



UNIVERSITÉ MOHAMED EL BACHIR EL IBRAHIMI BORDJ BOU ARRÉRIDJ

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Département de Génie Civil

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux De Génie Civil

SUJET

Effet du Sable sur la Durabilité du Béton de Terre Stabilisée

Par:

Mrs. SEHILI Farid & OULD AMER Ahmed

Soutenu publiquement le : 06/07/2019 devant le jury composé de :

| | |
|--------------------------------|--------------|
| Dr. ZIANI Hocine | Président |
| Dr. MESSAOUDENE Ibrahim | Encadreur |
| Dr. AMRIOU Abderachid | CO-Encadreur |
| Dr. GUELMINE Layachi | Examineur |
| Dr. LOGZIT Nacer | Examineur |

Promotion : 2018/2019

DEDICACES

**ON DÉDIE CE MODESTE TRAVAIL À NOS PARENTS, À
TOUS LES MEMBRES DE NOS FAMILLES, ET À TOUS NOS
AMIS.**

REMERCIEMENTS

Nous remercions Dieu de nous avoir donné la force de finir ce modeste travail de recherche dans les meilleures conditions.

Ces travaux de recherche ont été menés au laboratoire de Génie Civil de l'université Bordj Bou Arreridj.

Nous tenons à remercier par cette occasion, notre encadreur Dr MESSAOUDENE Ibrahim et Co-encadreur, Dr AMRIOU Abderachid pour leurs conseils qui ont permis de mener à bien le mémoire. Ainsi que les ingénieurs de laboratoire.

Comme nous remercions nos parents, nos camarades, nos amis et tous ceux qui ont participé à la réalisation de ce modeste travail.

Table des matières

| | |
|-----------------------|--|
| Dédicace | |
| Remerciement | |
| Liste des figures | |
| Liste des tableau | |
| Résumé | |
| Introduction générale | |

CHAPITRE 1 : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

| | | |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <u>1.1</u> | <u>Introduction</u> : | 4 |
| <u>1.2</u> | <u>Techniques d'utilisation de la terre en construction</u> | 4 |
| <u>1.3</u> | <u>La BTC (Brique de Terre Compressée) et BTCS (Brique de Terre Compressée Stabilisée)</u> | 7 |
| <u>1.3.1</u> | <u>La construction en bloc de terre comprimée dans le monde</u> | 7 |
| <u>1.3.2</u> | <u>Diversités des produits de blocs de terre comprimée</u> | 8 |
| <u>1.3.3</u> | <u>Avantage des BTC</u> | 9 |
| <u>1.4</u> | <u>La terre comme matériau de construction</u> | 9 |
| <u>1.4.1</u> | <u>Généralités sur les argiles et les minéraux argileux</u> | 9 |
| <u>1.4.2</u> | <u>Les argiles</u> | 10 |
| <u>1.5</u> | <u>Les propriétés du matériau terre en construction</u> | 12 |
| <u>1.5.1</u> | <u>Texture</u> | 12 |
| <u>1.5.2</u> | <u>Plasticité</u> | 13 |
| <u>1.5.3</u> | <u>Matière organique</u> | 14 |
| <u>1.5.4</u> | <u>Sulfates</u> | 14 |
| <u>1.6</u> | <u>Stabilisation des sols</u> | 15 |
| <u>1.6.1</u> | <u>Stabilisation mécanique</u> | 15 |
| <u>1.6.2</u> | <u>Stabilisation physique</u> | 17 |
| <u>1.6.3</u> | <u>Stabilisation chimique</u> | 17 |
| <u>1.7</u> | <u>Conclusions</u> | 26 |

CHAPITRE 2 : MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

| | | |
|-------|------------------------------------------------|----|
| 2.1 | <u>Introduction</u> | 28 |
| 2.2 | <u>Matériaux utilisés</u> | 28 |
| 2.2.1 | <u>Sable de dune</u> | 28 |
| 2.2.2 | <u>Sol argileux</u> | 34 |
| 2.2.3 | <u>CIMENT</u> | 37 |
| 2.2.4 | <u>L'eau gâchage</u> | 38 |
| 2.3 | <u>Confection des blocs</u> | 38 |
| 2.3.1 | <u>Matériel spécifique</u> | 38 |
| 2.3.2 | <u>Mélanges</u> | 39 |
| 2.3.3 | <u>Malaxage des mélanges</u> | 40 |
| 2.3.4 | <u>Optimisation de la teneur en eau</u> | 41 |
| 2.3.5 | <u>Compactage des mélanges</u> | 42 |
| 2.4 | <u>La cure des blocs</u> | 44 |
| 2.5 | <u>Résistances mécaniques</u> | 45 |
| 2.5.1 | <u>Résistance à la compression sèche</u> | 45 |
| 2.6 | <u>Essai de la durabilité</u> | 46 |
| 2.6.1 | <u>Séchage/ mouillage</u> | 46 |
| 2.6.2 | <u>Absorption totale</u> | 47 |
| 2.7 | <u>Conclusion</u> | 48 |

CHAPITRE 3 : RÉSULTATS ET DISCUSSION

| | | |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1 | <u>Introduction</u> | 50 |
| 3.2 | <u>Résistance à la compression</u> | 50 |
| 3.2.1 | <u>L'effet de sable et de la contrainte de compactage sur la résistance à la compression</u> | 52 |
| 3.3 | <u>Masse volumique</u> | 53 |
| 3.3.1 | <u>L'effet de sable et de la contrainte de compression sur la masse volumique des BTC</u> | 55 |
| 3.4 | <u>Absorption totale</u> | 55 |
| 3.5 | <u>Perte de Masse</u> | 59 |
| 3.5.1 | <u>Effet de sable et de la contrainte de compactage sur la perte de masse du BTC après 12 cycles de séchage/mouillage</u> | 74 |
| 3.6 | <u>Conclusion</u> | 74 |
| | <u>Conclusion général</u> | 75 |

Liste des figure

CHAPITRE 1 : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <u>Figure 1.1: (a) et (b) mise en œuvre du pise ; (c) exemple de mur en pise</u> | 5 |
| <u>Figure 1.2: (a) La technique du torchis illustrée ; (b) Une construction en torchis à Angers, France</u> | 6 |
| <u>Figure 1.3: Construction en adobe (Sources Internet) 1</u> | 6 |
| <u>Figure 1.4: Construction en BTC (Sources Internet)</u> | 7 |
| <u>Figure 1.5: Constructions réalisées en blocs de terre comprimée</u> | 8 |
| <u>Figure 1.6: Différents produits de blocs de terre comprimée</u> | 9 |
| <u>Figure 1.7: Couches tétraédrique et octaédrique</u> | 10 |
| <u>Figure 1.8: Agencement des couches octaédriques et tétraédriques</u> | 11 |
| <u>Figure 1.9: Fuseaux granulaires adoptés pour différentes techniques</u> | 13 |
| <u>Figure 1.10: Les zones des limites d'Atterberg de la construction en terre</u> | 14 |
| <u>Figure 1.11: Influence de la contrainte de compactage et la teneur en chaux</u> | 16 |
| <u>Figure 1.12: Influence de la granularité sur la compacité</u> | 16 |
| <u>Figure 1.13: Absorption totale en fonction de la teneur en sable</u> | 17 |
| <u>Figure 1.14: Eléments constitutifs d'une pâte de ciment. (CH) désigne la portlandite, (CSH) désigne l'hydrate tobermorite et (Ett.) désigne l'ettringite</u> | 19 |
| <u>Figure 1.15: Mécanisme de l'adsorption de cations Ca^{2+} sur la surface latérale</u> | 21 |
| <u>Figure 1.16: Représentation schématique de la microstructure du limon de Meaux</u> | 22 |
| <u>Figure 1.17: Représentation schématique de la microstructure du limon de Meaux</u> | 22 |
| <u>Figure 1.18: Hydrates calciques développés par réaction pouzzolanique</u> | 24 |
| <u>Figure 1.19: Modification des limites d'Atterberg d'un sol après traitement à la chaux</u> | 25 |

CHAPITRE 2 : MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <u>Figure 2.1: Courbe granulométrique du sable de dune</u> | 31 |
| <u>Figure 2.2: Courbe granulométrique de l'argile</u> | 35 |
| <u>Figure 2.3: Classification LCPC des sols fins en laboratoire. Diagramme de plasticité</u> | 36 |
| <u>Figure 2.4: moule cylindrique utiliser pour la fabrication des BTC</u> | 39 |
| <u>Figure 2.5: Combinaison des mélanges des blocs</u> | 39 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| <u>Figure 2.6: Malaxage à sec (a), avec l'eau (b).</u> | 40 |
| <u>Figure 2.7: Mise en place du matériau dans le moule.</u> | 41 |
| <u>Figure 2.8: Mélange homogène visuellement</u> | 42 |
| <u>Figure 2.9: Compactage de l'éprouvette</u> | 43 |
| <u>Figure 2.10: Démoulage de l'éprouvette.</u> | 43 |
| <u>Figure 2.11: Conservation des éprouvettes.</u> | 44 |
| <u>Figure 2.12: Conservation des éprouvettes au laboratoire.</u> | 45 |
| <u>Figure 2.13: Essai de compression.</u> | 45 |
| <u>Figure 2.14: Eprouvette émergée dans l'eau.</u> | 46 |
| <u>Figure 2.15: Éprouvettes séchées dans l'étuve.</u> | 47 |

CHAPITRE 3 : RÉSULTATS ET DISCUSSION

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <u>Figure 3.1. Evolution de la résistance à la compression moyenne à l'état sec en fonction du taux de sable pour 10MPa.</u> | 51 |
| <u>Figure 3.2. Evolution de la résistance à la compression moyenne à l'état sec en fonction du taux de sable pour 20MPa.</u> | 52 |
| <u>Figure 3.3. Evolution de la résistance à la compression moyenne à l'état sec en fonction du taux de sable et de la contrainte de compactage.</u> | 52 |
| <u>Figure 3.4. L'influence du taux de sable sur la masse volumique des BTC.</u> | 54 |
| <u>Figure 3.5. L'influence du taux de sable sur la masse volumique des BTC.</u> | 55 |
| <u>Figure 3.6. Effet du sable sur l'absorption totale d'eau des bétons comprimés à 10MPa.</u> | 56 |
| <u>Figure 3.7. Effet du sable sur l'absorption totale d'eau des bétons comprimés à 20MPa.</u> | 57 |
| <u>Figure 3.8. Effet du sable et de la contrainte de compactage sur l'absorption d'eau.</u> | 58 |
| <u>Figure 3.9. Perte de masse moyenne E1 du BTC comprimée à 10MPa</u> | 59 |
| <u>Figure 3.10. Éprouvettes E1 après 12 cycles de séchage/mouillage</u> | 60 |
| <u>Figure 3.11. Perte de masse moyenne E2 du BTC comprimée a 10MPa.</u> | 61 |
| <u>Figure 3.12. Éprouvettes E2 après 12 cycles de séchage/mouillage</u> | 61 |
| <u>Figure 3.13. Perte de masse moyenne E3 du BTC comprimée a 10MPa.</u> | 62 |
| <u>Figure 3.14. Éprouvettes E3 après 12 cycles de séchage/mouillage.</u> | 63 |
| <u>Figure 3.15. Perte de masse moyenne E4 du BTC comprimée a 10MPa.</u> | 64 |
| <u>Figure 3.16. Éprouvettes E4 après 12 cycles de séchage/mouillage</u> | 64 |
| <u>Figure 3.17. Perte de masse moyenne E5 du BTC comprimée a 10MPa.</u> | 65 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <u>Figure 3.18. Éprouvettes E5 après 12 cycles de séchage/mouillage</u> | 66 |
| <u>Figure 3.19. Perte de masse moyenne F1 du BTC comprimée a 20MPa</u> | 67 |
| <u>Figure 3.20. Éprouvettes F1 après 12 cycles de séchage/mouillage</u> | 67 |
| <u>Figure 3.21. Perte de masse moyenne F2 du BTC comprimée a 20MPa</u> | 68 |
| <u>Figure 3.22. Éprouvettes F2 après 12 cycles de séchage/mouillage</u> | 69 |
| <u>Figure 3.23. Perte de masse moyenne F3 du BTC comprimée a 20MPa</u> | 70 |
| <u>Figure 3.24. Éprouvettes F3 après 12 cycles de séchage/mouillage</u> | 70 |
| <u>Figure 3.25. Perte de masse moyenne F4 du BTC comprimée a 20MPa</u> | 71 |
| <u>Figure 3.26. Éprouvettes F4 après 12 cycles de séchage/mouillage</u> | 72 |
| <u>Figure 3.27. Perte de masse moyenne F5 du BTC comprimée a 20MPa</u> | 73 |
| <u>Figure 3.28. Éprouvettes F5 après 12 cycles de séchage/mouillage</u> | 73 |
| <u>Figure 3.29. Effet de sable et de la contrainte de compactage sur la perte de masse des BTC après 12 cycles de séchage/mouillage</u> | 74 |

Liste des Tableaux

CHAPITRE 1 : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

| | |
|---------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1.1: Résumé des différentes types d'argile..... | 12 |
|---------------------------------------------------------|----|

CHAPITRE2 : MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 2.1:Les préconisations en matière de propreté pour les sables..... | 29 |
| Tableau 2.2: Résultats obtenu pour essai équivalente de sable..... | 29 |
| Tableau 2.3: Classement de sable. | 30 |
| Tableau 2.4: les résultats des analyses granulométrique du sable de dune..... | 31 |
| Tableau 2.5: pourcentage du tamisât de sable de dune. | 31 |
| Tableau 2.6: Résultats du module de finesse de sable | 32 |
| Tableau 2.7: la masse volumique apparente (ρ app) du sable | 33 |
| Tableau 2.8: Masse volumique absolue | 33 |
| Tableau 2.9: Les masses volumiques des sols..... | 34 |
| Tableau 2.10 : Résultats de l'analyse granulométrique pour l'argile..... | 34 |
| Tableau 2.11: Résultats limite d'Atterberg | 35 |
| Tableau 2.12: Composition chimique du sol..... | 37 |
| Tableau 2.13: Composition minéralogique du sol. | 37 |
| Tableau 2.14: Les caractéristiques de ciment..... | 38 |
| Tableau 2.15: Les compositions de différents mélanges..... | 40 |
| Tableau 2.16: Optimisation de la teneur en eau | 42 |

CHAPITRE 3 : RÉSULTATS ET DISCUSSION

| | |
|-----------------------------------------------------------|----|
| Tableau 3.1. Résistance à la compression pour 10MPa. | 50 |
| Tableau 3.2. Résistance à la compression pour 20MPa. | 51 |
| Tableau 3.3. Masse volumique des BTC..... | 53 |
| Tableau 3.4. Masse volumique de BTC | 54 |
| Tableau 3.5. Résultats d'absorption d'eau. | 56 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 3.6. Résultats d'absorption d'eau | 56 |
| Tableau 3.7. Résultats de perte de masse moyenne E1 du BTC pendant 12 cycles..... | 59 |
| Tableau 3.8. Résultats de perte de masse moyenne E2 du BTC pendant 12 cycles..... | 60 |
| Tableau 3.9. Résultats de perte de masse moyenne E3 du BTC pendant 12 cycles..... | 62 |
| Tableau 3.10. Résultats de perte de masse moyenne E4 du BTC pendant 12 cycles | 63 |
| Tableau 3.11. Résultats de perte de masse moyenne E5 du BTC pendant 12 cycles | 65 |
| Tableau 3.12. Résultats de perte de masse moyenne F1 du BTC pendant 12 cycles..... | 66 |
| Tableau 3.13. Résultats de perte de masse moyenne F2 du BTC pendant 12 cycles..... | 68 |
| Tableau 3.14. Résultats de perte de masse moyenne F3 du BTC pendant 12 cycles..... | 69 |
| Tableau 3.15. Résultats de perte de masse moyenne F4 du BTC pendant 12 cycles..... | 71 |
| Tableau 3.16. Résultats de perte de masse moyenne F5 du BTC pendant 12 cycles..... | 72 |

RESUME

La conception écologique des structures et le développement durable jouent un rôle important dans l'industrie de la construction. Les matériaux écologiques de construction tels que le béton de terre, contenant une proportion de divers composants écologiques, sont de grande importance aujourd'hui. L'objectif de la production de ce béton est de réduire la consommation de ciment et donc la production de CO₂.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'effet de sable sur la durabilité des bétons de terre compressée et stabilisée (BTCS) après 12 cycles de séchage/mouillage, de point de vue : résistance à la compression, masse volumique, absorption totale et perte de masse.

