état humide ». Les stabilisants les plus couramment utilisés sont le ciment et la chaux.

I.6.2.1 : L'argile :

a) Minéralogie des argiles:

Les minéraux argileux sont de très petites particules très actives sur le plan électrochimique. Lorsque le pourcentage d'argile augmente, l'influence de la portion argileuse sur le comportement global du sol augmente proportionnellement. (Mohamed, 2007)

b) Structure des argiles:

Les particules d'argile sont formées d'un empilement de feuillets qui sont constitués par l'association de deux unités structurales de base, ces feuillets sont formés par la juxtaposition des couches structurales tétraédriques (silice) et octaédriques (aluminium).(Mohamed, 2007)

I.6.2.2 : Ciment:

a) Définition :

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire capable de faire prise dans l'eau. Il se présente sous l'aspect d'une poudre très fine qui mélangée avec de l'eau. Forme une pâte faisant prise et durcissant progressivement dans le temps. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium. (Festa Jean et Dreux Georges, 2007)

Tableau I. 1: liste des différents types des ciments courants normalisés par la norme NF P 15-301.

Désignation	Types de ciment	Clinker %	Ajouts et Teneurs en %	Matière secondaire
CEM I	Ciment portland	95 à 100 %	----- ---	
CEM II /A	Ciment portland composé	80 à 94 %	L'un des Ajouts - 6 à 20 %	
CEM II /B		65 à 79 %	- 21 à 35 %	
CEM III/A	Ciment de haut fourneau	35 à 64 %	- 35 à 65 %	
CEM III/B		20 à 34 %	Laitier - 66 à 80 %	0 à 5%
CEM III/C		5 à 19 %	- 81 à 95 %	
CEM IV/A	Ciment pouzzolanique	65 à 90 %	Pouzzolane, - 10 à 35 % cendre	
CEM IV/B		45 à 64 %	ou fumée silice - 36 à 55 %	
CEM V/ A	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64 %	laitier - 18 à 30 % et cendre	
CEM V/ B		20 à 39 %	- 31 à 50 %	

e) Les classes du ciment :

En plus des valeurs caractéristiques des classes de résistance, la norme prévoit le respect de valeurs limites de résistance à la compression applicables à chaque résultat d'essai. Ces résistances sont mesurées sur « mortier normal » selon la norme NF EN 196-1.

Tableau I. 2: les classes du ciment selon la norme NF EN 196-1.

Valeurs limites de résistance à la compression		
Classe de résistance	Résistances minimales absolues en MPa	
	2 jours	28 jours
32,5 N	–	≥ 32.5
32,5 R	≥ 13.5	≥ 32.5
42,5 N	≥ 12.5	≥ 42.5
42,5 R	≥ 20	≥ 42.5
52,5 N	≥ 20	≥ 52.5
52,5 R	≥ 30	≥ 52.5

I.6.2.3 : La chaux :**a) Définition :**

Le calcaire est une pierre d'origine naturelle comportant des niveaux élevés de carbonates de calcium et/ou de magnésium. Le terme « chaux » désigne les produits dérivés du calcaire, notamment la chaux vive, la chaux éteinte et la chaux hydraulique.

Les trois grandes familles de chaux (chaux aérienne, chaux naturelles et chaux hydrauliques) se différencient par la composition de leur matière première, le calcaire, et leur manière de faire prise.

- Les chaux aériennes : fabriquées à base de calcaire pur, ces chaux font prise et durcissent au contact du gaz carbonique contenu dans l'air. Cette prise très longue limite le retrait et développe une faible résistance à long terme.
- La chaux vive (CaO) : C'est le premier produit de la cuisson de la pierre à chaux (calcaire). C'est un matériau très avide d'eau. La chaux vive en contact de l'eau produit des explosions et sa température peut dépasser 150° (réaction très exothermique).
- La chaux éteinte (Ca(OH)₂) : Elle est obtenue par hydratation de la chaux vive. Cette opération qui permet le passage de la chaux vive à la chaux éteinte s'appelle Extinction. Elle s'accompagne d'une augmentation de volume du produit (foisonnement).

- Les chaux hydrauliques : Sont des chaux recomposées avec différents liants. Elles suivent le même processus de prise, dans des proportions différentes liées au pourcentage des matériaux qui les composent. (Mahamat S, 2010)

b) Caractéristiques de la chaux :

La chaux est un liant naturel et écologique. Elle offre des avantages tel que :

- Un pouvoir assainissant et désinfectant
- Une esthétique que l'on peut obtenir avec un autre liant ;
- Une participation à la respiration de l'ouvrage ;
- Une élasticité ;
- Une tenue dans le temps encore inégalité ;
- Une absorption des CO₂ lors de la carbonisation.(Mahamat S, 2010)

I.6.2.4 : Sable :

a) Définition :

Le sable est une matière minérale siliceuse ou calcaire qui se présente dans le sol sous la forme de grains ou de poudre, suivant qu'il s'agit de sable grossier ou de sable fin. Les sables proviennent de la désagrégation des roches qui constituent l'écorce terrestre ; suivant leur composition, ils sont blancs, jaunes, gris ou rougeâtres. On peut encore classer les sables d'après leur origine et distinguer les sables de carrière, les sables de mer et les sables de rivière.

I.7 : Les propriétés fondamentales pour la stabilisation de la terre :

D'une terre à l'autre, les propriétés sont changeantes et dépendent de la nature et du mélange complexe des tractions granulaires qui les composent.

On distingue d'une part des propriétés chimiques liées à la présence de sels, d'oxydes, de carbonates ou de sulfates et, d'autre part, des propriétés physiques nombreuses telles que la couleur, la stabilité structurale, l'adhérence, la masse volumique apparente, la teneur en eau, la porosité ou indice des vides, le pouvoir adsorbant, le potentiel et la diffusion capillaire, la perméabilité, le retrait linéaire, la résistance sèche et d'autres encore. La connaissance de ces propriétés chimiques et physiques permet de préciser la qualité et le comportement d'une terre pour la construction (Rigassi, 1995).

On observera cependant que la connaissance exhaustive des propriétés chimiques et physiques d'une terre n'est pas toujours nécessaire. Il convient en effet de bien connaître quatre propriétés fondamentales de la terre, qui sont (Houben, 2006):

I.7.1 : Texture ou Granularité:

Elle se mesure par analyse granulométrique pour les fractions de grains grossiers (graviers, sables, silts) et par analyse sédimentométrique pour les fractions fines argileuses. Les éléments tels que les graviers et les sables sont les éléments résistants du matériau; les argiles assurent la cohésion de l'ensemble et contrôlent la plasticité et la manière dont la terre réagit à l'humidité, par conséquent elles contrôlent le retrait et le gonflement (Walker, 1995).

Tableau I. 3: la classification des fractions de grains selon les normes (A.S.T.M, AFNOR). (Houben, 2006):

Type des grains	Diamètre max	Diamètre min
Cailloux	200 mm	20 mm
Graviers	20 mm	2 mm
Sables grossiers	2 mm	0.2 mm
Sables fins	0.2 mm	0.06 mm
Silts	0.06 mm	0.02 mm
Silts fins	0.02 mm	0.002 mm
Argiles	0.002 mm	0 mm

I.7.2 : La plasticité:

La plasticité définit la propriété de la terre à subir des déformations sans réaction élastique notable caractérisée par une fissuration ou une pulvérisation. La plasticité d'une terre ainsi que les limites entre différents états de consistance sont déterminées par les mesures des limites d'Atterberg (limite de liquidité L_L , limite de plasticité L_P , l'indice de plasticité I_P).

Les limites d'Atterberg sont des propriétés importantes de sols fins, et sont utilisées dans l'identification et la classification des sols. En outre, elles sont utilisées dans les spécifications pour contrôler les propriétés de compressibilité et le comportement des mélanges de sols (Burrough, 2001).

Les sols sableux et les limons ont des valeurs typiquement faibles de l'indice de plasticité, tandis que la plupart des argiles ont des valeurs plus élevées. Les sols

qui ont des valeurs élevées d' I_p sont très plastiques et sont généralement très compressibles et très cohérents. Un sol plastique est considéré comme cohérent (USACE, 2000).

I.7.3: La compressibilité:

La compressibilité d'une terre définit son aptitude à se laisser comprimer au maximum pour une énergie de compactage et un taux d'humidité donnés (teneur en eau optimale ou TEO). Lorsqu'un volume de terre est soumis à l'action d'une force, le matériau est comprimé et l'indice des vides décroît. Plus la densité d'une terre peut être augmentée, plus sa porosité sera bloquée et moins l'eau pourra y pénétrer.

La teneur en eau doit être suffisante pour permettre une lubrification des grains et leur permettre de se réarranger afin d'occuper le moins de place possible. Cette teneur en eau ne doit pas non plus être trop importante car les vides seraient remplis d'eau et de ce fait, incompressibles.

I.7.4 : La cohésion :

La cohésion d'une terre exprime la capacité de ses particules à se maintenir ensemble lorsque l'on exerce sur le matériau une contrainte de traction. La cohésion d'une terre dépend des caractéristiques de collage ou de cimentation de son mortier grossier qui lie les grains inertes entre eux. Cette propriété est donc tributaire de la quantité et de la qualité collante des argiles. (Houben, 2006). La cohésion se mesure par l'essai de traction à l'état humide.

I.8 : Stabilisation:

I.8.1 Définition:

Le Centre des Nations Unies pour les établissements humains a défini la stabilisation d'un sol comme étant, la modification des propriétés d'un système terre-eau-air pour obtenir des propriétés permanentes compatible avec une application particulière (United Nations, 1992).

Mais la stabilisation est un problème complexe car de très nombreux paramètres interviennent. Il faut en effet connaître : les propriétés de la terre, les améliorations envisagées, l'économie du projet, les techniques de mise en œuvre de la terre choisie pour le projet et la maintenance du projet réalisé (Houben, 2006).

I.8.2 Objectifs:

Les principaux objectifs de stabilisation des sols sont (Winterkorn, 1975; Nations Unies, 1992; Symons, 1999):

- l'obtention de meilleures caractéristiques mécaniques de la terre (augmenter les résistances à la compression, à la traction et au cisaillement),
- la réduction de la porosité et les variations de volume (réduire le retrait et le gonflement à l'eau),
- l'amélioration de la résistance à l'érosion du vent et de la pluie (réduire l'abrasion de surface et la perméabilité à l'eau).

I.8.3 Procédés :

On dénombre trois procédés de stabilisation (Winterkorn, 1975; Nations Unies, 1992, Webb, 1994) :

I.8.3.1 Stabilisation mécanique :

La stabilisation mécanique est le terme général utilisé pour la stabilisation du sol par compactage. Ce procédé modifie les propriétés de la terre (la densité, la compressibilité, la perméabilité et la porosité), en intervenant sur la structure.

I.8.3.2 Stabilisation physique :

Les propriétés d'une terre peuvent être modifiées en intervenant sur la texture : mélange contrôlé de fractions de grains différentes (argile et sable).

I.8.3.3 Stabilisation chimique :

La stabilisation de la terre est assurée par l'ajout d'autres matériaux ou de produits chimiques qui modifient ses propriétés, soit du fait d'une réaction physicochimique entre les particules de la terre et le produit ajouté soit en créant une matrice qui lie ou enrobe les particules. On peut citer, en particulier du ciment, de la chaux, du bitume, et de sous-produits industriels. Le choix et la quantité de matériau ou de produit chimique à ajouter dépendent de la nature du sol et du degré d'amélioration de la qualité du sol souhaité (Akpodje, 1985).

I.8.4 : Stabilisation au ciment :

I.8.4.1 : Généralités :

Le ciment est sans doute l'un des meilleurs stabilisants pour le bloc de terre comprimée. L'ajout de ciment, avant la compression, permet d'améliorer les caractéristiques du matériau, en particulier sa résistance à l'eau, par l'irréversibilité des liens qu'il crée entre les particules les plus grosses. Le ciment va agir principalement sur les sables et les graviers comme dans le béton ou dans un mortier sable-ciment. De ce fait, il est inutile, voire néfaste, d'utiliser des terres trop argileuses (> 30 %) (Houben, 1996).

