

REPUBLICQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département de Génie Civil

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Génie Civil

Spécialité : Matériaux En Génie Civil

Par

➤ **Amar OUCHEN**

Intitulé

*Etude de l'influence du laitier sur le béton de terre comprimé et stabilisé
par le ciment et/ou la chaux par la méthode de plan de mélange*

Soutenu le : Juin 2022

Devant le Jury composé de :

<i>M.ROKBANE Abdelmadjid</i>	<i>M.A.A</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M.MESSAOUDENE Ibrahim</i>	<i>Professeur</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M.KESSAL Oussama</i>	<i>M.C.A</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>M.TABET Souad</i>	<i>M.A.A</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2021/2022

ملخص

يهدف هذا العمل لدراسة تأثير خبث الفرن العالي على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية لخرسانة الأرض المضغوطة والمثبتة بالأسمنت و / أو الجير. تم استخدام مخطط خلط ثلاثي العوامل لنمذجة تأثير الإضافات الثلاثة على خصائص BTCS في الحالات الطازجة والمتصلبة. تمت دراسة الكثافة والمقاومة الميكانيكية للضغط عند 28 يوماً. يتم أخذ العوامل الثلاثة (الجبير والأسمنت وخبث الفرن العالي) بنسب كتلية ، ومجموعها يساوي الوحدة مع استبدال الطين بنسبة تصل إلى 15% ؛ مما يعني أن هذه العوامل مرتبطة ببعضها البعض. وبالتالي ، فإن المجال التجريبي مقيد بالعلاقة التالية:

$$\text{الجبير (\%)} + \text{الأسمنت (\%)} + \text{خبث الفرن العالي (\%)} = 100\%$$

أظهرت النتائج المتحصل عليها أن إدخال أسمنت منفصل (100% أسمنت) مع محتوى عالٍ (بديل) يؤدي إلى تحسن كبير في المقاومة الميكانيكية عند 28 يوماً. المقاومة للضغط تزداد مع زيادة النسبة المئوية للإضافات إلى الحد الأمثل (66.7% أسمنت، 16.7% جير و 16.7% خبث). تحويل منحني بروكتور للتربة المستقرة بإحلال التربة بنسبة تصل إلى 15% (الجبير والأسمنت والخبث) إلى اليسار مما يشير إلى انخفاض في محتوى الماء الأولي (>13.145%). تزداد الكثافة الجافة للمخالط التي يكون استبدالها بالأسمنت أكبر من 33% ، أي حوالي 2.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة الترابية، خبث الفرن العالي، الإسمنت، الجير، الرص، المقاومة.

Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence du laitier granulé de haut fourneau sur les propriétés physico-mécaniques des bétons de terre comprimé et stabilisé par le ciment et/ou la chaux. Un plan de mélange à trois facteurs est utilisé afin de modéliser l'influence des trois ajouts sur les propriétés des BTCS aux états frais et durci. La densité et la résistance mécanique en compression à 28 jours sont étudiées. Les 3 facteurs (chaux, Ciment et Laitier de haut fourneau) sont pris en proportions massiques, dont la somme est égale à l'unité avec une substitution de l'argile qui va jusqu'à 15 % ; ce qui veut dire que ces facteurs sont dépendants les uns des autres. Le domaine expérimental est donc contraint par la relation suivante :

$$\text{Chaux (\%)} + \text{Ciment (\%)} + \text{Laitier (\%)} = 100 \%$$

Les résultats obtenus montrent que l'introduction de ciment séparé (100% de ciment) et combiné à forte teneur (en substitution) conduit à une amélioration considérable de la résistance mécanique à 28 jours. La résistance à la compression augmente avec le pourcentage d'additions jusqu'à un optimum (66.7% de ciment, 16.7% de chaux et 16.7% de laitier). La courbe Proctor de la terre stabilisée avec une substitution de la terre qui va jusqu'à 15% (chaux, ciment et laitier) est déplacée vers la gauche indiquant une réduction de la teneur en eau initial (< 13.145 %). La densité sèche augmente pour les mélanges dont la substitution par le ciment est supérieure à 33%, elle est de l'ordre de 2.

Mots Clés : Béton de terre, laitier de haut fourneau, ciment, chaux, compactage, résistance.

Abstract

The objective of this work is to study the influence of granulated blast furnace slag on the physico-mechanical properties of earth concretes compressed and stabilized by cement and/or lime. A three-factor mixing scheme is used to model the influence of the three additions on the properties of BTCS in fresh and hardened states. The density and the mechanical resistance in compression at 28 days are studied. The 3 factors (lime, cement and blast furnace slag) are taken in mass proportions, the sum of which is equal to unity with a clay substitution of up to 15%; which means that these factors are dependent on each other. The experimental domain is therefore constrained by the following relation: Lime (%) + Cement (%) + Blast Furnace Slag (%) = 100%.

The results obtained show that the introduction of separate cement (100% cement) and combined with high content (in substitution) leads to a considerable improvement in the mechanical resistance at 28 days. The compressive strength increases with the percentage of additions up to an optimum (66.7% cement, 16.7% lime and 16.7% slag). The Proctor curve of stabilized soil with soil substitution up to 15% (lime, cement and slag) is shifted to the left indicating a reduction in initial water content (<13.145%). The dry density increases for the mixtures whose substitution by cement is greater than 33%, it is of the order of 2.

Keywords: Earth concrete, blast furnace slag, cement, lime, compaction, strength.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

- ✓ Mes défunts parents ;
- ✓ Tous les membres de ma famille ;
- ✓ Tous mes amis.

REMERCIEMENTS

Je remercie Dieu de m'avoir donné la force de finir ce modeste travail de recherche dans les meilleures conditions.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à mon promoteur, Pr. MESSAOUDENE Ibrahim pour son assistance et ses précieux conseils qui ont permis de mener à bien le présent mémoire.

Je remercie également tous les techniciens et ingénieurs du laboratoire des travaux publics LTP/EST de Bordj Bou Arréridj pour m'avoir accueillie et permis d'effectuer mon projet de recherche.

Je tiens également à remercier, tous les membres de jury qui ont accepté de corriger mon mémoire.

SOMMAIRE

Résumé.....	i
Dédicaces.....	ii
Remerciements.....	iii
Sommaire.....	iv
Liste des Tableaux.....	vi
Liste des figures.....	viii
Introduction générale.....	1
Chapitre 1. Etude bibliographique sur les bétons de terre comprimée.....	2
1.1.Introduction.....	2
1.2. Les principaux modes d'utilisation de la terre en construction.....	2
1.3. La terre compactée BTC.....	4
1.4. Diversités des produits de blocs de terre comprimée.....	5
1.5. La construction en bloc de terre comprimée dans le monde.....	6
1.6. Avantage des BTC.....	6
1.7. La terre comme matériau de construction.....	8
1.8. Les propriétés du matériau terre en construction.....	11
1.8.1. Texture.....	11
1.8.2. Plasticité.....	12
1.8.3. Matière organique.....	12
1.8.4. Sulfates.....	13
1.9. Stabilisation des sols.....	13
1.9.1. Stabilisation mécanique.....	13
1.9.2. Stabilisation physique.....	15
1.9.3. Stabilisation chimique.....	16
1.10. Effet du ciment sur les caractéristiques mécaniques des BTC.....	16
1.11.Effet de la chaux sur les caractéristiques mécaniques des BTC.....	18
1.12. Effet du laitier granulé (GBFS) sur les caractéristiques mécaniques des BTC.....	19
1.13. Synthèse de l'étude bibliographique.....	21
Chapitre 2. Méthodologie Expérimentale.....	22
2.1. Introduction.....	22
2.2. Matériaux.....	22
2.2.1. Ciment.....	22
2.2.2. Chaux.....	23
2.2.3. Laitier de haut fourneau (LHF).....	23
2.2.4. Sable de dune.....	24
2.2.5. La terre.....	25
2.2.5.1. Composition granulaire.....	26
2.2.5.2. Limites d'Atterberg.....	27
2.2.5.3. Analyses physico-chimique et minéralogique de la terre.....	28

2.2.5.4. Essai Proctor Normal	28
2.2.5.5. Classification géotechnique (selon L.C.P.C)	29
2.2.5.6. Compactage statique.....	30
2.2.5.7. La cure des blocs de terre.....	31
2.3. Essai de résistance à la compression.....	31
2.3.1. Principe.....	31
2.3.2. Appareillage.....	32
2.3.3. Eprouvettes	32
2.3.3.1. Prescriptions.....	32
2.3.4. Mode opératoire.....	32
2.3.4.1. Préparation et positionnement des éprouvettes	32
2.3.4.2. Mise en charge.....	33
2.3.4.3. Evaluation des types de rupture.....	33
2.3.5. Expression des résultats.....	33
2.4. Conclusion.....	34
Chapitre 3. Résultats et discussion	35
3.1 Introduction.....	35
3.2. Formulation du béton de terre stabilisée (BTS)	35
3.3 Essais Proctor Normale	37
3.3.1. Terre	37
3.3.2. Terre + Sable	38
3.3.3. Mélange 1	39
3.3.4. Mélange 2.....	40
3.3.5. Mélange 3.....	41
3.3.6. Mélange 4.....	42
3.3.7. Mélange 5.....	43
3.3.8. Mélange 6.....	44
3.3.9. Mélange 7.....	45
3.3.10. Mélange 8.....	46
3.3.11. Mélange 9.....	47
3.3.12. Mélange 10.....	48
3.3.13. Discussion des résultats des essais Proctor normal.....	49
3.3.14. Résultats des essais à la compression.....	50
3.4. Le résultat du plan de mélange.....	51
3.4.1. Analyse de variance (ANOVA)	51
3.5. Evaluation des types de rupture.....	53
3.6. Conclusion.....	54
Conclusions générales et perspectives.....	55
Références bibliographiques	

Liste des Tableaux

Chapitre 1	
Tableau 1.1. Comparaison entre les BTC et d'autres matériaux de construction.....	7
Tableau 1.2. Résumé des différents types d'argile.....	10
Tableau 1.3. Résistance à la compression de BTCS avec (5% Ciment).....	17
Tableau 1.4. Résistance à la compression de BTCS avec (10% Ciment).....	17
Tableau 1.5 : La composition des mélanges des B.T.C.....	18
Tableau 1.6 : La composition des mélanges des B.T.C. stabilisé par laitier-ciment.....	20
Chapitre 2	
Tableau 2.1. Propriétés du ciment utilisé CEM I (CPA 42.5 R).....	23
Tableau 2.2. Caractéristiques physiques de la chaux.....	23
Tableau 2.3. Caractéristiques physiques du laitier de haut fourneau.....	24
Tableau 2.4. Composition chimique du laitier de haut fourneau.....	24
Tableau 2.5. Caractéristiques physiques du sable de dune.....	25
Tableau 2.6. Les limites d'Atterberg de la terre.....	27
Tableau 2.7. Les limites d'Atterberg du mélange (terre + 20% sable).....	27
Tableau 2.8. L'analyse chimique de la Terre (% massique).....	28
Tableau 2.9. L'analyse minéralogique de la terre.....	28
Tableau 2.10. Caractéristiques physiques de la terre.....	28
Chapitre 3	
Tableau 3.1. Proportions des facteurs dans les compositions étudiées.....	36
Tableau 3.2. Compositions des facteurs selon un plan de mélange.....	36
Tableau 3.3. Résultat de la densité sèche maximale de la Terre.....	37
Tableau 3.4. Résultat de la teneur en eau optimale de la Terre.....	37
Tableau 3.5. Résultat de la densité sèche maximale du mélange (Terre + Sable).....	38
Tableau 3.6. Résultat de la teneur en eau optimale du mélange (Terre + Sable).....	38
Tableau 3.7. Résultat de la densité sèche maximale du mélange 1.....	39
Tableau 3.8. Résultat de la teneur en eau optimale du mélange 1.....	39
Tableau 3.9. Résultat de la densité sèche maximale du mélange 2.....	40
Tableau 3.10. Résultat de la teneur en eau optimale du mélange 2.....	40
Tableau 3.11. Résultat de la densité sèche maximale du mélange 3.....	41
Tableau 3.12. Résultat de la teneur en eau optimale du mélange 3.....	41
Tableau 3.13. Résultat de densité sèche maximale du mélange 4.....	42
Tableau 3.14. Résultat de la teneur en eau optimale du mélange 4.....	42
Tableau 3.15. Résultat de densité sèche maximale du mélange 5.....	43
Tableau 3.16. Résultat de la teneur en eau optimale du mélange 5.....	43
Tableau 3.17. Résultat de la densité sèche maximale du mélange 6.....	44
Tableau 3.18. Résultat de la teneur en eau optimale du mélange 6.....	44
Tableau 3.19. Résultat de la densité sèche maximale du mélange 7.....	45
Tableau 3.20. Résultat de la teneur en eau optimale du mélange 7.....	45
Tableau 3.21. Résultat de la densité sèche maximale du mélange 8.....	46
Tableau 3.22. Résultat de la teneur en eau optimale du mélange 8.....	46
Tableau 3.23. Résultat de la densité sèche maximale du mélange 9.....	47
Tableau 3.24. Résultat de la teneur en eau optimale du mélange 9.....	47
Tableau 3.25. Résultat de la densité sèche maximale du mélange 10.....	48
Tableau 3.26. Résultat de la teneur en eau optimale du mélange 10.....	48

Tableau 3.27. Les résultats d'essais Proctor Normal.....	49
Tableau 3.28. Résultat de la résistance à la compression à 28 jours.....	50
Tableau 3.29. ANOVA pour la résistance à la compression à 28 jours.....	51

Liste des Figures

Chapitre 1	
Figure 1.1. Maisons en pise.....	3
Figure 1.2. La technique du torchis.....	3
Figure 3.3. Production manuelle des adobes avec un moule en bois.....	4
Figure 1.4. Construction en BTC (Sources Internet).....	4
Figure 1.5. Maison Construite en BTC en Rhône–Alpes.....	4
Figure 1.6. Différents produits de blocs de terre comprimée.....	5
Figure 1.7. Constructions réalisées en blocs de terre comprimée.....	6
Figure 1.8. Structures feuillet des argiles.....	9
Figure 1.9. Agencement des couches octaédriques et tétraédriques.....	10
Figure 1.10. Fuseaux granulaires adoptés pour différentes techniques de construction en terre.....	11
Figure 1.11. Les zones des limites d’Atterberg de la construction en terre.....	12
Figure 1.12. Influence de la contrainte de compactage et la teneur en chaux sur les résistances mécaniques.....	14
Figure 1.13. Influence de la granularité sur la compacité.....	15
Figure 1.14. Absorption totale en fonction de la teneur en sable.....	16
Figure 1.15. Evolution de la résistance en fonction de taux de sable.....	17
Figure 1.16. Evolution de la résistance en fonction de taux de sable.....	18
Figure 1.17. Résistance en compression sèche en fonction du dosage en chaux.....	19
Figure 1.18. Résistance en compression humide en fonction du dosage en chaux.....	19
Figure 1.19. Evolution de la résistance à la compression sèche en fonction de l’âge de durcissement.....	20
Figure 1.20. Evolution de la résistance à la compression humide en fonction de l’âge de durcissement.....	20
Chapitre 2	
Figure 2.1. Echantillon de ciment CEM I (CPA 42.5 R).....	22
Figure 2.2. Echantillon de la chaux.....	23
Figure 2.3. Echantillon de laitier de haut fourneau (LHF).....	24
Figure 2.4. Echantillon de sable de dune.....	24
Figure 2.5. Courbe granulométrique du sable de dune.....	25
Figure 2.6. Echantillon de la terre.....	25
Figure 2.7. Courbe granulométrique de la terre.....	26
Figure 2.8. Essai de limite d’Atterberg.....	27
Figure 2.9. Essai Proctor Normal de la terre.....	29
Figure 2.10. Classification de la terre selon le diagramme de Casagrande.....	29
Figure 2.11. Classification du mélange (Terre + 20 % sable) selon le diagramme de Casagrande.....	30
Figure 2.12. Compactage statique de la terre.....	31
Figure 2.13. Ruptures correctes d’éprouvettes cylindriques.....	34
Figure 2.14. Exemples de ruptures incorrectes d’éprouvettes cylindriques.....	34
Chapitre 3	
Figure 3.1. Substitution de la terre par les trois (3) paramètres.....	35
Figure 3.2. Courbe ternaire des dix (10) mélanges à trois (3) paramètres.....	36
Figure 3.3. La courbe Proctor de la Terre.....	37
Figure 3.4. La courbe Proctor du mélange (Terre + Sable).....	38
Figure 3.5. La courbe Proctor du mélange 1.....	39
Figure 3.6. La courbe Proctor du mélange 2.....	40
Figure 3.7. La courbe Proctor du mélange 3.....	41

Figure 3.8. La courbe Proctor du mélange 4.....	42
Figure 3.9. La courbe Proctor du mélange 5.....	43
Figure 3.10. La courbe Proctor du mélange 6.....	44
Figure 3.11. La courbe Proctor du mélange 7.....	45
Figure 3.12. La courbe Proctor du mélange 8.....	46
Figure 3.13. La courbe Proctor du mélange 9.....	47
Figure 3.14. La courbe Proctor du mélange 10.....	48
Figure 3.15. Les courbes Proctor des dix (10) mélanges.....	49
Figure 3.16. Evolution de la résistance à la compression des dix (10) mélanges.....	51
Figure 3.17. Graphique de distribution de probabilité normale pour la résistance à la compression à 28jours.....	53
Figure 3.18. Courbes ternaires de la résistance à la compression à 28 jours.....	53
Figure 3.19. Le mode de rupture des dix mélanges.....	54

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Le Béton de Terre Compressé et Stabilisé (BTCS) est un produit répondant parfaitement aux enjeux et contraintes actuels connus dans le monde du bâtiment. Par sa disponibilité et sa simplicité de mise en œuvre (maçonnerie classique), il peut constituer une solution alternative aux habituels blocs de ciment creux et permettre ainsi de renforcer l'aspect environnemental de l'opération en utilisant un matériau peu cher, résistant aux contraintes de la majorité des sollicitations en apportant des solutions sur le plan de la gestion de l'humidité et de la qualité de l'air intérieur et surtout durable puisque ne nécessitant que peu d'émissions de CO₂ lors de sa fabrication et pouvant être produit partout où la terre se trouve [1].

La norme ARS 670–1996 [2] définit les BTC comme des éléments de maçonnerie de dimensions réduites et de caractéristiques régulières, contrôlées et obtenues par compression statique ou dynamique de la terre à l'état humide suivie d'un démoulage immédiat.

La terre est composée de matériaux inertes (graviers, sables) et de matériaux actifs (argiles). Les premiers jouent un rôle de squelette et les seconds celui de liant, tel un ciment. La terre a donc une structure comparable à celle du béton avec un liant différent.

Pour améliorer la résistance des constructions en terre, plusieurs recherches ont employé des techniques différentes. La technique la plus récente est la construction en terre stabilisée par des ajouts chimiques et/ou par stabilisation mécanique. La stabilisation d'un sol mélangé au ciment ou à la chaux, compacté, apporte des solutions aux problèmes de durabilité du matériau terre et permet de l'utiliser ensuite dans la construction comme une excellente alternative aux autres matériaux tels que le béton et produire ainsi des matériaux de qualité et économiques.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence du laitier granulé de haut fourneau sur les propriétés physico-mécaniques des bétons de terre comprimé et stabilisé par le ciment et/ou la chaux. Ainsi, Notre travail est scindé en trois (03) chapitres précédés par une introduction générale et se termine par une conclusion générale et perspective. Le premier chapitre est une synthèse bibliographique sur le BTC. Le deuxième chapitre porte sur l'identification et la caractérisation des matériaux qui ont été utilisés et enfin le troisième chapitre présente les résultats expérimentaux et discussions.

CHAPITRE I
ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES
BETONS DE TERRE COMPRIMEE (BTC)

Chapitre 1. Etude Bibliographique sur les BTC

1.1 Introduction

Depuis des millénaires, l'homme utilisait une source naturelle, la terre crue comme l'un des principaux matériaux de construction. Aujourd'hui encore, plus d'un tiers des habitants de la planète vit dans des bâtiments en terre [3]. C'est un matériau économique facile à utiliser, la technologie de construction n'était pas encore développée. Dans la construction, le sol a été souvent compacté sous forme de blocs pour améliorer ses caractéristiques telles que la résistance mécanique, les isolations, thermique et acoustique, etc. Pour cela, les sols argileux ont été couramment utilisés, ils présentent de bonnes propriétés de cohésion [4]. Il existe de nombreuses techniques de construction en terre. Chacune de ces techniques est rattachée à un lieu géographique défini, un climat donné et selon les additifs disponibles localement. Parmi ces techniques, celle de la brique de terre comprimée (BTC) qui procure aux constructions une durabilité plus grande par rapport à la technique de l'adobe. Aujourd'hui, nombreux sont les chercheurs qui étudient les propriétés mécaniques et hygrothermiques des terres pour la construction [5].