Dans ce cadre, on a utilisé cinq mélanges (0, 20, 40, 60 et 80 %) du poids du mélange sec, avec 10% de ciment pour le stabiliser. Le mélange est compacté avec deux contraintes différentes (10 et 20MPa). Les échantillons (moules Proctor) ont été conservés au laboratoire à une température $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ pendant 28 jours.

Les résultats indiquent que la résistance à la compression et la durabilité des (BTC) sont bien meilleures pour un taux de sable de 60% et une contrainte de compactage de 20MPa.

Mots Clés : Béton de terre, perméabilité, compactage, résistance à la compression, durabilité.

ملخص

يلعب التصميم البيئي للهياكل والتنمية المستدامة دورًا مهمًا في صناعة البناء والتشييد. تعتبر مواد البناء البيئية مثل الخرسانة الترابية، التي تحتوي على نسبة من المكونات البيئية المختلفة، ذات أهمية كبيرة اليوم. الهدف من إنتاج هذه الخرسانة هو تقليل استهلاك الأسمنت وبالتالي إنتاج ثاني أكسيد الكربون.

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة تأثير الرمال على متانة خرسانة ترابية المضغوطة والمثبتة (BTCS) بعد 12 دورة من التجفيف / الترطيب ، من وجهة نظر: المقاومة للضغط ، الكثافة ، الاستيعاب الكلي وفقدان الكتلة.

في هذا السياق ، تم استخدام خمسة مخاليط رمل (0 ، 20 ، 40 ، 60 و 80٪) من وزن الخليط الجاف ، مع 10٪ من الأسمنت لتثبيتته. يتم ضغط الخليط مع اثنين من الضغوط المختلفة (10 و 20MPa). تم تخزين العينات (قوالب بروكتور) في المختبر في درجة حرارة $T = 20 \pm 2$ درجة مئوية لمدة 28 يومًا.

تشير النتائج إلى أن قوة الضغط والمتانة لـ (BTC) أفضل بكثير بالنسبة لمحتوى الرمل بنسبة 60 ٪ وإجهاد الضغط .MPa20

الكلمات المفتاحية: الخرسانة ترابية ، النفاذية ، الرص ، مقاومة الضغط ، الديمومة

ABSTRACT

The ecological design of structures and the sustainable development is nowadays of high importance in the construction industry. Thus, alternative building materials such as soil concrete containing a proportion of various ecological components are of high importance nowadays. The aim of producing ecological concrete is to reduce the consumption of cement and thus the CO₂ production.

The main objective of this work is to study the effect of sand on the durability of compressed and stabilized a soil concrete (BTCS) after 12 cycles of drying / wetting, from the point of view: compressive strength, density, total absorption and mass loss.

In this context, five sand contents (0, 20, 40, 60 and 80%) of the weight of the dry mixture were used, with 10% of cement to stabilize it. The mixture is compacted with two different stresses (10 and 20MPa). The samples (Proctor mussels) were stored in the laboratory at a temperature $T = 20 \pm 2$ ° C for 28 days.

The results indicate that the compressive strength and durability of the (BTC) are much better for a sand content of 60% and a compaction stress of 20MPa.

Keywords: A soil concrete, permeability, compaction, compressive strength, durability

Introduction générale

Introduction générale

De nos jours, le changement climatique est l'un des défis les plus complexes. Les humains sont en face des phénomènes extrêmes tels que le réchauffement de la planète, la fonte de la glace polaire, les inondations, les incendies de forêt, les tremblements de terre, les tsunamis, etc. Une des différentes causes responsables du réchauffement climatique est les émissions de gaz à effet de serre notamment le CO₂. L'aspect écologique d'un bâtiment ou d'un ouvrage, tout comme la sécurité et la pérennité mécanique, prend une place importante dans la construction. Selon les études de l'OCDE (Organisation de Coopération et de Développement Economique), la phase d'utilisation des bâtiments représente 25% à 40% de la consommation totale d'énergie dans les pays de l'OCDE (**Etats-Unis , Europe, Japon**). Cette consommation est équivalente à celle du secteur industriel.

Depuis les temps les plus reculés, la terre crue composée essentiellement d'argile et de particules fines, constitue un matériau de base de forte importance. En effet, elle est disponible en grande quantité partout. Elle ne nécessite que très peu d'énergie pour sa fabrication et ne génère et pas de déchets. La terre crue a été utilisée dans la construction sous différentes formes tels que : l'adobe, le pisé, la terre paille, le torchis, les briques de terre compressée, la bauge (terre crue empilée), etc. La terre crue peut également être utilisée comme matériau de remplissage et d'isolation et formuler des enduits.

Les éco-matériaux à base de sol argileux représentent l'avenir de la construction. On assiste ces dernières années à des changements de comportement et une volonté de voir les bétons classiques remplacés par des bétons contenant une forte proportion de produits dits « écologiques » variés pour favoriser cette mutation. Ces bétons écologiques ont pour objectif de réduire la consommation du ciment, donc la réduction des quantités de CO₂ et maintenir des propriétés acceptables. De nos jours, les constructions sont des structures plus complexes, plus grandes et nécessitent des matériaux plus performants. De ce fait, des études sont nécessaires pour comprendre les phénomènes liés aux interactions physico-chimiques entre les sols argileux et les liants et ainsi mettre en évidence le rôle de chaque liant et les cinétiques des réactions chimiques à l'échelle macroscopique ou microstructurale afin de pouvoir améliorer les caractéristiques de ces bétons.

Par rapport à l'histoire de la construction en terre, la technique du bloc de terre comprimée (BTC) est une technique récente, elle permet d'avoir des blocs d'un format très souple sur le plan de la maçonnerie et peut s'intégrer aussi bien dans une structure poteau-poutre comme matériau de remplissage que comme matériau principal dans un mur porteur. Pour obtenir de meilleures caractéristiques mécaniques du BTC, réduction de sa porosité, variations de volume (gonflement et retrait) et amélioration de la résistance à l'érosion du vent et de la pluie (réduire l'abrasion de surface et la perméabilité du bloc), plusieurs stabilisants peuvent être utilisés: comme le ciment, la chaux, le bitume, les fibres,...etc.

Introduction générale

Comme tout nouveau matériau, le béton à base de sol argileux étudié dans ce mémoire nécessite des plans d'expérience permettant d'optimiser sa formulation et de mieux comprendre son comportement par l'effet de sable sur la résistance mécanique et la durabilité.

Notre mémoire est composé de trois chapitres. Il commence par une introduction générale et se termine par une conclusion générale.

- ✓ Le premier chapitre est une synthèse bibliographique succincte. Dans ce chapitre, les différentes méthodes de traitements de la terre crue pour la construction, les différents modes d'utilisation et de mise en œuvre seront présentés. L'état de l'art de mécanisme de l'interaction physico – chimique de sols argileux – liants. Ou de traitement du sol par le ciment, la chaux.

- ✓ Le deuxième chapitre porte sur l'identification et la caractérisation des matériaux qui ont été utilisés dans cette étude (les sols, le sable de dune, le ciment). Ce chapitre présente aussi les mélanges, le mode de conservation et les procédures d'essai expérimentales utilisés dans cette étude.

- ✓ Le troisième chapitre présente les résultats expérimentaux discussions.

Chapitre 1 :

Étude Bibliographique

1.1 Introduction :

La terre crue est utilisée comme un matériau de construction depuis très longtemps, notamment pour la construction des maisons individuelles. Selon un document de CRATerre (Centre international de la construction en terre) [1], plus d'un tiers des habitants de la planète habitent encore dans des maisons en terre. En effet, la terre crue est une source naturelle. C'est un matériau économique et facile à utiliser quand 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 puisqu'ils présentent de bonnes propriétés de cohésion.

Les applications du béton à base de terre sont en cours d'étude en raison de la variété de ses propriétés. Les études récentes portent sur les propriétés principales de ce matériau telles que la formulation, la résistance mécanique. Elles indiquent que ce matériau est sensible aux cycles de dessiccation-imbibition (cycles hygrothermiques), qui induisent des fissurations parfois remarquables [2]. Cependant, certaines propriétés physiques et propriétés mécaniques n'ont pas encore été étudiées comme le retrait, le fluage et les propriétés de transfert.

1.2 Techniques d'utilisation de la terre en construction

La construction en terre crue est une technique de construction très ancienne et connue dans tout le monde étant donné qu'elle a été le premier matériau de construction utilisé par l'homme. Il existe différents modes de mise en œuvre de la terre crue. D'après **Houben H, et Guillaud H** [3] dénombre douze techniques, chaque technique utilise une terre bien précise. En effet, chacune d'elle a une formulation différente. Les quatre techniques de construction les plus répandues sont les suivantes : l'adobe, le torchis, le pisé et les briques de terre comprimée (BTC).

❖ Pisé

La technique du pise consiste à construire des murs massifs en compactant de la terre humide et pulvérulente dans des coffrages (figure 1.1.a et 1.1.b). Le mur est décoffré immédiatement après que la terre a été damée.

Au printemps et à l'automne, la terre contient naturellement la bonne quantité d'eau peut être mise en œuvre ainsi. La simplicité avec laquelle le tas de terre est transformé en un mur solide et cohérent par simple compression semble magique. Cette technique est relativement longue à mettre en œuvre, ce qui fait du pise un matériau haut de gamme dans les pays industrialisés.

Une fois décoffré, le mur présente une texture et une couleur unique appréciées par les architectes, et il est inutile de l'enduire (figure 1.1.c) [2].

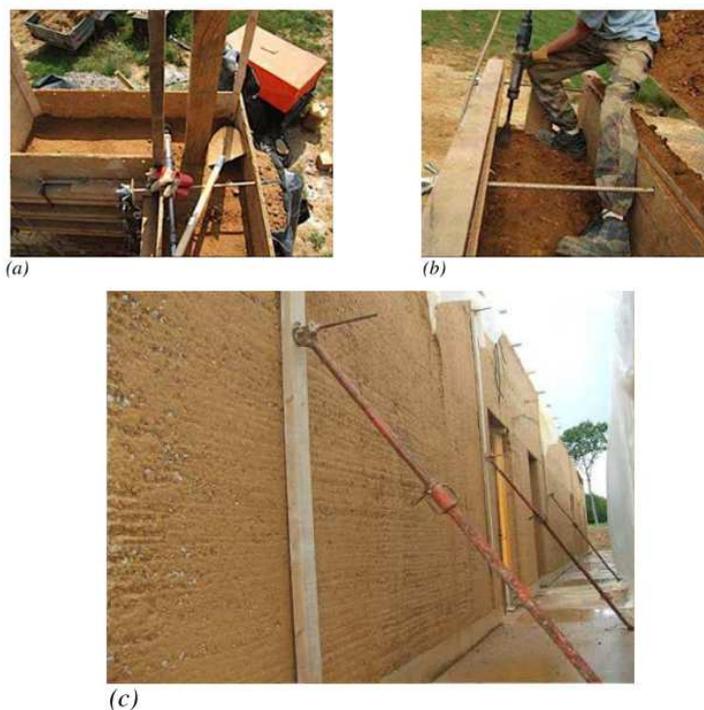


Figure 1.1. (a) et (b) mise en œuvre du pise ; (c) exemple de mur en pise [2].

❖ Torchis

La technique du torchis utilise une ossature en bois emplie de terre, ou le plus souvent d'un mélange de terre et de paille. Le matériau à l'état plastique est ainsi forcé de remplir les espaces vides. La surface peut être laissée telle qu'elle ou enduite pour obtenir des finitions plus régulières. Les murs en torchis ne sont pas porteurs et leur épaisseur est généralement comprise entre 15 et 20 cm. [4]

La Figure 1.2a montre un mur en torchis pendant sa construction, tandis que la Figure 1.2b est un édifice en torchis situé à Angers, en France.



Figure 1.2. (a) La technique du torchis illustrée ; (b) Une construction en torchis à Angers, France [4].

❖ L'adobe

L'adobe est une brique en terre crue façonnée à la main ou dans un moule en bois à l'état plastique et séchée à l'air libre. Actuellement, certains procédés incluent un ajout de paille afin d'obtenir une meilleure isolation thermique. **Costi et al., [5]** suggèrent que la teneur en argile/limon pour la production d'adobe devrait être comprise entre 5 et 70 %. **Dao et al., [6]** ont utilisé un sol qui se compose de 4,7 % de sable grossier, 37,9 % de sable fin (20-200 μm), 22,7 % de limon (2-20 μm) et 29,9 % d'argile (<2 μm). Les dimensions d'une brique d'adobe varient beaucoup : 60 x 40 x 5 cm, 45 x 30 x 5 cm, 50 x 36 x 5 cm, 40 x 30 x 6 cm [5].



(a) Séchage des adobes

(b) Mur d'une maison en adobe

Figure 1.3. Construction en adobe (Sources Internet) 1

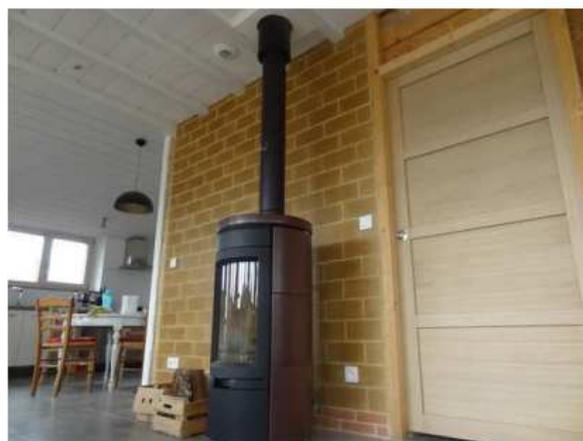
Dao, K., et al, [6] rapportent une conductivité thermique aux alentours de $1,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ pour une masse volumique apparente de $1780 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. La résistance est supérieure à 2,5 MPa en compression et à 1 MPa en flexion [6].

1.3. La BTC (Brique de Terre Compressée) et BTCS (Brique de Terre Compressée Stabilisée)

Les briques de terre compressée (BTC) et briques de terre compressée stabilisée (BTCS) sont obtenues par compression de la terre dans des presses et sont immédiatement démoulés contrairement aux briques d'adobe (Figure 1.4). Pour la construction de blocs de terre compressée, **Houben et al.**, [7] recommandent un sol contenant : 0-40 % de gravier, 25-80 % de sable, 10-25 % de limon et 8-30 % d'argile. Pour les BTCS, en général, 3 à 19 % de chaux hydraulique ou de ciment sont utilisés, avec une moyenne de 6 à 8 %.



(a) Brique de terre compressée



(b) Cloison en brique de terre compressée

Figure 1.4. Construction en BTC (Sources Internet)

La résistance en compression moyenne d'une brique est de 2 à 4 MPa. Dans certains cas particuliers, les briques de terre atteignent 12 MPa [8]. La BTCS est plus résistante que la BTC. **Touré et al.**, [9] montrent une résistance en compression de 2,5 à 4 MPa pour les BTC, et de 2 à 6 MPa pour les BTCS avec 8 % de ciment. L'épaisseur minimale d'un mur porteur en BTC ou BTCS doit être de 20 cm de largeur. **Zhang et al.**, [10] montrent une corrélation linéaire entre la conductivité thermique et la masse volumique apparente des BTC, où les valeurs moyennes de la conductivité thermique augmentent de 0,52 à 0,93 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ avec l'augmentation de la densité apparente de 1500 à 2100 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

1.3.1 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 (voir figure 1.5), 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 escoffié (France) et Mausolée(Inde) [11].



Figure 1.5. Constructions réalisées en blocs de terre comprimée [11].

1.3.2 Diversités des produits de blocs de terre comprimée

Les dimensions courantes des BTC sont adaptées à une grande souplesse d'emploi dans des solutions constructives variées, en maçonnerie porteuse ou renforcée et en maçonnerie de remplissage (Figure 1.6). Les briques de terre comprimée permettent aussi la réalisation de structures particulières (arcs, coupoles et voûtes), pour des constructions à usage d'habitation ou industriel.



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

1.3.3 Avantage des BTC

Les BTC présentent certains avantages par rapport aux autres techniques de construction en terre crue et à certains matériaux classiques de maçonnerie. Les BTC offrent une résistance mécanique et une durabilité meilleure que les adobes. Les BTC donnent une grande souplesse dans la conception architecturale comparativement aux pisés. Les BTC offrent des performances thermiques supérieures et ne demandent aucune énergie de cuisson comparées aux briques cuites [13].

1.4 La terre comme matériau de construction

1.4.1 Généralités sur les argiles et les minéraux argileux

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 plus ou moins réguliers dont la taille se situe entre quelques microns et quelques millimètres ;
- de lamelles pour les argiles dont la plus grande dimension ne dépasse pas quelques microns;
- d'agrégats correspondant à des fragments de roches. Leurs formes résultent de la morphologie des minéraux les constituant [14].