Dans la terre, le ciment hydraté réagit de deux façons (H .Hauben et H.Guillaud, 1995) la réaction avec lui-même : formation d'un mortier de ciment pur hydraté et la réaction avec le squelette sableux.

Réaction avec l'argile selon trois phases :

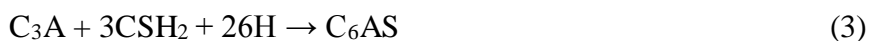
- L'hydratation provoque la formation de gels de ciment à la surface des agglomérats d'argile.
- Progression de l'hydratation qui active la désagrégation des agglomérats d'argile ; ceux-ci sont pénétrés en profondeur par les gels de ciment.
- Interpénétration intime des gels de ciment et des agglomérats argileux. L'hydratation persiste mais plus lente.

I.8.4.2 Mécanisme de stabilisation :

Une fois le mélange avec le sol est réalisé, le ciment va se dissoudre et s'hydrater si la quantité d'eau est suffisante pour former des constituants hydratés. La principale réaction provient de l'hydratation des deux silicates de calcium (C₃S et C₂S) qui forment deux nouveaux composés: la portlandite (CH) et le silicate de calcium hydraté (C-S-H:3CaO.2SiO₂.3H₂O) :



L'hydratation des aluminates tricalciques (C₃A) dépend de la teneur en gypse du ciment. En présence de gypse, l'ettringite est formée ce qui contribue à l'augmentation de la résistance :



La phase ferrite (C₄AF) réagit rapidement en présence de gypse pour former de l'ettringite selon la réaction suivante :



La minéralogie et la granulométrie des sols traités influent peu sur les effets du ciment puisque la poudre de ciment contient en elle-même tout ce dont elle a besoin pour réagir et former des produits cimentaires ; le ciment va créer des liens physiques entre les particules augmentant ainsi la résistance des sols (Tran, 2009).

Dans le cas des sols cohérents, beaucoup de particules sont plus fines que les grains de ciment, donc elles ne peuvent pas être revêtues par du ciment (Bell, 1975). Cependant, suite au compactage appliqué sur les hydrates de ciment, ces derniers forment un squelette rigide qui sera de plus en plus résistant à mesure que l'hydratation avance, menant à l'augmentation de la résistance.

De plus, une réaction en trois étapes avec de l'argile se produit (United Nations, 1992):

1. L'hydratation provoque la formation de gels de ciment à la surface des agglomérats d'argile. La chaux libérée pendant l'hydratation du ciment réagit aussitôt avec l'argile. La chaux est vite consommée et l'argile entame une dégradation.
2. Progression de l'hydratation, la désagrégation des agglomérats d'argile ; ceux-ci sont pénétrés en profondeur par les gels de ciment.
3. Interpénétration intime des gels de ciment et des agglomérats argileux. L'hydratation persiste, mais plus lente.

Dans certains cas, les particules d'argile pourront ralentir la prise du ciment en formant autour des grains une enveloppe protectrice. La composition chimique et minéralogique des argiles ainsi que leur quantité jouent donc un rôle fondamental dans les phénomènes d'interaction qui auront lieu et qui se poursuivront dans le temps entre elles et le ciment (Vénuat, 1980).

I.8.5 : Stabilisation à la chaux :

L'utilisation de la chaux dans la stabilisation des sols est connue depuis l'antiquité. Elle a été utilisée comme stabilisant de la chaussée par les Romains et d'autres civilisations anciennes (Jarrige, 1989).

Les théories de la stabilisation à la chaux suggèrent cinq mécanismes de bases (H. Hauben et H. Guillaud, 1995) :

- Absorption d'eau : plus remarquable en cas d'utilisation de la chaux vive. La chaux subit une réaction d'hydratation qui abaisse la teneur en eau du mélange. Pour 1% de chaux vive ajouté, on peut constater, après 2 heures, une diminution de la teneur en eau de 1 à 1,5%.
- Echange cationique : L'addition de la chaux à une terre humidifiée correspond à un apport important d'ions de calcium. Par un phénomène d'échange cationique, ces ions de calcium se

substituent aux cations échangeables (magnésium, sodium, hydrogène...) de la terre. La capacité d'échange cationique de la terre est déterminante dans ce phénomène.

- Flocculation et agglomération : l'échange cationique et l'augmentation de la quantité d'électrolytes dans l'eau interstitielle conduisent à la flocculation et agglomération des particules fines de la terre. Ainsi, il y a augmentation de la taille des agrégats de la fraction fine de la terre. La structure et la texture de la terre changent.

- Carbonatation : la chaux ajoutée à la terre réagit avec le dioxyde atmosphérique pour former du carbonate de calcium. Cette réaction consomme une partie de la chaux disponible pour les réactions pouzzolaniques.

- Réaction pouzzolanique : C'est le mécanisme le plus important influençant la stabilisation à la chaux. Les propriétés de résistances du matériau sont dues essentiellement à une dissolution des minéraux argileux dans un environnement alcalin produit par la chaux et à la recombinaison de la silice et de l'alumine des argiles avec le calcium pour former des silicates d'aluminium et de calcium qui ciment les grains entre eux.

I.8.6: Stabilisation mixte chaux-ciment :

Ce type de traitement s'effectue sur les sols trop humides et plastiques. On utilise d'abord la chaux seule à des faibles teneurs puis le ciment. Les deux liants ne sont pas concurrents mais complémentaires. Un traitement préalable à la chaux permet l'assèchement du sol trop humide. Sa flocculation en présence de chaux le rend pulvérulent et friable donc plus apte à être mélangé ensuite au ciment. Le ciment dont la cinétique d'hydratation est plus grande que celle de la chaux permet l'obtention des résistances mécaniques dès les premiers jours de traitement. Il n'existe pas à notre connaissance d'étude sur les mécanismes qui régissent ce traitement. Apparemment, on peut penser que la portlandite Ca(OH)_2 libérée par le ciment en solution joue le même rôle stabilisant que celui de la chaux. Les hydrates formés par la chaux libre et par la portlandite du ciment vont se cumuler à ceux provenant du ciment dissous (Guettala, 2003).

Conclusion

A travers cette étude bibliographique, nous avons montré le caractère ancien de la construction en terre et son importance dans le domaine de construction. Aussi, on a traité les différentes techniques de la construction.

On a choisit l'ajout de ciment et la chaux comme une mode de stabilisation pour confectionner les briques de terre comprimée BTC.



CHAPITRE II :

« METHODE DES PLANS D'EXPERIENCES »

II.1 : Introduction :

Les plans d'expérience sont de plus en plus utilisés dans l'industrie et dans les laboratoires de recherche. Ils permettent en effet de modéliser au mieux un phénomène aléatoire, le plus souvent complexe, à l'aide d'un minimum d'essais. Ils s'inscrivent donc dans la démarche constante d'amélioration de la qualité ou de la productivité. (Tinsson, 2010).

II.2 : Choix de la méthode d'expérimentation :

La méthode d'expérimentation choisie doit faciliter l'interprétation des résultats. Elle doit également minimiser le nombre des essais sans toutefois sacrifier la qualité. La théorie des plans d'expériences assure les conditions pour les quelles on obtient la meilleure précision possible avec le minimum d'essais. On a donc le maximum d'efficacité avec le minimum d'expériences et par conséquent le cout minimum. (Cours Pr bencheikh).

II.3 : Les différents types de facteurs :

La construction des plans et l'interprétation des résultats dépendent en grande partie des types de facteurs rencontrés dans l'étude. On distingue plusieurs types de facteurs. Nous retiendrons les types de facteurs suivants : les facteurs continus, les facteurs discrets, les facteurs ordonnables, les facteurs booléens. (Cours Pr bencheikh).

a- facteurs continus :

La pression est un exemple de facteur continu. Dans un intervalle de pression donné, on peut choisir toutes les valeurs possibles. Il en est de même d'une longueur, d'une concentration ou d'une température. Les valeurs prises par les facteurs continus sont donc représentées par des nombres continus.

b- Facteurs discrets :

Au contraire, les facteurs discrets ne peuvent prendre que des valeurs particulières. Ces valeurs ne sont pas forcément numériques : on peut représenter un facteur discret par un nom, une lettre, une propriété ou même par un nombre qui n'a alors en soi aucune valeur numérique mais qu'une signification de repère. Par exemple, on peut s'intéresser aux couleurs d'un produit : bleu, rouge et jaune sont des facteurs discrets.

c- Facteurs ordonnables :

Il s'agit de facteurs discrets que l'on peut mettre dans un ordre logique. Par exemple, grand, moyen, petit, ou encore premier, deuxième, troisième et quatrième.

d- Facteurs booléens :

Les facteurs booléens sont des facteurs discrets qui ne peuvent prendre que deux valeurs : haut ou bas, ouvert ou fermé, blanc ou noir, etc.

II.4 : Notion d'espace expérimental

Un expérimentateur qui lance une étude s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la **réponse**, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs variables. Au lieu du terme «variable» on utilisera le mot **facteur**. La réponse dépend donc de un ou de plusieurs facteurs. Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (Figure II.1). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée **niveau**. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas. La borne supérieure est le niveau haut.

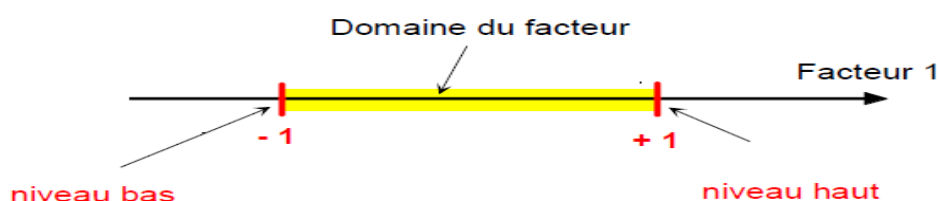


Figure II. 1 : le niveau bas, le niveau haut, et le domaine d'un facteur

Le niveau bas du facteur est noté par - 1 et le niveau haut par +1. Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.

L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le **domaine** du facteur. On a l'habitude de noter le niveau bas par -1 et le niveau haut par +1.

S'il y a un second facteur, il est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté. On définit, comme pour le premier facteur, son niveau haut, son niveau bas et son domaine de variation. Ce second axe est disposé orthogonalement au premier. On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions. Cet espace est appelé **l'espace expérimental** (Figure II.2).

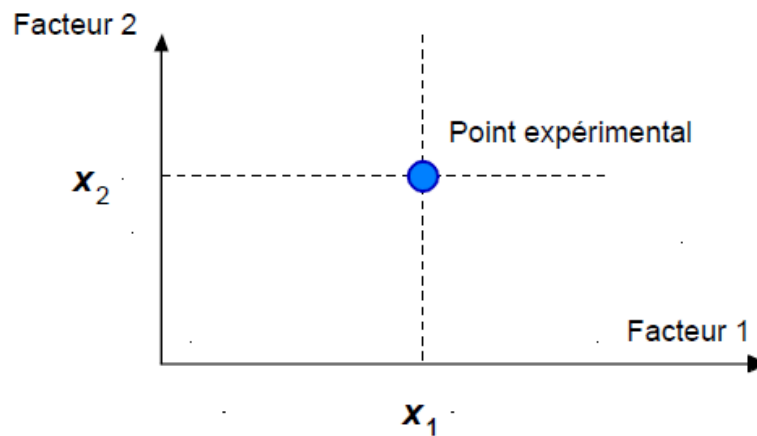


Figure II. 2: l'espace expérimental d'un facteur.

Chaque facteur est représenté par un axe gradué et orienté. Les axes des facteurs sont orthogonaux entre eux. L'espace ainsi défini est l'espace expérimental.

Le niveau x_1 du facteur 1 et le niveau x_2 du facteur 2 peuvent être considérés comme les coordonnées d'un point de l'espace expérimental (Figure II.3). Une expérience donnée est alors représentée par un point dans ce système d'axes. Un plan d'expériences est représenté par un ensemble de points expérimentaux.