1.2 Les principaux modes d'utilisation de la terre en construction

Il existe diverses techniques de construction en terre crue. Dans certains cas, la terre est amendée de fibres essentiellement végétales pour limiter les fissurations de retrait ou augmenter ses propriétés isolantes. On distingue les parois monolithiques et celles faites à base de briques [6]. Les techniques de construction les plus répandues sont : l'adobe, le torchis, le pisé et les briques de terre comprimée (BTC).

▪ Le Pisé

Le pisé est une terre damée dans des coffrages. Il est utilisé pour construire des murs monolithiques en compactant les couches successives de terre humide à l'intérieur des coffrages. Le mur est décoffré immédiatement après que la terre a été damée. L'épaisseur des murs en pisé peut varier de 30 à 120 cm et en moyenne de 50 cm. Le séchage du mur en pisé se fait lentement par l'évaporation d'eau sur ses surfaces (façades extérieure et intérieure) et peut durer de 1 à 2 ans. La figure 1.1 présente les étapes principales lors d'une construction

d'un mur en pisé : installation coffrages ; coulage ; compactage des différentes couches et décoffrage [7].



Figure 1.1 : Maisons en pisé [7].

▪ Le Torchis

Le torchis est constitué d'une structure portante en bois remplie d'un mélange terre-fibre (usuellement de la paille). La terre est malaxée avec un ajout d'eau afin d'obtenir un matériau plastique qui est ensuite plaqué sur le lattis de façon à le recouvrir complètement (Figure 1.2). Après séchage, il est généralement enduit de terre, parfois stabilisée à la chaux ou avec un mélange chaux-sable. L'ajout de fibres permet d'éviter la fissuration du mélange au séchage, et la stabilité de la structure et la résistance aux intempéries [8].



Figure 1.2. (a) La technique du torchis ; (b) Une construction en torchis à Angers, France. [8]

▪ L'adobe

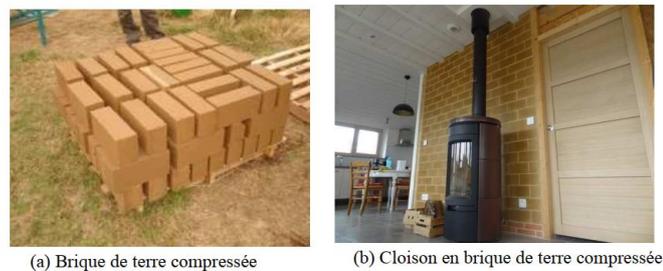
L'adobe est constitué d'un mélange de terre argileuse, de paille et d'eau. A l'époque, les briques d'adobe étaient moulées à la main. Actuellement, on utilise des moules en bois (Figure 1.3) ou en acier de taille variée. La production des briques se fait manuellement, moulage et séchage au soleil (Figure 1.3) [9].



Figure 1.3. Production manuelle des adobes avec un moule en bois [9].

1.3. La terre compactée BTC

Les blocs de terre comprimée qui sont des formes évolutives et modernisées des blocs d'adobe font partie des techniques de construction en terre crue les plus récentes. Au lieu qu'ils soient moulés à la main dans un cache en bois, les blocs sont obtenus par compactage de la terre légèrement humide dans un moule métallique au moyen d'une presse. Comparé aux adobes, les BTC présentent une meilleure résistance à la compression et une insensibilité à l'eau plus élevée. Les briques de terre compactée sont stabilisées le plus souvent à la chaux ou ciment (de 6 à 8% en masse sec le reste est composé de terre crue) [10]. Les BTC peuvent être utilisés comme murs porteurs, cloisons, voûtes, arc, coupoles, fours à pain, poêles, etc. tant à l'intérieur qu'à l'extérieur du bâtiment (Figures 1.4 et 1.5).



(a) Brique de terre compressée

(b) Cloison en brique de terre compressée

Figure 1.4. Construction en BTC [11].



Figure 1.5. Maison Construite en BTC en Rhône-Alpes [11].

1.4. Diversités des produits de blocs de terre comprimée

Aujourd'hui, le marché accueille une large gamme de produits de terre comprimée (Figure 1.6):

- ✓ **Blocs pleins** : de forme prismatique (parallélépipèdes, cubes, hexagones multiples, etc.). Leur usage est très varié.
- ✓ **Blocs creux** : 15% à 30 % de creux avec des procédés sophistiqués. Les évidements créés au sein des blocs améliorent l'adhérence du mortier et allègent les blocs.
- ✓ **Blocs alvéolaires** : légers mais exigent des moules assez sophistiqués ainsi que des pressions de compression plus forte que la normale.
- ✓ **Blocs à emboitements** : permettent de se passer de mortier mais exigent des moules assez sophistiqués et en général des pressions de compression plus ou moins élevées.
- ✓ **Blocs parasismiques** : leur forme améliore leur comportement parasismique ou permet une meilleure intégration de systèmes structuraux parasismiques.
- ✓ **Blocs spéciaux** : fabriqués exceptionnellement pour une application spécifique.



Figure 1.6. Différents produits de blocs de terre comprimée [12].

1.5. La construction en bloc de terre comprimée dans le monde

Plusieurs constructions ont été réalisées en blocs de terre comprimée à travers les quatre coins du monde (Figure 1.7), profitant des avantages de cette technique moderne, que ce soit sur le plan économique, écologique, esthétique, thermique et environnemental. On peut citer ici quelques exemples fascinants : Qasbah, Sud Maroc ; Mosquée de Djenné (Mali) ; Château Escoffier, France et Mausolée, Inde [13].



Figure 1.7. Constructions réalisées en blocs de terre comprimée [13].

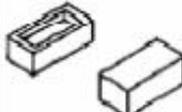
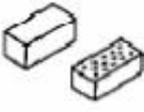
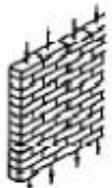
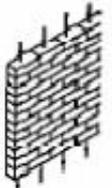
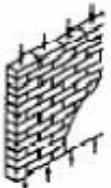
1.6. Avantage des BTC

Les BTC présentent certains avantages par rapport aux autres techniques de construction en terre crue. Si on compare la technique des BTC à la technique du pisé, la première (c.-à-d. les BTC) permet d'étaler la fabrication sur une période plus longue tout en diminuant la fissuration des murs grâce à un retrait de séchage s'effectuant sur chaque brique et non sur toute la longueur du mur en pisé. En outre, les BTC permettent une plus grande liberté dans la conception architecturale ainsi que dans la mise en œuvre. Si on compare la technique des

BTC à la technique des briques d'adobe, la première permet d'utiliser une aire de fabrication, séchage et stockage de surface moins importante que dans le cas de l'adobe grâce à une superposition immédiate des briques.

De plus, suite à l'utilisation de presses pour la fabrication des BTC, les briques sont de formes plus régulières et ont un fini meilleur. Les presses permettent également de produire des blocs aux formes diverses grâce au système de moules. La stabilisation n'est pas obligatoire pour le bloc entier : on peut choisir de ne stabiliser que la surface extérieure des briques. Les BTC présentent également une résistance à la compression supérieure à celle des adobes. Par contre, pour les deux comparaisons, les BTC demandent un temps de fabrication plus long ainsi que la possession d'une presse au prix souvent élevé et une main d'œuvre professionnelle. Si on compare maintenant les BTC à des blocs de sable-ciment, les premiers « offrent une plus grande capacité d'opposition à l'infiltration directe ou par capillarité de l'eau de pluie ou de ruissellement [14]. Le tableau 1.1 présente une comparaison entre les BTC et d'autres matériaux de maçonnerie.

Tableau 1.1. Comparaison entre les BTC et d'autres matériaux de construction [15]

Caractéristiques	Unité	BTC	Briques cuites	Adobes	Blocs en béton
FORME ET TAILLE					
Type					
L x l x h	cm	29,5 x 14 x 9	22 x 10,5 x 8,5	40 x 20 x 10	40 x 20 x 15
ASPECT - Surface - Intérêt esthétique		lisse moyen à bon	rugueuse à lisse bon à excellent	irrégulière pauvre	rugueuse moyen
PERFORMANCES - Résistance en compression	Mpa	1 à 4	0,5 à 6	0 à 5	0,7 à 5
humide		0,02 à 0,2	0 à 0,02	-	0,02 à 0,05
- Dilatation thermique réversible	%	0,81 à 1,04	0,7 à 1,3	0,4 à 0,8	1,0 à 1,7
- Isolation thermique	W/m°C	1 700 à 2 200	1 400 à 2 400	1 200 à 1 700	1 700 à 2 200
- Masse volumique apparente	kg/m ³	faible à très bonne	faible à excellente	faible	faible à très bonne
- Durabilité					
EMPLOI EN MAÇONNERIE		porteur  sans enduit	porteur  sans enduit	porteur  avec enduit	remplissage  avec enduit

1.7. La terre comme matériau de construction

Généralement les sols sont constitués de minéraux suivants : le quartz, les argiles les feldspaths, les micas, les carbonates (calcite et dolomite), les oxydes et hydroxydes métalliques dont l'hématite, la goethite et la limonite pour le fer, le gypse.

Ces minéraux se présentent généralement dans les sols sous forme de :

- Grains polygonaux dont la taille se situe entre quelques microns et quelques millimètres ;
- Lamelles pour les argiles dont la plus grande dimension ne dépasse pas quelques microns;
- Agrégats correspondant à des fragments de roches. Leurs formes résultent de la morphologie des minéraux qui les constituent [16]. Vu l'importance des argiles comme liant dans la fabrication des BTC, et pour pouvoir analyser les mécanismes responsables des modifications qui apparaissent dans le sol traité, il est utile de rappeler certaines propriétés physico-chimiques des argiles.

Les argiles sont des produits de décomposition des roches siliceuses, par dégradation physique et mécanique puis par altération chimique [17]. Elles tirent essentiellement leurs origines d'altération chimique de certains minéraux composant les minéraux parent [18].

Les argiles ont une origine géologique secondaire [19], elles ont été formées par la dégradation des roches ignées (volcaniques) due à des phénomènes d'érosion et d'altération chimique sous l'action des agents atmosphériques [20].

Actuellement, il n'existe pas de définition unique du terme argile. Le mot argile englobe deux commutations, l'une liée à la taille des grains ($<2\mu\text{m}$) et l'autre à la minéralogie [21]. Ce sont des silicates et aluminates hydratés d'une structure feuillet qu'on appelle phyllo-silicates.

Ils sont organisés en couches planes infinies constituées d'unités structurales tétraédriques (T) et octaédriques (O) reliées par leurs sommets. Ce type de structure à très grande surface spécifique associée à des caractéristiques physico-chimiques très particulières, explique la capacité des argiles à admettre de nombreux échanges de cations et d'anions dans le réseau ou adsorbés en surface.

On distingue 5 niveaux d'organisation :

- 1- Les plans sont constitués par les atomes

2- Les couches tétraédriques (T) principalement siliceuses ou octaédriques (O) principalement alumineuse, sont formées par une combinaison des plans

3- Les feuillets correspondent à des combinaisons des couches

4- L'espace inter-foliaire : c'est le vide séparant deux feuillets de même structure, il peut être occupé par des cations (éventuellement hydraté) [21].

5- Le cristal résulte de l'empilement de plusieurs couches (Figures 1.8 et 1.9) [22, 23].

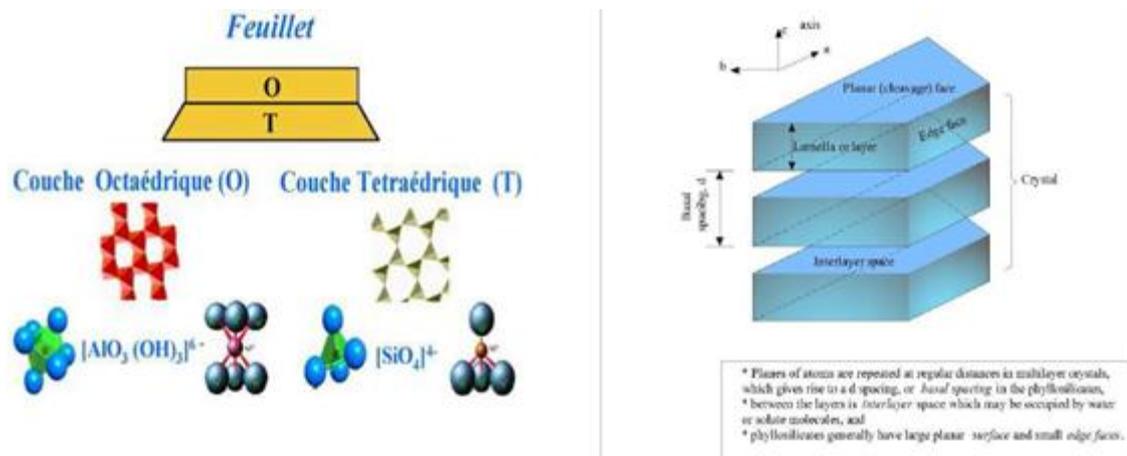


Figure 1.8. Structure feuillet des argiles [22, 23].

En mécanique de sol, on distingue trois grandes familles d'argiles :

- **Groupe 1:1**, les kaolinites ou T–O (1 couche octaédrique et 1 couche tétraédrique) équidistance voisine de 7 Å.
- **Groupe 2:1**, les micas ou T–O–T (1 couche octaédrique insérée entre 2 couches tétraédriques) équidistance variable entre 9 et 15 Å, suivant le remplissage ou non de l'espace inter-foliaire;
- **Groupe 2:1:1**, la famille des smaltites ou T–O–T est similaire au type précédent mais l'espace inter-foliaire est occupé par une couche d'octaèdre brucitique (cation octaédrique = Mg) ou gibbsitique (cation octaédrique = Al). L'équidistance caractéristique est alors de 14Å environ.

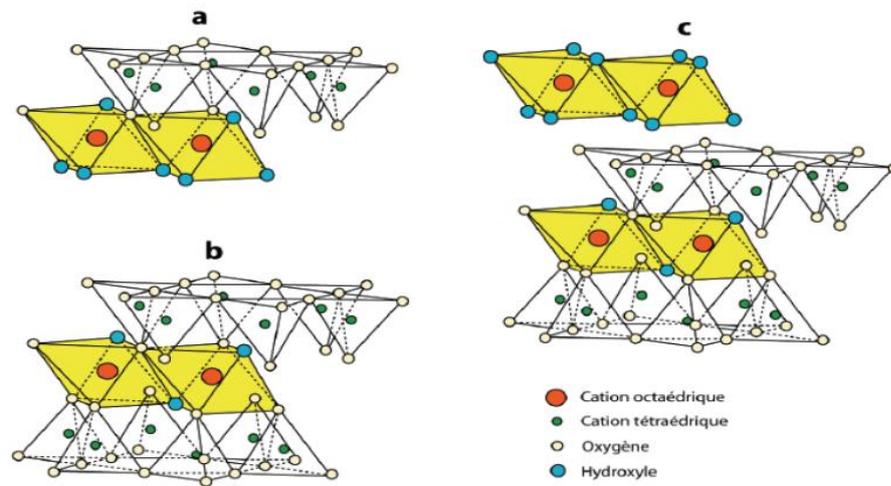


Figure 1. 9. Agencement des couches octaédriques et tétraédriques [23].

(a) feuillet de type 1:1, (b) feuillet de type 2:1,
(c) feuillet de type 2:1:1 avec une couche brucitique ou gibbsitique

Le tableau 1.2 résume les trois familles d'argiles présentées ainsi que leurs formules chimiques :

Tableau 1.2. Résumé des différents types d'argile [23]

Type de l'argile	Combinaison des feuillets	Formule chimique	Espace interfoliaire
Kaolinite	T-O	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	Liaison hydrogène forte
Illite	T-O-T	$(K,H_3O)(Al,Mg,Fe)_2(Si,Al)_4O_{10}[(OH)_2,(H_2O)]$	Présence de K^+
Montmorillonite (Famille des smectites)	T-O-T	$(Na,Ca)_{0.3}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2.nH_2O$	Présence ou pas des cations hydratés (Na^+ et Ca^+)

1.8. Les propriétés du matériau terre en construction

1.8.1 Texture

Les retours d'expérience sur les techniques de construction en terre permettent de définir des fuseaux granulaires de référence. Il est très important de respecter la teneur minimale en argile pour toutes les techniques voir la (Figure 1.10). Il pourrait être établi à 5%. Le pourcentage commun d'argile à toutes les recommandations était trouvé dans les gammes comprises entre 10% et 22% pour les BTC et entre 10% à 15% pour le pisé. Cependant, la teneur en limon entre 10% à 25% pour le BTC [24]. Doat et al [25], démontrent qu'une fraction trop importante en silt provoque après séchage des BTC un retrait trop important et qu'une fraction trop importante d'élément de taille plus grosse diminue les performances des BTC à cause du manque d'argile et de cohésion. Guettala et al [26], montrent qu'il est nécessaire de bien fragmenter le sol cohésif car il existe une taille critique pour les mottes de sols argileux. Au-delà d'une taille de 5mm, ces mottes d'argiles diminuent les résistances mécaniques du sol traité.

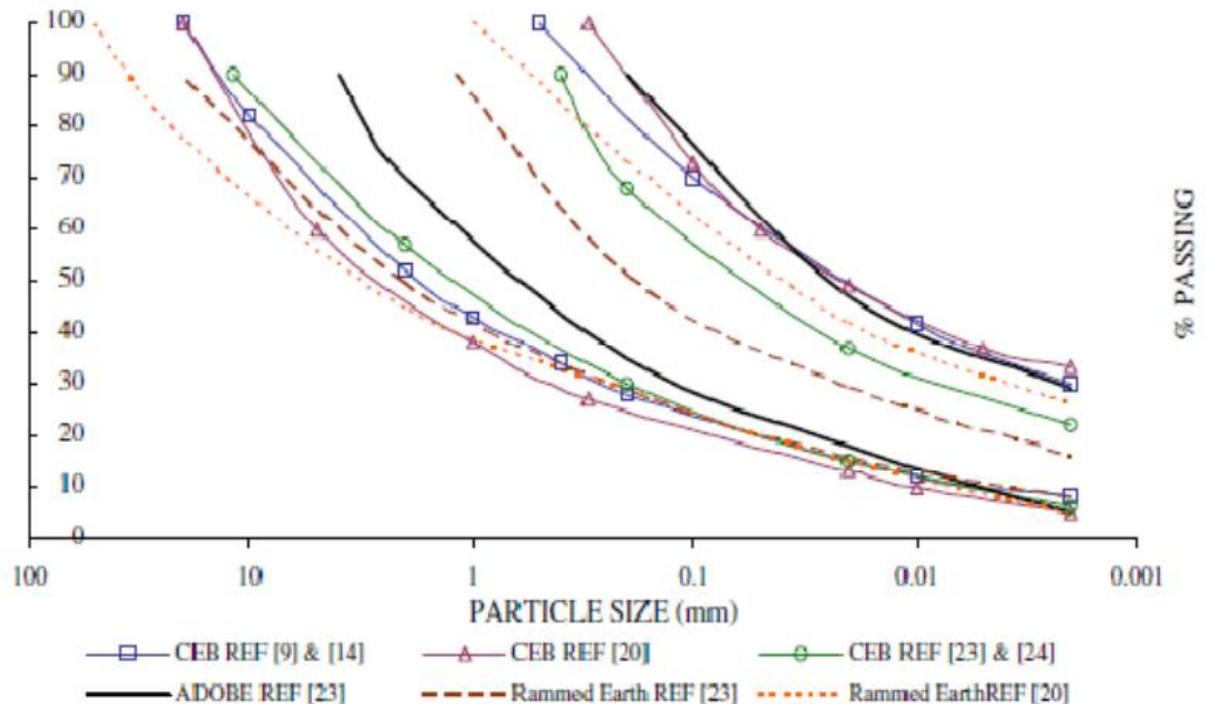


Figure 1.10. Fuseaux granulaires adoptés pour différentes techniques de construction en terre [24].

1.8.2. Plasticité

La plasticité est la capacité des matériaux de maintenir une déformation sans se rompre. Elle est l'un des états de la cohérence des sols. La figure 1.11 représente les zones des limites d'Atterberg de la construction en terre. La plasticité est similaire pour le pisé et les blocs de terre comprimée, en revanche l'utilisation de la terre en adobe demande une limite de liquidité et un indice de plasticité plus important par rapport à des techniques de construction plus sèche comme le BTC ou le mur en pisé. En général, une bonne terre de construction ayant un indice de plasticité (IP) compris entre 16% à 28 % et une limite de liquidité (LL) entre 32% à 46% [24].