Les argiles contrairement aux autres minéraux présentent une cohésion, qui résulte d'interactions spécifiques avec l'eau [14]. Donc pour comprendre le comportement des sols argileux vis-à-vis de l'eau, il est nécessaire de connaître le comportement monominéral des argiles, leurs structures et leurs affinités à l'eau [15].

1.4.2 Les argiles

Selon **Caillère et al.**, [16], l'argile est constituée de particules fines de taille inférieure à 2 μm . Les argiles se forment de l'altération et de la dégradation des roches qui affleurent à la surface de l'écorce terrestre en contact avec l'eau et sous l'effet des variations de température. Les argiles se trouvent dans des zones superficielles, le dépôt sédimentaire, provenant des roches magmatiques, métamorphiques ou sédimentaires rencontrées dans le substratum régional. Les particules argileuses sont formées principalement de phyllosilicates (silicates en feuillets, silicates d'aluminium et parfois de silicates de magnésium). Elles ont la forme de plaquettes fines développées dans un plan de l'espace qui résulte de l'empilement de couches tétraédriques et octaédriques.

Gautier M [17] montre que, le plan des tétraèdres, noté T, est composé de tétraèdres d'atomes d'oxygène autour de chaque atome noté Z (*figure 1.7*). Dans la couche tétraédrique, le cation dominant est Si_4^+ mais de fréquentes substitutions ont lieu avec Al_3^+ et, plus rarement, avec Fe_3^+ . Le plan d'octaèdres, noté O, est formé par des atomes d'oxygène et des groupements hydroxyles autour de chaque atome noté M. Ces octaèdres (*figure 1.7*) forment un réseau hexagonal répété infiniment dans le plan du feuillet.

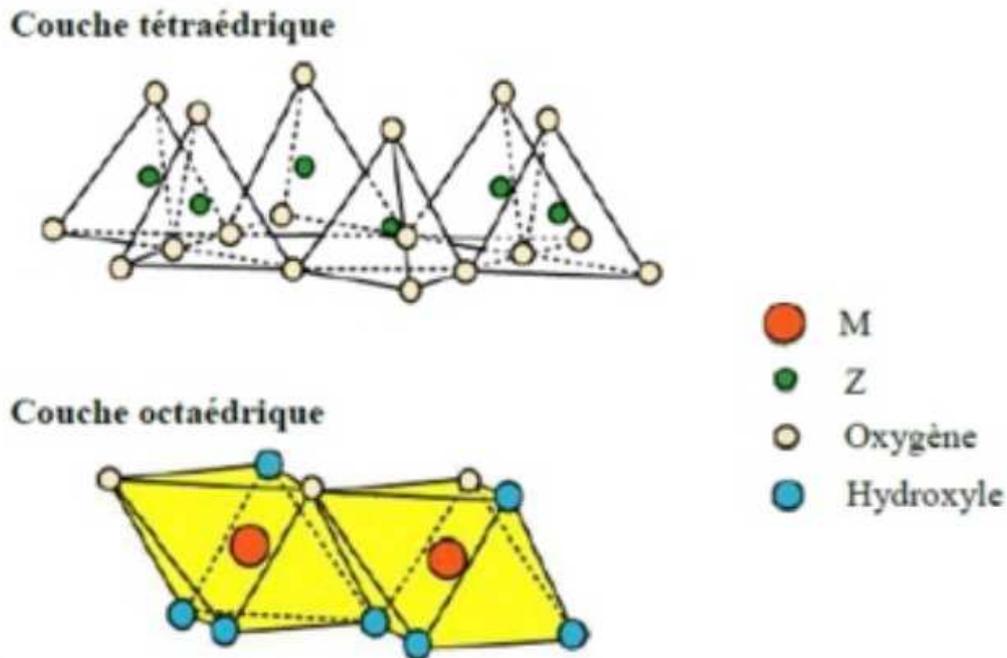


Figure 1.7 Couches tétraédrique et octaédrique [17]

En mécanique de sol, on distingue trois grandes familles d'argiles (*figure 1.8*) :

- 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

interfoliaire;

- Groupe 2:1:1, la famille des smectites ou T–O–T est similaire au type précédent mais l'espace interfoliaire est occupé par une couche d'octaèdre brucitique (cation octaédrique = Mg) ou gibbsitique (cation octaédrique = Al). L'équidistance caractéristique est alors de 14 Å environ.

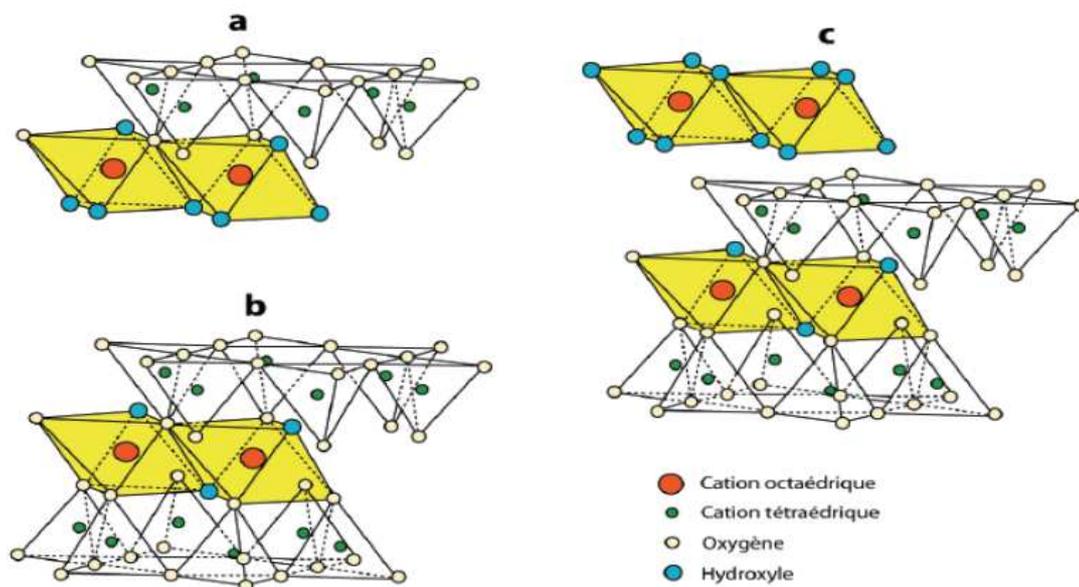


Figure 1.8 Agencement des couches octaédriques et tétraédriques [17].

Le Tableau 1 résume ces trois familles d'argiles présentées ainsi que leurs formules chimiques :

Tableau 1.1 Résumé des différentes types d'argile

| 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 | $(K,H_{30})(Al,Mg,Fe)_2(Si,Al)_4O_{10}[(OH)_2,(H_2O)]$ | Présence de K^+ |
| Montmorillonite (Famille des smectites) | T-O-T | $(Na,Ca)_{0.3}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$ | Présence ou pas des cations hydrates (Na^+ et Ca^+) |

1.5 Les propriétés du matériau terre en construction

1.5.1 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 1.9). 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 [18]. Doat et al., [19], 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., [20], 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 5 mm, ces mottes d'argiles diminuent les résistances mécaniques du sol traité.

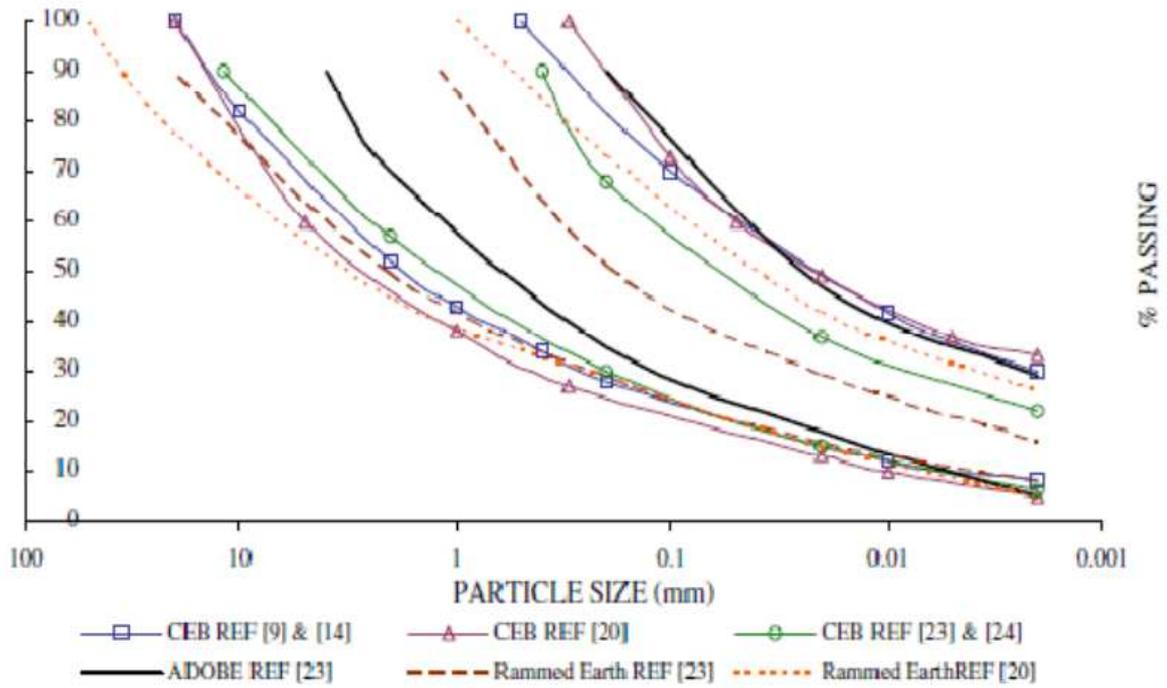


Figure 1.9. Fuseaux granulaires adoptés pour différentes techniques de construction en terre [18].

1.5.2 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 1.10 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 (**WL**) entre 32 à 46 % [18].

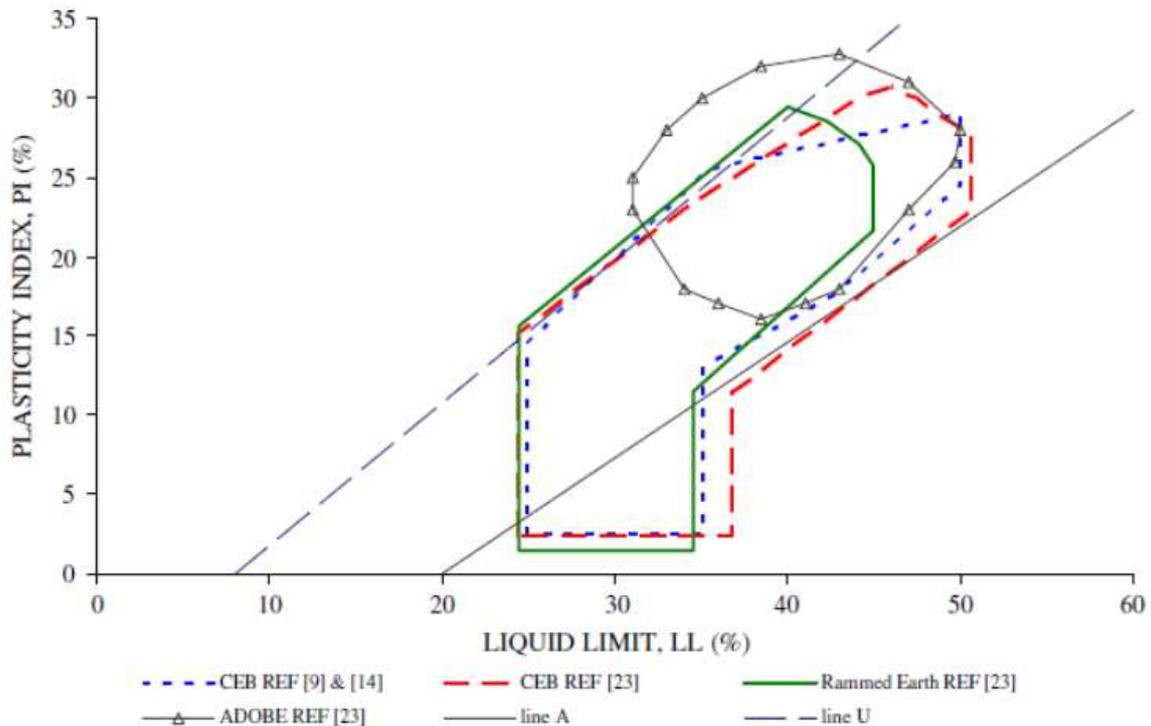


Figure 1.10. Les zones des limites d'Atterberg de la construction en terre [18].

1.5.3 Matière organique

Dans le sol, le terme matière organique du sol regroupe l'ensemble des constituants organiques morts ou vivants, d'origine végétale, animale ou microbienne, transformés ou non, présents dans le sol. Leurs effets sont de retarder la réaction pouzzolanique car elles enveloppent la surface de l'argile et gênent ainsi la réaction chaux-argile. Selon **Guillaud H et Houben H [1]** la matière organique supérieure à 1 % dans le sol représente un danger potentiel. **M. Vénuat [21]** a proposé un autre seuil de 2 % de la matière organique à ne pas dépasser pour le traitement d'un sol.

1.5.4 Sulfates

Les sols peuvent contenir des quantités variables de sulfate qui peuvent entraîner dans certaines conditions (taux de sulfate, solubilité du sulfate, répartition dans le sol) 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 en raison des variations dans la structure atomique en plus d'adjonction d'eau à la structure minérale. **Guillaud H et Houben H [1]** a conseillé de faire une étude spécifique pour les terres contenant plus de 2% à 3% de sulfates.

1.6 Stabilisation des sols

La stabilisation des sols regroupe l'ensemble des techniques permettant d'améliorer les caractéristiques physicochimiques, mécaniques et hydriques des sols. Elle doit permettre :

- La réduction de la porosité ;
- La diminution du retrait et gonflement ;
- l'obtention d'une meilleure cohésion ;
- L'amélioration de la résistance à l'érosion et l'imperméabilisation de surface ;
- L'obtention de meilleures résistances à la compression sèche et humide, à la traction et au cisaillement.

On distingue trois principales techniques de stabilisation (stabilisation mécanique, physique et chimique).

1.6.1 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 [15].

✓ 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 [1]. 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 [22].

✓ 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., [23], montrent que les résistances mécaniques augmentent en fonction de la contrainte de compactage jusqu'à optimum de 17.5MPa qui donnera la meilleure résistance, au-delà de cette valeur il y a une chute de résistance (figure 1.11).

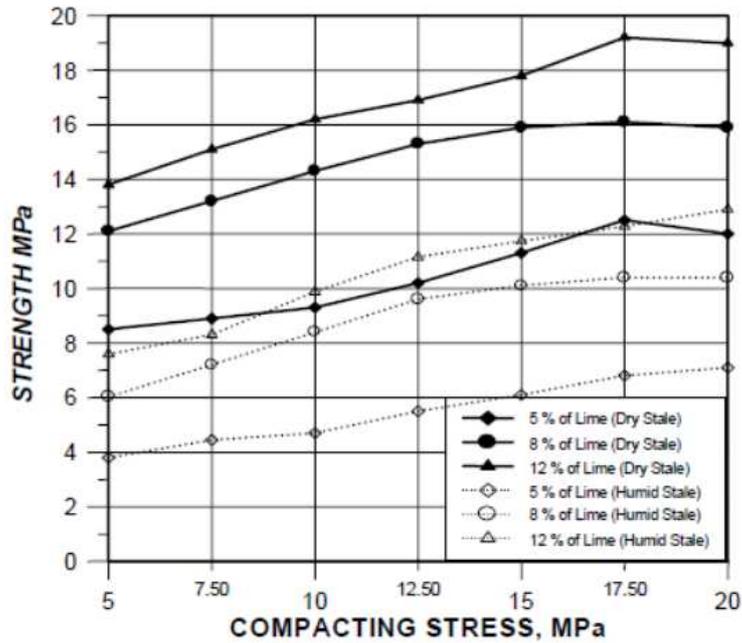


Figure 1.11. Influence de la contrainte de compactage et la teneur en chaux sur les résistances mécaniques, [23].