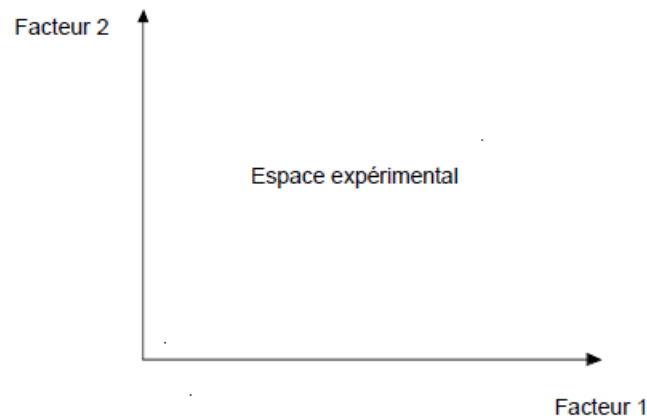


Figure II. 3: les points expérimentaux dans un espace expérimental.

Dans l'espace expérimental, les niveaux des facteurs définissent des points expérimentaux. Le regroupement des domaines des facteurs définit le «*domaine d'étude*». Ce domaine d'étude est la zone de l'espace expérimental choisie par l'expérimentateur pour faire ses essais. Une étude, c'est-à-dire plusieurs expériences bien définies, est représentée par des points répartis dans le domaine d'étude (Figure II.4).

Cette façon de représenter une expérimentation par des points dans un espace cartésien est une représentation géométrique de l'étude.

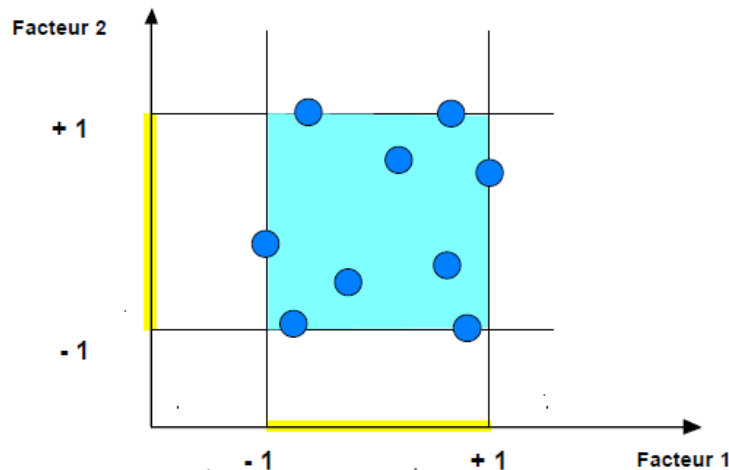


Figure II. 4: les points expérimentaux dans un domaine d'étude.

II.5 : Logiciel utilisé :

II.5.1 : Présentation de logiciel « Minitab » :

Minitab est un logiciel propriétaire commercial de statistiques. Il est développé par *Minitab, Inc.* pour le système d'exploitation Windows uniquement. Il est largement utilisé par les universités pour enseigner les statistiques, et les développeurs le dirigent particulièrement aux entreprises en affichant leur intention de les rendre plus performantes selon la méthode « Six Sigma ». Logiciel développé depuis 1972 et disponible en 8 langues.

Conclusion

La méthode des plans d'expériences consiste à organiser la démarche expérimentale et l'analyse décisionnelle en appliquant des règles rigoureuses basées sur l'exploitation des propriétés algébriques et statistiques des matrices décrivant les expériences. Elle amène une méthodologie pour résoudre nos problèmes d'optimisation.



III.1 : Introduction :

À travers la synthèse bibliographique, on a pu voir que les phénomènes physicochimiques jouent un rôle déterminant sur le comportement mécanique des blocs de terre comprimée et sur leur durabilité.

Dans ce chapitre on présente les différents critères de sélection d'un matériau destiné à la confection de brique de terre comprimée (BTC).

III.2 : Matériaux utilisés :

III.2.1 : Sol :

Nous avons utilisés deux types d'argile, argile n°1 « argile verte (Arg_{vrt}) », argile n°2 « argile grise (Arg_{grs}) »



Figure III. 1: Argile n°1 Arg_{vrt}



Figure III. 2: Argile n°2 Arg_{grs}

Essais d'identifications :

III.2.1.1 : Analyse granulométrique tamisage (NF P 94-056) :

Elle a pour but de déterminer la distribution des particules qui forment le squelette des sols en vue de leur classification.

L'essai consiste à séparer les grains agglomérés d'une masse connue de matériau par brassage sous l'eau, à fractionner ce sol, une fois séché, au moyen d'une série des tamis et à peser successivement le refus cumulé sur chaque tamis. La masse de refus cumulé sur chaque tamis est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse (figure III. 3).



Figure III. 3: Appareillage de l'analyse granulométrique par tamisage.

Tableau III. 1: analyse granulométrique pour le type d'argile Arg_{VRT}.

Tamis (mm)	Refus Partiels (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
5	00	00	00	100
2.5	00	00	00	100
1.25	00	00	00	100
0.63	210	210	21	79
0.315	223	433	43.3	56.7
0.16	180.5	613.5	61.35	38.65
0.08	176	789.5	78.95	21.05
fond	210	999.5	100	00

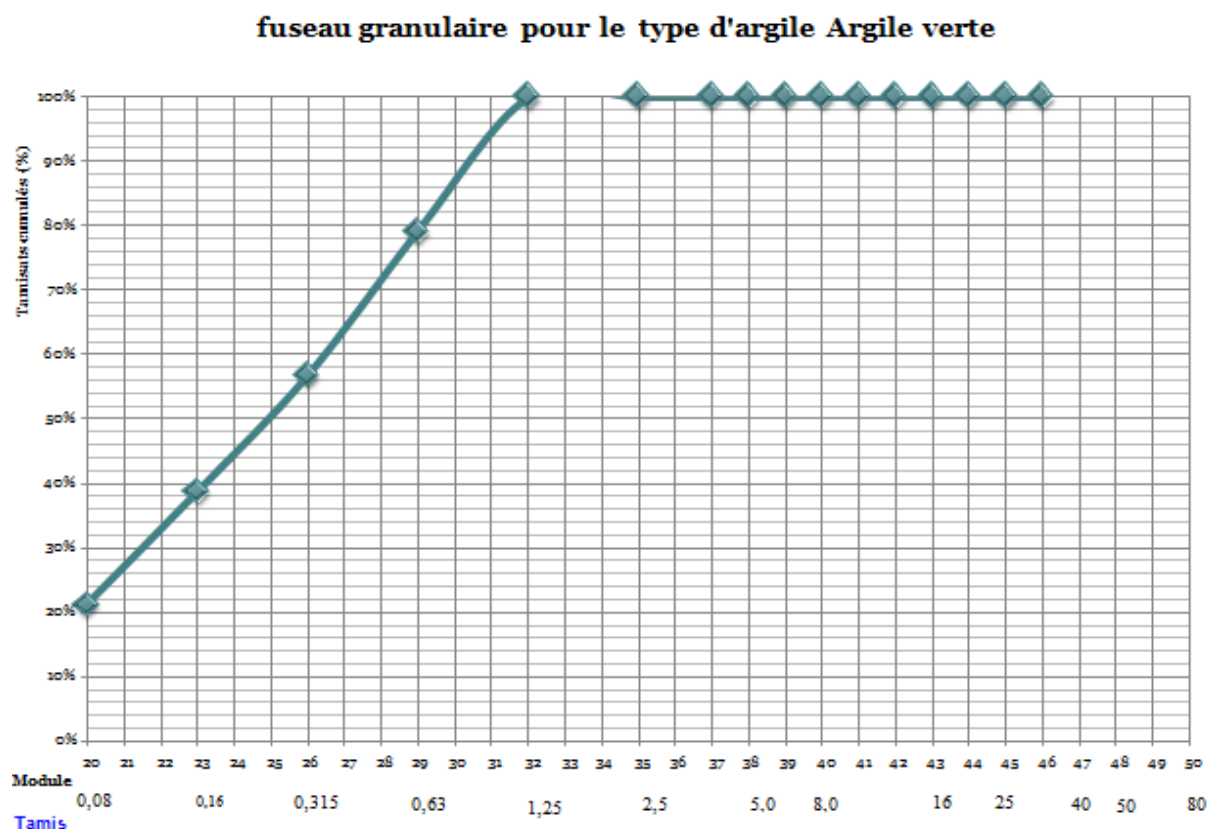


Figure III. 4: Courbe granulométrique d'argile Arg_{vrt}.

Tableau III. 2: analyse granulométrique pour le type d'argile Arg_{grs}.

Tamis (mm)	Refus Partiels (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
5	00	00	00	100
2.5	00	00	00	100
1.25	248	248	24.8	75.2
0.63	206	454	45.4	54.6
0.315	166	620	62	38
0.16	130	750	75	25
0.08	46	796	79.6	20.4
fond	204	1000	100	00

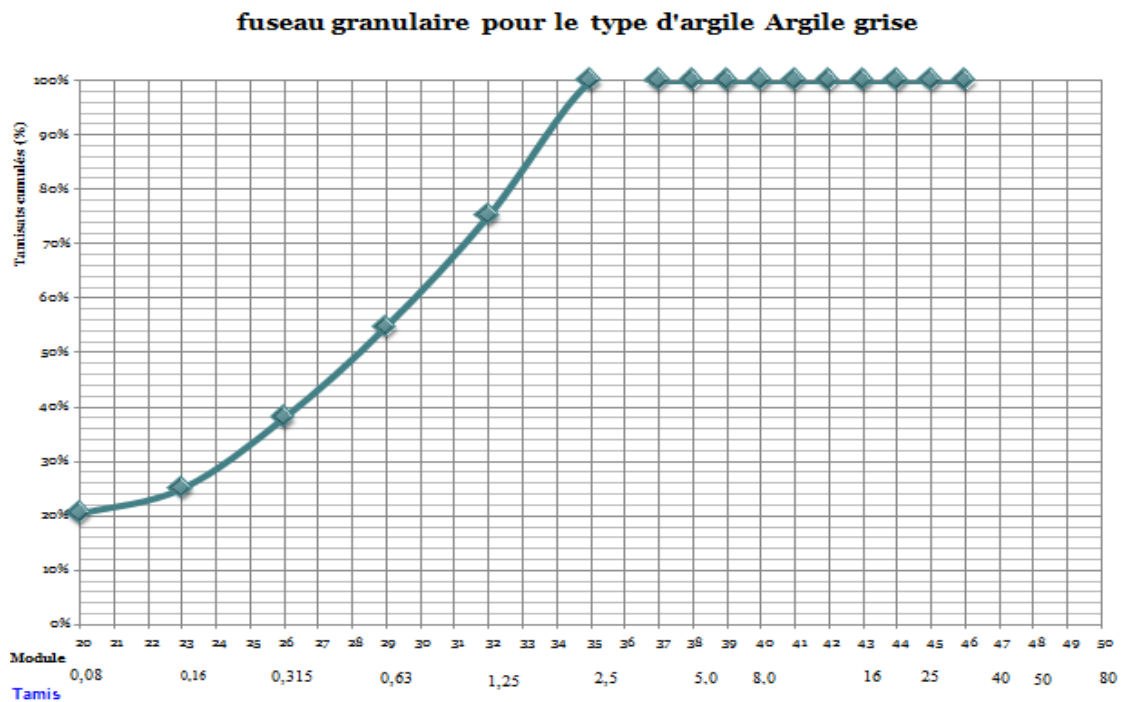


Figure III. 5: Courbe granulométrique d'argile Arg_{grs}.

III.2.1.2 : Les limites d'Atterberg (NF P 94-051):

Les limites d'Atterberg sont des caractéristiques géotechniques conventionnelles d'un sol qui marquent les seuils entre :

- le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique : limite de liquidité (W_l),
- le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide : limite de plasticité (W_p).

Ces limites ont pour valeur la teneur en eau du sol à l'état de transition considérée, exprimée en pourcentage de masse de la matière première brute. La différence $I_p = W_l - W_p$ d'apprécier la quantité et le type d'argiles présentes dans un échantillon. Il définit donc l'argilosité de l'échantillon.



Figure III. 6: Appareillage de limites d'Atterberg.

Tableau III. 3: les résultats obtenus par l'essai de la limite d'Atterberg pour les 2 types des argiles.