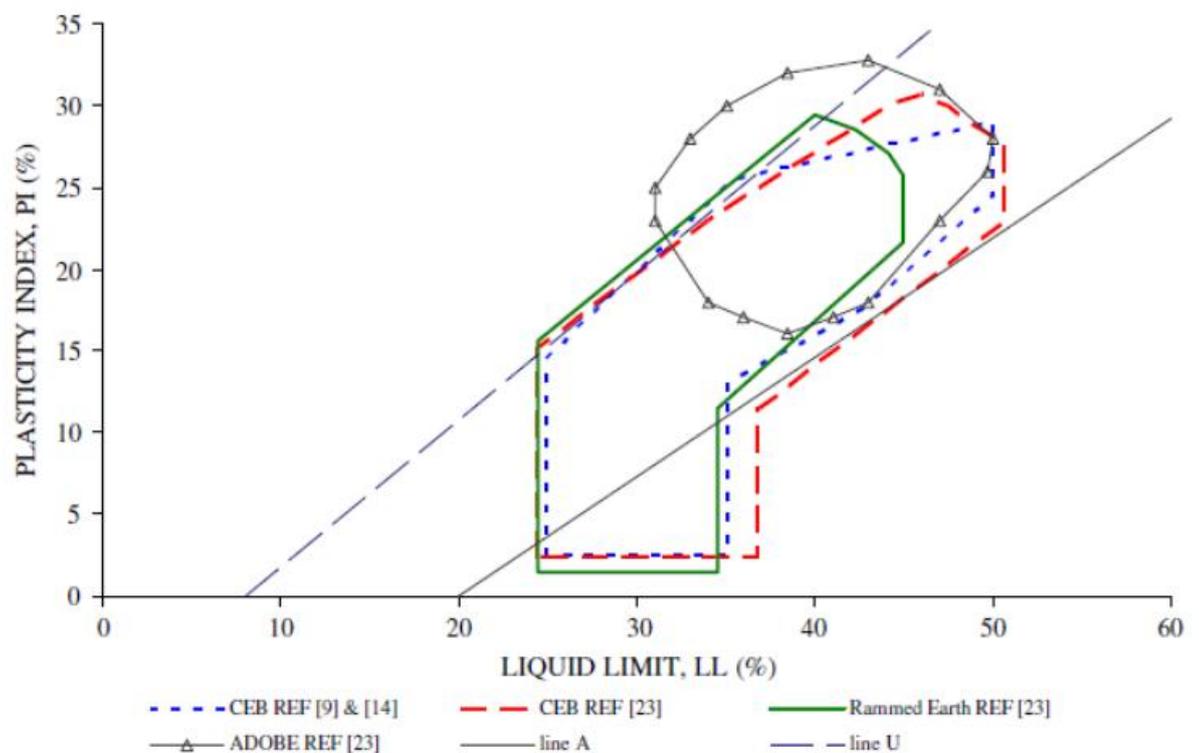


Figure 1.11. Les zones des limites d'Atterberg de la construction en terre [24].

1.8.3. Matière organique

Dans le sol, le terme matière organique regroupe l'ensemble des constituants organiques morts ou vivants, d'origine végétale, animale ou microbienne, fermentés ou non, présents dans le sol. Leurs effets sont négatives en retardant la réaction pouzzolanique car elles enveloppent la surface de l'argile et gênent ainsi la réaction chaux-argile. Selon Guillaud et

Houben [27], la matière organique supérieure à 1% dans le sol représente un danger potentiel. Vénuat [28] a proposé un autre seuil de 2% de la matière organique à ne pas dépasser pour le traitement d'un sol.

1.8.4. Sulfates

Les sols peuvent contenir des quantités variables de sulfate qui peuvent entraîner dans certaines conditions (taux de sulfate, solubilité du sulfate, concentration) des gonflements par formation d'ettringite. Les minéraux de sulfure s'oxydent et réagissent avec d'autres minéraux contenus dans le sol pour former des sulfates. Cette transformation induit une augmentation du volume (expansion) en raison des variations dans la structure atomique en plus d'adjonction d'eau acide à la structure minérale. Guillaud et Houben [27] ont conseillé de faire une étude spécifique pour les terres contenant plus de 2% à 3% de sulfates.

1.9 Stabilisation des sols

La stabilisation est un processus de modification des propriétés du matériau de base afin d'en augmenter les performances. Elle peut être mécanique, Chimique ou physique suivant l'usage que l'on fait des briques. L'objectif étant surtout d'améliorer la tenue mécanique et la tenue à l'eau, elle vise à augmenter la cohésion des particules et à réduire le volume des vides entre les particules solides. Une bonne stabilisation du matériau, notamment vis-à-vis de l'eau, est primordiale, car elle permet de faire face aux manques de dispositifs constructifs associés à la protection (débords de toitures importants, protection contre les jets d'eau, soubassement suffisamment élevé et drainage en pied de mur et aux badigeonnages [29].

1.9.1. Stabilisation mécanique

Elle s'opère par compactage de la terre qui modifie sa compressibilité et sa densité, sa perméabilité et sa porosité. Le compactage permet d'obtenir un matériau aux caractéristiques mécaniques élevées, cependant ces matériaux restent très sensibles à l'eau. Mise au contact avec l'eau, les matériaux redeviennent plastiques et ne résistent plus du tout à la compression. C'est pourquoi le compactage est un moyen de stabilisation généralement associé à d'autres méthodes telles que la stabilisation chimique. Il est le plus souvent influencé par trois caractéristiques : le mode, l'énergie et la texture de la terre [30].

✓ Mode de compactage

Il existe quatre principales méthodes de compression : la compression statique, la compression dynamique par vibration, la compression dynamique par impact et la compression par pétrissage. À chacune de ces méthodes de compression correspond un mode de production ou de mise en œuvre du matériau terre [27]. Le compactage dynamique permet d'obtenir une résistance plus importante de 50% par rapport à la vibro-compression et de 20% par rapport à la compression statique [31].

✓ Energie de compactage

Les recherches concernant l'énergie de compactage montrent qu'une plus grande énergie diminue la teneur en eau et augmente la densité sèche, mais que de trop fortes d'énergies peuvent être néfastes : effets de laminage du matériau. L'étude menée par Guettala et al. [32], montre que les résistances mécaniques augmentent en fonction de la contrainte de compactage (pression) jusqu'à un optimum de 17.5MPa qui donnera la meilleure résistance, au-delà de cette valeur il y a une chute de résistance (figure 1.12).

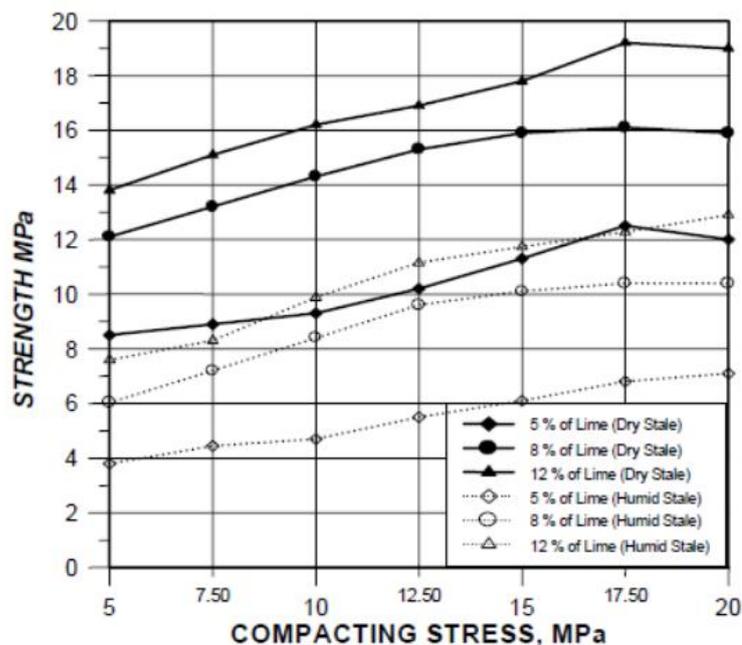


Figure 1.12. Influence de la contrainte de compactage et la teneur en chaux sur les résistances mécaniques [32].

✓ Texture de la terre

Les granularités étroites ne donnent pas de fortes compacités alors que les granularités étalées donnent des courbes de compactage aplaties avec un maximum peu accentuées (figure 1.13).

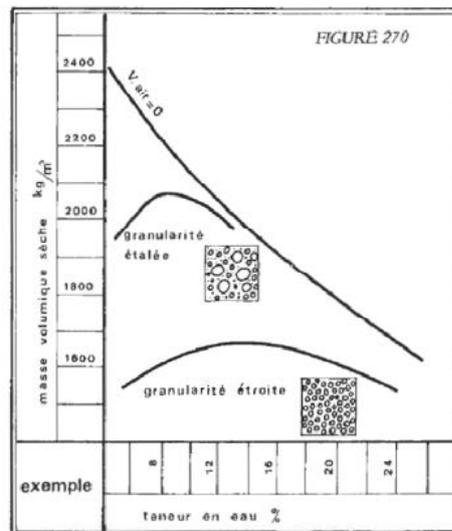


Figure 1. 13. Influence de la granularité sur la compacité [33].

1.9.2. Stabilisation physique

La stabilisation physique peut se faire de deux façons différentes : soit de modifier les propriétés des sols par une amélioration des caractéristiques du matériau par correction de la granularité. Dans ce cas on intervient directement sur la texture, le mélange obtenu conduit selon le cas, à la diminution de la plasticité du matériau de base par l'ajout de sable, ou à lui donner une certaine cohésion par l'ajout des fines. Soit d'ajouter des fibres végétales à des terres argileuses. Cela renforce la structure du matériau en l'empêchant de se fissurer au moment du retrait de l'argile lorsque la terre sèche.

Izemmouren [30, 34] a étudié l'influence de la concentration du sable sur la durabilité des briques de terre comprimée. La stabilisation des briques est obtenue par la correction granulométrique réalisée par deux types de sable concassé. Les résultats montrent que les résistances mécaniques à l'état sec et humide augmentent en fonction de la concentration du sable. Cependant, pour l'absorption totale, la concentration du sable ne présente pas d'écart

important par rapport à la terre seule mais, cette concentration à une valeur optimale (30%) qui donne une absorption minimale pour les deux types de sol (Figure 1.14).

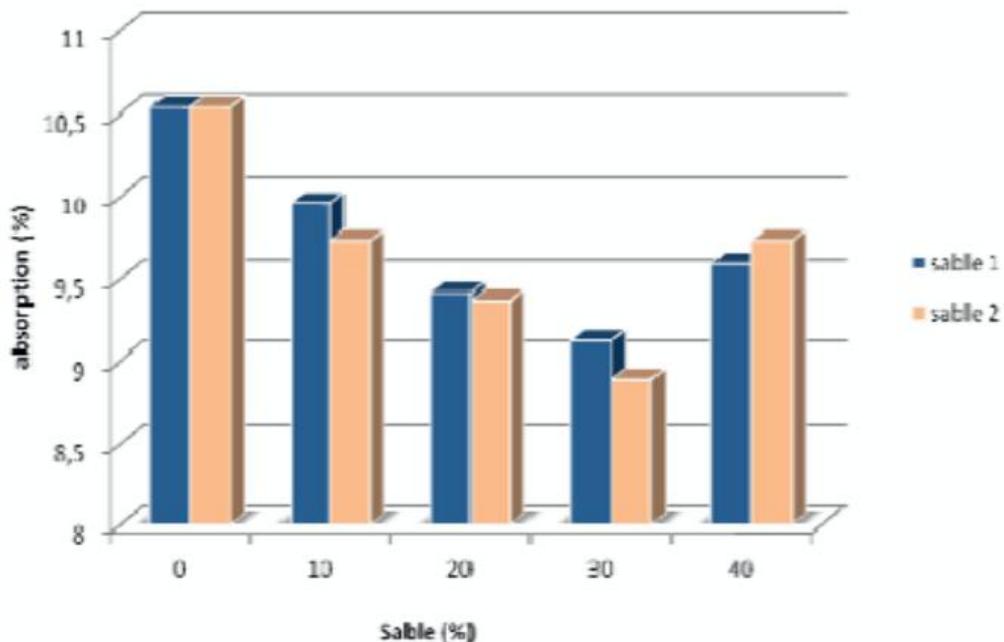


Figure 1.14. Absorption totale en fonction de la teneur en sable [34].

1.9.3 Stabilisation chimique

La stabilisation chimique favorise l'ajout d'additifs dans le sol naturel d'origine pour former de nouveaux matériaux cimentaires améliorant ainsi les propriétés de sol (moins de gonflement, une meilleure plasticité et maniabilité et une meilleure portance).

De nombreuses substances chimiques telles que la chaux, le ciment, le chlorure de calcium (CaCl_2), le chlorure de sodium (NaCl) et divers composants de silicate ont été utilisées dans le passé pour stabiliser chimiquement les sols. La chaux et le ciment sont les deux additifs largement employés dans la stabilisation chimique des sols argileux [35].

1.10 Effet du ciment sur les caractéristiques mécaniques des BTC

Messaadi et Zaidi (2019) [36] ont étudiés le béton de terre comprimé et stabilisé par deux taux différents de ciments (5% et 10% par rapport au mélange sec : tableaux 1.3 et 1.4) avec une

contrainte de compactage de 20MPa. Ils ont montré que la résistance à la compression est plus grande avec un taux plus grand de ciment.

Les tableaux 1.3 et 1.4 et les figures 1.15 et 1.16 résument les résultats obtenus.

a / Dosage en ciment 5%

Tableau 1.3. Résistance à la compression de BTCS avec (5% Ciment) [36]

BTC	Argile (%)	Sable (%)	Ciment (%)	Rc28j (MPa)
B1	95%	0%	5%	3.71
B2	75%	20%	5%	5.84
B3	55%	40%	5%	5.78
B4	35%	60%	5%	5.76
B5	15%	80%	5%	2.36

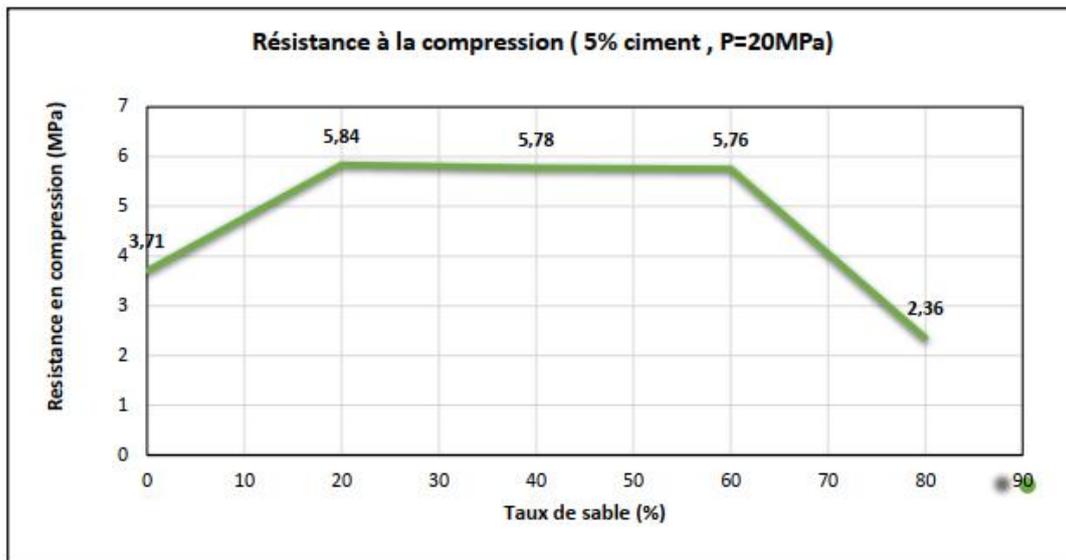


Figure 1.15. Evolution de la résistance en fonction de taux de sable [36].

b / Dosage de ciment 10%

Tableau 1.4. Résistance à la compression de BTCS avec (10% Ciment) [36]

BTC	Argile (%)	Sable (%)	Ciment (%)	Rc28j (MPa)
B1	95%	0%	10%	10.38
B2	75%	20%	10%	8.14
B3	55%	40%	10%	8.93
B4	35%	60%	10%	9.72
B5	15%	80%	10%	5.07

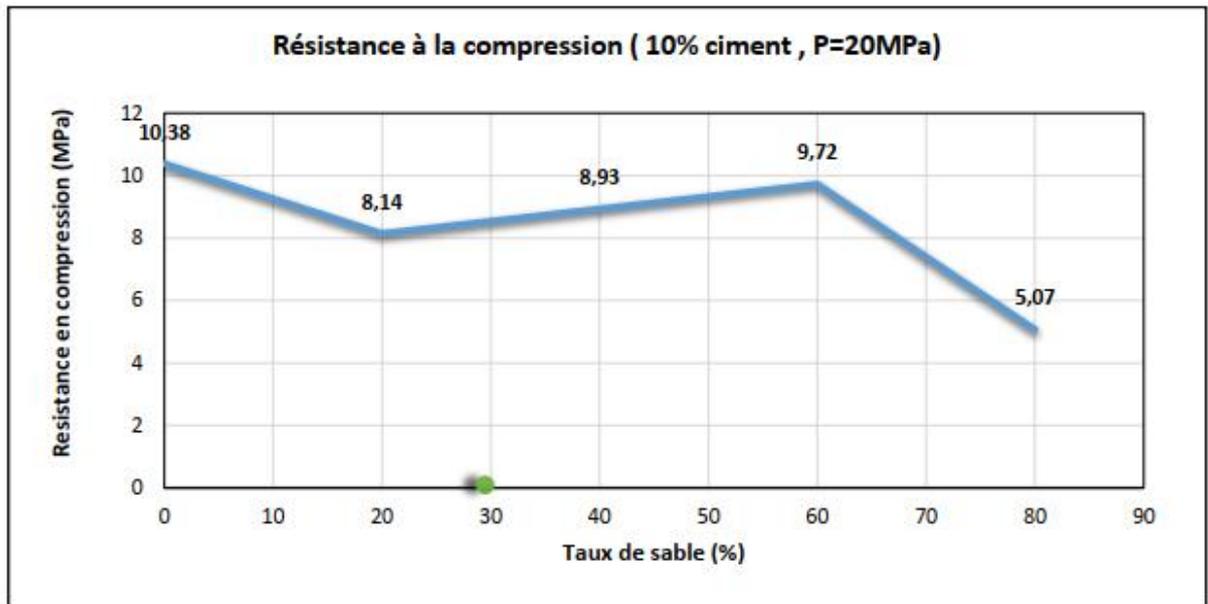


Figure 1.16. Evolution de la résistance en fonction de taux de sable [36].

1.11 Effet de la chaux sur les caractéristiques mécaniques des BTC

Izemmouren et al., [37] ont montré que le traitement à la chaux des blocs de terre comprimée et durcie par vapeur améliore les caractéristiques mécaniques spécialement la résistance en compression humide (Tableau 1.5 et Figures 1.17 et 1.18).

Tableau 1.5. La composition des mélanges des B.T.C [37]

Sol + Sable (%)	94	90	86
Chaux	6	10	14

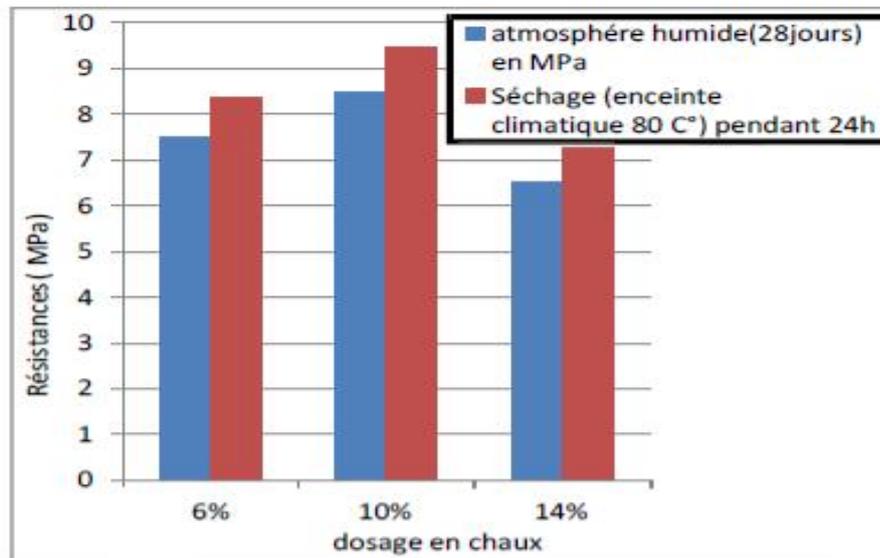


Figure 1.17. Résistance en compression sèche en fonction du dosage en chaux [37].