✓ **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 1.12)

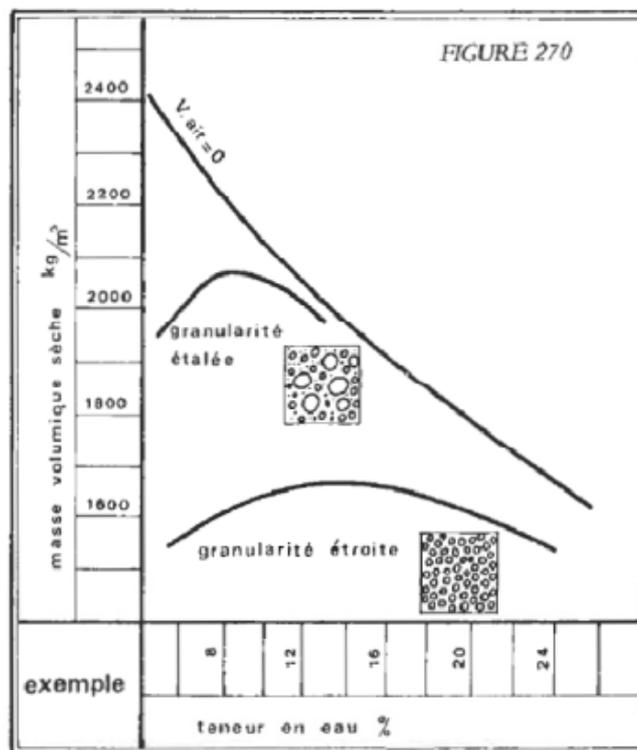


Figure 1.12. Influence de la granularité sur la compacité [3]

1.6.2 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.[15]

Izemmouren O et Guettala A [24], ont 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 1.13).

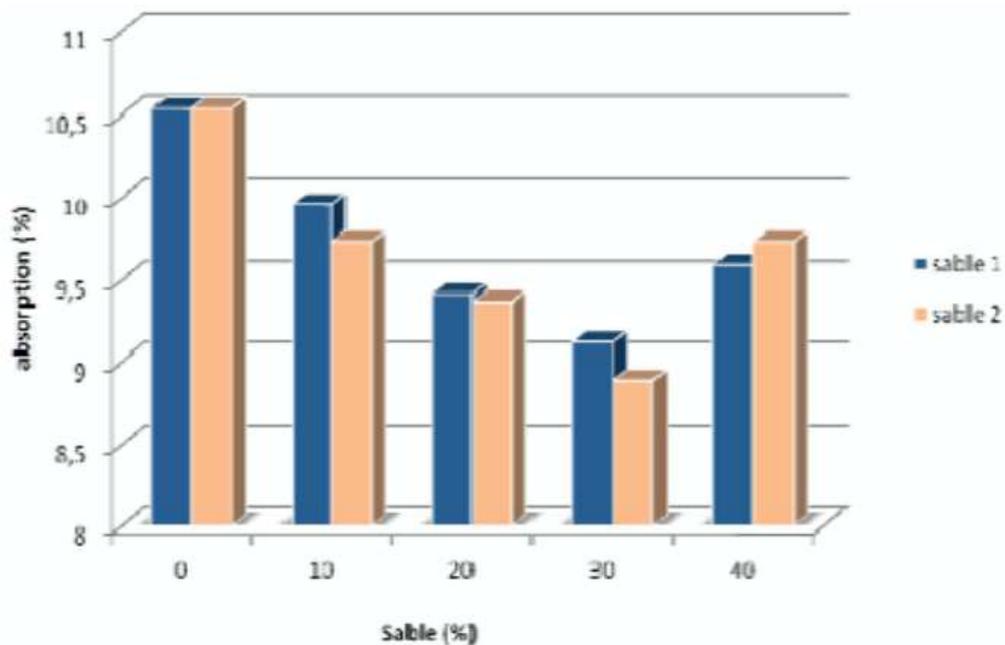


Figure 1.13. Absorption totale en fonction de la teneur en sable [38].

1.6.3 Stabilisation chimique

La stabilisation chimique modifie les caractéristiques de la terre à l'aide de certains ajouts. Afin d'augmenter les caractéristiques mécaniques et de diminuer la sensibilité à l'eau, on a souvent recours à l'adjonction de liants hydrauliques (ciment, chaux et bitume) ou de produits chimiques, rendant les sols traités moins hydrophiles. De nombreux stabilisants chimiques existent et apportent diverses améliorations à la terre selon leur propriété [13].

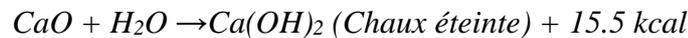
1.6.3.1 La chaux

La chaux est obtenue à partir d'un calcaire (CaCO_3 et autres minéraux) sous la décompression thermique à environ 1000°C . Le calcaire se décompose en chaux vive et en dioxyde de carbone, selon la formule suivante :



On distingue :

- ✓ *La chaux vive qui est avide d'humidité et est le produit direct de la thermolyse (ou calcination) du calcaire, principalement de l'oxyde de calcium (CaO).*
- ✓ *La chaux aérienne ou chaux éteinte est obtenue par la réaction de la chaux vive avec de l'eau ; elle est constituée surtout d'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2) et réagit avec le CO_2 de l'air comme la réaction ci-dessous :*



- ✓ *La chaux hydraulique contient en plus des silicates et des aluminates, car elle provient de calcaire argileux ; ses propriétés se rapprochent de celles des ciments.*

La chaux est utilisée afin de diminuer la teneur en eau des sols argileux et faciliter la mise en œuvre. Ses propriétés sont définies par les normes NF P98-101 et NF EN 459-1.

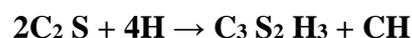
1.6.3.2 Le ciment

Le ciment est un produit composé principalement du clinker et d'autres additifs. Le clinker qui contient un mélange de calcaire d'environ (80%) et d'argile de l'ordre de (20%) est porté à des températures de $1450 - 1550^\circ\text{C}$ et broyé en poudre fine inférieure à $80\mu\text{m}$. Le ciment a quatre composés anhydres :

- ✓ Les aluminates tricalciques (C_3A)
- ✓ Les silicates bicalciques (C_2S)
- ✓ Les silicates tricalciques (C_3S)
- ✓ Les aluminoferrites tétracalciques (C_4AF)

Dès que le ciment est en contact avec l'eau, les aluminates tricalciques (C_3A) réagissent rapidement. Ces réactions perturbent la prise du ciment et change la durabilité des matériaux. C'est pourquoi le gypse de formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ est ajouté au clinker. Le gypse permet de modérer les réactions de C_3A avec l'eau. La pâte de ciment est obtenue quand le ciment est mélangé avec l'eau. L'hydratation de la pâte de ciment entraîne les réactions et les composées suivantes :

- Silicates de calcium hydratés (CSH) issus de l'hydratation des C_2S et C_3S :



La Figure 1.14 présente la microstructure type d'une pâte de ciment, avec les principaux hydrates qui la composent.

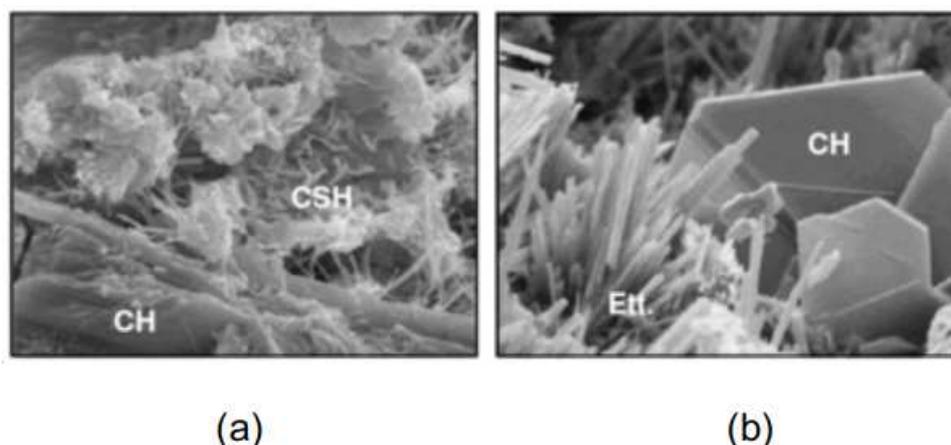
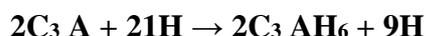


Figure 1.14. Éléments constitutifs d'une pâte de ciment. (CH) désigne la portlandite, (CSH) désigne l'hydrate tobermorite et (Ett.) désigne l'ettringite [25]

Le volume des CSH varie de 60% à 70% du volume de la pâte de ciment hydratée.

Les CSH augmentent la cohésion et apportent une résistance au mélange.

- Aluminates de calcium hydratés (CAH) issus de l'hydratation rapide des aluminates tricalciques:



Les CAH provoquent une prise rapide de la pâte de ciment diminuent la malléabilité et augmentent légèrement la résistance aussi.

- Ettringite primaire ($C_3 A.3\bar{C}\bar{S} H$ ou $CA\bar{S} H$) issue de la réaction des $C_3 A$ et des $C_4 AF$ avec le gypse, régulateur de prise :



- Ettringite secondaire issue de la réaction des $C_3 A$ avec l'ettringite primaire :



Dans les matériaux cimentaires, la quasi-totalité des réactions pouzzolaniques du ciment ont lieu avant 28 jours.

1.6.3.3 Interactions Argile-Liants

L'ajout des liants au sol argileux entraîne des interactions à l'échelle microscopique et à l'échelle macroscopique.

1.6.3.3.1 Echelle microscopique

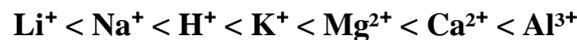
1.6.3.3.1.1 Cas de la chaux

Quand la chaux est mélangée avec le sol argileux, des réactions successives avec les particules d'argiles apparaissent en deux phases : les réactions à court terme et les réactions à long terme. Selon **Cabane N., Lasledj A [26,27]**, les réactions à court terme sont dues à l'échange cationique, la floculation et l'agglomération ; tandis que les réactions à long terme sont dues aux réactions pouzzolaniques et à la carbonatation.

✓ Echange cationique

Dans le sol, les argiles présentent un déficit de charge, elles ont la propriété de fixer l'ion calcium qui est libéré par l'hydratation de la chaux. Cet échange s'appelle échange cationique :

- La nature du cation présent en solution. Cet échange dépend de potentiel de remplacement et de la masse atomique. Ces échanges concernent plus particulièrement les argiles T-O-T. On peut les classer avec l'ordre suivant :



Les recherches indiquent que plus la charge du cation interfoliaire est faible et sa taille est petite, plus son échange est facile [26, 28, 29].

- Des cations de bordure : sur les bords d'un cristal, les liaisons Si-O et Al-OH ne sont pas équilibrées. Ces fonctions sont déstabilisées en milieu basique et constituent une source supplémentaire de sites de fixation pour l'ion calcium. Celles-ci fixent aussi les cations de calcium présents en solution formant des sites pour les réactions pouzzolaniques (figure 1.15):

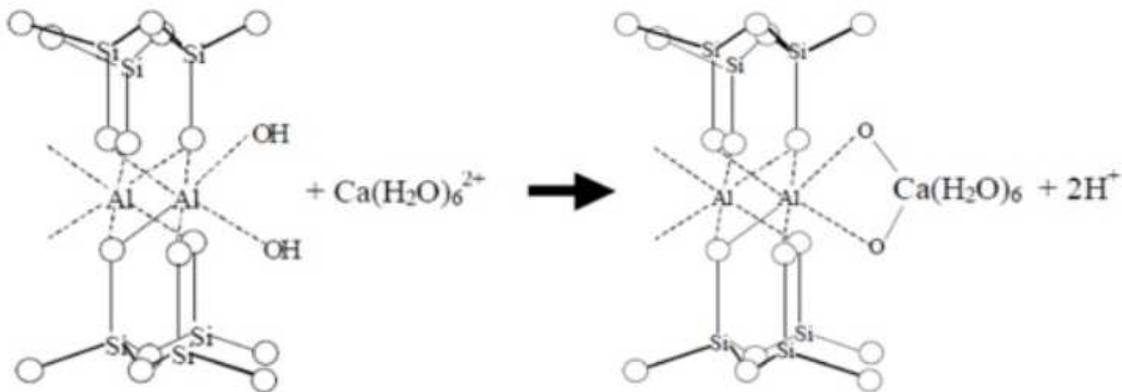


Figure 1.15 Mécanisme de l'adsorption de cations Ca^{2+} sur la surface latérale

d'une argile de type 2:1 [30].

✓ Flocculation et agglomération

L'ajout de chaux modifie la charge superficielle des argiles et donc la structure de la double couche dont l'extension diminue. La chaux conduit à la libération d'ion calcium qui favorisera la déprotonation de la surface des minéraux argileux et la création de charges négatives. Selon les études de **Rossi et al.**, [31], la flocculation pourrait résulter d'une réaction immédiate entre la chaux, adsorbée à la surface des particules argileuses, et les sites aluminols (Al-OH) et silanols (Si-OH) des minéraux argileux, qui entrainerait la formation, en très faible quantité, de phases de type silicates et aluminates de calcium hydratés.

Les figures 1.16 et 1.17 présentent une diminution du volume apparent des particules et une contraction du sol avant et après traitement. On observe que la flocculation améliore la consistance des argiles.

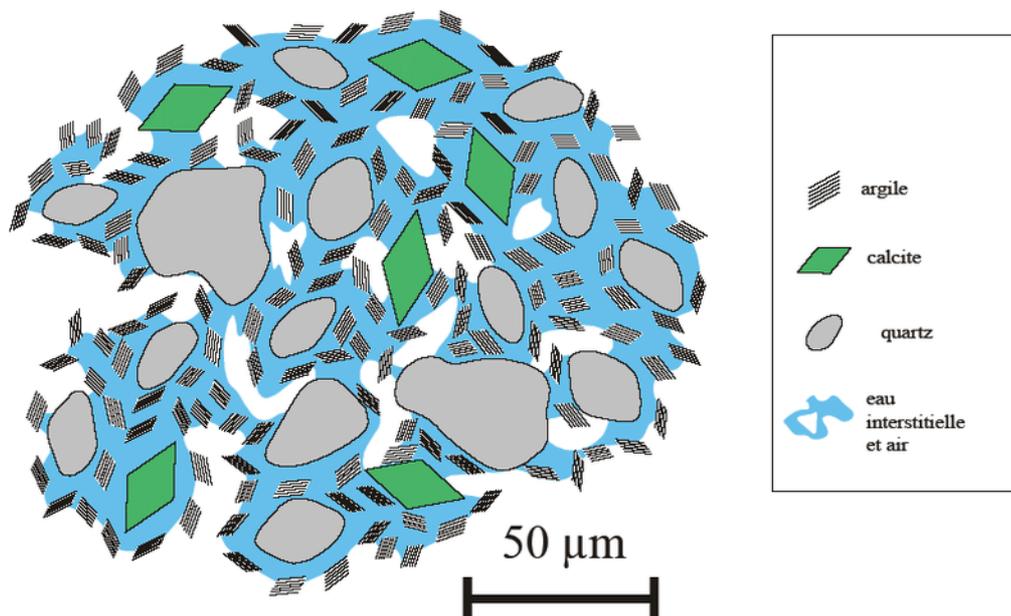


Figure 1.16. Représentation schématique de la microstructure du limon de Meaux avant le traitement [26].

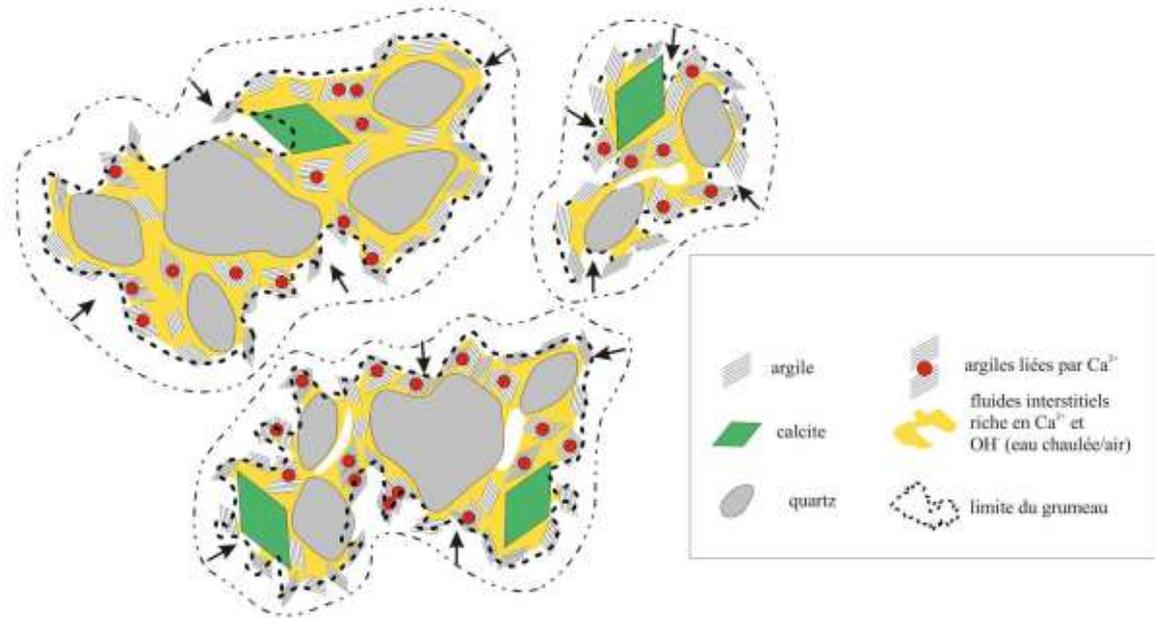


Figure 1.17. Représentation schématique de la microstructure du limon de Meaux après le traitement [26].