La limite d'Atterberg		
Limite de liquidité W_L (%)	Limite de plasticité W_P (%)	L'indice de plasticité I_P (%)
Arg_{vrt}	36	15
Arg_{grs}	42	23

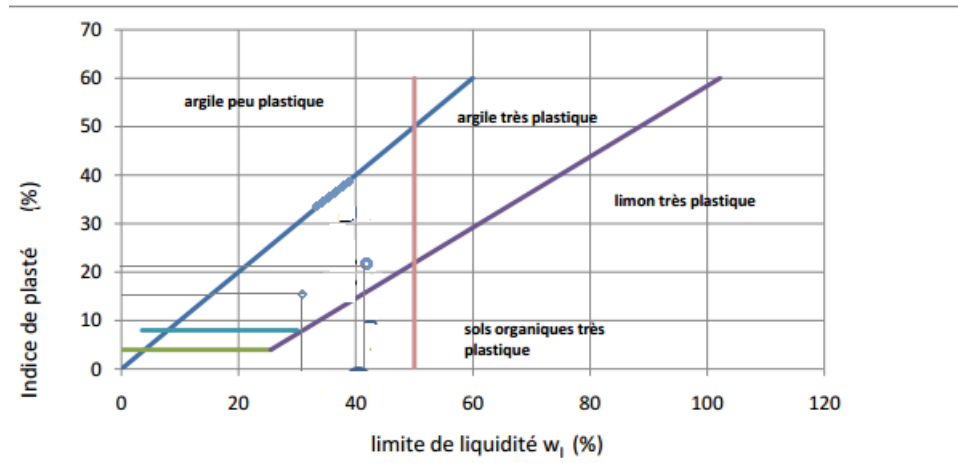


Figure III. 7: Diagramme de casagrande.

III.2.2 : Sable

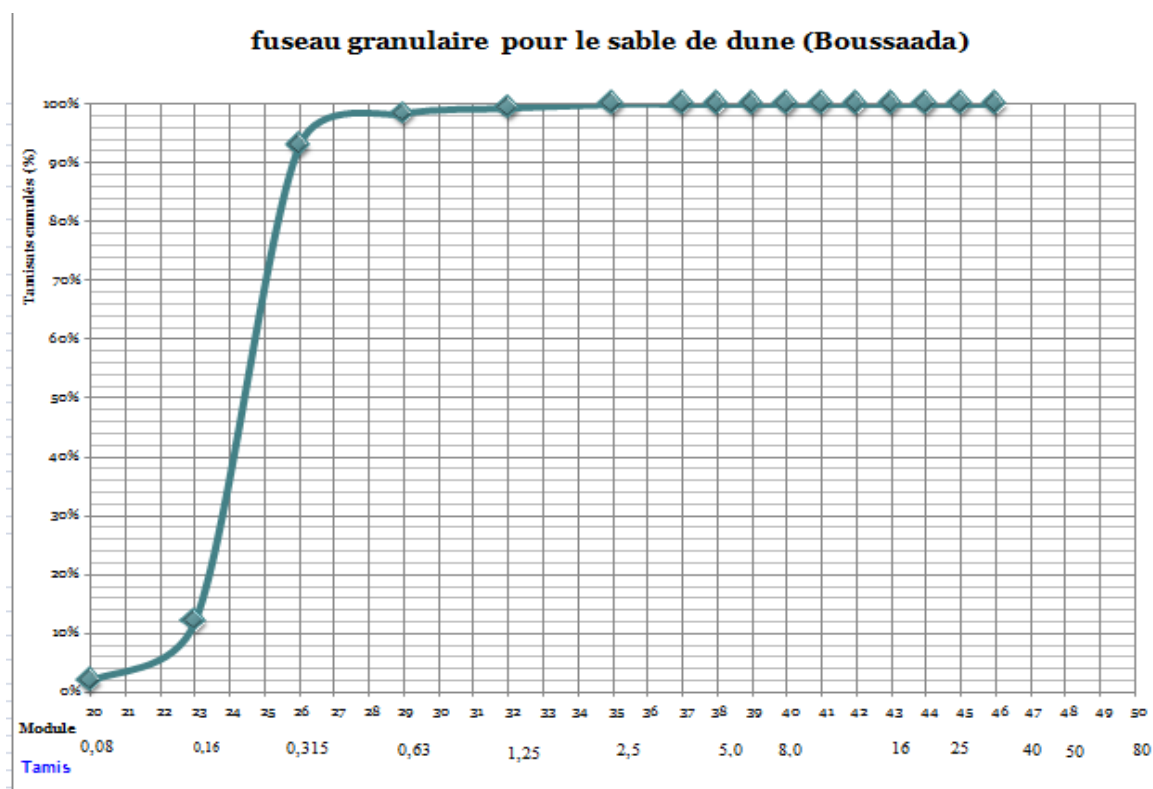
Les essais d'identifications :

III.2.2.1 : Analyse granulométrique par tamisage (NF 18-304) :

On peut définir l'analyse granulométrique par tamisage comme l'ensemble des opérations aboutissant à la séparation selon leur grosseur des éléments constituant l'échantillon, en employant des tamis à maille carrée afin d'obtenir une représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension.

Tableau III. 4: analyse granulométrique du sable de dune (Boussaâda).

Tamis (mm)	Refus Partiels (g)	Refus cumulés		Tamisât (%)
		(g)	(%)	
5	00	00	00	100
2.5	00	00	00	100
1.25	7	7	0.7	99.3
0.63	10.21	17.21	1.721	98.279
0.315	54	71.21	7.121	92.879
0.16	809	880.21	88.021	11.979
0.08	101.76	981.97	98.197	1.803
fond	18	999.97	100	00

**Figure III. 8:** Courbe granulométrique du sable Boussaâda.**III.2.2.2 : Le module de finesse :**

La finesse du sable est quantifiée par le calcul de son module de finesse à partir de l'analyse granulométrique. Plus le module est faible plus le sable est riche en éléments fins, il est égale au 1/100 de la somme des refus, exprimé en pourcentage sur les différents tamis de la série utilisée.

$$M_f = \sum R / 100$$

Après l'analyse granulométrique on trouve que le M_f du sable testé est égal à $M_f = 1$

Tableau III. 5: module de finesse du sable.

Qualité du sable	Module de finesse
Gros	>2.5
moyen	2 à 2.5
fin	1.5 à 2
Très fin	1.5 à 1

On se basant sur cette classification, on trouve le résultat suivant:

- Pour le sable de dune : Sable très fin

III.2.2.3 : Equivalent de sable (NF P 18-598) :

Il est effectuée sur des éléments de diamètre (2 mm) son importance est capital car la présence des éléments fins peut modifier le comportement rhéologique du matériaux et pour pouvoir interpréter correctement les résultats et les indispensable de répète l'essai au moins deux fois. Il est essentiel pour le choix et le contrôle.

Tableau III. 6: la nature du sable en fonction des mesures par l'équivalent de sable selon la norme (NF P 18-598)

ESV (visuel)	ESP (par piston)	Nature et qualité du sable
ES < 65%	ES < 60%	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. Sable à rejeter pour des bétons de qualité
65% ≤ ES < 75%	60% ≤ ES < 70%	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courante quand le retrait n'a pas de conséquence notable sur la qualité du béton
75% ≤ ES < 85%	70% ≤ ES < 80%	Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualités
ES ≥ 85%	ES ≥ 80%	Sable très propre ; l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau.

$$ESV = (h_2 / h_1) * 100\%$$

$$ESP = (h'_2 / h_1) * 100\%$$



Figure III. 9: Appareil de l'essai d'équivalent de sable.

Tableau III. 7: équivalent du sable de dune

Essai	h_1	h_2	ESV (%)	ESV _{moy} (%)	h'_2	ESP (%)	ESP _{moy} (%)
1	11.20	8.80	78.57		7.80	72.75	
2	12.20	8.90	72.65	74.81	7.90	64.75	67.485
3	12.10	8.86	73.22		7.86	64.95	

Le sable testé donne les résultats suivants :

ESV = 74.81%
 ESP = 67.485 % } le sable est considéré argileux et nécessite un lavage avant son utilisation

II.2.2.4 : La masse volumique :

a- Masse volumique absolue : NF P 18-555

C'est la masse de l'unité de volume de la substance, c'est-à-dire le rapport entre sa masse et son volume absolu.

La masse volumique absolue du sable est déterminée par la formule:

$$\rho_{abs} = \frac{M}{V_2 - V_1} \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

Avec : M=300g

Tableau III. 8: la masse volumique absolue de sable de dune (Boussaâda).

N° d'essai	M (g)	V1 (ml)	V2 (ml)	ρ_{abs} (g/cm ³)	$\rho_{abs moy}$ (g/cm ³)
1	300	400	510	2.72	2.67
2	300	400	512	2.678	
3	300	400	515	2.608	

b- Masse volumique apparente : NF P 18-554

L'état lâche :

C'est la masse du matériau par unité de volume y compris des vides existant entre les grains.

La masse volumique apparente du sable est donnée par la formule suivante :

$$\rho_{app} = \frac{M2 - M1}{V} \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

L'état compact :

La masse volumique à l'état compact est la masse du matériau par unité de volume après compactage compris les vides restants entre les grains, elle est souvent supérieure à la masse volumique à l'état lâche. Même procédure que celle à l'état lâche après remplissage du récipient avec compactage.

Les résultats représentés dans les tableaux suivants :

Tableau III. 9: la masse volumique apparente à l'état lâche.

N° d'essai	M1 (g)	V1 (ml)	M2 (ml)	ρ_{app} (g/cm ³)	$\rho_{app moy}$ (g/cm ³)
1	1443.5	1000	2944	1.50	1.51
2	1443.5	1000	2988	1.544	
3	1443.5	1000	2947	1.503	

Tableau III. 10: la masse volumique apparente à l'état compact.

N° d'essai	M1 (g)	V1 (ml)	M2 (ml)	ρ_{app} (g/cm ³)	$\rho_{app moy}$ (g/cm ³)
1	1443.5	1000	3051	1.607	1.60
2	1443.5	1000	3048	1.604	
3	1443.5	1000	3037	1.593	

c- Porosité :

C'est le volume des vides entre les grains du sable. La porosité peut être déterminée par la formule suivante :

$P (\%) = 1 - (\text{Masse volumique apparente} / \text{masse volumique absolue}) * 100$

$$P (\%) = [1 - \rho_{\text{app}} / \rho_{\text{abs}}] * 100$$

A l'état lâche :

$$P_L (\%) = [1 - \rho_{\text{app}} / \rho_{\text{abs}}] * 100$$

d- Compacité :

La compacité d'un matériau est une proportion de son volume réellement occupé par la matière solide qui le constitue, c'est-à-dire le rapport du volume absolu des grains au volume apparent du matériau.

La compacité donnée par la formule :

$$C = \rho_{\text{app}} / \rho_{\text{abs}} = 100 - P$$

A l'état lâche :

$$C_L = \rho_{\text{app}} / \rho_{\text{abs}} = 100 - P_L$$

e- L'indice des vides :

L'indice des vides est le rapport entre le volume du vide et le volume de solide.

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{P}{100 - P}$$

A l'état lâche :

$$e_L = \frac{V_v}{V_s} = \frac{P_L}{100 - P_L}$$

Tableau III. 11: la porosité, la compacité et l'indice de vide pour le sable.

	Porosité (%)	Compacité (%)	L'indice de vide
Etat compacte	40,07	59.93	0.66
Etat lâche	43.44	56.55	0.77

III.2.3 Ciment :

Le ciment utilisé est le ciment du groupe Lafarge au niveau de la wilaya de M'sila « MOKAOUEM » CRS et « MATIN » CPJ-CEM II 42.5

II.2.4 La chaux :

Tous les types de chaux sont à employer en principe dans la stabilisation du matériau terre destiné à la construction, la préférence est néanmoins donnée aux chaux aériennes qu'aux chaux hydrauliques. La chaux est surtout conseillée pour les sols contenant une fraction argileuse de moins 20 % (Doat, 1979).

On a utilisé la chaux broyée de la wilaya de saïda (SARL.BMSD).

Tableau III. 12: fiche technique des propriétés physique et chimiques de la chaux de Saïda.