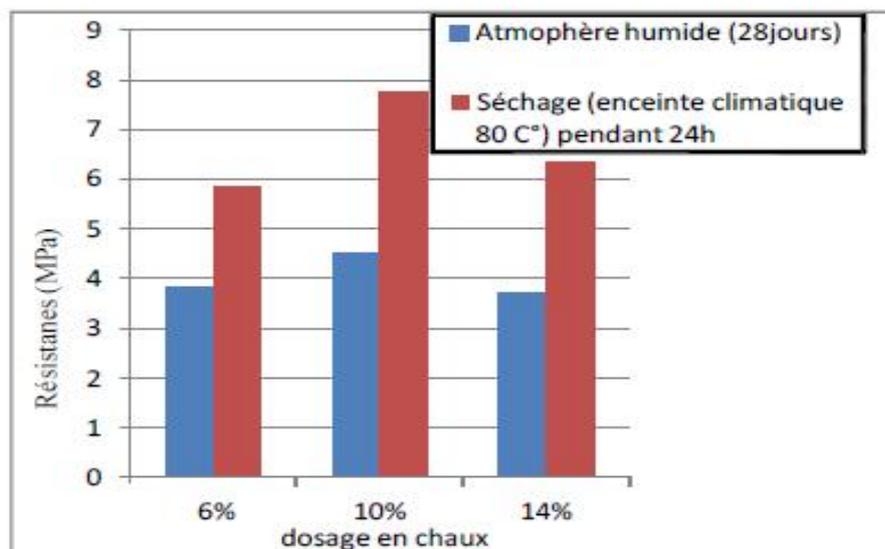


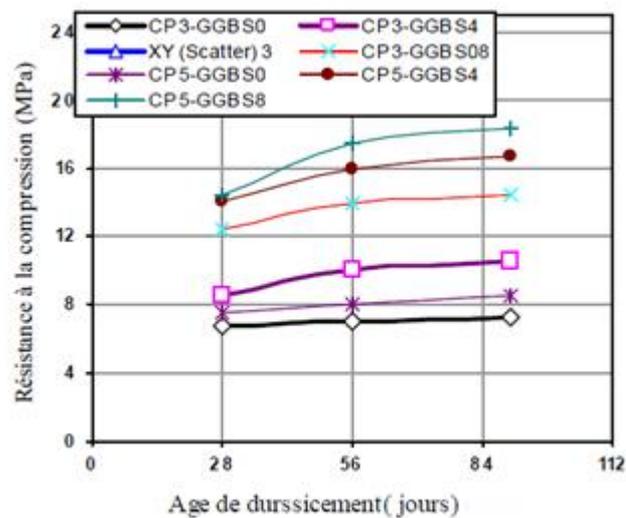
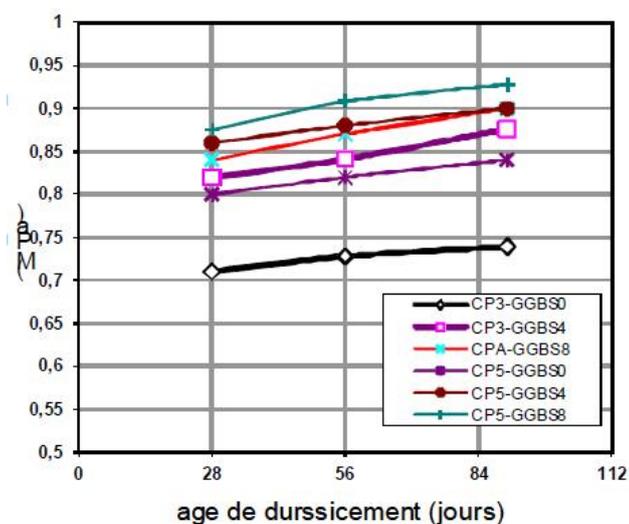
Figure 1.18. Résistance en compression humide en fonction du dosage en chaux [37].

1.12 Effet du laitier granulé (GBFS) sur les caractéristiques mécaniques des BTC

Izemouren et Guettala [38] ont montré que la combinaison de (GBFS) et de ciment peut améliorer les propriétés mécaniques des briques de terre comprimée (Tableau 1.6 et Figures 1.19 et 1.20).

Tableau 1.6. La composition des mélanges des B.T.C. stabilisé par laitier-ciment [38]

Désignation	PC	Composants			
		Sol	sable	Cément	GGBS
CP3-GBS0		70	30	3	0
CP3-GBS4	3%	70	30	3	4
CP3-GBS8		70	30	3	8
CP3-GBS0		70	30	5	0
CP3-GBS4	5%	70	30	5	4
CP3-GBS8		70	30	5	8

**Figure 1.19.** Evolution de la résistance à la compression sèche en fonction de l'âge de durcissement [38]**Figure I.20.** Evolution de la résistance à la compression humide en fonction de l'âge de durcissement [38]

1.13 Synthèse de l'étude bibliographique

Cette étude bibliographique basée sur des études précédentes, nous a permis de mieux comprendre les effets bénéfiques de l'association du laitier et du ciment comme ajouts au sol destiné à fabriquer des blocs de terre comprimée. Le laitier possède une réactivité plus faible que le ciment et donc la cinétique de réaction avec la portlandite libérée lors de l'hydratation du clinker est lente et les effets n'apparaissent qu'à long terme. Cet effet est d'ordre chimique suite à la réaction pouzzolanique : SiO_2 du laitier + Ca(OH)_2 qui forme de nouveaux composés stables (C-S-H). En effet, la combinaison de 8% de laitier et de 5% de ciment peut améliorer les propriétés mécaniques des briques de terre comprimée [39].

Aussi, les travaux précédents ont montré que la résistance des BTC à la compression est plus grande avec un taux de 10% de ciment (seul ajout). Le traitement avec 10% de chaux (seul ajout) des blocs de terre comprimée et durcie par vapeur améliore les caractéristiques mécaniques spécialement la résistance en compression humide.

CHAPITRE II
METHODOLOGIE EXPERIMENTALE

Chapitre 2. Méthodologie Expérimentale

2.1. Introduction

Nous présentons dans ce chapitre, en premier lieu, les principales caractéristiques des matériaux utilisés dans notre travail (ciment, chaux, laitier de haut fourneau, sable de dune et la terre). Ensuite, nous exposons les différentes méthodes, outils et procédures de mises en œuvre lors de la réalisation des essais expérimentaux dans le laboratoire. Nous avons consacré une partie à la préparation de plan d'expériences appliqué et à la description des essais de caractérisation de béton de terre comprimée et stabilisée (**BTCS**). Les essais utilisés pour cette étude sont : L'Analyse sédimentométrique, Analyse granulométrique, Equivalent de sable, les Limites d'Atterberg, le Compactage (dynamique et statique) et la résistance à la compression à 28jours.

2.2. Matériaux

Les matériaux utilisés dans cette étude sont : la terre, sable de dune, le ciment, la chaux et le laitier de haut fourneau.

2.2.1. Ciment

Le ciment utilisé est issu de Biskra de type CEM I/CPA 42,5 R (Figure 2.1) a une résistance rapide à court terme, conforme à la norme Algérienne (NA 442-2013). Ses caractéristiques sont données dans le tableau 2.1.



Figure 2.1. Echantillon de ciment CEM I (CPA 42.5 R).

Tableau 2.1. Propriétés du ciment utilisé CEM I (CPA 42.5 R)

Masse volumique Absolue (ρ_s) (Kg/m³)	3140
Masse volumique Apparente (ρ_a) (Kg/m³)	1160
Consistance normale (%)	26.1
Début de prise (min)	170
Fin de prise (min)	240
Résistance à la compression 2 jours (MPa)	20-29
Résistance à la compression 28 jours (MPa)	42.5-52.5

2.2.2. Chaux

La Chaux utilisée vient de Hasasna, dans la ville de Saida, dans le Nord-Ouest de l'Algérie de couleur blanche est dérivée de calcaire. Elle est obtenue par broyage ultra fin (Figure 2.2).

**Figure 2.2.** Echantillon de la chaux.

Les caractéristiques physiques sont regroupées dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2. Caractéristiques physiques de la chaux

Masse volumique apparente (g/cm³)	1.14
Masse volumique absolue (g/cm³)	2.00
Surface spécifique (cm²/g)	4900

2.2.3. Laitier de haut fourneau (LHF)

Le laitier granulé utilisé est un sous-produit d'El-Hadjar Annaba. Il est livré sous forme de sable de fraction 0/5 mm. Broyé et tamisé, la taille des fins est inférieure à 80 μ m (Figure 2.3).



Figure 2.3. Echantillon de laitier de haut fourneau (LHF).

Ces principales caractéristiques physico-chimiques sont regroupées dans le tableau 2.3 et tableau 2.4.

Tableau 2.3. Caractéristiques physiques du laitier de haut fourneau

Masse volumique apparente (g/cm^3)	0.95
Masse volumique absolue (g/cm^3)	2.86
Surface Spécifique Blain (cm^2/g)	2822
Perte au feu (%)	4.63

Tableau 2.4. Composition chimique du laitier de haut fourneau

Elément	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	K₂O	Na₂O
%	37.77	7.8	2.16	42.06	4.26	0.60	0.26

2.2.4. Sable de dune

La courbe granulométrique du sable de dune d'Oued Souf utilisé présentée graphiquement dans la figure 2.4 et la figure 2.5, montre que la granularité est continue, étalée et assez régulière, ce qui représente une répartition assez homogène des classes granulaires.



Figure 2.4. Echantillon de sable de dune.

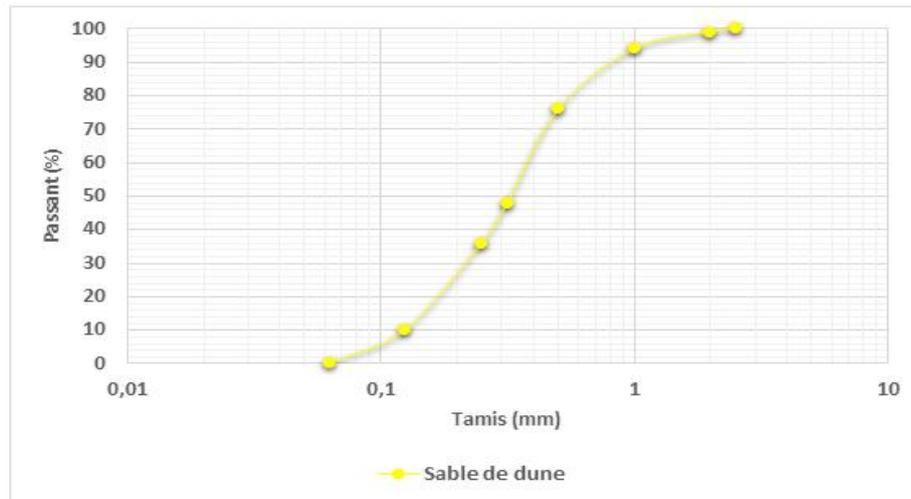


Figure 2.5. Courbe granulométrique du sable de dune.

Le **tableau 2.5** présente également ses caractéristiques physiques.

Tableau 2.5. Caractéristiques physiques du sable de dune

Densité absolue (g/cm^3)	2.62
Densité apparente (g/cm^3)	1.65
Module de finesse	1.95
Equivalent de sable (%)	80.2

2.2.5. La terre

La terre est généralement composée de trois phases de nature différente (solide, air et eau). Son comportement mécanique repose principalement sur les interactions inter-particules ainsi que sur l'action physique et chimique de l'eau et de l'air sur ces particules. La terre utilisée (Argile de couleur rouge) provient de la région de Bordj Bou Arréridj (Figure 2.6), elle est choisie sur la base de sa disponibilité et son abondance dans la région.



Figure 2.6. Echantillon de la terre.

2.2.5.1. Composition granulaire

L'essai granulométrique a pour but de déterminer la répartition granulaire et de comparer les différents échantillons analysés. Les résultats de l'essai permettent de tracer la courbe granulométrique sur un diagramme comportant en abscisse les dimensions des tamis, et en ordonnée les pourcentages des tamisât cumulés. Cet essai est effectué en deux phases :

➤ **Granulométrie par tamisage. [NF P 94-056]**

La granulométrie par tamisage est effectuée sur la fraction granulaire dont le diamètre (ϕ) est supérieur à $80\mu\text{m}$. Les courbes relatives au matériau utilisé (terre) dans notre étude sont présentées dans la figure 2.7.

➤ **Granulométrie par sédimentométrie. [NF P18-560]**

Cet essai complète le premier et permet de quantifier les fractions de particules dont le diamètre est inférieur à $80\mu\text{m}$ (figure 2.7) et pour lesquelles le tamisage devient impossible. Le principe de la sédimentation utilise la différence de chute des particules, dans une éprouvette de 2 litres d'eau distillée. Il consiste à laisser les particules en suspension se déposer au fond de l'éprouvette, selon leurs diamètres.

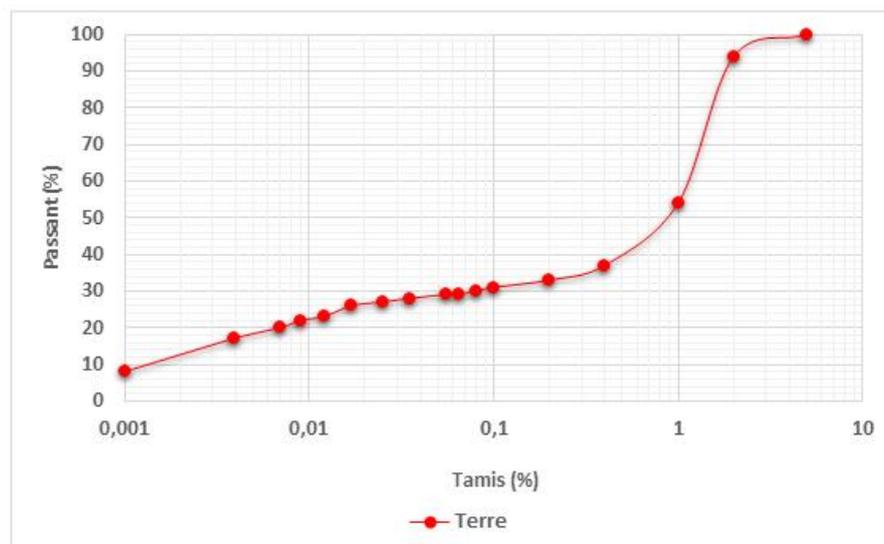


Figure 2.7. Courbe granulométrique de la terre.

2.2.5.2. Limites d'Atterberg. [NF P 94-051]

Les limites d'Atterberg sont déterminées selon la norme française (NF P 94-051) et par la méthode à la coupelle avec l'appareil de Casagrande (Figure II.8) ; elle a pour but de déterminer la teneur en eau des différents sols prélevés à leur passage de l'état liquide à l'état plastique. Cet essai se pratique sur la fraction de sol dont les particules ont une dimension inférieure à 0,4 mm. Si à un échantillon de sol préalablement desséché et pulvérisé, on fait croître la teneur en eau de façon homogène par malaxage, il passe progressivement de l'état solide, à l'état plastique puis à l'état liquide. Par définition, la teneur en eau W (%) d'un sol est le rapport entre le poids d'eau et le poids de sol sec. Elle est exprimée en pourcentage.

Le tableau 2.6 présente les résultats de la limite d'Atterberg de la terre et le tableau 2.7 présente les résultats de la (Terre + 20 % de sable de dune).

Tableau 2.6. Les limites d'Atterberg de la terre

Limite de liquidité W_L (%)	Limite de plasticité W_P (%)	Indice de plasticité I_p
44.537	26.370	18.167

Tableau 2.7. Les limites d'Atterberg du mélange (terre + 20% sable)

Limite de liquidité W_L (%)	Limite de plasticité W_P (%)	Indice de plasticité I_p
32.371	17.044	15.327



Figure 2.8. Essai de limite d'Atterberg.

2.2.5.3. Analyses physico-chimique et minéralogique de la terre

L'analyse chimique et minéralogique permet de détecter les composants en éléments nocifs de la terre. Le tableau 2.8 et le tableau 2.9 présentent les compositions chimique et minéralogique de la terre. Le tableau 2.10 présente ses caractéristiques physiques. **Les analyses nous ont été fournies par les services de la briqueterie.**

Tableau 2.8. L'analyse chimique de la Terre (% massique)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	PF	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	TiO ₂	Cl
54.05	20.66	8.37	7.57	1.23	2.68	0.01	3.86	0.59	0.13	0.86	0.003

Tableau 2.9. L'analyse minéralogique de la terre

Minéraux	Teneur (%)	
Quartz	SiO ₂	25
Calcite	CaCO ₃	02
Albite	Na Al SiO ₈	05
Feldspaths	K(K ₂ O ₆ SiO ₂ Al ₂ O ₃)	09
Illite	2K ₂ O Al ₂ O ₃ 24SiO ₂ 2H ₂ O	20
Kaolinite	Al ₂ Si ₂ O ₃ (OH) ₄	19
Chlorite	Mg ₂ Al ₂ O ₁₈ Si ₃	12
Minéraux ferrugineux+ Autres		08

Tableau 2.10. Caractéristiques physiques de la terre

Caractéristiques à l'état sec	
Poids volumique (Kg/m ³)	2355.1
Humidité naturelle (%)	8.7
Temps de séchage (Heures)	Séchage lent
Humidité de façonnage (%)	20.7
Retrait sur sec (%)	8.4
Resistance mécanique à la flexion (Kg/cm ²)	16.01
Coloration	Rouge

2.2.5.4. Essai Proctor Normal. [NF P94-093]

Le comportement à l'essai Proctor de compactage permet de montrer qu'à énergie de compactage donnée, il existe une teneur en eau dite "optimale" permettant d'obtenir le poids sec "maximal", objectif recherché car permettant d'obtenir la résistance mécanique maximale, à énergie de compactage donnée. Cet essai est déterminé selon la norme (NF P94-093) voir la figure 2.9.



Figure 2.9. Essai Proctor Normal de la terre.

2.2.5.5. Classification géotechnique (selon L.C.P.C)

Selon (L.C.P.C) la classification des sols fins selon le diagramme de Casagrande, on peut dire qu'il s'agit d'une terre peu plastique, elle est localisée dans la zone proche de la droite (Figure 2.10). D'autre part, l'ajout de 20% de sable de dune améliore la cohésion du squelette granulaire de la terre. En effet, le point de classification est décalé dans la zone haute de la droite, c'est à dire qu'il s'agit d'une terre peu plastique (Figure 2.11).

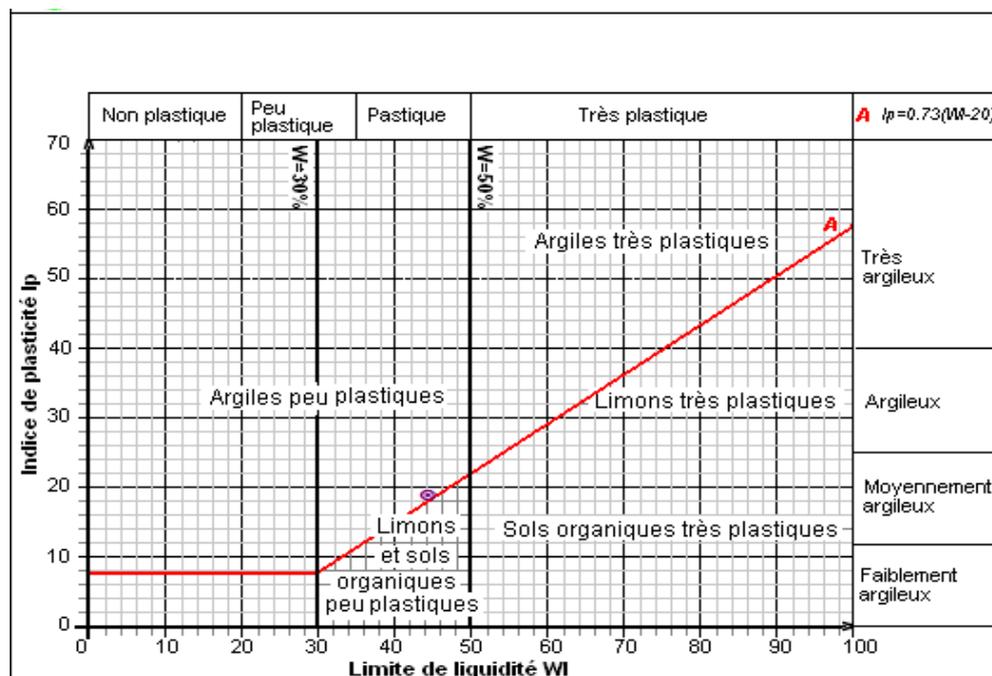


Figure 2.10. Classification de la terre selon le diagramme de Casagrande.

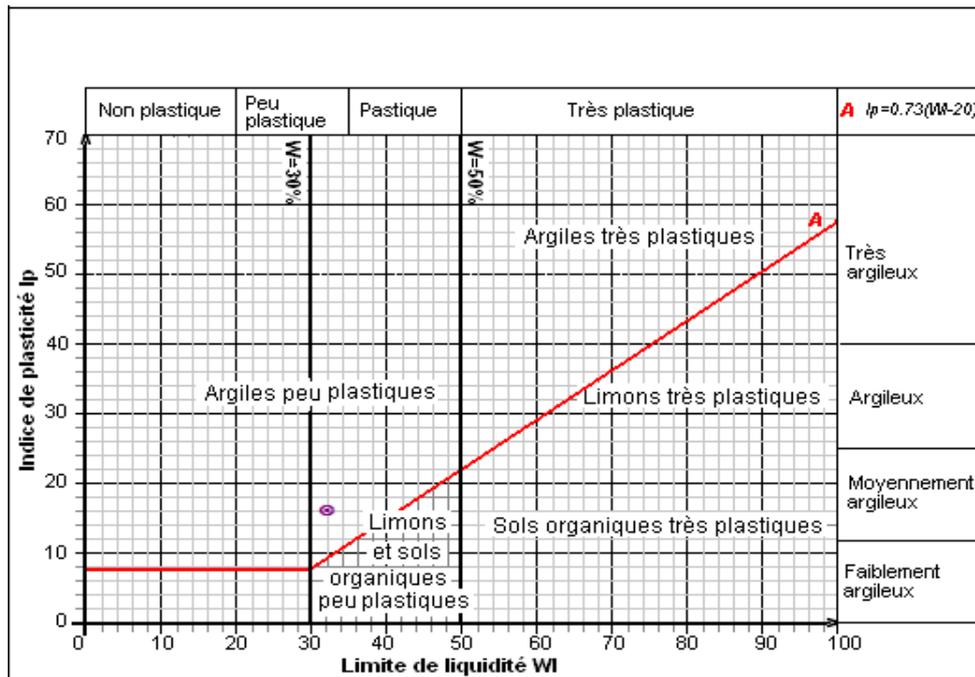


Figure 2.11. Classification du mélange (Terre + 20 % sable) selon le diagramme de Casagrande.