✓ Réactions pouzzolaniques

Les réactions pouzzolaniques commencent entre le calcium provenant de la chaux et les couches tétraédriques, et octaédriques des feuillets du sol argileux. Ces hydrates tapissent la surface des particules du sol argileux. Cette réaction consomme des argiles et conduit à la formation de nouveaux minéraux aux propriétés liantes. La réalisation de cette réaction est conditionnée par la saturation initiale en chaux du sol [28,32].



CSH : Silicates de calcium hydraté

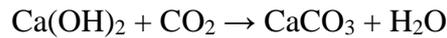
CAH : Aluminates de calcium hydraté

On observe ainsi des hydrates tels qu'hydrate de silicate calcique (CSH), hydrate d'aluminate calcique (CAH) et hydrate alumino-silicate calcique (CASH) [33, 34].

D'après les études de **Lasledj A, Bell F.G, Locat et al.**, [27, 33, 35] les résultats montrent que l'humidité est relativement importante pour favoriser la réaction pouzzolanique par la mobilité des ions et la formation des minéraux uniformes dans une surface plus ou moins étendue autour des grains de chaux.

✓ La carbonatation

La carbonatation est une conséquence de la réaction produite entre la chaux et le CO_2 de l'air. Il s'agit de la formation de calcite au contact avec le CO_2 . Donc cette réaction peut avoir lieu pendant la maturation des sols traités [10]. Elle suit la formule suivante :



La nature des hydrates formés au cours de la réaction pouzzolanique dépend de la nature des argiles présentes dans le sol. **Lasledj A.**, [27] montre aussi que, cette réaction provoque une réduction de la résistance finale à cause de la consommation d'une partie de la chaux disponible pour la réaction pouzzolanique.

1.6.3.3.1.2 Cas du ciment

L'ajout de ciment pour traiter les sols a pour but de former rapidement les hydrates calciques. Généralement, après 28 jours la quasi-totalité du ciment a réagi et les caractéristiques mécaniques sont presque définitives. Cet écart provient du fait que lors du traitement au ciment, les minéraux aux propriétés liantes se développent directement à partir du ciment [2]. Pendant la période de maturation, les C-S-H se forment à partir de l'alite (C_3S) et de la bélite (C_2S) via l'hydratation. Au contraire, des aluminates calciques provoquent la libération d'un excès de chaux qui donne de la portlandite.

La figure 1.18 montre les hydrates calciques développés par réaction pouzzolanique à partir d'argile (a) et du quartz (b).

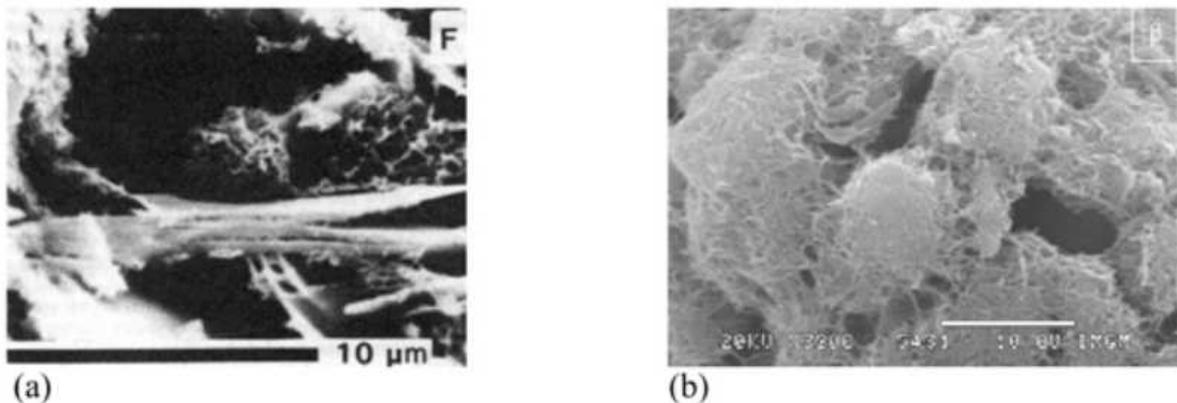


Figure 1.18. Hydrates calciques développés par réaction pouzzolanique

à partir d'argiles (a) et du quartz (b).

- C-S-H « réticulés » et C-S-A-H « aplati » se développant à la surface des particules d'argiles. [35].*
- C-S-H de structure fibreuse (réticulée) formant une couche adhérente à la surface des grains de quartz. [36].*

1.6.3.3.2 Echelle macroscopique

1.6.3.3.2.1 Régulateur de la teneur en eau

L'ajout des liants au sol change ses propriétés mécaniques et propriétés physiques grâce aux réactions pouzzolaniques. Les liants permettent aussi de modifier la teneur en eau plus particulièrement dans le cas de l'ajout de la chaux. Les recherches de **Guillaud H et Houben H, Hibouche A, Saussaye L** [1, 2, 25] indiquent qu'avec 1% de chaux vive ajouté, la réaction exothermique d'hydratation assèche le sol en évacuant ainsi environ 0,5% à 1% d'eau.

1.6.3.3.2.2 Modification de la rhéologie du sol argileux

✓ Cas de la chaux

L'ajout de chaux modifie aussi la texture du sol. **Osula D.O.A**, [37] indique que l'ajout de chaux induit une diminution des particules inférieures à $2\mu\text{m}$ et une augmentation des particules de plus grande taille. Cela entraîne une amélioration de la consistance du sol et un temps de cure plus long. L'ajout de chaux augmenté aussi la limite de plasticité du sol et est responsable du décalage de l'indice de plasticité en fonction de la quantité de chaux utilisée, de la nature des minéraux argileux du sol traité et de la teneur en eau [26, 33, 38]

La figure 1.19 présente la modification des limites d'Atterberg obtenue par **Rogers C.D.F et Glendinning S.**, [39]. Selon leur étude, l'ajout de chaux provoque une réduction de la plasticité marquée par un abaissement de l'indice de plasticité (IP), résultat d'une forte augmentation de la limite de plasticité (WP), une plus faible augmentation de la limite de liquidité (WL), et une diminution de la teneur en eau (W). Ces auteurs notent que l'ampleur des modifications de plasticité ne dépend pas du temps de cure, mais de la quantité de chaux ajoutée.

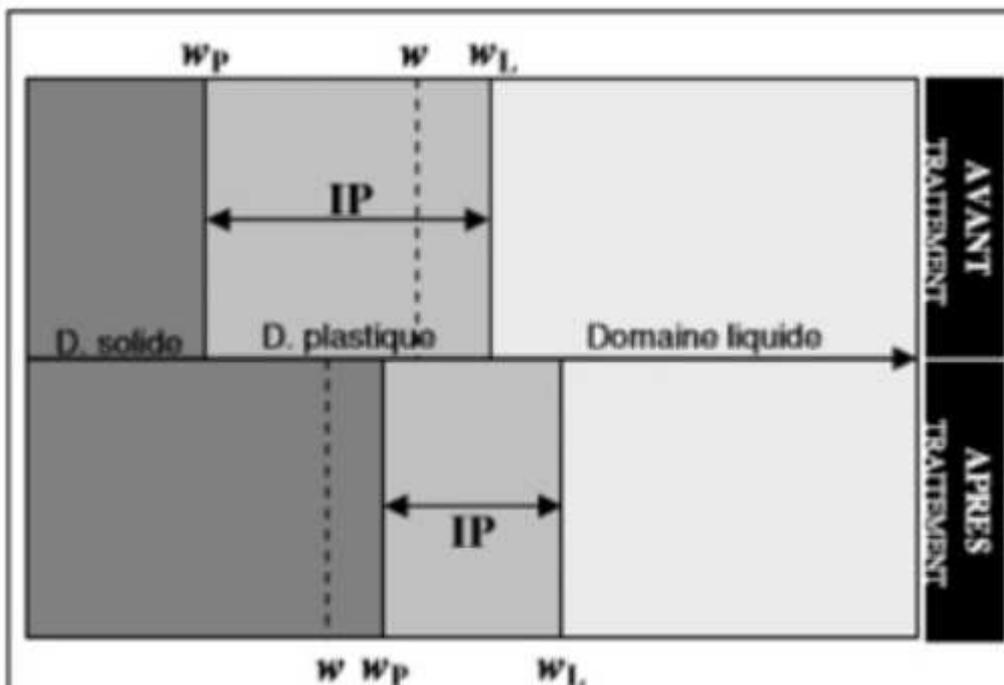


Figure 1.19. Modification des limites d'Atterberg d'un sol après traitement à la chaux [39].

✓ Cas du ciment

Le rôle du ciment comme de liant hydraulique entraîne la floculation des argiles.

❖ Effet sur le comportement mécanique

L'ajout de chaux et de ciment ou de liant hydraulique permet d'améliorer les propriétés mécaniques des sols à plus long terme tels que : l'augmentation de la résistance à la compression simple, de la résistance à la traction et l'augmentation du module d'élasticité [2, 26, 27, 33].

✓ Traitement à la chaux

L'ajout de chaux au sol provoque les réactions pouzzolaniques qui permettent une amélioration des caractéristiques mécaniques du mélange. La durée d'augmentation est jusqu'à un an de traitement [40]. Les autres études montrent que, l'ajout de la chaux permet de réduire la densité sèche du mélange parce que sous l'action de la chaux l'agglomération par floculation des particules argileuses modifie très rapidement les paramètres géotechniques (la diminution de l'indice de plasticité, l'augmentation de l'indice portant immédiat et la diminution de la densité de l'optimum Proctor et augmentation de la teneur en eau optimale), d'augmenter la résistance à la compression simple avec le temps de cure, de supprimer le gonflement et de réduire le retrait [1, 2]. **Little D.N, Bell F.G [41, 33]** indiquent que la résistance à la compression simple d'un sol traité à 2% de chaux passe de 0,30 MPa à 24h de cure à 0,45 MPa à 28j, puis à 0,50 après 360 jours. Pour un traitement à 6% de chaux les résistances aux mêmes échéances sont de 0,4; 0,9 et 1,0 MPa.

✓ Traitement au ciment

L'ajout du ciment au sol provoque deux effets : l'hydratation du ciment et la réaction avec l'argile. Ces modifications sont rapides et peuvent durer des mois ou augmenter pendant un an [26].

L'hydratation du ciment induit la formation d'un gel d'hydrates englobant la surface des agglomérats d'argile. Les agglomérats de sol pénètrent ensuite dans la pâte de ciment. La portlandite libérée réagit alors avec l'argile et provoque, en milieu alcalin, sa dégradation. Le pourcentage de ciment ajouté peut donner des résultats différents en fonction de la structure du sol. Selon **Guetala A et Guenfoud M [40]**, la résistance à la compression simple augmente aussi en fonction de la quantité de ciment ajoutée :

- De 0,2 à 0,4 MPa avec 3% de ciment

- Plus de 1MPa pour 10% de ciment dans le cas du mélange kaolinite/illite. En général, il faut ajouter au moins 6% de ciment pour obtenir des résultats remarquable [2].

1.7 Conclusions

La recherche bibliographique a montré que la terre crue est l'un des principaux matériaux de construction utilisés depuis plusieurs siècles. C'est un matériau abondant, qui nécessite très peu d'énergie pour sa fabrication et qui ne génère pas de déchets. Par contre, les constructions d'aujourd'hui qui nécessitent des performances mécaniques importantes n'utilisent plus ce matériau depuis l'invention du béton. Pour atteindre des bonnes performances, plusieurs techniques de traitement peuvent être utilisées. Le traitement aux liants est l'une des techniques les plus utilisées pour améliorer la résistance mécanique et la durabilité de ces matériaux.

Chapitre 2 :

Matériaux et Méthodes Expérimentales

2.1 Introduction

Le but de cette étude est de tenter d'optimiser la formulation du béton à base de terre en essayant de maximiser la quantité de sol argileux tout en ayant des caractéristiques acceptables. Une quantité optimale de liants a été utilisée en se basant sur les études précédentes. Le pourcentage du sable a été également modifié afin de mieux comprendre leur influence sur la résistance mécanique et la durabilité du béton de terre.

Dans ce chapitre nous présentons en premier lieu, les caractéristiques des matériaux utilisés, suivies d'une présentation d'ensemble des formulations. En deuxième lieu nous décrivons les méthodes expérimentales utilisées pour les expériences des résistances mécaniques et la durabilité des BTC.

2.2 Matériaux utilisés

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

2.2.1 Sable de dune

Le sable des dunes est le résultat d'une érosion et d'une sédimentation des différentes roches suivi d'un transport fluviatile et parfois éolien. La plus grande partie des formations sableuses est constituée de quartz. Pour notre étude nous avons utilisé le sable de dune Oued souf.

2.2.1.1 Equivalent de sable NF P 18-598

➤ Principe de l'essai

Cet essai permet de mettre en évidence des traces d'argile, de limon ou de méliers très fines, contenus dans un sol sableux.

➤ Mode opératoire

- Tamiser le matériau à tester de façon à séparer les éléments sableux les plus grossiers des particules fines (fraction 0/2), puis en prélever 120 gr.
- Remplir une éprouvette avec la solution lavande jusqu'au premier trait de jauge.
- Verser les 120 gr de l'échantillon dans l'éprouvette à l'aide de l'entonnoir. Préparer de la même façon une seconde éprouvette.
- Laisser les deux éprouvettes au repos pendant 10 minutes.
- Boucher les éprouvettes à l'aide des bouchons et les agiter à l'aide de l'appareil agité l'éprouvette horizontalement pendant 30 secondes, soit 90 allé/retour.
- Remplir les éprouvette jusqu'au second trait de jauge en lavant le bouchon et les parois intérieures afin de récupérer toutes les impuretés et le sable au fond des tubes.
- Laisser reposer chaque éprouvette 20 minutes en tenant compte des décalages de temps dus aux manipulations.
- Abaisser le piston dans le liquide pour séparer le floculat de l'eau.
- Lire les valeurs de h_1 et h_2 à l'aide d'une règle.
- Calculer «ES» en remplaçant h_1 et h_2 dans la formule suivante : $ES = (h_2/h_1) * 100$

Tableau 2.1: Les préconisations en matière de propreté pour les sables utilisés dans les bétons.

| ESv | ESp | Nature et qualité de sable |
|------------------|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ES < 65 % | ES < 60 % | Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement. Sable à rejeter pour des bétons de qualité. |
| 65 % < ES < 75 % | 60 % < ES < 70 % | Sable légèrement argileux de propreté admissible pour les bétons de qualité courants quand le retrait n'a pas de conséquence notable sur la qualité de béton. |
| 75 % < ES < 85 % | 70 % < ES < 80 % | Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité. |
| ES > 85 % | ES > 80 % | Sable très propre. L'absence presque totale des fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité de béton qu'il faudra compenser par une augmentation du dosage en eau. |

Tableau 2.2: Résultats obtenus pour l'essai équivalent de sable.

| Equivalent de sable | | |
|---------------------|------|------|
| Paramètres | ESV | ESp |
| Essai 1 | 89.5 | 90 |
| Essai 2 | 90 | 91.1 |

ESV : (équivalent de sable visuel).

ESp : (équivalent de sable au piston).

Le sable de dune d'Oued Souf est un sable très propre.

2.2.1.2 Analyse granulométrique par tamisage NF EN 933-1

➤ *But de l'essai*

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer la grosseur et le pourcentage pondéral respectif des différents grains consistant l'échantillon.

➤ *Principe de l'essai*

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaire de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et de nombre des tamis sont choisies en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue.

Les masses des différents refus et tamisât sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme de tableau ou graphique.

➤ *Mode opératoire*

L'échantillon doit être préparé suivant la prescription de la norme [NF EN933-1]. La masse M de l'échantillon pour essai doit être supérieure à $(D/10)^2$, avec M exprimé en gramme et D plus grande dimension spécifiée en millimètres.