Caractéristiques de base	La fiche technique de la chaux
Apparence physique	Poudre blanche sèche
CaO (%)	>73.3
MgO (%)	<0.5
Fe ₂ O ₃ (%)	<2
Al ₂ O ₃ (%)	<1.5
SiO ₂ (%)	<2.5
SO ₃ (%)	<0.5
Na ₂ O (%)	0.4-0.5
CO ₂ (%)	<5
CaCO ₃ (%)	<10
Densité spécifique (g/cm ³)	2
Plus de 90 µm (%)	<10
Plus de 630 µm (%)	0
Matériau insoluble (%)	<1
Densité apparente (g/l)	600-900

III.2.5 l'adjuvant :

Les superplastifiants sont des produits organiques qui, ajoutés à de faibles proportions (de 0,2 à 2% environ) au béton frais permettent d'en modifier les propriétés rhéologiques durant une période plus ou moins longue.

L'utilisation de superplastifiants dont l'action est schématisée sur (Figure I.5) permet de concilier la diminution de la teneur en eau et la fluidité du béton tout en conservant de bonnes performances mécaniques du matériau. (Hanaa F, 2009)

On a utilisé l'adjuvant fluidifiant « MEDAFLUID SF »

III.2.6 l'eau de gâchage :

L'eau utilisée dans les mélanges est une eau potable de laboratoire de développement des Géomatériaux Université de M'sila.

Conclusion :

D'après ces essais on peut tirer les conclusions suivantes :

- Les deux types d'argiles utilisées sont des argiles très plastiques.
- Le sable Boussaâda est un sable argileux avec un ES= 74.81%, une masse volumique absolue=2.67 g/m³.
- Nous avons utilisé deux types de ciment CRS et CEM II 42.5 du groupe Lafarge.



IV.1 : Introduction :

D'après les résultats obtenus dans le chapitre précédent, et après la détermination des caractéristiques des différents matériaux utilisés, nous allons présenter dans ce chapitre les essais réalisées sur les briques de terre comprimées et stabilisées par ciment et par la chaux.

IV.2 : Confection des blocs :

IV.2.1 : Mélanges :

Dans le but d'améliorer la résistance des matériaux locaux utilisés dans les constructions, plusieurs traitements ont vu le jour. Il s'agit par exemple des traitements des latérites par le ciment, par de la chaux. Ces techniques d'amélioration de la résistance des matériaux locaux font appel à la technique de mélange afin d'homogénéiser et de bien répartir le traitement dans l'ensemble du matériau.

IV.2.2 : Préparation des mélanges :

IV.2.2.1 : Etapes de préparation :

Les étapes suivantes :

- 1- On pèse les quantités nécessaires des différents matériaux : argile, ciment, chaux, sable et eau.
- 2- Préparation des moules : après le nettoyage et graissage à l'aide d'une huile les moules sont prêts pour utilisation.
- 3- le malaxage : L'opération est exécutée comme suit:

On pose l'argile sèche avec la quantité du ciment, la chaux, le sable dans le malaxeur (figure IV.2) et on malaxe le mélange à sec durant 40 à 60 secondes

On ajoute une quantité d'eau et l'adjuvant, puis on malaxe pendant 120 à 180 seconde jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène et humide.

Le malaxage est la préparation des moules sont des opérations importantes dans la fabrication de la BTC. La répartition du stabilisant doit être homogène pour que son effet soit uniforme pour tout le mélange. Cette homogénéité est conditionnée par le malaxage.

- 4- Le moulage des éprouvettes : cette opération est exécutée à l'aide d'une presse manuelle du laboratoire de développement Géomatériaux (figure IV.3).

Les éprouvettes utilisées sont des éprouvettes cubiques des dimensions $(15*15*15)$ cm³ et $(7*7*7)$ cm³.



Figure IV. 1: le malaxeur utilisé.



Figure IV. 2: les matériaux et les éprouvettes.



Figure IV. 3: Presse manuelle du laboratoire de développement Géomatériaux, université de M'sila

IV.2.2.2 : Préparation du mélange :

Nous avons fait les études à l'aide d'un logiciel « Minitab », on a choisi les facteurs présenté dans les tableaux ci-dessous.

Les mélanges sont préparés selon la méthodologie des plans d'expérience :

Expérience 01 :

Tableau IV. 1: les facteurs et les niveaux pour la 1^{ère} expérience.

Facteurs	Niveau bas (-)	Niveau haut (+)
Ciment	5%	10%
Chaux	5%	10%
Sable	10%	20%

Tableau IV. 2: les essais de la 1^{ère} expérience.

Essais	Ciment	chaux	Sable fin
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1

Expérience 02 :**Tableau IV. 3:** les facteurs et les niveaux de la 2^{ème} expérience.

Facteurs	Niveau bas (-)	Niveau haut (+)
Sable	10%	20%
Chaux	5%	10%
Adjuvant	non	Oui 2%
Argile	Arg _{vt}	Arg _{grs}

Tableau IV. 4: les essais de la 2^{ème} expérience.

Essais	Sable fin	chaux	adjuvant	Argile
1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	-1
3	-1	1	-1	-1
4	1	1	-1	-1
5	-1	-1	1	-1
6	1	-1	1	-1
7	-1	1	1	-1
8	1	1	1	-1
9	-1	-1	-1	1
10	1	-1	-1	1
11	-1	1	-1	1
12	1	1	-1	1
13	-1	-1	1	1
14	1	-1	1	1
15	-1	1	1	1
16	1	1	1	1

IV.3 : La cure des éprouvettes :

Comme pour le béton, la résistance d'un sol-liant croît avec l'âge.

Après le démoulage, les éprouvettes sont introduites dans une étuve climatique à 20 °C avec humidité de 90% pendant 28 jours.



Figure IV. 4: l'étuve utilisée pour la cure (du laboratoire de développement Géomatériaux université de M' sila).

IV.4: Essai de compression (la norme P 18-406)

L'essai de compression est réalisé suivant la norme P 18-406. $\sigma_c = F/S$

F : la charge appliquée en KN.

S : section transversale de l'éprouvette ($S = a * a$).



Figure IV. 5: Presse hydraulique pour l'essai de compression (avec une pression de 300KN).

IV.4: Essais non destructifs :

IV.4.1 : Essai d'auscultation dynamique (ultrason) P 18-414 et P 18-418:

Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde, d'où le nom de la méthode (essai de vitesse de propagation d'ondes sonores) à parcourir une distance connue ; l'état du béton totalement inconnu peut se déterminer approximativement selon la vitesse mesurée.

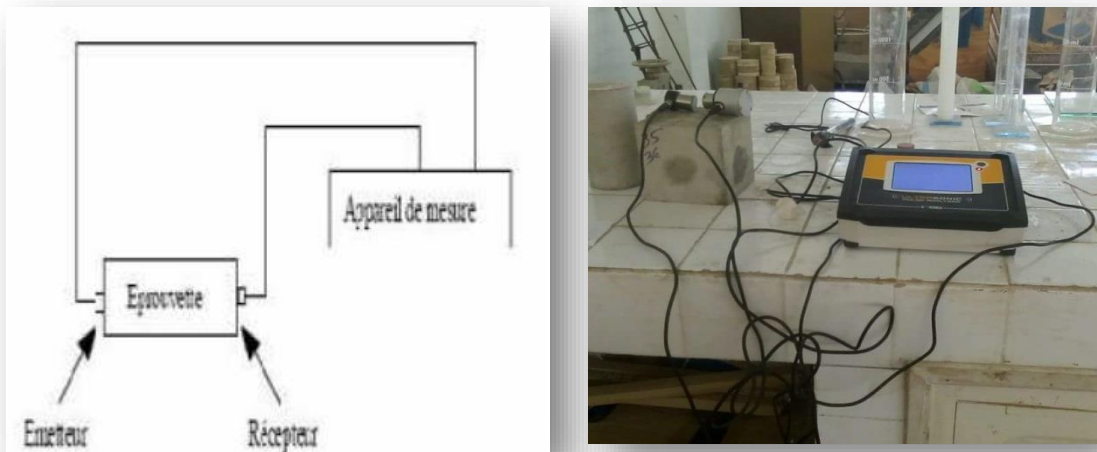


Figure IV. 6: Appareil d'auscultations dynamique (ultrason) .

*Manières de mesure :

a- Mesure en transparence (directe) : Les mesures en transparence sont utilisées dans le cas des éprouvettes, Les transducteurs sont appliqués sur les deux faces de l'élément à tester.

Figure (IV.7)

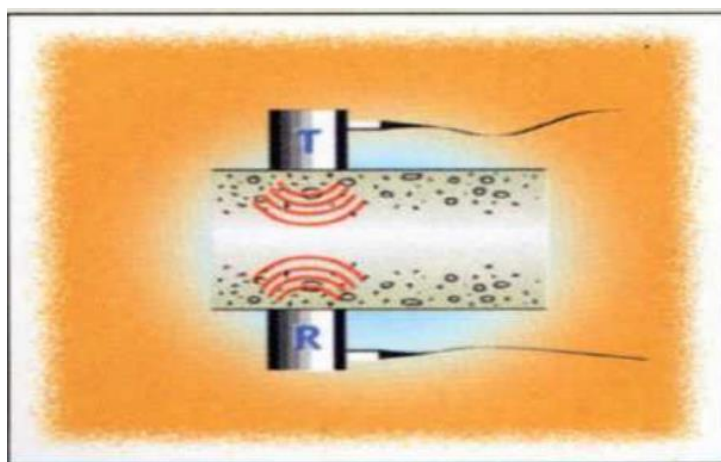


Figure IV. 7: mesure en transparence (directe).

b- Mesures en surface (indirecte) : Elles sont utilisées sur tous les éléments de structure et sur les éprouvettes, mais plus particulièrement sur les dalles et éléments en longueur.

L'émetteur est maintenu en un point fixe, le récepteur est déplacé successivement à des distances marquées à l'avance. Après avoir relevé le temps correspondant à un point considéré, on passe au point suivant

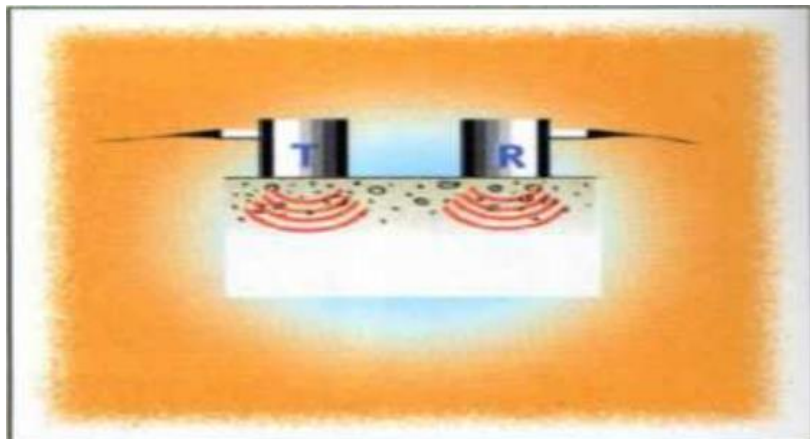


Figure IV. 8: mesure en surface (indirecte).

c- Mesures semi directe :

Elles sont utilisées sur tous les éléments de structure et sur les éprouvettes, mais plus particulièrement sur les éléments de structure où on ne peut pas utiliser les autres manières.

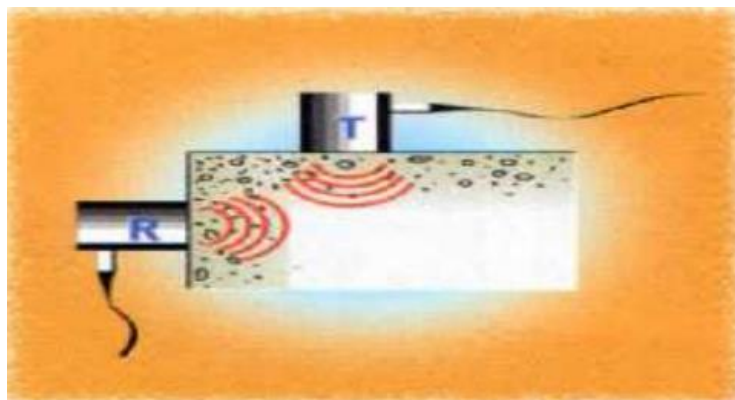


Figure IV. 9: mesure semi directe.



CHAPITRE V :
« *RESULTATS ET
INTERPRETATIONS* »

V-1 Introduction :

Dans ce chapitre, après avoir réalisé toutes les formulations nécessaires de tous les mélanges des éprouvettes. On va présenter les résultats et donner les interprétations convenables pour les valeurs obtenues par les différents essais.