2.2.5.6. Compactage statique

Pour la confection des éprouvettes nécessaires au programme d'essai en compactage statique, on a conçu un moule cylindrique Il est en acier trempé. Le moule est muni d'un piston pour assurer la transmission de la contrainte de compactage de la presse au mélange. Le schéma du moule dans la presse est présenté sur la figure 2.12.

Avant de soumettre le sol (terre) aux essais, il est écrêté à 1mm. Il se situe dans la zone limite de liquidité ($25 < WL < 50$) et dans la zone limite de l'indice de plasticité ($2.5 < IP < 29$) selon la norme XP P 13-901. Il présente une plasticité tout à fait adaptée à la production des BTC.

Les moules cylindriques de l'essai Proctor ($D=10$ cm $H=17$ cm) sont utilisés pour la détermination des différents essais comme est illustré sur la figure 2.12 ci-dessous. Le poids du mélange global sec pour chaque bloc est maintenu constant durant toutes les étapes de cette étude, il est pris égale à 2.1Kg.

L'argile, le laitier et le sable ont été séchés à l'étuve à 105°C . Les matériaux (terre + sable + ajouts) sont d'abord mélangés à sec pendant deux minutes puis malaxés avec l'eau pendant deux minutes aussi dans un malaxeur à une vitesse de 140tr/min.

L'optimisation de la teneur en eau a été obtenue par l'essai Proctor. Le compactage des éprouvettes est du type statique à simple effet : le plateau supérieur de la presse se déplace entraînant l'ensemble (moule + mélange + piston), le plateau inférieur de la presse reste fixe. L'opération est conduite jusqu'à la contrainte de compression voulue (20MPa). Le démoulage se fait directement après le compactage [1].



Figure 2.12. Compactage statique de la terre.

2.2.5.7. La cure des blocs de terre

Comme pour le béton, la résistance d'un sol-liant croît avec l'âge. Tous les sols n'ont pas un comportement identique, mais une période de cure de 28 jours est indispensable. Pendant cette période, on maintiendra le matériau en atmosphère humide, en prenant garde au vent ; ceci afin d'éviter un dessèchement trop rapide.

Après le démoulage, le bloc est pris manuellement avec précaution, en évitant de toucher les arêtes à cause de la fragilité du bloc, il est ensuite couvert d'un film en plastique de manière à assurer son étanchéité.

Tous les blocs étudiés sont conservés au laboratoire à une température $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ pendant 28 jours.

2.3. Essai de résistance à la compression, NF EN 12390-3.

2.3.1. Principe

Après 28 jours, les éprouvettes sont chargées jusqu'à rupture dans une machine pour essai de compression conforme à l'EN 12390-4. La charge maximale atteinte est enregistrée et la résistance en compression calculée.

2.3.2. Appareillage

Machine d'essai de compression, conforme à l'EN 12390-4.

2.3.3. Eprouvettes

2.3.3.1. Prescriptions

NOTE I : L'éprouvette doit être un cube, un cylindre ou une carotte conforme aux EN 12350-1, EN 12390-1, EN 12390-2 et EN 12504-1. Les dimensions de l'éprouvette doivent être conformes aux tolérances spécifiées dans l'EN 12390-1.

NOTE II : ne convient pas de soumettre à l'essai des éprouvettes endommagées ou qui présentent des nids de cailloux importants.

2.3.4. Mode opératoire

2.3.4.1. Préparation et positionnement des éprouvettes

Essuyer toute humidité excessive de la surface de l'éprouvette avant de la positionner dans la machine d'essai. Tous les plateaux de la machine d'essai doivent être essuyés et toutes particules ou corps étrangers retirés des surfaces de l'éprouvette qui pourront par défaut être en contact entre eux.

Enlever tout appareillage, autre que les plateaux auxiliaires ou éléments d'espacement, (EN 12390-4), entre l'éprouvette et les plateaux de la machine d'essai.

Positionner les éprouvettes de façon que le chargement s'effectue perpendiculairement au sens de coulage.

Centrer l'éprouvette sur le plateau inférieur avec une précision de $\pm 1 \%$ de la dimension nominale pour les éprouvettes cubiques ou du diamètre pour les éprouvettes cylindriques.

Si des plateaux auxiliaires sont utilisés, les aligner avec la face supérieure et la face inférieure de l'éprouvette.

Avec des machines d'essai à deux colonnes, il convient de placer la surface moulée des éprouvettes cubiques en face de l'un des montants.

2.3.4.2. Mise en charge

Sélectionner une vitesse constante de chargement dans la plage 0,2MPa/s (N/mm².s) à 1,0MPa/s (N/mm².s). Appliquer la charge sans choc et l'accroître de façon continue à la vitesse constante sélectionnée $\pm 10\%$ jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

La charge maximale obtenue doit être enregistrée.

2.3.4.3. Evaluation des types de rupture

Des exemples de rupture d'éprouvettes montrant des essais s'étant déroulés correctement sont donnés dans la figure 2.13. Des exemples de rupture incorrecte d'éprouvettes sont donnés dans la figure 2.14.

Toute rupture incorrecte doit être enregistrée en faisant référence à la forme de rupture donnée par la figure 2.14 et correspondant au mieux à l'observation.

NOTE : Les ruptures incorrectes sont généralement dues à une attention insuffisante portée au mode opératoire, en particulier le positionnement de l'éprouvette ou bien une erreur due à la machine.

2.3.5. Expression des résultats

La résistance à la compression est donnée par l'équation suivante :

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

f_c : est la résistance en compression, exprimée en mégapascals (Newtons par millimètres carrés);

F : est la charge maximale, exprimée en Newtons ;

A_c : est l'aire de la section de l'éprouvette sur laquelle la force de compression est appliquée, calculée à partir de la dimension nominale de l'éprouvette (EN 12390-1), exprimée en millimètres carrés.

La résistance à la compression doit être exprimée à 0,5MPa (N/mm²) près.

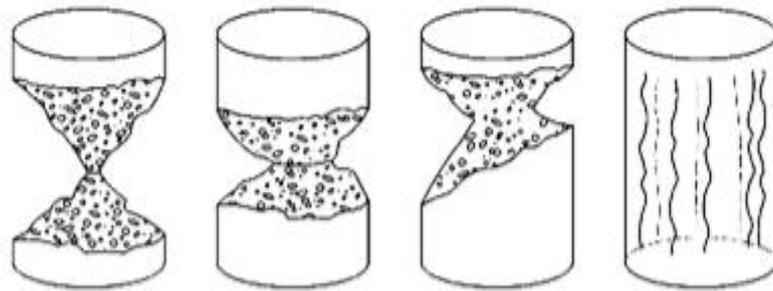


Figure 2.13. Ruptures correctes d'éprouvettes cylindriques (Source LTP/Est de Bordj Bou Arréridj).

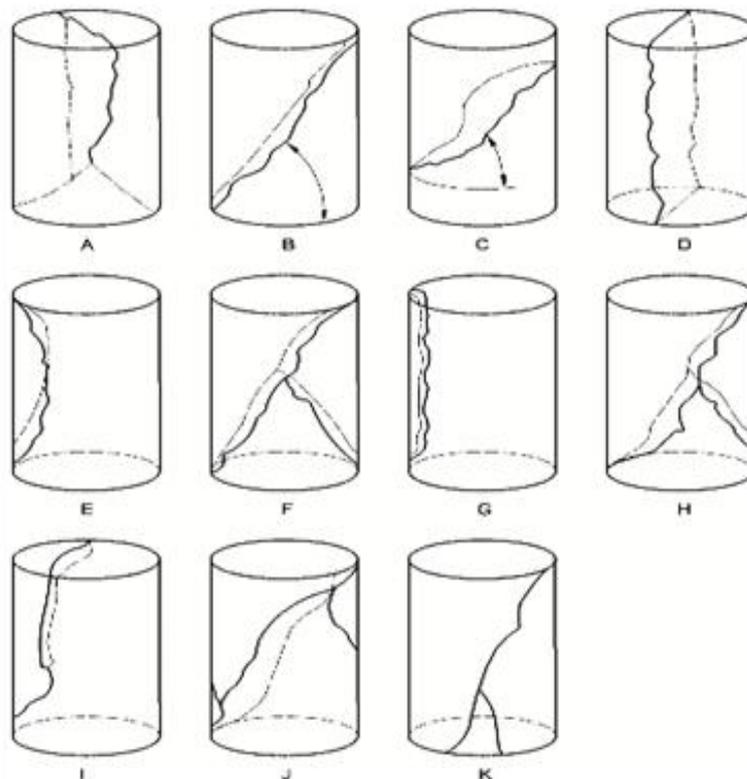


Figure 2.14. Exemples de ruptures incorrectes d'éprouvettes cylindriques (Source LTP/Est de B.B.A).

2.4. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation des caractéristiques et les analyses physico-chimiques et minéralogique des matériaux utilisés pour cette étude qui sont : Ciment, chaux, laitier de haut fourneau, sable de dune et la terre. Il présente tous les essais effectués au niveau du laboratoire des travaux public de l'EST de Bordj Bou Arreridj.

CHAPITRE III
RESULTATS ET DISCUSSIONS

Chapitre 3. Résultats et Discussions

3.1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre des réponses sur l'utilisation de 20% de sable de dunes et 15% des fines ou bien des ajouts minéraux ($D_{max} < 80\mu m$) avec une substitution de la terre, pour fabriquer un béton de terre comprimé et stabilisé (BTCS) ayant de bonnes propriétés. Pour mener bien notre recherche expérimentale, la méthodologie des plans d'expériences est utilisée. La préparation du sol a été abordée dans le **chapitre 2 (2.2.5.6)**.

3.2. Formulation du béton de terre stabilisée (BTS)

Le programme expérimental a permis de comprendre le rôle joué par les différents paramètres séparément utilisés (chaux, ciment et laitier) sur les propriétés du béton de terre comprimé et stabilisée (BTCS). Ainsi, nous avons traité un plan de mélange à 3 facteurs pris en proportions massiques, dont la somme est égale à l'unité avec une substitution de terre qui va jusqu'à 15% (262.5 grammes de la terre). Ces facteurs sont donc dépendants les uns des autres. Le domaine expérimental est contraint par la relation (1) :

$$\text{Chaux (\%)} + \text{Ciment (\%)} + \text{Laitier (\%)} = 100 \% \quad (1)$$

La figure 3.1 représente la substitution de la terre par les trois (3) paramètres.

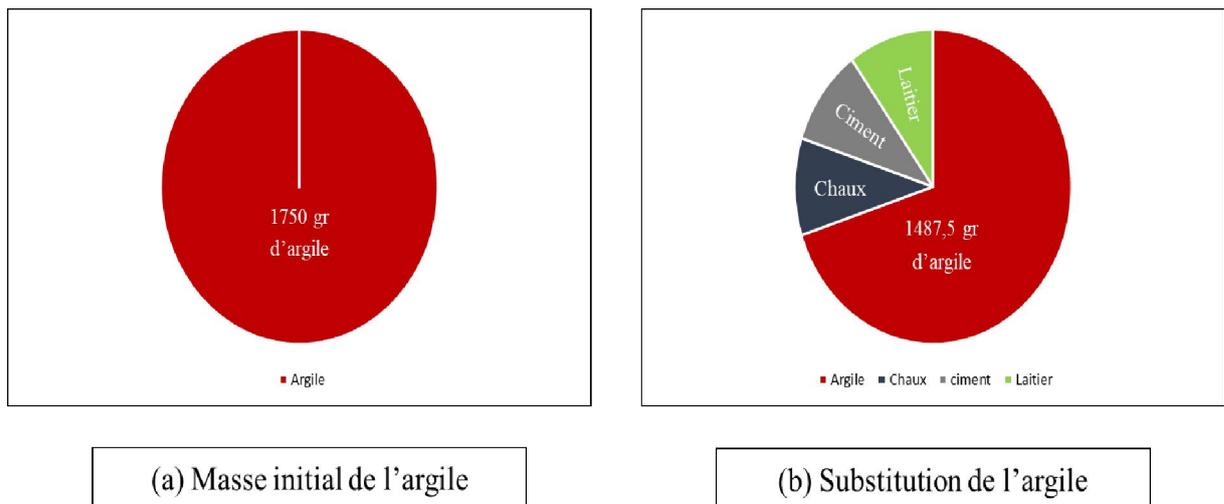


Figure 3.1. Substitution de la terre par les trois (3) paramètres.

La figure 3.2 représente un réseau triangulaire des 10 combinaisons étudiées.

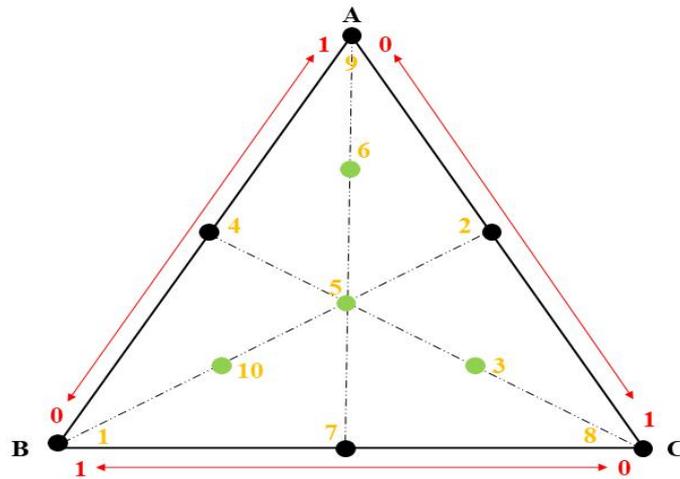


Figure 3.2. Courbe ternaire des dix (10) mélanges à trois (3) paramètres.

Tableau 3.1. Proportions des facteurs dans les compositions étudiées

Mélange	Chaux	Ciment	Laitier
1	0	1	0
2	0.5	0	0.5
3	0.167	0.167	0.667
4	0.5	0.5	0
5	0.333	0.333	0.333
6	0.667	0.167	0.167
7	0	0.5	0.5
8	0	0	1
9	1	0	0
10	0.167	0.667	0.167

Tableau 3.2. Compositions des facteurs selon un plan de mélange

Mélange	Chaux (gr)	Ciment (gr)	Laitier (gr)	Argile (gr)	Sable de Dune (gr)	W_{opt} (%)
1	0	262.5	0	1487.5	350	9.200
2	131.25	0	131.25	1487.5	350	12.941
3	43.8	43.8	175	1487.5	350	12.196
4	131.25	131.25	0	1487.5	350	9.561
5	87.5	87.5	87.5	1487.5	350	9.945
6	175	43.8	43.8	1487.5	350	12.579
7	0	131.25	131.25	1487.5	350	9.509
8	0	0	262.5	1487.5	350	11.049
9	262.5	0	0	1487.5	350	11.777
10	43.8	175	43.8	1487.5	350	10.933

Dans notre cas, la réponse souhaitée est la résistance à la compression à 28 jours. Les résultats obtenus des réponses sont ensuite intégrés dans le logiciel "Expert Design 7".

3.3 Essais Proctor Normale (NF P 94-093)

3.3.1. Terre

La caractérisation physique de la terre utilisée est nécessaire afin de pouvoir étudier l'effet des ajouts fins (laitier, chaux et ciment) et de 20% de sable du mélange sec (terre +ajouts).

Tableau 3.3. Résultat de la densité sèche maximale de la Terre

% Eau additive		10 %	12 %	14 %	16 %
Masse du moule + Sol humide (g)	A	3705	3787	3762	3672
Masse du moule (g)	B	1695	1695	1695	1695
Masse du sol humide (A-B) (g)	C	2010	2092	2067	1977
Volume du moule (Cm ³)	D	940	940	940	940
Masse volumique humide (C/D) (t/m ³)	E	2.14	2.22	2.20	2.10
$\gamma d = (E*100/(100+L))$ (t/m ³)	F	1.93	1.96	1.90	1.79

Tableau 3.4. Résultat de la teneur en eau optimale de la Terre

N° de la tare		1	2	1	2	1	2	1	2
Masse du sol humide + Tare (g)	G	70.57	65.47	81.58	76.90	61.08	61.27	67.56	61.47
Masse du sol sec + Tare (g)	H	65.34	60.82	75.17	71.19	56.00	56.30	60.36	55.01
Masse de la tare (g)	J	17.65	17.61	26.55	27.64	23.68	24.65	17.96	17.57
Masse de l'eau (G-H) (g)	I	5.23	4.65	6.41	5.71	5.08	4.97	7.20	6.46
Masse du sol sec (H-J) (g)	K	47.69	43.21	48.62	43.55	32.32	31.65	42.40	37.44
Teneur en eau (100*I/K) (%)	L	10.97	10.76	13.18	13.11	15.71	15.70	16.98	17.25
Moyenne (%)		10.865		13.145		15.705		17.115	

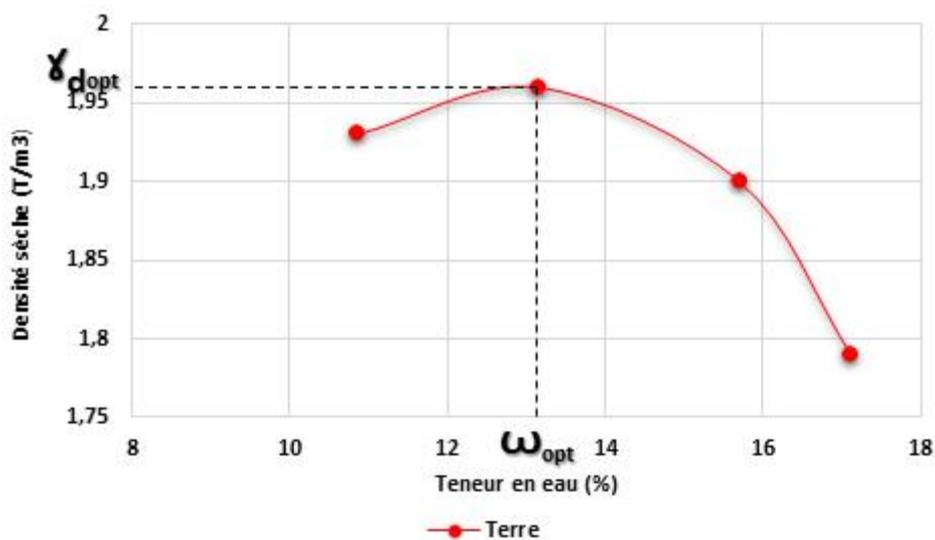


Figure 3.3. La courbe Proctor de la Terre.