L'opération du tamisage du sable se fait au moyen d'une tamiseuse ou on place la série des tamis sur cercle inférieur du cadre de l'appareil en suite l'ensemble est serré aux montants par la couronne supérieure, à l'aide de deux jeux de ressort et vis de blocage.

La durée de l'essai suffit 3 minutes.

• **Le module de finesse du sable NF P 18-540**

Le module de finesse (MF) est une facture très importante qui nous de juger la qualité du sable, le module de finesse est égal au 1/100 de la somme de refus cumules exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivant : 0,16 – 0,315 – 0,63 – 1,25 – 2,5 – 5mm.

Il est donné par la relation suivant :

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

Tableau 2.3: Classement de sable.

| Quantité de sable | Module de finesse |
|-------------------|-------------------|
| Gros | > 2.5 |
| Moyen | 2 à 2.5 |
| Fin | 1.5 à 2.0 |
| Très fin | 11.0 à 1.5 |

Tableau 2.4: les résultats des analyses granulométrique du sable de dune.

| Diametre de tamis (mm) | Refus (g) | Refus cumules | Refus cumules (%) | Tamis cumules (%) |
|------------------------|-----------|---------------|-------------------|-------------------|
| 5 | 3 | 3 | 0.3 | 99.7 |
| 3.15 | 8 | 11 | 1.1 | 98.9 |
| 2.5 | 6 | 17 | 1.7 | 98.3 |
| 1.6 | 29 | 46 | 4.6 | 95.4 |
| 1.25 | 35 | 81 | 8.1 | 91.9 |
| 0.63 | 241 | 322 | 32.2 | 67.8 |
| 0.5 | 141 | 463 | 46.3 | 53.7 |
| 0.315 | 285 | 748 | 74.8 | 25.2 |
| 0.16 | 215 | 963 | 96.3 | 3.7 |
| 0.08 | 30 | 993 | 99.3 | 0.7 |
| Fond | 7 | 1000 | 100 | 0 |

Tableau 2.5: pourcentage du tamisât de sable de dune.

| | | | |
|---------------------------|------------------------|----|------|
| $\Phi \leq 80\mu\text{m}$ | $\Phi \leq 2\text{mm}$ | Cu | Cc |
| 2% | 80% | 3 | 1.02 |

Avec :

Cu : coefficient d'uniformité dit de Hazzen. $Cu = D_{60}/D_{10}$

Cc : coefficient de courbure. $Cc = (D_{30})^2/D_{60}.D_{10}$

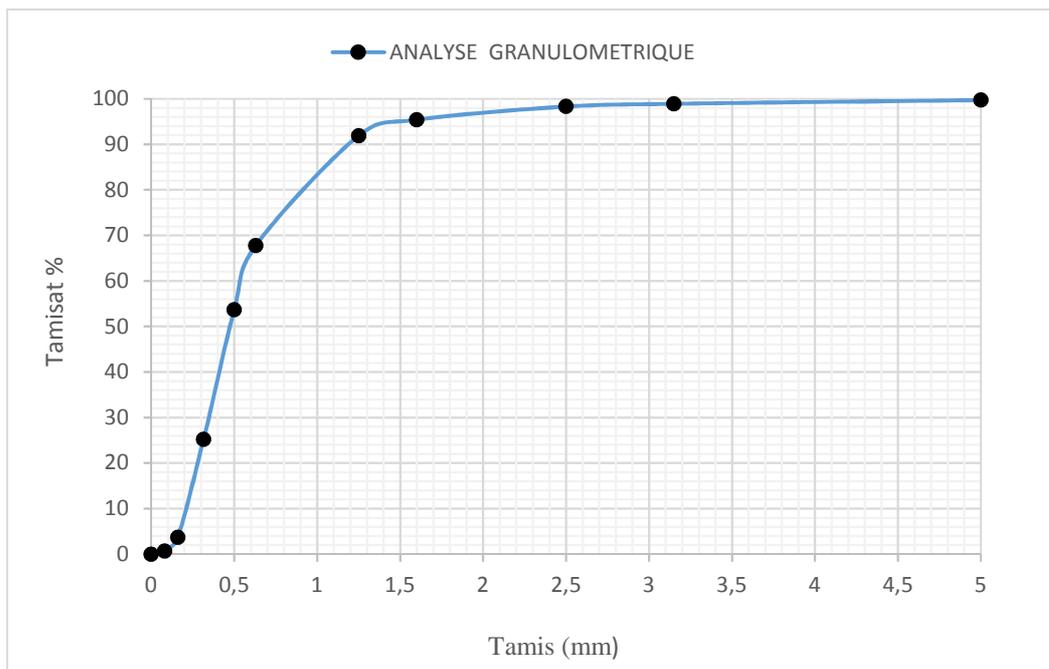


Figure 2.1: Courbe granulométrique du sable de dune

Tableau 2.6: Résultats du module de finesse de sable

| Sable | Module de finesse | Qualité de sable |
|-------|-------------------|------------------|
| Dune | 2.12 | Sable moyen |

A partir de ces résultats, et d'après la classification des sols LCPC (laboratoire central des Ponts et chaussées) basée sur le coefficient d'uniformité et de courbure, le sable de dune se Classe parmi les sables propres mal gradués symbolisés par les lettres SM (sable mal gradué), Sa courbe est uniforme et très peu étalée.

2.2.1.3 Masses volumiques

La masse volumique d'un corps est la masse de l'unité sur le volume de ce corps.

Il existe le volume apparent et le volume absolu, on distingue :

A. La masse volumique apparente (ρ_{app})

C'est la masse d'un corps par unité de volume apparent en état naturel. Elle est exprimée en (g/cm^3 , kg/m^3 , t/m^3).

➤ Principe

Il s'agit de remplir une mesure de 1 litre ou plus (2 litre, 5 litre) avec le matériau et de déterminer la masse du contenu.

Le mode de remplissage de la mesure, a une influence très importante sur les résultats, il faudra réaliser les essais avec du matériel aussi simple que possible, et très soigneusement.

➤ Mode opératoire

- Peser le récipient à vide et noter M1.
- Verser le matériau à l'aide d'entonnoir dans le récipient et le disposer sans tassement par couches horizontales successives jusqu'au remplissage (la distance entre l'extrémité de l'entonnoir et le bord du récipient est de 10 cm pour le sable).
- Ensuite araser la couche supérieure du pot à l'aide d'une règle que l'on anime de mouvement de «va et vient ». Peser le récipient plein : soit m2 (gr) sa masse.
- Il résulte que :

$$\rho_{app} = (M2-M1)/V$$

M1 : masse de récipient à vide.

M2 : masse de récipient remplis.

V : volume de récipient.

Les résultats obtenus sont classés dans les tableaux 2.7:

Tableau 2.7: la masse volumique apparente (ρ app) du sable

| M1 (kg) | M2 (kg) | (M2-M1) (kg) | V (L) | ρ app (kg/L) | ρ app moy (Kg/L) |
|---------|---------|--------------|-------|-------------------|-----------------------|
| 1444 | 2955 | 1511 | 1 | 1.51 | 1.51 |
| 1440 | 2940 | 1500 | | 1.5 | |
| 1446 | 2987 | 1541 | | 1.54 | |

B. Masse volumiques absolu ou spécifique

C'est la masse d'un corps par unité de volume absolu de matière pleine (volume de matière seule sans tenir compte les vides et les pores). Elle est exprimée en (g/cm³, kg/m³, t/m³).

➤ Principe

Le volume absolu ou réel d'un corps est généralement déterminé en mesurant le volume d'un liquide que déplace l'introduction de ce corps.

➤ Mode opératoire

- Mettre dans une éprouvette graduée en verre un volume d'eau V1 (400 ml)
- Peser une masse M du corps (300g) et l'introduire dans l'éprouvette.
- Bien éliminer les bulles d'air.
- Lire le niveau volume V2.
- Le volume absolu ou réel est : $V = V2 - V1$.
- La masse volumique réelle est : $\rho = M / (V2 - V1)$

Les résultats obtenus sont classés dans le tableau suivants :

Tableau 2.8: Masse volumique absolue

| Désignation | V (ml) | ρ abs (kg/l) | ρ Moy (kg/l) |
|-------------|--------|-------------------|-------------------|
| Essai 1 | 115 | 2.6 | 2.6 |
| Essai 2 | 119 | 2.52 | |
| Essai 3 | 111 | 2.7 | |

2.2.2 Sol argileux

2.2.2.1 Origine des sols

Les sols utilisés dans notre recherche trouvent leur appartenance dans la région de Oued lahmer Medjanna Bordj Bou Arreridj (Algérie).

2.2.2.2 Caractéristiques physiques des sols

Avant de soumettre le sol aux essais, il est écrêté à 1 mm. **Houben et Guillaud [3]** sont indiquées que les éléments les plus fins ne doivent pas être autorisés à former des nodules de taille supérieure à 10mm ; la présence de 50% des nodules ayant une taille supérieure à 5 mm pourrait réduire de moitié la résistance à la compression.

A. Les masses volumiques

Le tableau 2.9 présente la masse volumique apparente et l'humidité naturelle du sol étudié.

Tableau 2.9: Les masses volumiques des sols.

| Poids volumique (kg/m ³) | Humidité naturel (%) |
|--------------------------------------|----------------------|
| 2355.1 | 8.7 |

B. Analyses granulométriques

L'analyse granulométrique pour l'argile est mesurée de la même manière que le sable.

Tableau 2.10 : Résultats de l'analyse granulométrique pour l'argile.

| Tamis (mm) | Refus partiel (g) | Refus cumulé | % Refus cumulé | % Tamisât cumulé |
|------------|-------------------|--------------|----------------|------------------|
| 1,25 | 1 | 1 | 0.1 | 99.9 |
| 0,63 | 398 | 399 | 39.9 | 60.1 |
| 0,5 | 82 | 481 | 48.1 | 51.9 |
| 0,315 | 161 | 642 | 64.2 | 35.8 |
| 0,16 | 169 | 811 | 81.1 | 18.9 |
| 0,08 | 138 | 949 | 94.9 | 5.1 |
| 0 | 51 | 1000 | 100 | 0 |

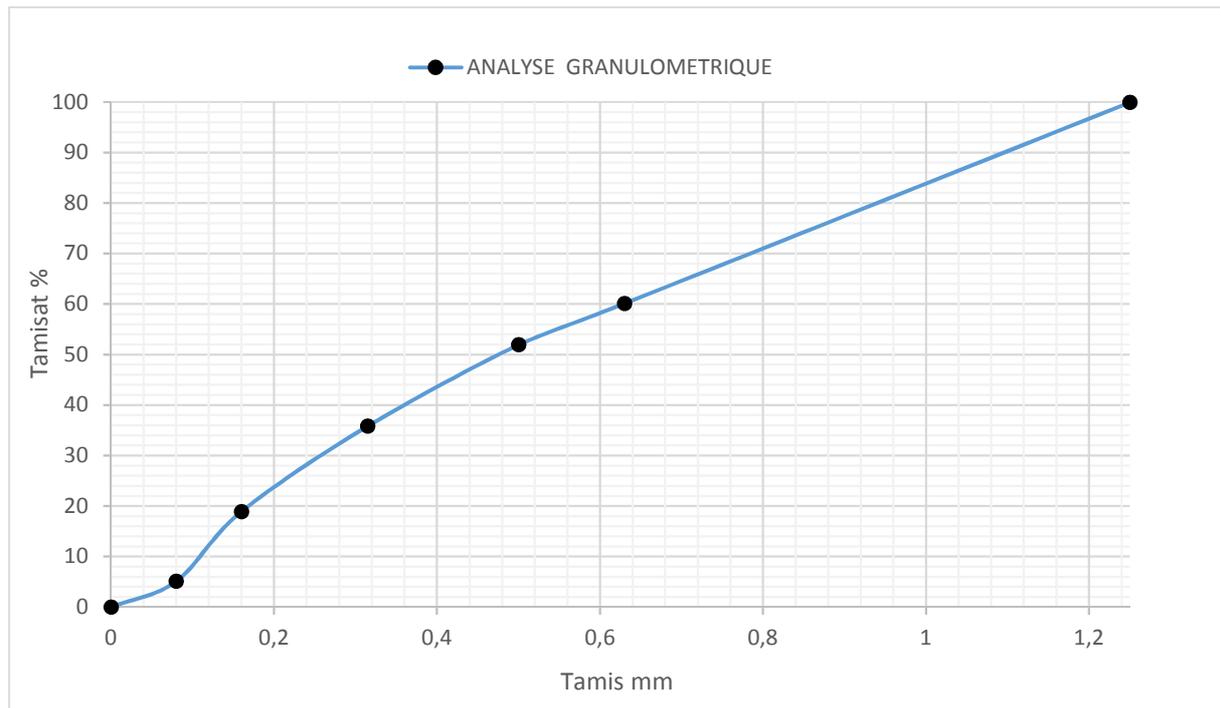


Figure 2.2: Courbe granulométrique de l'argile

C. Limite d'Atterberg:

Les limites d'Atterberg permettent d'analyser les variations de consistance des sols fins en fonction de la teneur en eau. Comme pour la granularité, des études statistiques ont été faites afin de définir les limites d'Atterberg les mieux adaptées pour les blocs de terre et de prévoir rapidement les possibilités constructives d'un sol [19]. Les essais définis par Casagrande s'effectuent sur le mortier de sol ($d < 0,4$ mm) selon la procédure de la norme NF P 94 051. Les résultats des essais sont présentés dans le tableau 2.11.

Tableau 2.11: Résultats limite d'Atterberg

| Limite d'Atterberg | | |
|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Limite de liquidité (Wl) % | Limite de plasticité (Wp) % | Indice de plasticité (Ip) % |
| 34.27 | 23.37 | 10.9 |

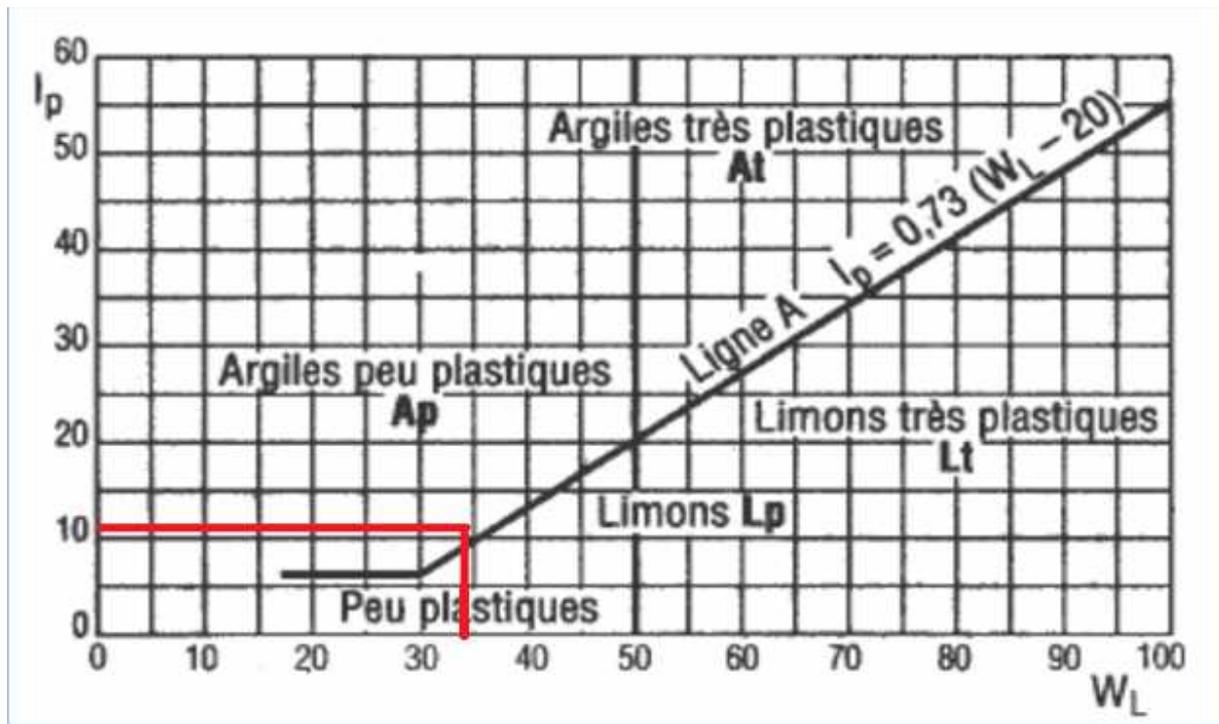


Figure 2.3: Classification LCPC des sols fins en laboratoire. Diagramme de plasticité.