V-2 résultats des essais de la 1^{ère} expérience :

V-2-1 résistances mécaniques et ultrasoniques des BTC :

Le ciment utilisé dans cette expérience et le ciment MATIN CEM II 42,5. La pression appliquée pour comprimer la brique après confection est constante pour tous les blocs (12 KN).

Tableau V. 1: les résultats des résistances mécaniques et ultrasoniques des BTC de la 1^{ère} expérience.

Essais	Ciment (%)	Chaux (%)	Sable fin (%)	Pression (KN)	Résistance a la compression (MPa)	Résistance a l'ultrason (m/s)
1	-1	-1	-1	12	2.540	1376.15
2	1	-1	-1	12	1.810	1442.30
3	-1	1	-1	12	2.570	1500
4	1	1	-1	12	5.100	1595.75
5	-1	-1	1	12	8.030	1807.23
6	1	-1	1	12	4.375	1898.74
7	-1	1	1	12	2.840	2000
8	1	1	1	12	6.070	2054.8

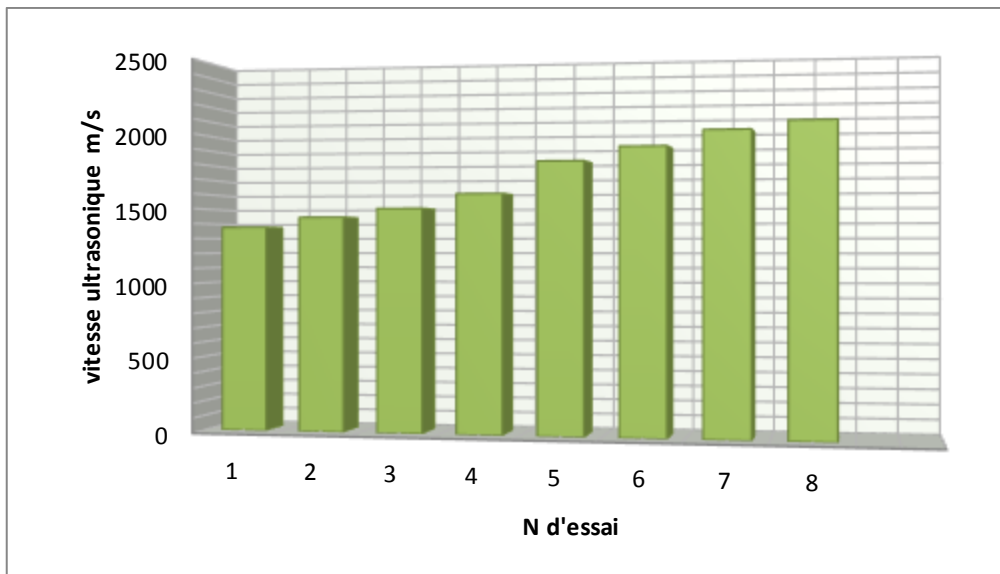


Figure V. 1: Diagramme des résultats de l'essai d'auscultations dynamique (ultrason) pour la 1^{ère} expérience.

Selon ces résultats, on constate que les derniers mélanges donne des meilleurs résultats par rapport aux autres, en particulier le mélange qui contient les quantités 10% ciment, 10% chaux et 20% sable augmente la vitesse du son.

Donc ce mélange est le plus compacte est qui contient le moins des vides (c'est le mélange optimal).

V-2-2 : les diagrammes et les graphes donnez par logiciel Minitab :

V.2.2.1 : diagramme de Perto des effets pour C10 (Rc) :

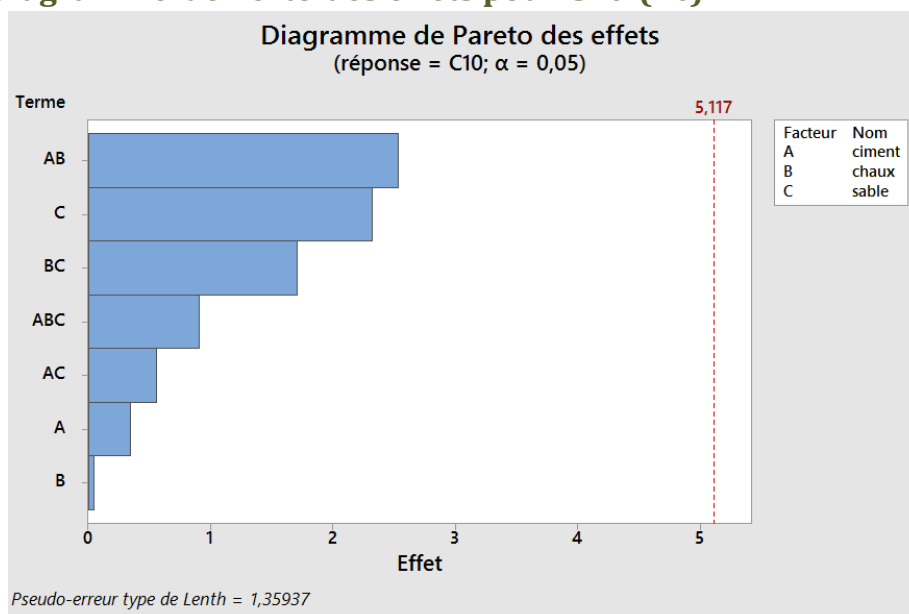


Figure V. 2: Diagramme des effets pour C10.

Ce graphe montre que les facteurs qui ont beaucoup d'effet sur la résistance à la compression sont :

- 1- Le ciment et la chaux.
- 2- Le sable.

V.2.2.2 : graphique en cube :

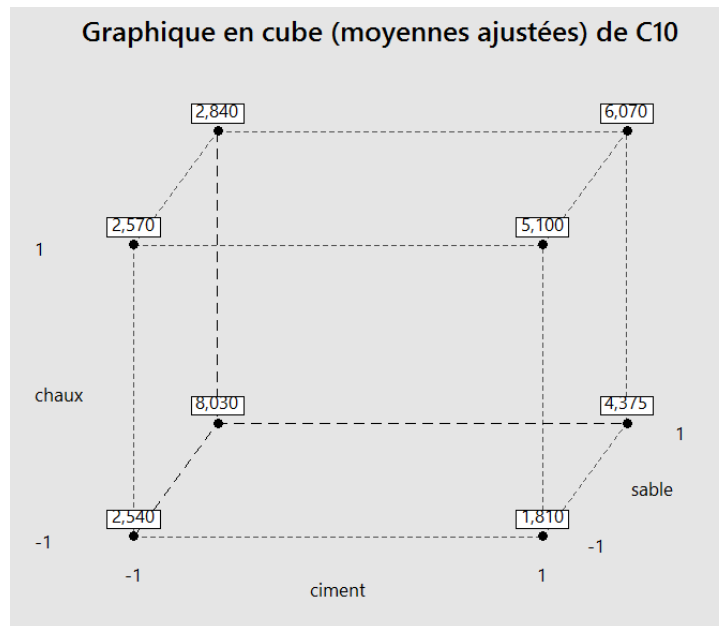


Figure V. 3: Graphique en cube (moyennes ajustées) de C10.

Ce graphe en cube donne les résistances en compression des différents mélanges avec des différents pourcentages des constituants (ciment, chaux, sable).

V.2.2.3 : Les effets principaux pour C10 :

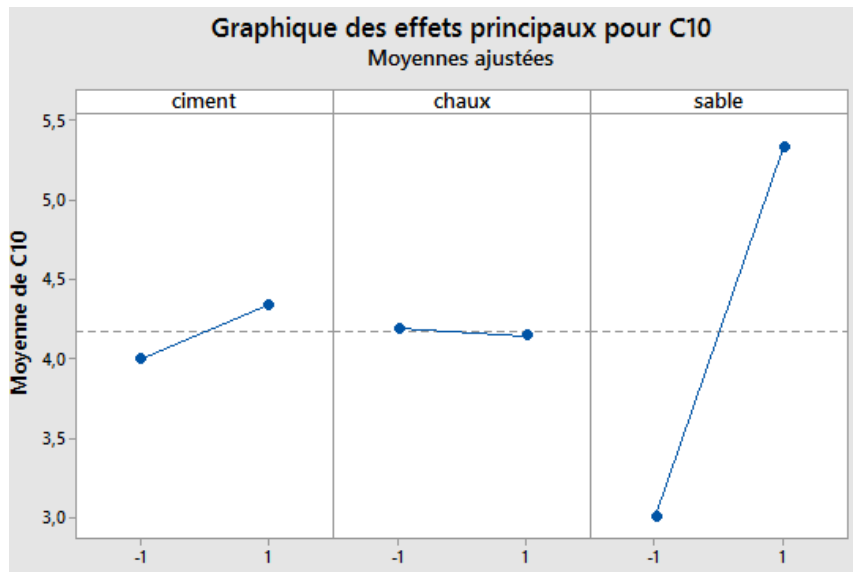


Figure V. 4: Graphique des effets principaux pour C10.

Ce graphe nous donne l'effet de chaque constituant sur la résistance à la compression. Quand on augmente la quantité de ciment de 5 à 10% la résistance augmente légèrement, alors que pour le sable, la variation de pourcentage de 10 à 20% de sable fait augmenter fortement la résistance de 3.0 à 5.5 MPa. Par contre l'augmentation du pourcentage de la chaux ne donne aucun effet.

V.2.2.4 : Interactions des facteurs :

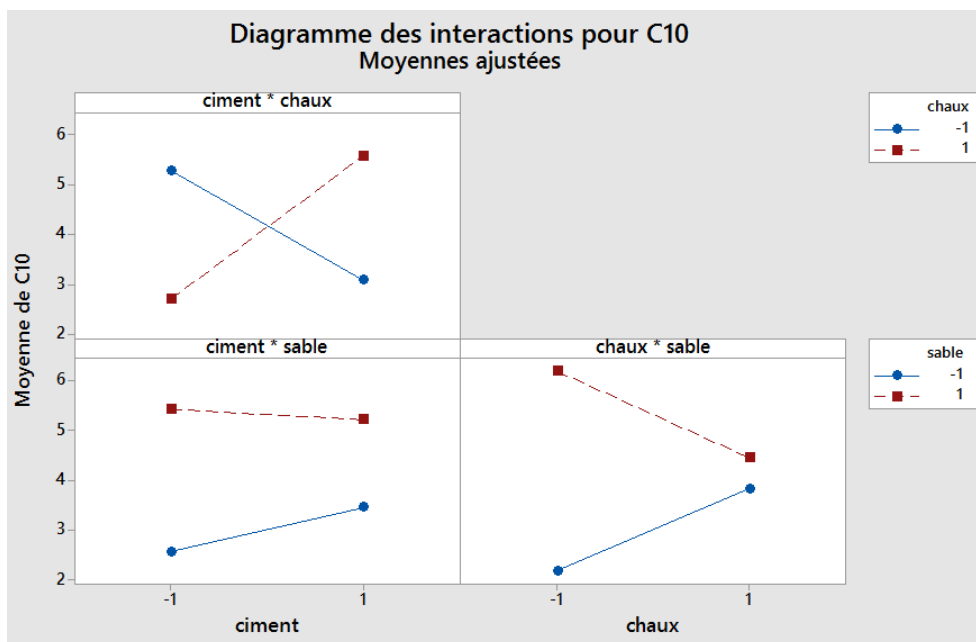


Figure V. 5: Diagramme des interactions entre les constituants pour C10.

L'interaction entre le ciment et la chaux est forte il ya une réaction entre ces deux constituants, par contre l'interaction entre la chaux et le sable est faible, la chaux réagi des petites quantités avec le sable. Aussi l'interaction entre le ciment et sable est la plus faible parmi les 3 interactions représentées dans le diagramme au dessus.

V-2-3 : Conclusion :

La première expérience montre que le mélange du 5^{ème} essai (5% ciment, 5% chaux et 20% sable) donne la meilleur résistance à la compression, par contre le mélange de l'essai n8 (10% de ciment, 10% de la chaux et 20% du sable) donne un bon compactage. On peut dire que le bon mélange est le mélange n°5 qui donne une meilleur résistance avec un petit pourcentage de ciment (5%).