3.3.2. Terre + Sable

Le sable joue le rôle de squelette pour la terre et améliore ainsi sa tenue mécanique. Il a été montré qu'un taux de 20% de sable du mélange sec (terre+ajouts) donne les meilleures performances [1]. **Ce mélange constitue donc, la base du plan de mélange étudié.**

Tableau 3.5. Résultat de la densité sèche maximale du mélange (Terre + Sable)

% Eau additive		8 %	10 %	12 %	14 %
Masse du moule + Sol humide (g)	A	3741	3816	3784	3716
Masse du moule (g)	B	1695	1695	1695	1695
Masse du sol humide (A-B) (g)	C	2046	2121	2089	2021
Volume du moule (Cm ³)	D	940	940	940	940
Masse volumique humide (C/D) (t/m ³)	E	2.18	2.26	2.22	2.15
$\gamma d = (E*100/(100+L))$ (t/m ³)	F	2.00	2.04	1.96	1.88

Tableau 3.6. Résultat de la teneur en eau optimale du mélange (Terre + Sable)

N° de la tare		1	2	1	2	1	2	1	2
Masse du sol humide + Tare (g)	G	63.55	48.02	70.16	76.30	61.72	54.32	58.08	56.35
Masse du sol sec + Tare (g)	H	59.31	45.12	64.52	70.02	56.16	49.50	52.26	50.93
Masse de la tare (g)	J	13.13	12.68	12.74	12.85	13.10	12.90	12.97	19.09
Masse de l'eau (G-H) (g)	I	4.24	2.90	5.64	6.28	5.56	4.82	5.82	5.42
Masse du sol sec (H-J) (g)	K	46.18	32.44	51.78	57.14	43.06	36.61	39.29	37.84
Teneur en eau (100*I/K) (%)	L	9.18	8.94	10.89	10.99	12.91	13.17	14.81	14.32
Moyenne (%)		9.06		10.94		13.04		14.565	

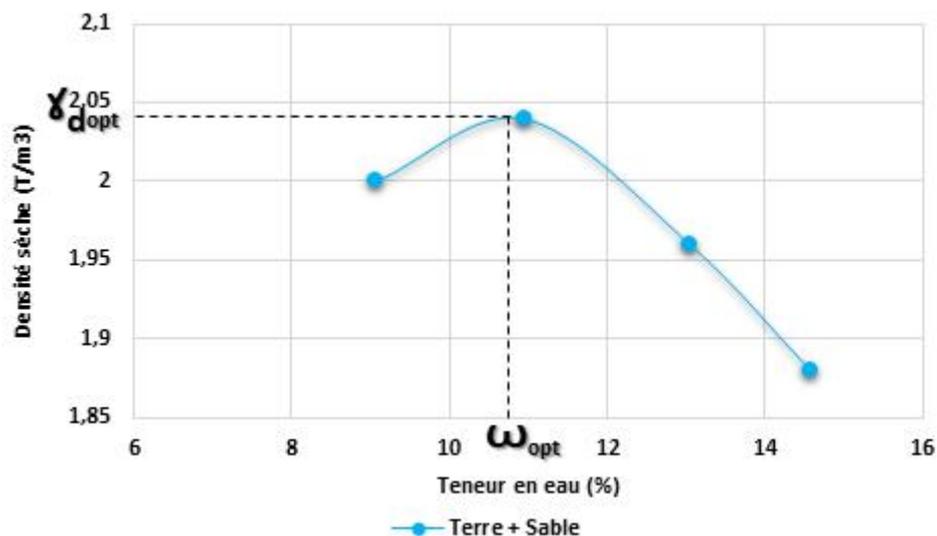


Figure 3.4. La courbe Proctor du mélange (Terre + Sable)

3.3.3. Mélange 1

Tableau 3.7. Résultat de la densité sèche maximale du mélange 1

% Eau additive		8 %	10 %	12 %	14 %
Masse du moule + Sol humide (g)	A	3796	3848	3807	3732
Masse du moule (g)	B	1695	1695	1695	1695
Masse du sol humide (A-B) (g)	C	2101	2153	2112	2037
Volume du moule (Cm ³)	D	940	940	940	940
Masse volumique humide (C/D) (t/m ³)	E	2.23	2.29	2.24	2.16
$\gamma d = (E*100/(100+L))$ (t/m ³)	F	2.07	2.09	2.01	1.90

Tableau 3.8. Résultat de la teneur en eau optimale du mélange 1

N° de la tare		1	2	1	2	1	2	1	2
Masse du sol humide + Tare (g)	G	63.03	54.85	54.18	64.99	65.90	56.44	66.29	62.13
Masse du sol sec + Tare (g)	H	59.65	52.17	51.06	61.57	61.54	53.10	61.56	57.48
Masse de la tare (g)	J	17.66	17.72	27.94	25.82	23.67	23.40	27.63	22.78
Masse de l'eau (G-H) (g)	I	3.38	2.68	3.12	3.42	4.36	3.34	4.73	4.65
Masse du sol sec (H-J) (g)	K	41.99	34.45	33.12	35.75	37.87	29.7	33.93	34.70
Teneur en eau (100*I/K) (%)	L	8.05	7.78	9.42	9.57	11.51	11.24	13.94	13.40
Moyenne (%)		7.915		9.495		11.375		13.67	

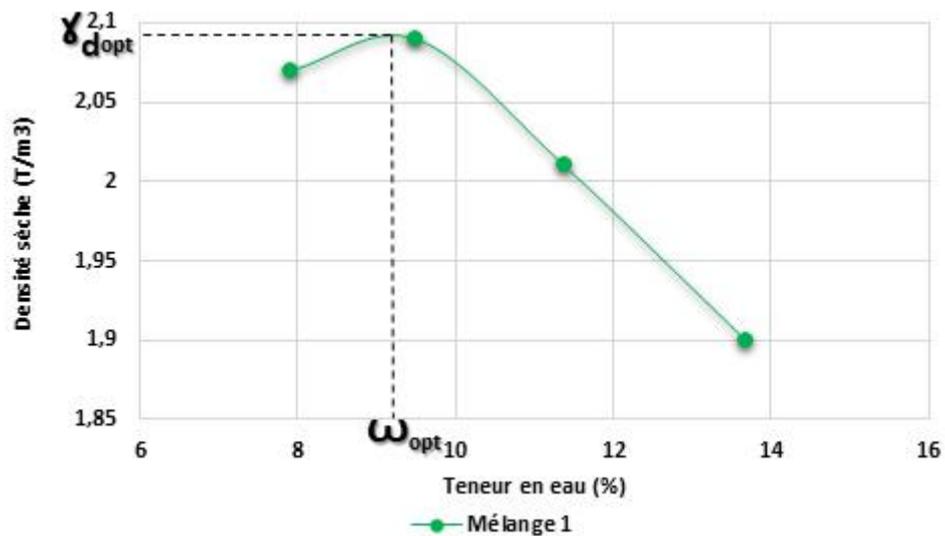


Figure 3.5. La courbe Proctor du mélange 1.

3.3.4. Mélange 2

Tableau 3.9. Résultat de la densité sèche maximale du mélange 2

% Eau additive		12 %	14 %	16 %	18 %
Masse du moule + Sol humide (g)	A	3702	3723	3681	3645
Masse du moule (g)	B	1695	1695	1695	1695
Masse du sol humide (A-B) (g)	C	2007	2028	1986	1950
Volume du moule (Cm ³)	D	940	940	940	940
Masse volumique humide (C/D) (t/m ³)	E	2.13	2.15	2.11	2.07
$\gamma d = (E*100/(100+L))$ (t/m ³)	F	1.89	1.90	1.82	1.76

Tableau 3.10. Résultat de la teneur en eau optimale du mélange 2

N° de la tare		1	2	1	2	1	2	1	2
Masse du sol humide + Tare (g)	G	65.33	71.24	79.67	72.11	88.33	80.72	68.58	73.63
Masse du sol sec + Tare (g)	H	60.95	66.60	73.10	66.50	79.91	73.05	61.69	65.96
Masse de la tare (g)	J	24.40	27.58	23.67	23.65	25.82	23.40	22.78	22.49
Masse de l'eau (G-H) (g)	I	4.38	4.64	6.57	5.61	8.42	7.67	6.89	7.67
Masse du sol sec (H-J) (g)	K	36.55	39.02	49.43	42.85	54.09	49.65	38.91	43.47
Teneur en eau (100*I/K) (%)	L	11.98	11.89	13.29	13.09	15.57	15.45	17.71	17.65
Moyenne (%)		11.935		13.190		15.510		17.680	

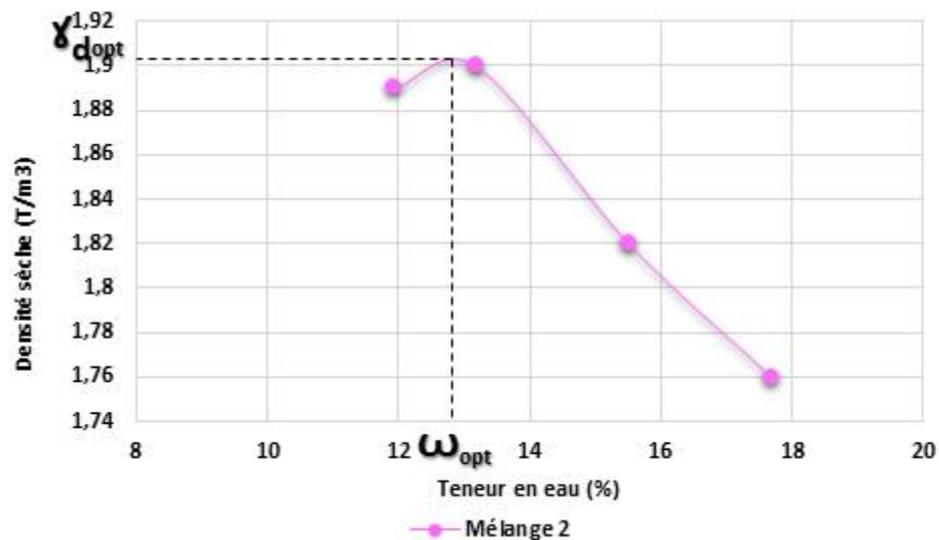


Figure 3.6. La courbe Proctor du mélange 2.

3.3.5. Mélange 3

Tableau 3.11. Résultat de la densité sèche maximale du mélange 3

% Eau additive		10 %	12 %	14 %	16 %
Masse du moule + Sol humide (g)	A	3729	3770	3734	3679
Masse du moule (g)	B	1695	1695	1695	1695
Masse du sol humide (A-B) (g)	C	2034	2075	2039	1984
Volume du moule (Cm ³)	D	940	940	940	940
Masse volumique humide (C/D) (t/m ³)	E	2.16	2.20	2.17	2.11
$\gamma d = (E*100/(100+L))$ (t/m ³)	F	1.95	1.96	1.91	1.85

Tableau 3.12. Résultat de la teneur en eau optimale du mélange 3

N° de la tare		1	2	1	2	1	2	1	2
Masse du sol humide + Tare (g)	G	95.89	104.33	82.51	62.78	71.86	56.67	55.84	56.93
Masse du sol sec + Tare (g)	H	88.17	95.63	74.74	57.50	64.64	51.33	49.95	50.90
Masse de la tare (g)	J	12.75	12.82	12.97	12.75	12.70	12.94	12.79	12.81
Masse de l'eau (G-H) (g)	I	7.72	8.70	7.77	5.28	7.22	5.34	5.89	6.03
Masse du sol sec (H-J) (g)	K	75.42	82.81	61.77	44.75	51.94	38.39	36.99	38.09
Teneur en eau (100*I/K) (%)	L	10.24	10.51	12.58	11.80	13.90	13.91	15.85	15.83
Moyenne (%)		10.38		12.19		13.905		15.83	

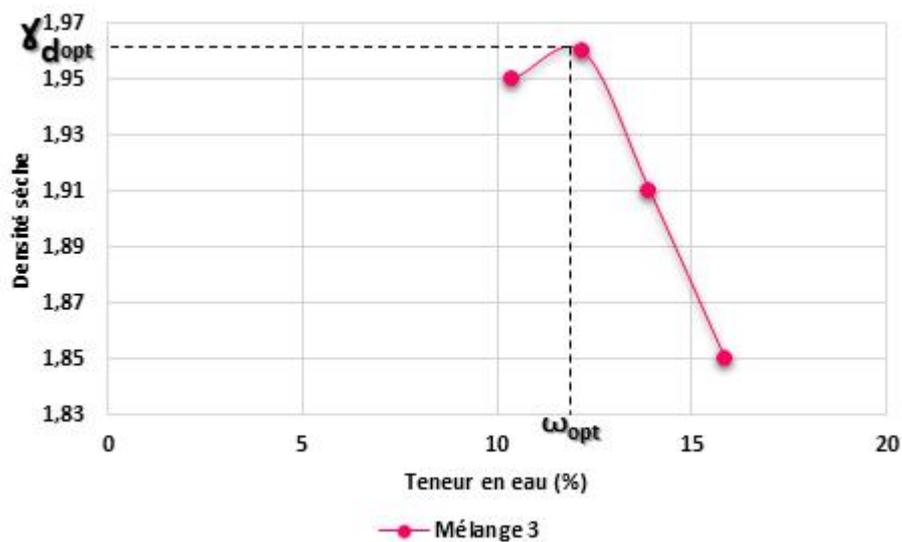


Figure 3.7. La courbe Proctor du mélange 3.

3.3.6. Mélange 4

Tableau 3.13. Résultat de densité sèche maximale du mélange 4

% Eau additive		8 %	10 %	12 %	14 %
Masse du moule + Sol humide (g)	A	3351	3728	3756	3745
Masse du moule (g)	B	1695	1695	1695	1695
Masse du sol humide (A-B) (g)	C	1656	2033	2061	2050
Volume du moule (Cm ³)	D	940	940	940	940
Masse volumique humide (C/D) (t/m ³)	E	1.76	2.16	2.19	2.18
$\gamma d = (E*100/(100+L))$ (t/m ³)	F	1.64	1.98	1.98	1.94

Tableau 3.14. Résultat de la teneur en eau optimale du mélange 4

N° de la tare		1	2	1	2	1	2	1	2
Masse du sol humide + Tare (g)	G	49.30	44.89	54.99	55.06	89.40	87.81	51.17	53.88
Masse du sol sec + Tare (g)	H	46.82	42.78	52.55	52.62	83.28	81.54	47.42	49.89
Masse de la tare (g)	J	12.76	12.78	24.40	24.65	26.55	22.52	17.67	17.56
Masse de l'eau (G-H) (g)	I	2.48	2.11	2.44	2.44	6.12	6.27	3.75	3.99
Masse du sol sec (H-J) (g)	K	34.06	30.00	28.15	27.97	56.73	59.02	29.75	32.33
Teneur en eau (100*I/K) (%)	L	7.28	7.03	8.67	8.72	10.79	10.62	12.60	12.34
Moyenne (%)		7.155		8.695		10.705		12.470	

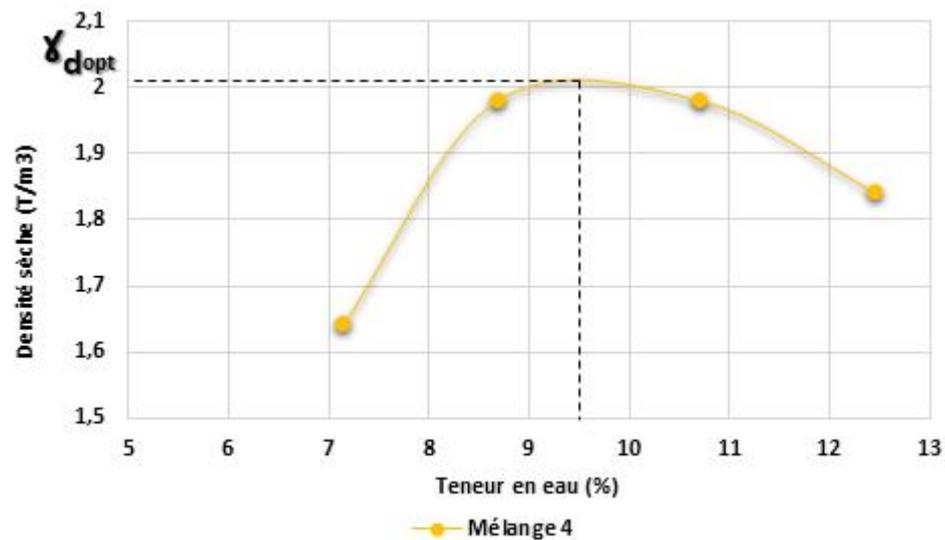


Figure 3.8. La courbe Proctor du mélange 4. 3.3.6. Mélange 4.

3.3.7. Mélange 5

Tableau 3.15. Résultat de densité sèche maximale du mélange 5

% Eau additive		8 %	10 %	12 %	14 %
Masse du moule + Sol humide (g)	A	3682	3773	3731	3725
Masse du moule (g)	B	1695	1695	1695	1695
Masse du sol humide (A-B) (g)	C	1987	2078	2036	2030
Volume du moule (Cm ³)	D	940	940	940	940
Masse volumique humide (C/D) (t/m ³)	E	2.11	2.21	2.17	2.16
$\gamma d = (E*100/(100+L))$ (t/m ³)	F	1.83	2.02	1.94	1.90

Tableau 3.16. Résultat de la teneur en eau optimale du mélange 5

N° de la tare		1	2	1	2	1	2	1	2
Masse du sol humide + Tare (g)	G	61.78	51.18	77.00	65.49	71.18	58.40	108.10	93.98
Masse du sol sec + Tare (g)	H	58.87	49.00	71.95	61.39	65.09	53.70	96.71	84.22
Masse de la tare (g)	J	17.55	17.95	17.72	16.64	12.90	12.90	13.07	13.04
Masse de l'eau (G-H) (g)	I	2.91	2.18	5.05	4.10	6.09	4.70	11.39	9.76
Masse du sol sec (H-J) (g)	K	41.32	31.05	54.23	44.75	52.19	40.80	83.65	71.18
Teneur en eau (100*I/K) (%)	L	7.03	7.02	9.31	9.16	11.67	11.52	13.62	13.71
Moyenne (%)		7.025		9.235		11.595		13.665	

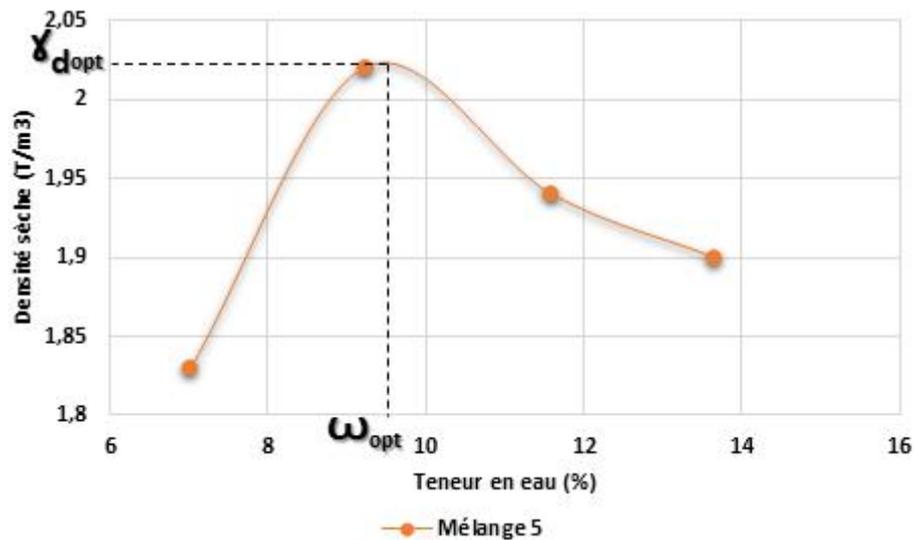


Figure 3.9. La courbe Proctor du mélange 5.

3.3.8. Mélange 6

Tableau 3.17. Résultat de la densité sèche maximale du mélange 6

% Eau additive		10 %	12 %	14 %	16 %
Masse du moule + Sol humide (g)	A	3547	3663	3717	3680
Masse du moule (g)	B	1695	1695	1695	1695
Masse du sol humide (A-B) (g)	C	1852	1968	2022	1985
Volume du moule (Cm ³)	D	940	940	940	940
Masse volumique humide (C/D) (t/m ³)	E	1.97	2.09	2.15	2.11
$\gamma d = (E*100/(100+L))$ (t/m ³)	F	1.82	1.88	1.90	1.84

Tableau 3.18. Résultat de la teneur en eau optimale du mélange 6

N° de la tare		1	2	1	2	1	2	1	2
Masse du sol humide + Tare (g)	G	28.41	29.20	75.88	64.04	54.52	68.43	28.32	33.54
Masse du sol sec + Tare (g)	H	26.75	27.53	71.07	59.47	50.10	62.54	25.63	30.21
Masse de la tare (g)	J	7.35	7.25	26.56	17.69	17.57	17.71	7.32	7.22
Masse de l'eau (G-H) (g)	I	1.66	1.67	4.81	4.57	4.42	5.89	2.69	3.33
Masse du sol sec (H-J) (g)	K	19.40	20.28	44.51	41.71	32.53	44.83	18.31	22.99
Teneur en eau (100*I/K) (%)	L	8.56	8.23	10.80	10.96	13.59	13.14	14.69	14.48
Moyenne (%)		8.395		10.880		13.365		14.565	

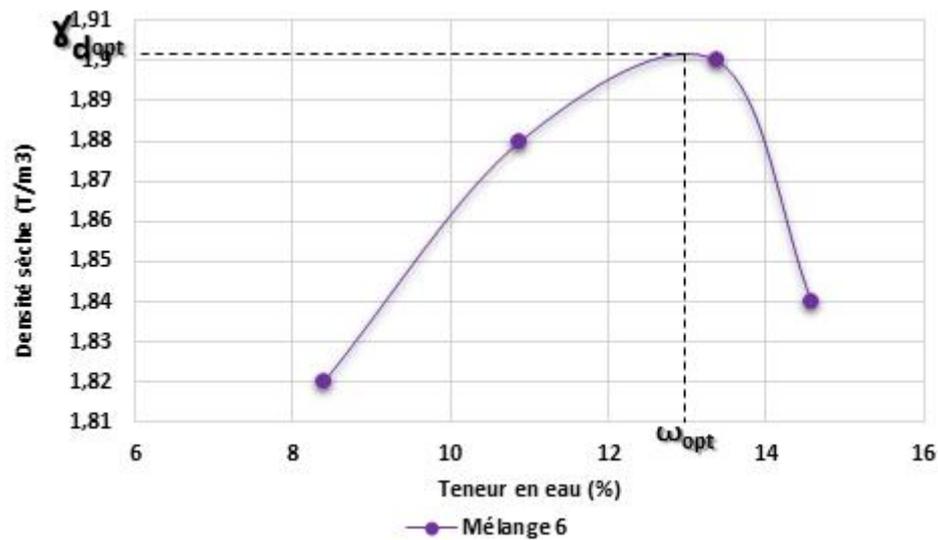


Figure 3.10. La courbe Proctor du mélange 6.