On remarque que le sol 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. Le graphique (figure 2.3) permet d'affirmer que le sol présente une plasticité tout à fait adaptée à la production des BTC.

La norme recommande que le sol doit présenter un minimum de plasticité assurant une cohésion entre les grains du matériau lors du compactage ($\% 2\mu\text{m} > 5 \%$).

2.2.2.3 Analyse chimique et minéralogique

L'analyse chimique permet de déterminer la teneur en éléments nocifs tels que les sulfates. Le sulfate le plus fréquemment rencontré dans les sols naturels est le sulfate de calcium (anhydrite et gypse). On associe sa présence à des dégradations de construction en terre. Le fort gonflement lié à l'hydratation de l'anhydrite et la solubilité de différents composés sont alors mis en cause. Dans le cas des blocs de terre comprimée et stabilisée, les sulfates peuvent également attaquer le ciment durci à l'intérieur du matériau particulièrement lorsque celui-ci est mis en contact avec de l'eau. Dans ce cas, une étude spécifique pour les terres contenant plus de 2 à 3 % de sulfates doit être faite [19].

L'analyse minéralogique, elle est aussi indispensable pour différencier les sols argileux. Les analyses des compositions chimiques et minéralogiques sont effectuées au laboratoire Briqueterie argilor zone industriel de Bordj Bou Arreridj. L'analyse chimique élémentaire effectuée par fluorescence X sur ce sol a révélé la composition

chimique qui figure sur le tableau 2.12 et Le tableau 2.13 présente la composition minéralogique déterminée par analyse par diffraction aux rayons X. :

Tableau 2.12: Composition chimique du sol.

| Composition chimique (%) | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-----------------|------------------|-------------------|-------------------------------|------------------|------|-------|
| Elément | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ | K ₂ O | Na ₂ O | P ₂ O ₅ | TiO ₂ | PF | Cl |
| % | 54.05 | 20.66 | 8.37 | 1.23 | 2.68 | 0.01 | 3.86 | 0.59 | 0.13 | 0.86 | 7.57 | 0.003 |

Tableau 2.13: Composition minéralogique du sol.

| Minéraux | Teneur % |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Quartz (SiO ₂) | 25 |
| Calcite (CaCO ₃) | 02 |
| Albite (NaAlSi ₃ O ₈) | 05 |
| Feldspath k(K ₂ O6SiO 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 ₅ (OH) ₄) | 19 |
| Chlorite (Mg ₂ Al ₄ O ₁₈ Si ₃) | 12 |
| Minéraux ferrugineux+autre | 08 |

2.2.3 CIMENT

Le ciment utilisé est un ciment **CRS-CEMI 42.5N N442** disponible sur le marché fabriqué par la cimenterie Lafarge (Hammam Dalâa- Wilaya de M'Sila Algérie).

2.2.3.1 Les caractéristiques de ciment

Les caractéristiques de ciment sont présentées dans le Tableau 2.14

Tableau 2.14: Les caractéristiques de ciment

| Désignation | CRS-CEMI 42.5N N442-MOKAOUEM | |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------|
| Provenance | Cimenterie Lafarge de (Hammam dala) wilaya de M'Sila Algérie | |
| Propriétés physiques | Consistance normale (%) | 25 a 28 |
| | Finesse Blaine (cm ² /g) | 3200 a 3800 |
| | Retrait a 28 jours (µm/m) | <1000 |
| | Expansion (mm) | ≤2.0 |
| | Chaleur d'hydratation | < 270j/g |
| | Résistance à la compression 2 jours (MPa) | ≥10 |
| | Résistance a la compression 28 jours(MPa) | ≥42.5 |
| Temps de prise à 20° (NA 230) | Début de prise (min) | >60 |
| | Fin de prise (min) | 240 a 400 |
| Analyse chimiques | Pertes au feu % | 0.5 à 3 % |
| | Teneur en sulfates (SO ₃) % | 1.8 a 3 |
| | Teneur en Oxydes de magnésium MgO (%) | 1.2 a 3 |
| | Teneur en Chlorures (NA5042) (%) | 0.01 a 0.05 |
| Composition minéralogique | Taux d'aluminate C ₃ A | <3.0 % |

2.2.4 L'eau gâchage

L'eau utilisée est celle du robinet du laboratoire de génie civil de l'université de BBA.

2.3 Confection des blocs

2.3.1 Matériel spécifique

Les éprouvettes cylindriques de l'essai Proctor (D=10 cm H=16.5 cm) utilisées pour la détermination des différents essais fixés par notre programme expérimental, ont été confectionnées dans un moule spécialement usiné à cet effet.



Figure 2.4: moule cylindrique utiliser pour la fabrication des BTC.

2.3.2 Mélanges

Pour la préparation des mélanges, on s'est basé sur l'étude réalisée par Izemmouren et Guettala, [24] sur les blocs de terre comprimée à base d'un sol de la région de Biskra et stabilisé par deux types de sable concassé, qui a montré que la teneur du sable augmente les résistances mécaniques. Cependant, pour les essais de la durabilité, la teneur du sable ne présente pas d'écart important par rapport aux blocs stabilisées par le sol seul. Cette teneur à une valeur optimale (30%) qui donne les meilleurs résultats.

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 Kg.



Figure 2.5: Combinaison des mélanges des blocs.

La composition des mélanges employés dans cette étude est présentée dans le tableau 2.15.

Tableau 2.15: Les compositions de différents mélanges

| Codifications | Argile (%) | Sable (%) | Ciment (%) | Contrainte de Compression |
|---------------|------------|-----------|------------|---------------------------|
| E1 | 90 | 0 | 10 | 10 MPa |
| E2 | 70 | 20 | 10 | |
| E3 | 50 | 40 | 10 | |
| E4 | 30 | 60 | 10 | |
| E5 | 10 | 80 | 10 | |
| F1 | 90 | 0 | 10 | 20 MPa |
| F2 | 70 | 20 | 10 | |
| F3 | 50 | 40 | 10 | |
| F4 | 30 | 60 | 10 | |
| F5 | 10 | 80 | 10 | |

2.3.3 Malaxage des mélanges

Les meilleures conditions de malaxage sont réunies lorsqu'on dispose d'un sol sec. les matériaux (sol + sable + ciment) sont d'abord mélangés à sec (figure 2.6 (a)) puis malaxés avec l'eau (figure 2.6 (b)) dans un malaxeur avec une vitesse de 140 tr/min. L'homogénéisation des mélanges à sec est effectuée pendant deux minutes pour le mélange.

Le malaxage avec l'eau a été effectué pendant deux minutes. Le matériau est mis en place et compacté juste après le malaxage.



Figure 2.6: Malaxage à sec (a), avec l'eau (b).



Figure 2.7: Mise en place du matériau dans le moule.

2.3.4 Optimisation de la teneur en eau

La teneur en eau a une action primordiale sur le comportement des matériaux. Pour tous les matériaux testés, naturels ou reconstitués, surtout lorsqu'ils sont fins, une variation de 2 à 3 points autour de l'optimum de compactage statique entraîne toujours une chute de la résistance à sec de 30 à 50 % [40]. Pour obtenir une fabrication homogène, il est donc indispensable de déterminer cette teneur en eau optimale pour chaque composition.

Dans notre cas l'optimisation de la teneur en eau a été obtenue comme suit :

La quantité d'eau déterminée expérimentalement pendant l'exécution des différents mélanges (tableau 2.16). On ajoute l'eau puis le malaxage est réalisé légèrement jusqu'au moment où le mélange devient homogène visuellement (figure 2.8).

Tableau 2.16: Optimisation de la teneur en eau

| Codifications | E/C |
|---------------|------|
| E1 | 1.22 |
| E2 | 1.05 |
| E3 | 0.95 |
| E4 | 0.75 |
| E5 | 0.5 |
| F1 | 1.15 |
| F2 | 1 |
| F3 | 0.87 |
| F4 | 0.7 |
| F5 | 0.45 |



Figure 2.8: Mélange homogène visuellement

2.3.5 Compactage des mélanges

Le compactage des éprouvettes est du type statique à simple effet : le plateau inférieur de la presse se déplace entraînant l'ensemble (moule +mélange +piston), le plateau supérieur reste fixe. L'opération est conduite jusqu'à l'affichage sur l'écran de la lecture de la pression voulue. Dans cette étude on a appliqué deux contraintes de compactages : 10 et 20 MPa .



Figure 2.9: Compactage de l'éprouvette

Le démoulage se fait directement après le compactage.



Figure 2.10: Démoulage de l'éprouvette

2.4 La cure des blocs

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. Dans les conditions de conservation réelles, les blocs doivent être protégés avec du plastique (figure 2.11) durant les premiers jours avant leur utilisation.



Figure 2.11: Conservation des éprouvettes.

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. Pour favoriser au maximum l'hydratation du liant, le bloc est conservé au laboratoire à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ pendant 24 heures avant d'être soumis aux différents modes de cure.

Pour étudier l'influence du mode de cure, les BTC sont curés selon mode :
– au laboratoire

- **Conservation au laboratoire**

Tous les blocs étudiés sont conservés au laboratoire à une température $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ pendant 28 jours (figure 2.12).



Figure 2.12: Conservation des éprouvettes au laboratoire.

2.5 Résistances mécaniques

2.5.1 Résistance à la compression sèche

Cet essai permet de déterminer la résistance sèche des blocs de terre comprimée destinés à la maçonnerie afin d'obtenir des résultats comparatifs indépendants du format de la brique. L'essai est réalisé selon la norme XP P 13-901.



Figure 2.13: Essai de compression.

La résistance à la compression est donnée par la formule

$$R_c = F/S$$

Où :

R_c : Résistance à la compression des blocs en (MPa).

F : Charge maximale supportée par les deux demi-blocs (N).

S : Surface moyenne des faces d'essai en mm².

2.6 Essai de la durabilité

2.6.1 Séchage/ mouillage

Pour déterminer la tenue et le comportement de béton de terre comprimée lorsqu'elle subit des alternances pluviométriques (saturation en hiver et séchage en été), un ensemble d'essais de mouillage /séchage a été effectué sur les différents blocs étudiés suivant la norme (ASTM D559-57,1977) dont le principe de l'essai est le suivant : Dessécher les blocs jusqu'à masse constante à une température de 60-75°C.

Peser chaque bloc (masse sèche) et subir une série de 12 cycles comprenant :

- 05 heures d'immersion au bout desquelles le bloc est pesé (figure 2.14).



Figure 2.14: Eprouvette émergée dans l'eau.

- 42 heures de séchage à l'étuve à une température de 75°C (figure 2.15).



Figure 2.15: Éprouvettes séchées dans l'étuve.

Les blocs sont brossés et pesés. Le cycle complet ne doit pas excéder 48 heures.

On recommence ce cycle douze (12) fois de suite puis les blocs sont séchés à une température de 75°C jusqu'à masse constante. Les résultats de cet essai donnent la perte en masse maximum admise après 12 cycles de mouillage / séchage.

Les limites sévères selon ASTM D559, la perte en masse admissible pour les constructions rurales est de :

- 5% pour tout climat dont la pluviométrie annuelle est supérieure à 500mm
- 10% pour les climats secs dont la pluviométrie annuelle est inférieure à 500mm.

A noter que ces tests effectués au laboratoire sont généralement plus sévères qu'en réalité [42].

Chaque essai est réalisé sur trois éprouvettes de la même composition, et la valeur moyenne des trois essais a été prise comme valeur caractéristique.

2.6.2 Absorption totale

Diverses procédures peuvent être utilisées pour déterminer la capacité d'absorption totale de la brique (BS 3921: 1985) :

1. Immersion dans l'eau froide (24 à 48 heures) après séchage au four à masse constante.
2. Essai d'ébullition (5 heures).
3. Absorption sous test à vide.

Avec les méthodes ci-dessus, des résultats très différents peuvent encore être obtenus [43]. Pour cette étude, nous avons utilisé l'essai d'ébullition.

En ce qui concerne l'essai d'ébullition, les blocs sèches sont placées dans un bac d'eau à température ambiante. La température de l'eau est portée à ébullition pendant une période de 1 h, maintenues à 100°C pendant 5 h. Les blocs laissées refroidir à la température ambiante entre 16 et 19 h. Les blocs humides sont ensuite retirés et pesés. L'absorption d'eau est évaluée comme indiquée dans l'équation 2.1.

L'absorption totale (TWA) est déterminée par la formule suivante :

$$\text{TWA \%} = \frac{Ph - Ps}{Ps} \quad \text{équation 2.1}$$

Avec :

Ph: poids éprouvette a l'état humide.

Ps: poids éprouvette a l'état sec.

2.7 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les caractéristiques des différentes matières premières qui entrent dans la composition des blocs de terre comprimée dans cette étude.

Les données présentées dans ce chapitre sont issues de la bibliographie ou des essais de caractérisation menés lors de notre étude. La présentation de la composition des mélanges et les procédures de fabrication des BTC, va nous permettre de mieux analyser les résultats et d'avoir une meilleure compréhension de l'influence du sable sur la durabilité du BTC.

Chapitre 3 :

Résultats et discussion

3.1 Introduction

Le présent chapitre est consacré à l'étude de l'effet du sable sur la durabilité des bétons de terre compressée et stabilisée (BTCS) après 12 cycles de séchage/mouillage, de point de vue : résistance à la compression, masse volumique, absorption totale et perte de masse.

Les briques ont été stabilisées par cinq teneurs en sable (0,20, 40, 60, 80 %) et curées au laboratoire pendant 28 jours à température ambiante.

Les BTCS sont compactées à des contraintes de compactages de 10 et 20MPa.

Selon la norme **ASTM D 559-57**, l'essai consiste à faire sécher les éprouvettes jusqu'à un poids constant à une température de 60° à 70°C, les éprouvettes sont pesées après le séchage puis soumises à une série de cycles comprenant :

- 5 heures d'immersion dans l'eau au bout des quelles l'éprouvette est pesée.
- 42 heures de séchage à l'étuve à 70°C.

Guetala et al., [20] ont montré que les conditions des essais de la durabilité des BTC en laboratoire semblent très sévères par rapport aux conditions climatiques naturelles.

3.2 Résistance à la compression

La résistance à la compression exprime la capacité des BTCS à résister à la destruction sous l'action des contraintes dues à la charge de compression.

✓ **Contrainte de compactage 10MPa.**

Les résultats de l'essai de compression sont représentés sur la figure 3.1 et dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1. Résistance à la compression pour 10MPa.

| Résistance à la compression (MPa) | | | | | | |
|------------------------------------------|-------------------|----------------------------|-------|-------|--------------------|--------------------------|
| | Taux de sable (%) | Résistance des éprouvettes | | | Résistance moyenne | Contrainte de compactage |
| E1 | 0 | 4.91 | 4.90 | 5.30 | 5.03 | 10MPa |
| E2 | 20 | 6.26 | 6.39 | 6.89 | 6.51 | |
| E3 | 40 | 8.85 | 9.15 | 14.99 | 10.99 | |
| E4 | 60 | 14.24 | 12.52 | 15.36 | 14.04 | |
| E5 | 80 | 4.14 | 6.39 | 8.77 | 6.43 | |

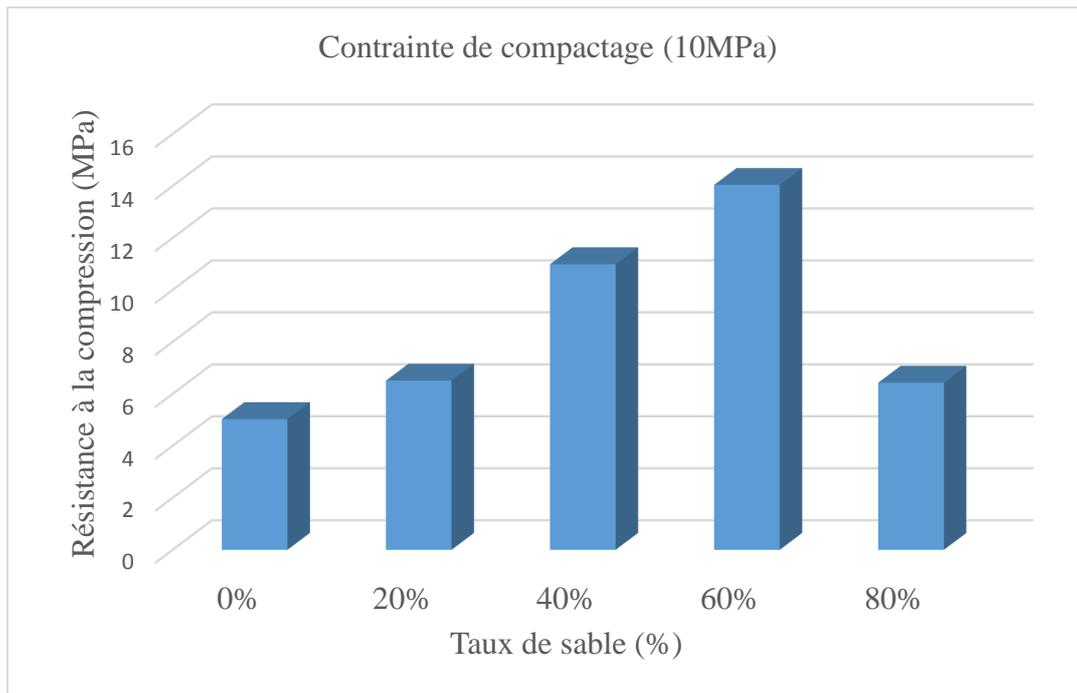


Figure 3.1. Evolution de la résistance à la compression moyenne à l'état sec en fonction du taux de sable pour 10MPa.