Nous avons remarqués aussi que les deux constituants qui donnent le bon effet sont le ciment avec la chaux.

V-3 résultats des essais de la 2^{ème} expérience :

V-3-1 résistances mécaniques et ultrasoniques des BTC :

Dans cette expérience nous avons utilisé le type de ciment MOKAOUEM CRS Du groupe Lafarge avec un dosage de 20%.

Tableau V. 2: les résultats des résistances mécaniques et ultrasoniques des BTC de la 2^{ème} expérience.

Essais	Sable fin (%)	Chaux (%)	Adjuvant (%)	Argile	Pression (KN)	Résistance a la compression (MPa)	Résistance a l'ultrason (m/s)
1	-1	-1	-1	-1	12	6.07	2112.68
2	1	-1	-1	-1	12	8.15	2419.35
3	-1	1	-1	-1	12	8.96	2173.91
4	1	1	-1	-1	12	10.77	1973.7
5	-1	-1	1	-1	12	10.62	2205.89
6	1	-1	1	-1	24	9.99	945.94
7	-1	1	1	-1	24	9.43	1428.57
8	1	1	1	-1	24	9.00	1627.90
9	-1	-1	-1	1	24	11.36	1750
10	1	-1	-1	1	24	13.87	1666.66
11	-1	1	-1	1	24	10.98	1707.32
12	1	1	-1	1	24	14.40	1666.67
13	-1	-1	1	1	24	9.02	1750
14	1	-1	1	1	24	10.57	1842.10
15	-1	1	1	1	24	8.47	2000
16	1	1	1	1	24	6.82	1842.10

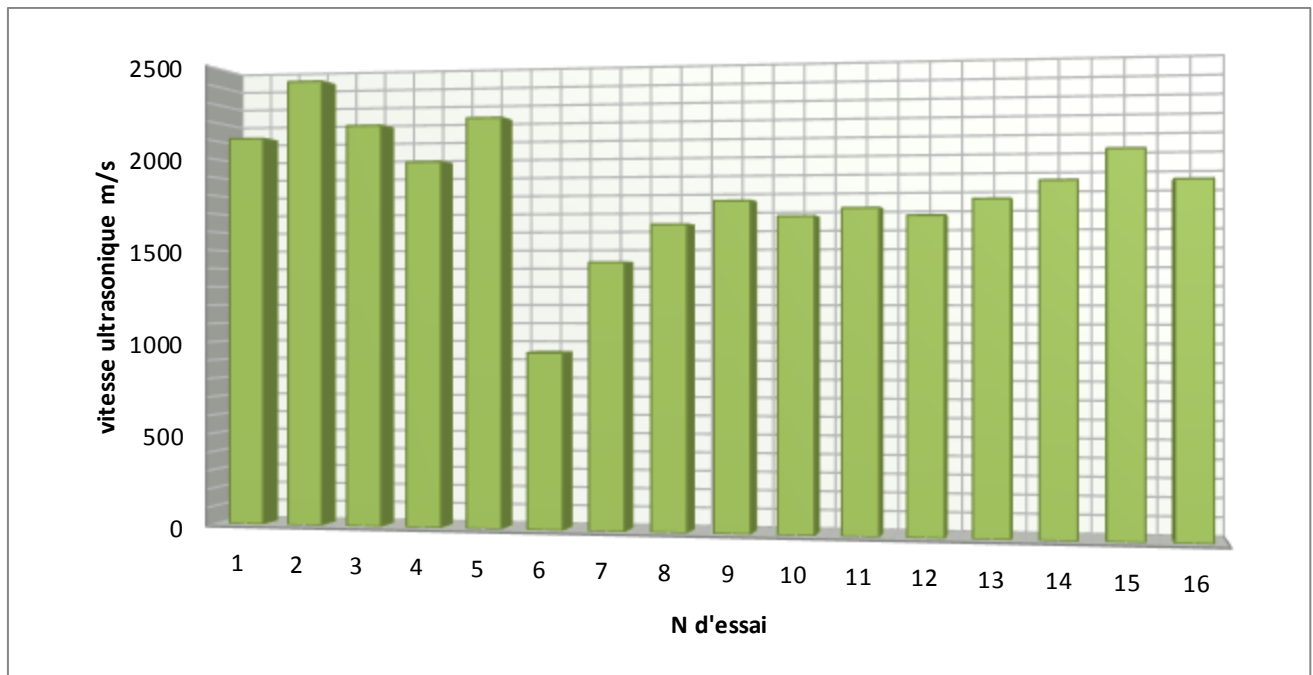


Figure V. 6: Diagramme des résultats de l'essai d'auscultation dynamique (ultrason) de la 2^{ème} expérience.

V-3-2 : les diagrammes et les graphes donnez par logiciel Minitab :

V.3.2.1 : diagramme de Perto des effets pour C11 :

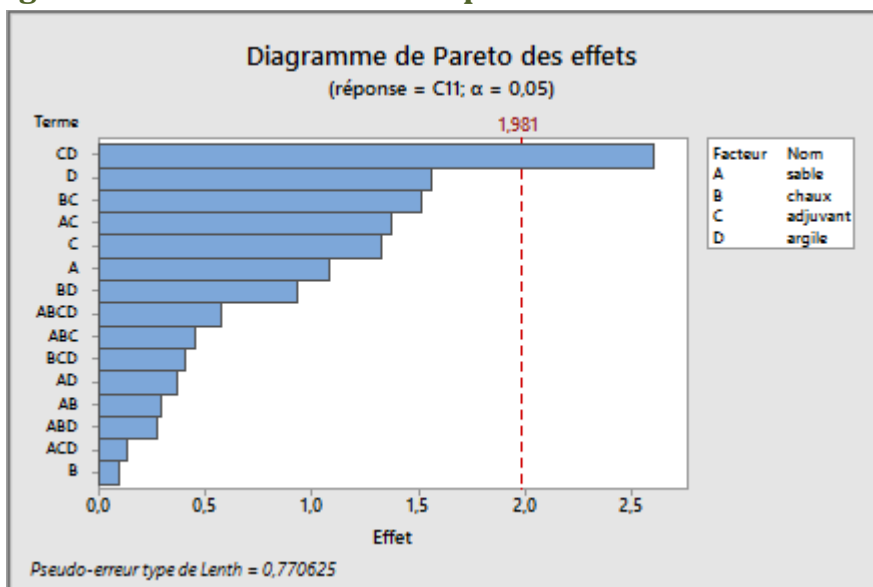


Figure V. 7: Diagramme de Pareto des effets pour C11.

D'après le diagramme, l'adjuvant avec l'argile n'est pas compatible, donc il ne faut jamais utiliser ce type d'adjuvant avec n'importe quel type d'argile. Le mélange de sable, adjuvant et argile donne un très faible effet. Finalement la chaux seule ne donne aucun effet.

V.3.2.2 : graphique en cube :

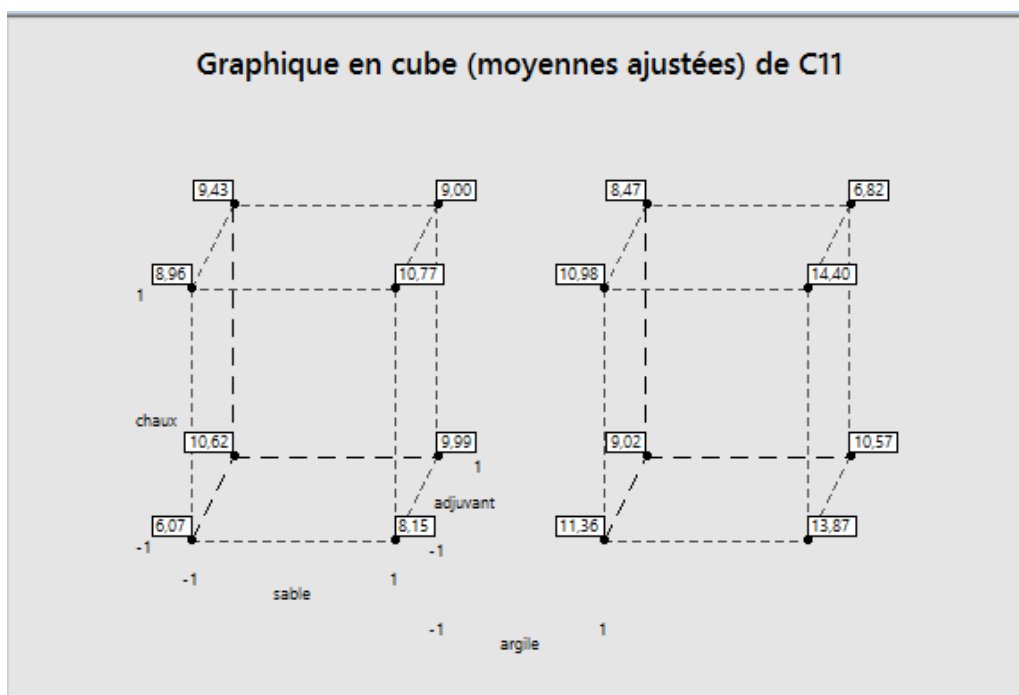


Figure V. 8: Graphique en cube (moyennes ajustées) de C11.

V.3.2.3 : Les effets principaux pour C11:

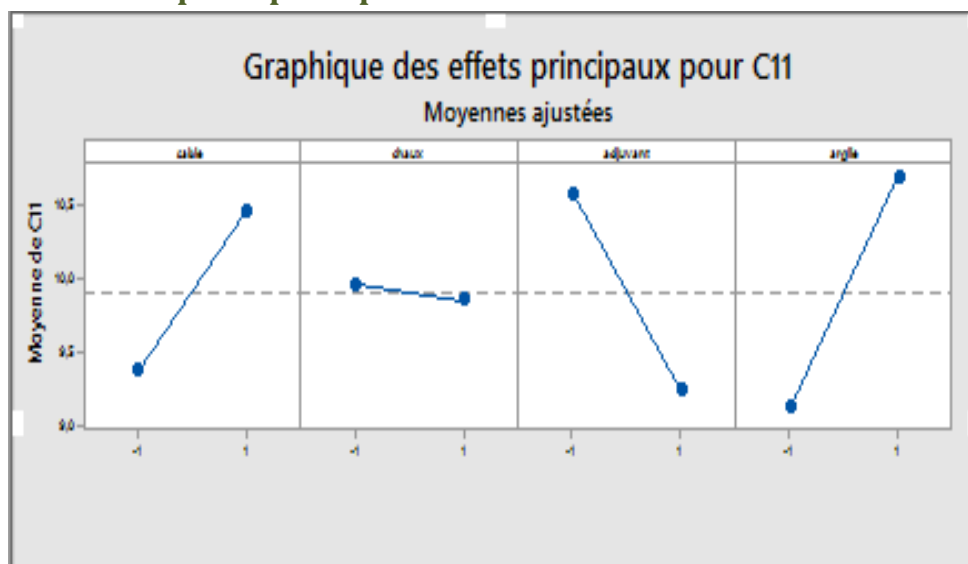


Figure V. 9: Graphique des effets principaux pour C11.

Ce graphe nous donne l'effet de chaque constituant sur la résistance à la compression C11 pour la 2^{ème} expérience. Quand on augmente la quantité de sable de 10% à 20% la résistance augmente. L'argile Arg_{gers} augmente la résistance, Mais quand nous avons ajouté l'adjuvant l'effet a été inversé. Par contre la chaux ne donne aucun effet.