3.3.9. Mélange 7

Tableau 3.19. Résultat de la densité sèche maximale du mélange 7

% Eau additive		8 %	10 %	12 %	14 %
Masse du moule + Sol humide (g)	A	3707	3815	3783	3734
Masse du moule (g)	B	1695	1695	1695	1695
Masse du sol humide (A-B) (g)	C	2012	2120	2088	2039
Volume du moule (Cm ³)	D	940	940	940	940
Masse volumique humide (C/D) (t/m ³)	E	2.14	2.26	2.22	2.17
$\gamma d = (E*100/(100+L))$ (t/m ³)	F	1.98	2.07	1.99	1.91

Tableau 3.20. Résultat de la teneur en eau optimale du mélange 7

N° de la tare		1	2	1	2	1	2	1	2
Masse du sol humide + Tare (g)	G	24.54	26.20	26.22	30.22	21.34	21.75	26.87	25.42
Masse du sol sec + Tare (g)	H	23.29	25.02	24.58	28.50	19.85	20.21	24.58	23.17
Masse de la tare (g)	J	7.33	9.59	7.34	9.45	7.29	7.34	7.35	7.34
Masse de l'eau (G-H) (g)	I	1.25	1.18	1.64	1.66	1.49	1.54	2.29	2.24
Masse du sol sec (H-J) (g)	K	15.96	15.43	17.24	19.05	12.56	13.47	17.23	15.83
Teneur en eau (100*I/K) (%)	L	7.83	7.65	9.51	8.71	11.86	11.63	13.29	14.15
Moyenne (%)		7.740		9.110		11.645		13.72	

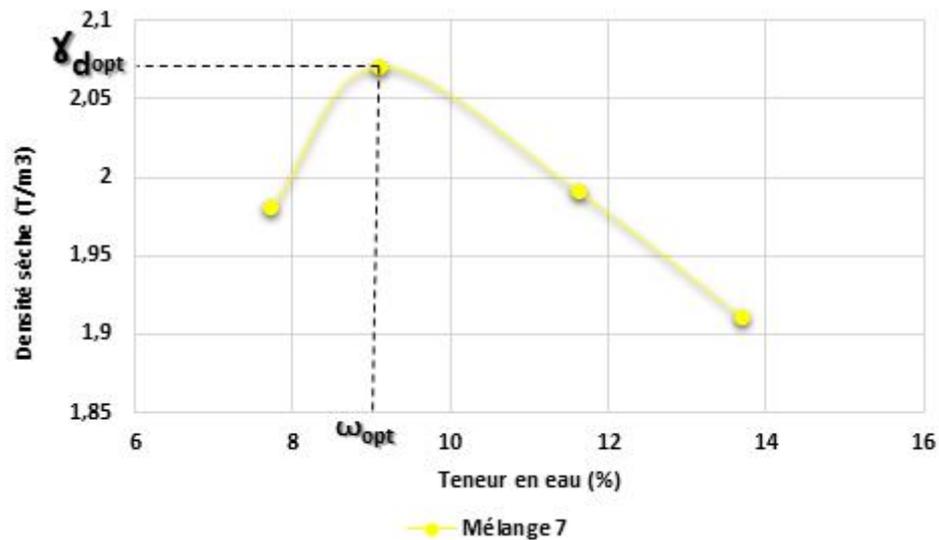


Figure 3.11. La courbe Proctor du mélange 7.

3.3.10. Mélange 8

Tableau 3.21. Résultat de la densité sèche maximale du mélange 8

% Eau additive		8 %	10 %	12 %	14 %
Masse du moule + Sol humide (g)	A	3696	3761	3785	3738
Masse du moule (g)	B	1695	1695	1695	1695
Masse du sol humide (A-B) (g)	C	2001	2066	2090	2043
Volume du moule (Cm ³)	D	940	940	940	940
Masse volumique humide (C/D) (t/m ³)	E	2.13	2.20	2.22	2.17
$\gamma d = (E*100/(100+L))$ (t/m ³)	F	1.98	1.99	1.98	1.90

Tableau 3.22. Résultat de la teneur en eau optimale du mélange 8

N° de la tare		1	2	1	2	1	2	1	2
Masse du sol humide + Tare (g)	G	54.90	59.89	59.31	68.85	49.85	59.95	66.89	61.16
Masse du sol sec + Tare (g)	H	51.62	56.23	55.08	63.66	45.79	54.83	60.25	55.26
Masse de la tare (g)	J	12.75	12.96	12.83	12.79	12.71	12.79	12.93	12.85
Masse de l'eau (G-H) (g)	I	2.68	3.60	4.23	5.19	4.06	5.12	6.64	5.90
Masse du sol sec (H-J) (g)	K	38.87	43.27	42.25	50.91	33.08	42.04	47.32	42.41
Teneur en eau (100*I/K) (%)	L	6.89	8.32	10.01	10.19	12.27	12.18	14.03	13.91
Moyenne (%)		7.605		10.10		12.225		13.97	

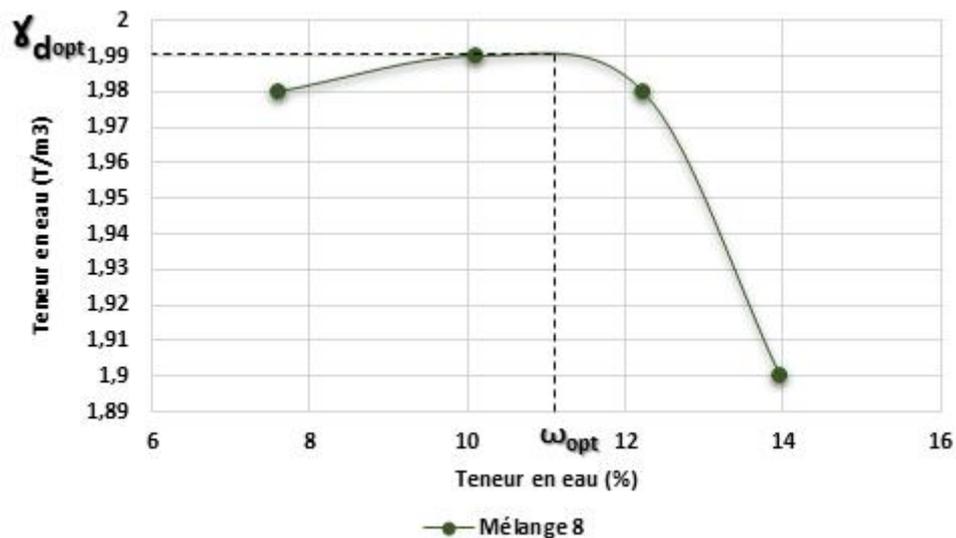


Figure 3.12. La courbe Proctor du mélange 8.

3.3.11. Mélange 9

Tableau 3.23. Résultat de la densité sèche maximale du mélange 9

% Eau additive		10 %	12 %	14 %	16 %	18 %
Masse du moule + Sol humide (g)	A	3554	3618	3691	3685	3617
Masse du moule (g)	B	1695	1695	1695	1695	1695
Masse du sol humide (A-B) (g)	C	1859	1923	1996	1990	1922
Volume du moule (Cm ³)	D	940	940	940	940	940
Masse volumique humide (C/D) (t/m ³)	E	1.97	2.04	2.12	2.12	2.04
$\gamma_d = (E*100/(100+L))$ (t/m ³)	F	1.82	1.86	1.90	1.88	1.74

Tableau 3.24. Résultat de la teneur en eau optimale du mélange 9

N° de la tare		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Masse du sol humide + Tare (g)	G	35.57	47.04	47.28	48.74	55.36	48.73	53.07	54.60	60.65	54.22
Masse du sol sec + Tare (g)	H	33.90	44.56	44.11	45.71	50.85	44.97	48.48	49.87	53.63	48.14
Masse de la tare (g)	J	12.89	12.93	12.85	12.67	12.91	12.82	13.08	13.09	12.96	12.74
Masse de l'eau (G-H) (g)	I	1.67	2.48	3.17	3.03	4.51	3.76	4.59	4.73	7.02	6.08
Masse du sol sec (H-J) (g)	K	21.01	31.63	31.26	33.04	37.94	32.15	35.40	36.78	40.67	35.4
Teneur en eau (100*I/K) (%)	L	7.95	7.84	10.14	9.17	11.89	11.69	12.97	12.86	17.26	17.17
Moyenne (%)		7.895		9.655		11.79		12.915		17.215	

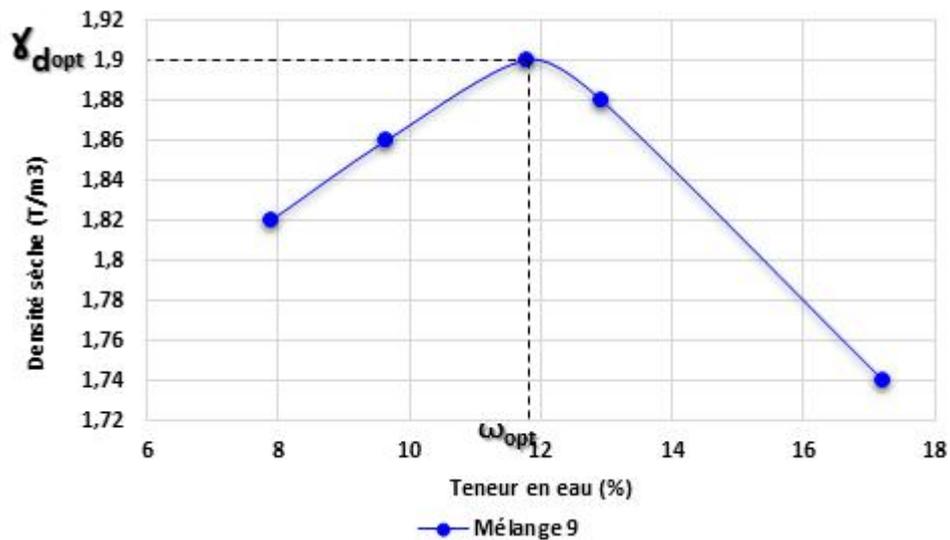


Figure 3.13. La courbe Proctor du mélange 9

3.3.12. Mélange 10

Tableau 3.25. Résultat de la densité sèche maximale du mélange 10

% Eau additive		10%	12 %	14 %	16 %
Masse du moule + Sol humide (g)	A	3739	3784	3752	3682
Masse du moule (g)	B	1695	1695	1695	1695
Masse du sol humide (A-B) (g)	C	2044	2089	2057	1987
Volume du moule (Cm ³)	D	940	940	940	940
Masse volumique humide (C/D) (t/m ³)	E	2.17	2.22	2.19	2.11
$\gamma d = (E*100/(100+L))$ (t/m ³)	F	1.98	1.99	1.93	1.83

Tableau 3.26. Résultat de la teneur en eau optimale du mélange 10

N° de la tare		1	2	1	2	1	2	1	2
Masse du sol humide + Tare (g)	G	79.96	87.46	77.18	84.97	77.73	85.95	60.55	61.63
Masse du sol sec + Tare (g)	H	74.94	82.03	71.95	78.52	71.28	78.45	54.23	55.14
Masse de la tare (g)	J	23.40	25.81	27.57	24.39	22.50	22.76	12.89	12.89
Masse de l'eau (G-H) (g)	I	5.02	5.43	5.23	5.85	6.45	7.50	6.32	6.49
Masse du sol sec (H-J) (g)	K	51.54	56.72	44.38	54.13	48.78	55.69	41.34	42.25
Teneur en eau (100*I/K) (%)	L	9.74	9.57	11.78	10.81	13.22	13.47	15.29	15.36
Moyenne (%)		9.655		11.295		13.345		15.325	

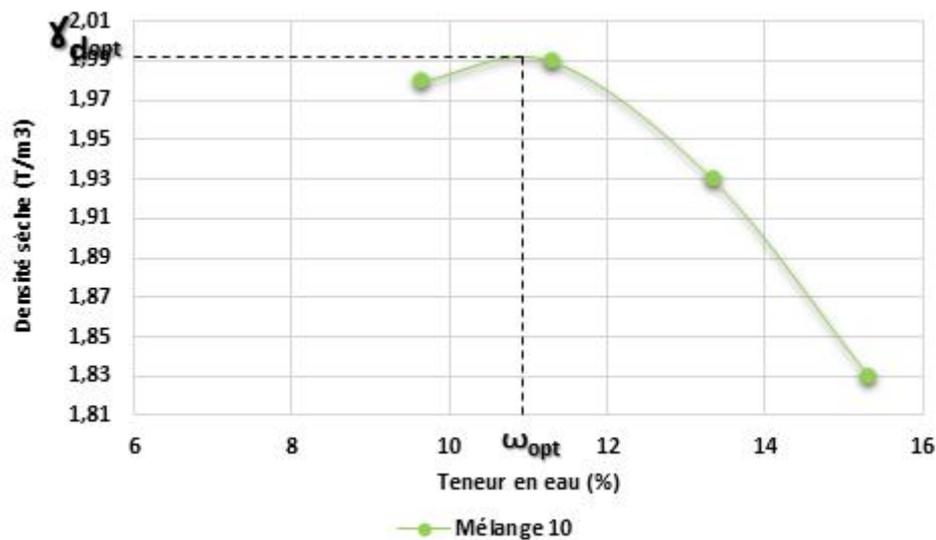


Figure 3.14. La courbe Proctor du mélange 10.

3.3.13. Discussion des résultats des essais Proctor normal

La figure 3.15 représente toutes les courbes Proctor des différents mélanges.

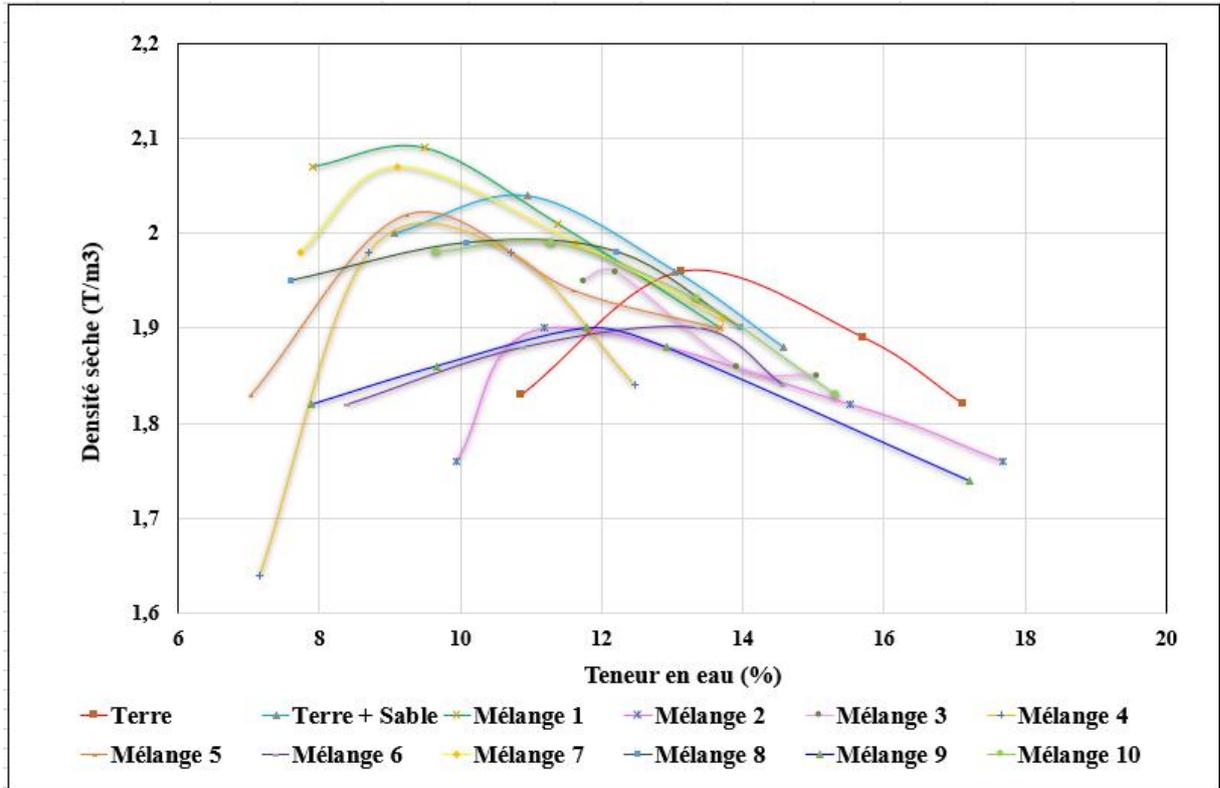


Figure 3.15. Les courbes Proctor des dix (10) mélanges.

Le tableau 3.27 résume tous les résultats obtenus de l'essai Proctor normal.

Tableau 3.27. Les résultats d'essais Proctor Normal

	γ_{dmax} (t/m ³)	W_{opt} (%)
Terre	1.960	13.145
Terre + Sable	2.041	10.799
Mélange 1	2.092	9.200
Mélange 2	1.901	12.941
Mélange 3	1.961	12.196
Mélange 4	2.031	9.561
Mélange 5	2.022	9.945
Mélange 6	1.911	12.579
Mélange 7	2.075	9.509
Mélange 8	1.993	11.049
Mélange 9	1.900	11.777
Mélange 10	1.991	10.933

La courbe Proctor de la Terre stabilisé avec une substitution de la terre qui va jusqu'à 15% par (chaux, ciment et laitier) est déplacée vers la gauche indiquant une réduction de la teneur en eau initial (< 13.145 %) avec une augmentation de la densité sèche des mélanges suivants : Mélange 1 (100% de ciment) , Terre + 20% de Sable de dune, [Mélange 7 (50% de ciment + 50% de laitier)], Mélange 4 (50% de la chaux + 50% de ciment), Mélange 5 (33.3% de la chaux + 33.3% de ciment + 33.3% de laitier), Mélange 8 (100% de laitier) et Mélange 10 (16.7% de la chaux + 66.7% de ciment + 16.7% de laitier), elles sont de l'ordre de 2.092, 2.075, 2.041 ,2.031, 2.022, 1.993 et 1.991 t/m³, respectivement.

D'autre part la densité sèche diminue pour le mélange 3 (16.7% de la chaux + 16.7% de ciment + 66.7% de laitier), Mélange 6 (66.7% de la chaux + 16.7% de ciment + 16.7% de laitier), Mélange 2 (50% de la chaux + 50% de laitier) et Mélange 9 (100% de la chaux), elles sont de l'ordre de 1.961, 1.911, 1.901 et 1.900 t/m³, respectivement.

Ces résultats sont évidents, puisqu'on sait bien que si la teneur en eau est réduite, la densité sèche augmente surtout s'il s'agit d'un matériau de base minérale comme celle de l'argile.

L'introduction de ciment séparé (100% de ciment) ou combiné à forte teneur (en substitution) conduit à une augmentation de la densité sèche.

3.3.14. Résultats des essais à la compression

Les résultats obtenus de la résistance à la compression à 28 jours sont regroupés dans le tableau 3.28 et la figure 3.16.

Tableau 3.28. Résultat de la résistance à la compression à 28 jours

Mélange	Chaux	Ciment	Laitier	Rc _{28j} (MPa)
1	0	1	0	13.2
2	0.5	0	0.5	6.4
3	0.167	0.167	0.667	7.4
4	0.5	0.5	0	12.4
5	0.333	0.333	0.333	7.8
6	0.667	0.167	0.167	6.9
7	0	0.5	0.5	10.2
8	0	0	1	6.1
9	1	0	0	5.4
10	0.167	0.667	0.167	14

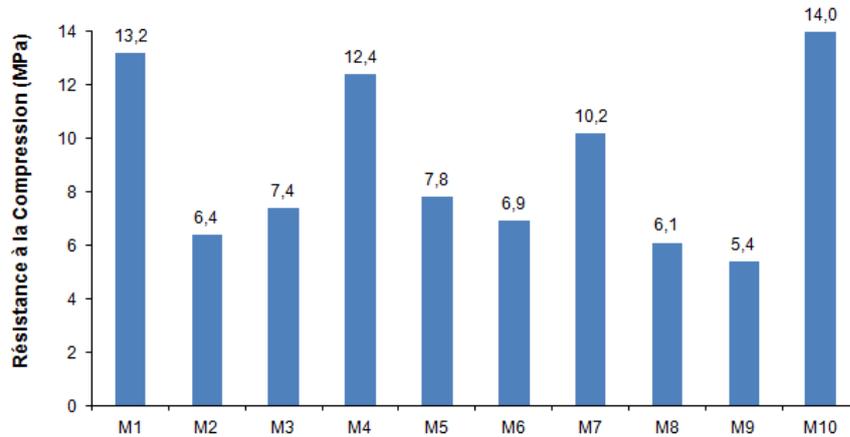


Figure 3.16. Evolution de la résistance à la compression des dix (10) mélanges.

L'introduction de ciment séparé (100% de ciment) ou combiné à forte teneur (en substitution) conduit à une amélioration considérable de la résistance mécanique à 28 jours. Il apparaît clairement que la résistance mécanique à la compression augmente avec le pourcentage d'additions jusqu'à un optimum (66.7% de ciment et 16.7% de chaux et 16.7% de laitier).

On remarque bien qu'il y'a une corrélation entre résistance à la compression et densité sèche, exception faite pour le mélange 8 (100% laitier), chose tout à fait normal puisque le laitier sans activant (ciment ou chaux) n'a aucun effet chimique.

3.4. Le résultat du plan de mélange

3.4.1. Analyse de variance (ANOVA)

L'analyse de variance (ANOVA) pour la résistance à la compression à 28 jours, étudie l'effet du modèle et les termes (linéaire-binaire) à partir des réponses mesurées.

Tableau 3.29. ANOVA pour la résistance à la compression à 28 jours

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F- Value	P-value Prob > F	
Model	84.02	5	16.80	8.24	0.0313	Significant
Linear Mixture	78.92	2	39.46	19.34	0.0088	
AB	5.03	1	5.03	2.47	0.1914	
AC	0.056	1	0.056	0.027	0.8767	
BC	4.995-003	1	4.995E-003	2.44E-003	0.6929	
Residual	8.16	4	2.04			
Cor Total	92.18	9				
Std. Dev.			1.43		R²	0.9115
Mean			8.98		Adj R²	0.8008
C.V. %			15.90		Pred R²	-0.4257
PRESS			131.41		Adeq Precision	0.848

La valeur F du modèle 8,24 implique que le modèle est significatif. Il n'y a que 3,13% de chances qu'une "valeur F du modèle" aussi importante puisse se produire en raison du bruit.

Les valeurs de "Prob > F" inférieures à ($< 0,05$) indiquent que les termes du modèle sont significatifs. Dans ce cas, les composants de mélange linéaire (Chaux, ciment et laitier) sont des termes de modèle significatifs. Les valeurs supérieures à ($> 0,05$) indiquent que les termes binaires du modèle (Chaux*ciment), (Chaux*laitier) et (Ciment*laitier) ne sont pas significatifs.

Les coefficients de détermination (R^2) et les coefficients ajustés (R^2 adj) ont été calculés pour vérifier l'adéquation du modèle. Les valeurs de (R^2) et (R^2 adj) sont proches de 1, ce qui implique également qu'il existe d'excellentes corrélations entre les modèles prédits et expérimentaux (Figure 3.17).

"Adeq Precision" mesure le rapport signal sur bruit. Un rapport supérieur à 4 est souhaitable. Le ratio de 7,848 indique un signal adéquat. Ce modèle peut être utilisé pour naviguer dans l'espace de conception. L'équation ci-dessous représente le modèle de régression de la réponse de la résistance en compression à 28 jours en termes des facteurs codés :

$$\text{Résistance à la compression à 28 jours, MPa} = + 5.20A + 13.88B + 6.17C + 9.97AB - 1.05AC + 0.31BC$$

La valeur de la résistance à la compression à 28 jours mesurée du béton de terre stabilisée est sous forme d'un graphique qui présente les valeurs observées en fonction des valeurs prévues (Figure 3.17). A partir de l'analyse des résultats, la majorité des réponses tracées est un peu proche à la droite de regression de la distribution.

La courbe ternaire de résistance à la compression à 28 jours est illustrée à la figure 3.18. On peut voir que le mélange 1 (100%) de ciment, donne des résistances à la compression plus élevées que celles avec des teneurs élevées en chaux et laitier. Cela peut être expliqué par les réactions chimiques du ciment et la formation des hydrates, ainsi que la diminution de porosité et l'augmentation de la compacité du béton de terre.

En effet, la présence de chaux et de laitier à faible teneur et du ciment à forte teneur améliore la résistance à la compression à 28 jours du béton de terre, notamment pour la teneur de

66.7% de ciment, 16.7% de chaux et de 16.7% de laitier par rapport à 100% de ciment (mélange1), et c'est ce que nous constatons avec le mélange10.

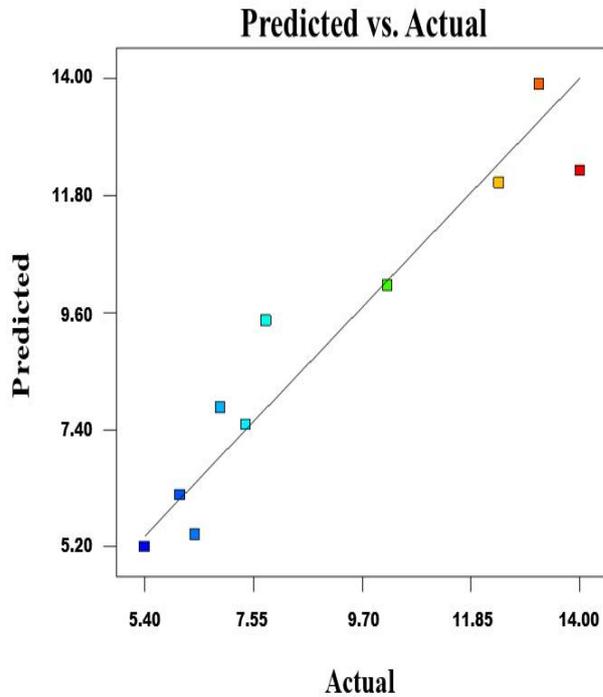


Figure 3.17. Graphique de distribution de probabilité normale pour la résistance à la compression à 28 jours.

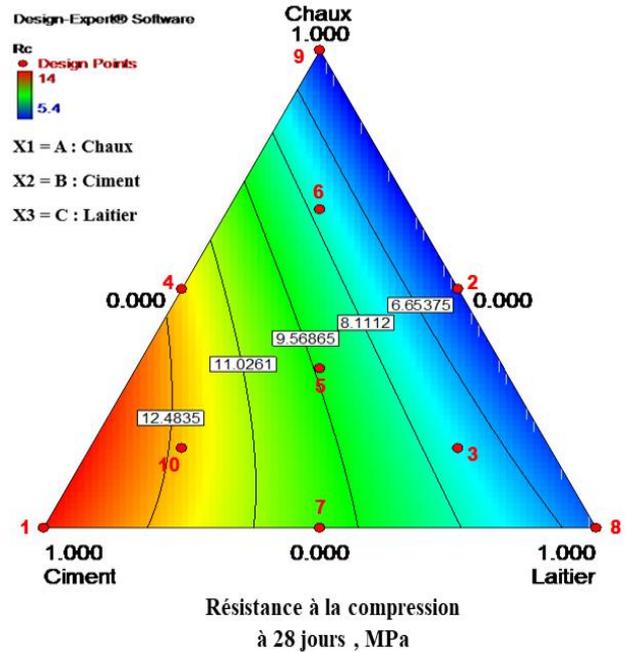


Figure 3.18. Courbes ternaires de la résistance à la compression à 28 jours.

3.5. Evaluation des types de rupture

Le mode de rupture de l'ensemble des éprouvettes présentant les 10 mélanges pour une résistance à la compression à 28 jours, montrent que les essais se sont déroulés correctement (Figure 3.19).

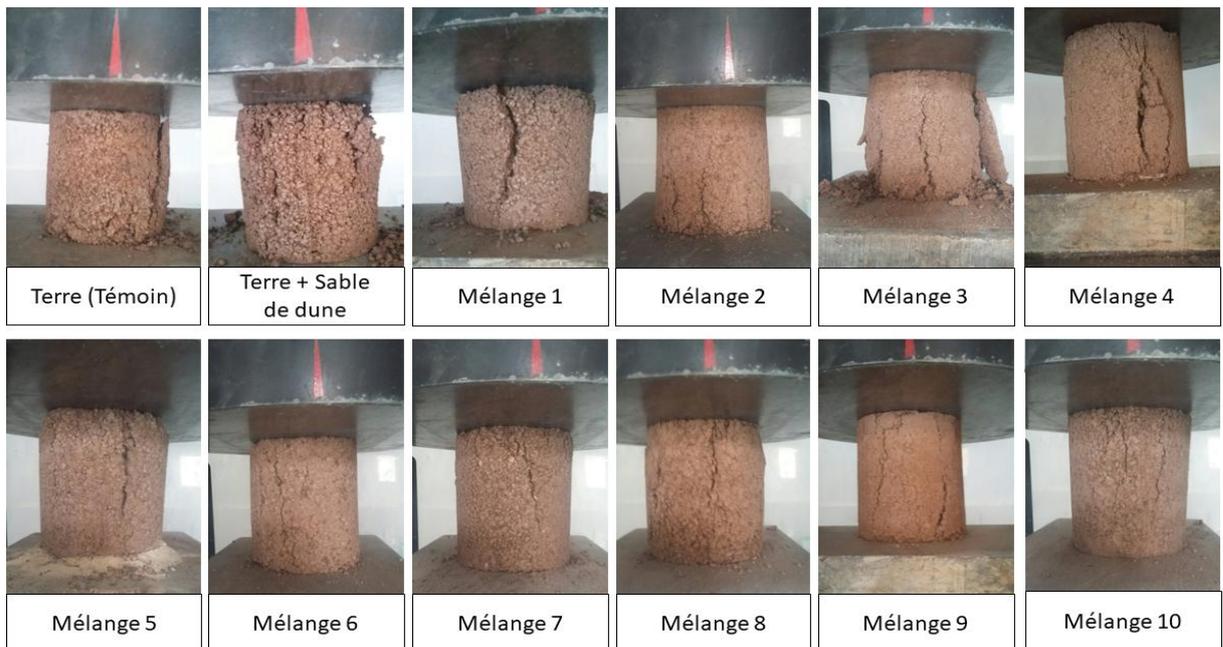


Figure 3.19. Le mode de rupture des dix mélanges.

3.6. Conclusion

Les résultats obtenus nous conduisent à tirer les conclusions suivantes :

- ✓ L'introduction au matériau de base (argile + sable) de ciment séparé des autres ajouts (laitier et chaux) (100% de ciment) ou combiné à forte teneur (en substitution) conduit à une amélioration considérable de la résistance mécanique à 28 jours jusqu'à un optimum (66.7% de ciment, 16.7% de chaux et 16.7% de laitier).
- ✓ La courbe Proctor de la terre stabilisée avec une substitution de la terre qui va jusqu'à 15% (chaux, ciment et laitier) est déplacée vers la gauche indiquant une réduction de la teneur en eau initial ($< 13.145\%$). La densité sèche augmente pour les mélanges dont la substitution par le ciment est supérieure à 33%, elle est de l'ordre de 2.
- ✓ Il y'a une corrélation entre résistance à la compression et densité sèche, exception faite pour le mélange 8 (100% laitier), chose tout à fait normal puisque le laitier sans activant (ciment ou chaux) n'a aucun effet chimique.

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

Conclusions Générales et Perspectives

L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence du laitier granulé de haut fourneau sur les propriétés physico-mécaniques des bétons de terre comprimée et stabilisée par le ciment et/ou la chaux. Les résultats obtenus nous conduisent à tirer les conclusions suivantes :

L'intérêt de modéliser la réponse étudiée par un polynôme et de pouvoir calculer ensuite toutes les réponses du domaine d'étude sans être obligé de faire toutes les expériences. La technique du plan de mélange est intéressante dans le sens où elle fait réduire le nombre des mélanges tout en faisant varier plusieurs facteurs à la fois.

L'introduction au matériau de base (argile + sable) de ciment séparé des autres ajouts (laitier et chaux) (100% de ciment) ou combiné à forte teneur (en substitution) conduit à une amélioration considérable de la résistance mécanique à 28 jours jusqu'à un optimum (66.7% de ciment, 16.7% de chaux et 16.7% de laitier).

La courbe Proctor de la terre stabilisée avec une substitution de la terre qui va jusqu'à 15% (chaux, ciment et laitier) est déplacée vers la gauche indiquant une réduction de la teneur en eau initial ($< 13.145\%$). La densité sèche augmente pour les mélanges dont la substitution par le ciment est supérieure à 33%, elle est de l'ordre de 2.

Il y'a une corrélation entre résistance à la compression et densité sèche, exception faite pour le mélange 8 (100% laitier), chose tout à fait normal puisque le laitier sans activant (ciment ou chaux) n'a aucun effet chimique.

Les résultats des différents travaux montrent clairement que les résistances mécaniques à la compression évoluent en fonction de la teneur en ciment et montre un accroissement notable pour les blocs stabilisés par la combinaison ciment, chaux et laitier. La résistance de ces blocs augmente significativement avec le temps de durcissement.

En perspectives, des études de durabilité s'imposent pour confirmer si les résultats obtenus seraient encourageants surtout pour les cycles de séchage/humidification et la tenue aux hautes températures.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographiques

- [1] I. Messaoudene, L. Molez and A. Amriou, " Effet du sable de dune sur la durabilité du béton de terre stabilisée et comprimée. " *AJCE vol. 38(1)*, 2020.
- [2] ARS (1996) Standard for terminology. Center for development of industry (CDI). African Regional Organization for Standardization. ARSO, Nairobi.
- [3] AP. Tuan, "Formulation et caractérisation d'un composite terre-fibres végétales : la bauge," *Thèse doctorat* : Université de l'Université de Caen, mai 2018.
- [4] NGO. Duc Chinh, "Développement d'un nouveau éco-béton à base de sol et fibres végétales –Etude du comportement mécanique et de durabilité, " *Thèse doctorat* : Université de Bordeaux, Novembre 2019.
- [5] BL. Armel, "Comportement hygro-thermo-mécanique de matériaux structuraux pour la construction associant des fibres de kénaf à des terres argileuses, " *Thèse doctorat* : Université de Caen, 2017.
- [6] A. Kouka and O. Jérémy, "Stabilisation de matériaux de construction durables et écologiques à base de terre crue par des liants organiques et/ou minéraux à faibles impacts environnementaux," *Thèse doctorat* : Université de Toulouse, Décembre 2017.
- [7] NGO. Duc Chinh, "Développement d'un nouveau éco-béton à base de sol et fibres végétales –Etude du comportement mécanique et de durabilité, " *Thèse doctorat* : Université de Bordeaux, Novembre 2019.
- [8] U. Rohlen, C. Ziegert and A. Mochel, " Construction en terre crue : Construction, rénovation, finitions, 2013 - catalogue-bu.u-bourgogne.fr
- [9] R. Daher, "L'architecture en terre crue dans la vallée du Jourdain ; Une filière en reconstruction...temporaire," *Thèse doctorat* : Université de Paris-Saclay, Novembre 2015.
- [10] S. Slimi, "La construction en pise entre performances énergétiques et perception des usages cas du village kabyle Ait Itcher, " *Mémoire de magister* : Université de Mouloud Mammeri - Tizi Ouzou, Février 2014.
- [11] Contribution de CRAterre au numéro hors-série de la revue L'Architecture d'Aujourd'hui - Perspectives durables, à travers une enquête "Redécouvrir la terre, matière première innovante", pp. 14-21, 2012.
- [12] C. Florian, "Etude Du Comportement Physico-Mecanique Du Bloc De Terre Comprimée Avec Fibres, " *Thèse doctorat* : Université de Biskra, 2014.
- [13] A. Layeb and A. Halbaoui, "Caractérisations physico-mécaniques d'un bloc de terre stabilisé avec la chaux à base des fibres (déchet de pneu usés - Verre), " *Mémoire de Master* : Université Ziane Achour de Djelfa, 2017.
- [14] P. Jehanne, "Construction En Terre Crue, " *Thèse de Master en Génie Civil* : Université de Liège, 2015.
- [15] L.A. Mango-Itulamy, "Valorisation des gisements argileux pour la fabrication des blocs de terre comprimée," *Thèse de Doctorat* : Université de Liège, Liège, 2019.
- [16] N. Cabane, "Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques : contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation," *Thèse de doctorat* : Ecole National Supérieur des Mines, Saint Etienne, 2004.
- [17] L. Amirouche, «Etude du pouvoir de sorption du cuivre (II), du Zinc (II) et des polyphénols par les bentonites sous l'effet des irradiations micro-ondes, " *Mémoire de Magister* : Université de Tizi-Ouzou, 2011.
- [18] M. Harrat, "Contribution à l'amélioration du procédé de Fabrication de la céramique. Etude sur site : unité Mergheb céramique de Touggourt, " *Mémoire de magister* : Université de Ouargla, 2007.

- [19] N. Oubagha, "Décantation des eaux contenant les colorants textiles et les adjuvants par des matériaux naturels et synthétique, " *Mémoire de Magister* : Université de Tizi-Ouzou, 2011.
- [20] Z. Belmri, "Elaboration et caractérisation des matériaux polycristallins à base de Kaolin DD et KT2, " *Mémoire magister* : Université de Constantine, 2008.
- [21] M.R. Boudchicha, " Etude de la cristallisation et des propriétés mécaniques et Diélectriques de céramiques préparés à partir de Kaolin-Dolomite, " *Thèse de Doctorat* : Université de Batna, 2005.
- [22] S. ZEN, "Etude des propriétés physico-chimiques des argiles de l'Est Algérien. Application à l'adsorption des colorants de tannerie, " *Thèse doctorat* : Université de 8 mai 1945 de Guelma 2015.
- [23] M. Gautier, "Interactions entre argile ammoniée et molécules organique dans le contexte du stockage des déchets .cas de molécules a courtes chaînes, " *Thèse de doctorat* : Université de d'Orléans, 2008.
- [24] M.C. Jiménez Delgado and I.C. Guerrero, "The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review," *Construction and Building Materials*, vol. 21, pp. 237–251, 2007.
- [25] P. Doat, A. Hays, H. Houben, S. Matuk and F. Vitoux, "Construire en terre, " *Editions Alternatives et Parallèles, collection An Architecture*, Paris, France, 265p, 1979.
- [26] A. Guettala, A. Abibsi and H. Houari "Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure," *Construction and Building Materials*, vol. 20, pp.119– 127, 2005.
- [27] H. Guillaud, H and Houben "*Traité de construction en terre*, " 2006.
- [28] M. Vénuat, "Le traitement des sols à la chaux et au ciment, " *Paris : Cerilh*, 1980.
- [29] A. Layeb and A. Halbaoui, "Stabilisation de matériaux de construction durables et écologiques à base de terre crue par des liant organiques et/ou minéraux à faibles impacts environnementaux, " *Thèse de doctorat* : Université de Toulouse, 2019.
- [30] O. Izemmouren, "Effet des ajouts minéraux sur la durabilité des briques de terre comprimée, " *Thèse doctorat* : Université Mohamed Khider, Biskra, 2016.
- [31] R. Bahar, M. Benazzoug and S. Kenai, "Performance of compacted cement stabilised soil," *Cement and Concrete Composites*, vol. 25, No 6, pp. 633- 641, 2004.
- [32] A. Guettala, H. Houari, B. Mezghiche and R. Chebili, "Durability of lime stabilized earth blocks," *Courrier du Savoir*, N°02, pp. 61-66, 2002.
- [33] H. Houben and H. Guillaud, "Earth construction—a comprehensive guide," *London: Intermediate Technology*; 1994.
- [34] O. Izemmouren and A. Guettala, "Amélioration de la durabilité des blocs de terre comprimée à base d'un sol de la région de Biskra, " *Matec web of conférences 11 : 02001*, 2014.
- [35] A. Abouismail and K. Ziani, "Étude comparative d'argile stabilisée au laitier active au ciment/chaux, " *Mémoire de Master* : Université Badji Mokhtar, Annaba,- 2019.
- [36] S. Messadi and H. Zaidi, "Effet du sable sur les caractéristiques mécaniques du béton de terre stabilisée, " *Mémoire de Master* : Université de Bordj Bou Arréridj, Juillet 2019.
- [37] O. Izemmouren, K. Gadri and A. Guettala, " Effet des conditions de cure sur les propriétés physiques et mécaniques des blocs de terre comprimée, " *21^{ème} Congrès Français de Mécanique*, Bordeaux, 26-30 Aout 2013.
- [38] O. Izemmouren and A. Guettala, "Effet du laitier de haut fourneau sur les propriétés d'ingénierie des briques de terre comprimée à base d'un sol portant de sulfate, " *Conférence Matériaux 2014 - Colloque Eco-Matériaux*, Novembre 2014, Montpellier, France.

- [39] S. Latreche and H. Bentabet, " Effet de l' Ajout du Laitier Granulé sur les Propriétés Physico-Mécaniques et la Durabilité des BTC, " *Mémoire de Master* : Université de Bordj Bou Arréridj, Novembre 2020.