V.3.2.4 : Interactions des facteurs :

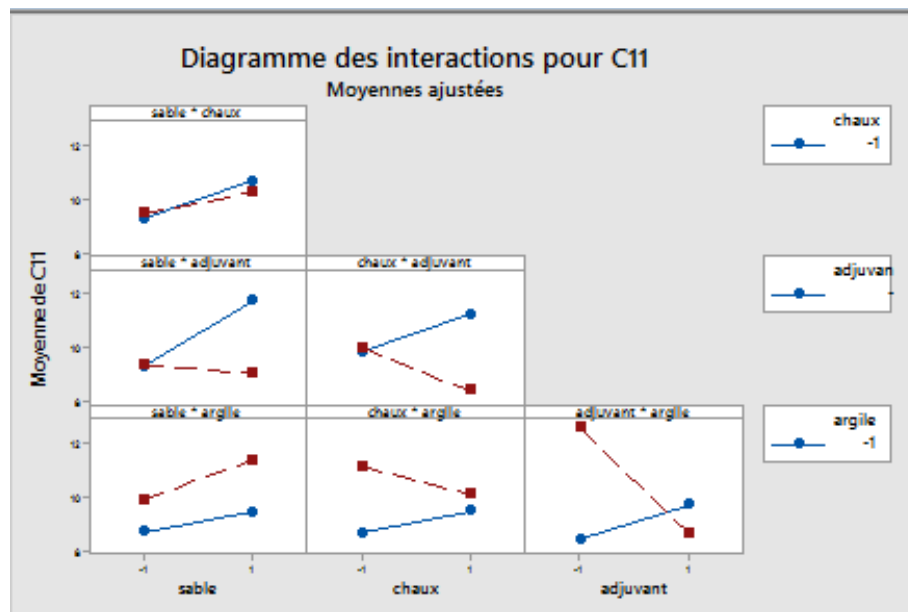


Figure V. 10: Diagramme des interactions pour C11.

La chaux il faut soit minimale ou éviter de la mélangé avec du ciment ou avec l'adjuvant. Le mieux c'est utiliser le pourcentage maximum du sable qui réagit mieux avec le ciment et avec l'argile.

V-3-3 : Conclusion :

D'après tous ces résultats on peut dire que l'argile grise est meilleure que l'argile verte, l'effèt d'adjuvant est mauvais (à ne pas utiliser).



Par rapport à l'histoire de la construction en terre, la technique du bloc de terre comprimée (BTC) est une technique récente, qui est une évolution moderne du bloc de terre moulée, plus communément dénommé bloc d'adobe. Comparé à l'adobe, le BTC est très régulier en formes et en dimensions, plus dense et présente une meilleure résistance à la compression et à l'eau.

Pour valoriser les matériaux et les savoir-faire locaux, Des blocs de terre comprimée sont réalisés après stabilisation par le ciment et la chaux.

Notre travail est devisé en 2 expériences avec l'utilisation de logiciel Minitab l'expérience n1 contient 3 facteurs avec 8 essais, la deuxième expérience contient 4 facteurs qui donne 16 essais.

L'objectif est d'aboutir à la fabrication d'une BTC possédant une bonne résistance à la compression.

Les résultats obtenues on montrée que :

- L'ajout du sable est un facteur important pour l'amélioration du malaxage et de la résistance de la brique.
- Le choix de type d'argile et un paramètre important sur la compacité et la résistance de la brique.
- L'adjuvant n'influe pas sur la résistance mais au contraire il diminue la résistance.
- Le mélange ciment et chaux ne donne pas de résultat optimale. Cette argile réagit mieux avec le ciment seul et donne le meilleur résultat.
- La compression de la brique joue un rôle important dans la résistance à la compression.

On peut finir ce travail par une recommandation d'étudier la durabilité de ces briques de terre comprimées et stabilisées par des essais mouillage-séchages.

Liste des références

- Anger & Fontaine**, *bâtie en terre : du grain de sable à l'architecture*, 2009.
- Ausroads**. *Guide to stabilisation in roadworks*. Ausroads Research Group, Sydney, 1998.
- Bell FG**. *Lime stabilization of clay minerals and soils*. *Engineering Geology* 42, 223-237, 1996.
- Burrough VS**. *Quantitative Criteria for the Selection and Stabilisation of Soils for Rammed Earth Wall Construction*, PhD Thesis, University of New South Wales, Australia, 2001.
- Boucif, N., & Ayad, F.** (2017). *Matériau terre: etude de la resistance au cisaillement et retrait*.
- CRATerre**. (1991). *Le bloc de terre comprimée Elements de base*.
- Festa Jean et Dreux Georges**. (2007). *Nouveau guide du béton et de ses constituants.pdf* (EYROLLES).
- Houben H, G. H.** (2006). *traité de construction en terre*, CRATerre, éditions parenthèses. (France, Ed.) (Edition Pa).
- Kaddour B A & Benchenna**. (2017). *valorisation des tufs pour la fabrication des briques en terre comprimées*. Moulay Tahar saida.
- Krami A & reggadi S.** (2011). *Thème Étude des briques de terre gypso-calcaire stabilisée par le ciment ou par la chaux Génie Civil et aux ingénieurs de laboratoire de génie civil sans acception ,.*
- Mahamat S.** (2010). *etude comparative entre l'amélioration des briques en terre comprimée stabilisée par le ciment et la chaux éteinte*.
- Miraucourt, D.** (2017). *Stabilisation du matériau terre crue pour application en brique de terre comprimée au Burkina Faso*, 103. Retrieved from https://matheo.ulg.ac.be/bitstream/2268.2/2539/1/TFE_Miraucourt_David_final_2.pdf
- Mohamed, H.** (2007). *Thème Contribution à l'amélioration du procédé de fabrication de la céramique Etude sur site : unité Maghreb céramique de Touggourt*.

Talla, A. P. (2010). *Étude Des Constructions En Briques De Terre Stabilisée À L ' Aide Des extraits du Parkia Biglobosa.*

Tinsson, W. (2010). *Plans d'expérience: constructions et analyses statiques.*

MOKAOUEM

Ciment pour béton en milieux agressifs
CPJ- CEM II/B 42,5 –ES NA 443



Analyses et caractérisation

Analyses chimiques

Perte au feu (%), (NA 5042):	1,00 – 3,00
Résidus insolubles (%), (NA 5042):	<0,7
Teneur en sulfates SO ₃ (%), (NA 5042):	2,00 – 2,50
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%):	1,9 – 2,2
Teneur en chlorures (%), (NA 5042):	0,012 – 0,025

Composition hypothétique du clinker (Bogue)

Aluminates tricalques C ₃ A (%):	≤ 5
(C ₄ AF) + 2(C ₃ A)	≤ 20%

Propriétés physiques

Consistance normale de la pâte de ciment (%):	25,5 – 28,50
Finesse suivant la méthode de Blaine (NA 231):	3 000 – 3 650
Chaleur d'hydratation J/g	< 270
Retrait à 28 jours en µm/m	<1 000
Expansion en mm	<5

Temps de prise à 20°C (NA 230)

Début de prise (min)	145 à 185
Fin de prise (min)	230 à 280

Résistance à la compression (NA 234)

02 jours (MPa)	≥ 10
28 jours (MPa)	≥ 42,5

Algerian Cement Company (SPA)

Direction générale

Ciment Blanc Algérien (SPA)

Hammam Dalaa, M'sila (ACC)
Tel: +213.35.50.78.20
Fax: +213.35.55.70.30

33, Rue des Pins, Hydra, Alger
Tel.: +213 (0) 21 48 16 65
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

Usine Oggaz (CIBA)
BP 67, 29350, Mascara
Tél. / Fax : +213 (0) 45 84 88 98



MOKAOUEM

Ciment pour béton en milieux agressifs
CPJ- CEM II/B 42,5 –ES NA 443



MOKAOUEM est un ciment résistant aux sulfates, c'est le résultat de la mouture d'un clinker contenant un faible taux d'aluminates de calcium avec une proportion de laitier de haut fourneau et du gypse.

Domaine d'utilisation :

MOKAOUEM est généralement utilisé pour les ouvrages en béton exposés à des conditions agressives sévères dues à l'attaque des sulfates de sol ou de l'eau souterraines tels que :

- Les fondations et les structures à réaliser dans un milieu agressif ;
- Les travaux maritimes ;
- Les stations de dessalement et d'épuration ;
- Les travaux hydrauliques ;
- Les barrages et les digues de soutènement collinaire.

Algerian Cement Company (SPA)

Hammam Dalaa, M'sila (ACC)
Tel: +213.35.50.78.20
Fax: +213.35.55.70.30

Direction générale

33, Rue des Pins, Hydra, Alger
Tel.: +213 (0) 21 48 16 65
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

Ciment Blanc Algérien (SPA)

Usine Oggaz (CIBA)
BP 67, 29350, Mascara
Tél. / Fax : +213 (0) 45 84 88 98



MATINE
Ciment pour béton exigeant
CEM II/B 42,5 N NA 442

Analyses et caractérisation

Analyses chimiques

Perte au feu (%), (NA 5042):	7,50 – 12,00
Résidus insolubles (%), (NA 5042):	0,7 – 2,00
Teneur en sulfates SO ₃ (%), (NA 5042):	2,00 – 2,70
Teneur en oxyde de magnésium MgO (%):	1,00 – 2,20
Teneur en chlorures (%), (NA 5042):	0,01 – 0,05
Teneur équivalent en alcalis (%):	0,3 – 0,75

Composition hypothétique du clinker (Bogue)

Silicates tricalciques C ₃ S (%):	58 - 64
Silicates bicalciques C ₂ S (%):	12 - 18
Aluminates tricalciques C ₃ A (%):	6,00 – 8,00
Aluminoferrites tetracalciques C ₄ AF (%):	10,00 – 12,00

Propriétés physiques

Consistance normale de la pâte de ciment (%):	25 – 28,50
Finesse suivant la méthode de Blaine (NA 231):	4150 – 5250
Retrait à 28 jours en µm/m	<1 000
Expansion en mm	0,3 – 2,5

Temps de prise à 20°C (NA 230)

Début de prise (min)	140 - 195
Fin de prise (min)	195 - 290

Résistance à la compression (NA 234)

02 jours (MPa)	≥ 10,0
28 jours (MPa)	≥ 42,5



Algérien Cement Company (SPA)

Hamam, Dassa, M'zila (ACC)
Tel: +213 35 50 78 20
Fax: +213 35 55 70 30

Direction générale

33, Rue des Pins, Hydra, Alger
Tel: +213 (0) 21 45 16 65
Fax: +213 (0) 21 45 16 71

Ciment Blanc Algérien (SPA)

Usine Oggar (OBA)
BP 67, 29503, Mascara
Tel./Fax: +213 (0) 40 64 88 96

LAFARGE
لافارج

MATINE
Ciment pour béton exigeant
CEM II/B 42,5 N NA 442

MATINE est un ciment gris de hautes résistances initiales et finales, résultat de la mouture du clinker obtenu par cuisson jusqu'à la fusion partielle (clinkérisation) d'un mélange convenablement dosé et homogénéisé de calcaire et d'argile.

Ce ciment est constitué d'oxydes minéraux dont les principaux sont la chaux (CaO) à fonction basique et la silice (SiO_2) à caractère acide. On trouve également l'alumine (Al_2O_3) et le fer (Fe_2O_3), ils sont rendus aptes à réagir entre eux et avec l'eau par traitement thermique à des températures comprises entre 1300 et 1500°C. En présence d'eau a lieu la réaction d'hydratation consistant en la formation d'un réseau résistant (propriété hydraulique) constitué principalement de micro-cristaux de silicates de calcium hydratés.

MATINE présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico-chimiques conformes à la norme NA 442, EN 197-1 et à la norme NF P 15-301/94.

Domaine d'utilisation :

MATINE est utilisé pour tous les projets de construction qui nécessitent de hautes résistances mécaniques mais qui ne présentent pas un besoin spécifique en bétons exposés à des conditions sévères comme l'attaque des sulfates du sol ou de l'eau, ainsi que dans les ouvrages dans lesquels le béton n'est pas affecté par le taux de chaleur d'hydratation du ciment.

Les principales applications de ce ciment sont :

- Secteur habitat (logements et d'autres constructions civiles) ;
- Secteur travaux publics (tunnels, ponts, port, aéroport .etc.) ;
- Secteur hydraulique (barrages, châteaux d'eau, stations d'épuration, stations de dessalement, .etc.) ;
- Secteur industriel.



Algerian Cement Company (SNA)

Hammam : Daria, Male (AOC)
Tel : +213 35 53 76 23
Fax : +213 35 56 70 30

Direction générale

33, Rue des Pins, Hydra, Alger
Tel : +213 (0) 21 48 16 65
Fax : +213 (0) 21 48 16 71

Ciment Blanc Algérien (SNA)

Unité Oggar (CBA)
BP 67, 29200, Mascara
Tel. / Fax : +213 (0) 45 64 88 98

LAFARGE
لافارج