✓ **Contrainte de compactage 20MPa.**

Les résultats de l'essai de compression sont représentés sur la figure 3.2 et dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2. Résistance à la compression pour 20MPa.

| Résistances à la compression (MPa) | | | | | | |
|------------------------------------|-------------------|----------------------------------|-------|-------|--------------------------|--------------------------|
| | Taux de sable (%) | Résistance des éprouvettes (MPa) | | | Resistance moyenne (MPa) | Contrainte de compactage |
| F1 | 0 | 8.54 | 7.9 | 11 | 9,14 | 20 MPa |
| F2 | 20 | 19.44 | 17.88 | 19.78 | 19,03 | |
| F3 | 40 | 19.76 | 16.10 | 15.90 | 17,25 | |
| F4 | 60 | 15.07 | 15.80 | 14.64 | 15,17 | |
| F5 | 80 | 6.64 | 6.33 | 6.55 | 6,5 | |

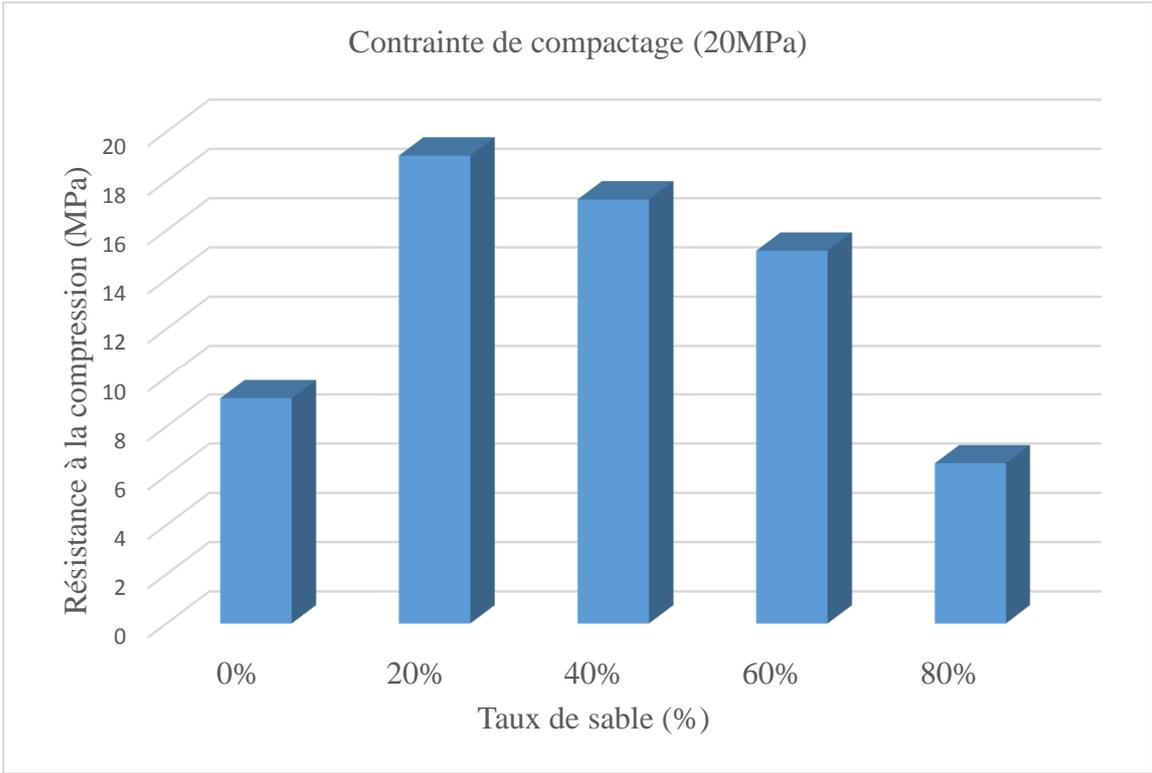


Figure 3.2. Evolution de la résistance à la compression moyenne à l'état sec en fonction du taux de sable pour 20MPa.

3.2.1 L'effet de sable et de la contrainte de compactage sur la résistance à la compression.

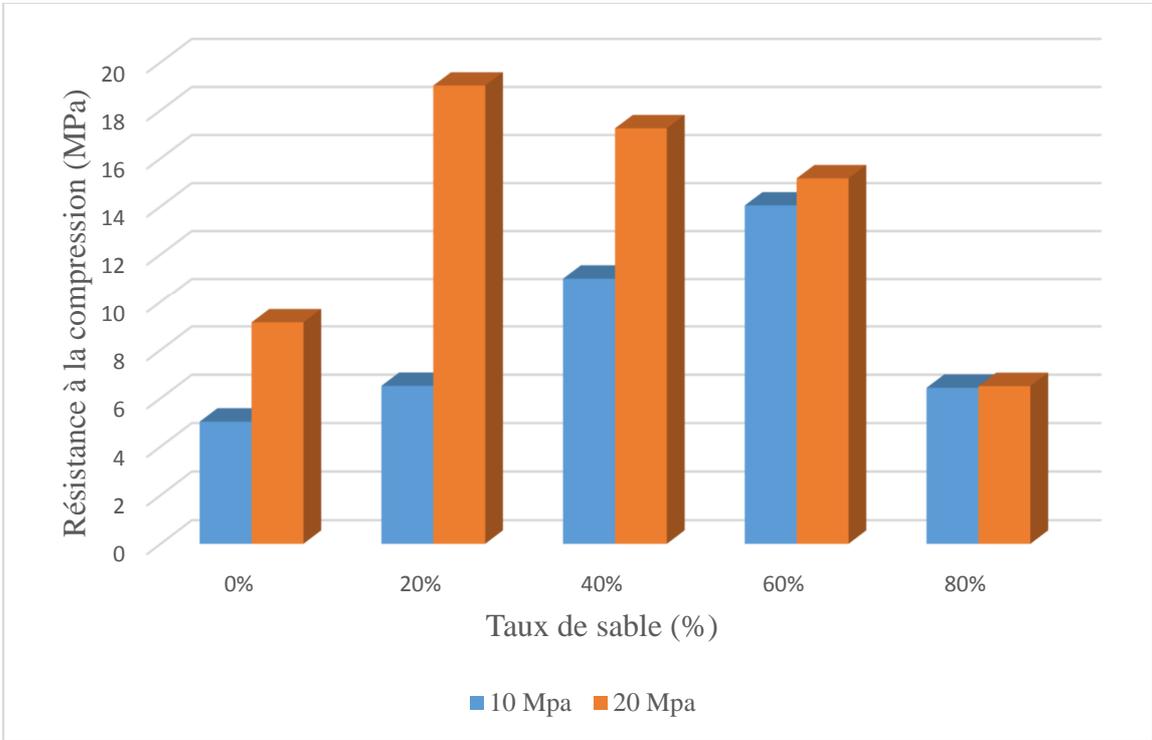


Figure 3.3. Evolution de la résistance à la compression moyenne à l'état sec en fonction du taux de sable et de la contrainte de compactage.

D'après la figure 3.3, la résistance à la compression atteint un maximum pour un taux de sable de 60 % et une contrainte de compactage de 10MPa et elle est encore bien meilleure pour un taux de sable de 20% et une contrainte de compactage de 20MPa.

L'augmentation de la contrainte de compactage (20MPa) contribue remarquablement à l'amélioration de la résistance à la compression par l'imperméabilisation des bétons en éliminant les vides inter-granulaires du squelette (sable, argile et ciment) tout en ajoutant un minimum de sable (20%).

3.3. Masse volumique

La masse volumique est le rapport de la masse sur le volume du BTC. Elle joue un rôle très important dans les propriétés thermo-physique, ainsi sur la maniabilité de son utilisation dans les divers chantiers de construction.

✓ Contrainte de compactage 10MPa.

Les résultats sont représentés sur la figure 3.4 et dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3. Masse volumique des BTC.

| Masse volumique moyenne du BTC (kg/m ³) | | | | |
|-----------------------------------------------------|-----|------------|-----------|--------------------------------------|
| | | Etat frais | Etats sec | Après 12 cycles Séchage/mouillage |
| E1 | 0% | 2326 | 2343 | 2238 |
| E2 | 20% | 2336,33 | 2325 | 2083 |
| E3 | 40% | 2438 | 2435 | 2298 |
| E4 | 60% | 2314,66 | 2302 | 2238 |
| E5 | 80% | 2113,66 | 2103 | 2088 |

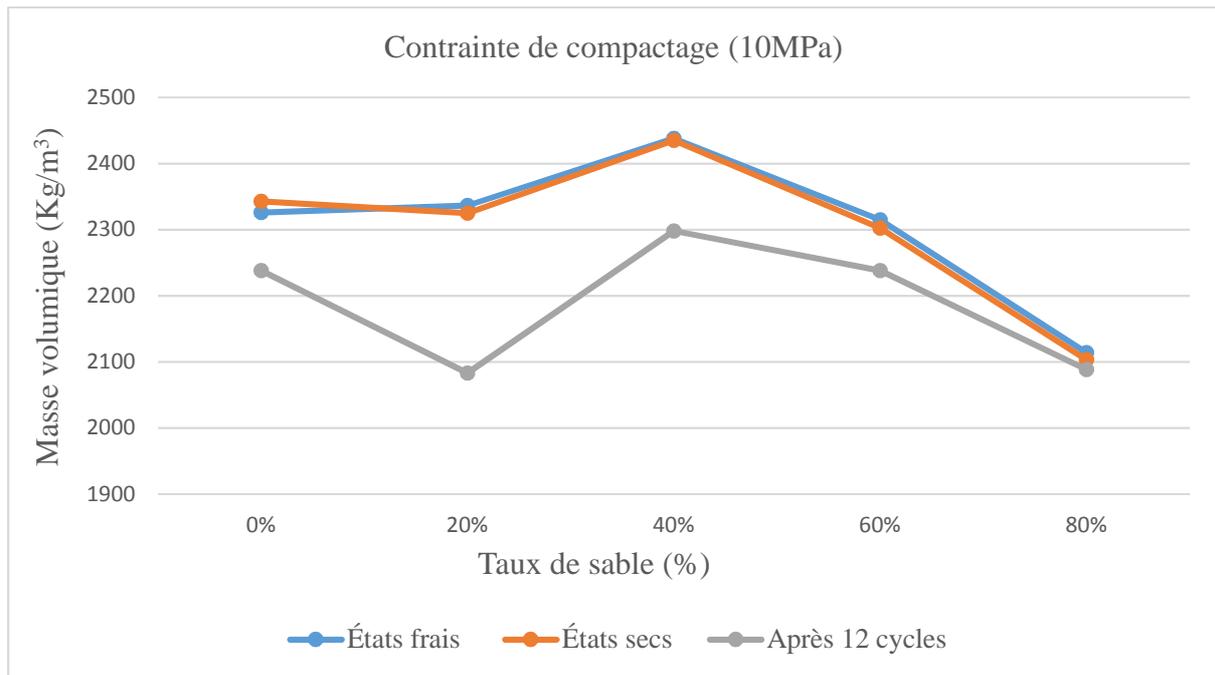


Figure 3.4. L'influence du taux de sable sur la masse volumique des BTC.

✓ **Contrainte de compactage 20MPa.**

Les résultats sont représentés sur la figure 3.5 et dans le tableau 3.6.

Tableau 3.4. Masse volumique de BTC

| Masse volumique moyenne du BTC (kg/m ³) | | | | |
|-----------------------------------------------------|-----|-------------|-----------|--------------------------------------|
| | | Etats frais | Etats sec | Après 12 cycles Séchage/mouillage |
| F1 | 0% | 2298,66 | 2291 | 2141 |
| F2 | 20% | 2333,66 | 2323,33 | 2253,66 |
| F3 | 40% | 2304,66 | 2293,66 | 2238 |
| F4 | 60% | 2427,33 | 2285 | 2240 |
| F5 | 80% | 2046,33 | 2040,66 | 2120 |

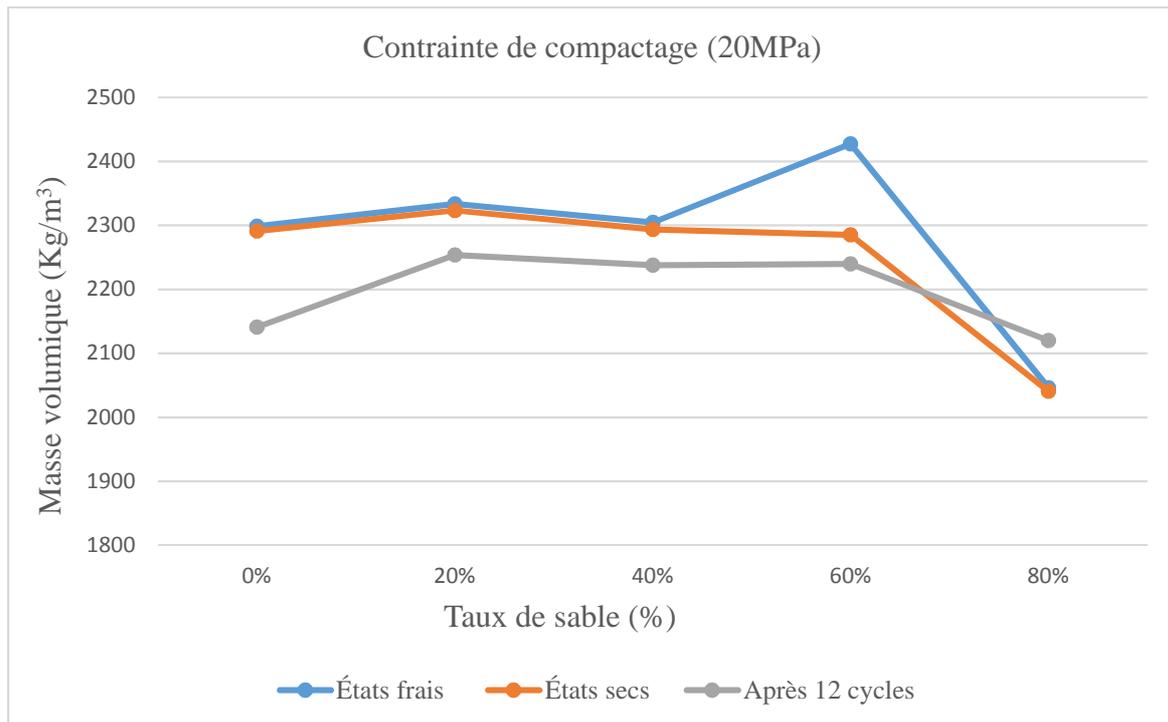


Figure 3.5. L'influence du taux de sable sur la masse volumique des BTC.

3.3.1. L'effet de sable et de la contrainte de compression sur la masse volumique des BTC.

D'après les résultats représentés sur les figures 3.4 et 3.5, on constate que la masse volumique des BTC pour une contrainte de compactage 10MPa, les masses volumique des bétons n'ont subi presque aucun changement en passant de l'état frais à l'état sec et cela quelque soit le taux de sable. Mais, après 12 cycles de séchage/mouillage, les masses volumiques diminuent surtout pour un taux de sable de 20%. Cela peut être expliqué par la grande quantité d'argile qui est sensible aux cycles de séchage/mouillage.

Pour une contrainte de 20MPa, la masse volumique des BTC a diminué pour un taux de sable de 60% en passant de l'état frais à l'état sec. Après 12 cycles de séchage/mouillage, les masses volumiques diminuent légèrement sauf pour un taux de sable de 80%. Plus la quantité d'argile est grande plus il y a diminution de la masse volumique.

3.4. Absorption totale

L'absorption totale de l'eau est une propriété importante qu'on peut utiliser pour le contrôle du volume total des vides dans les BTC [44]. L'absorption totale est obtenue après l'immersion de la brique dans un bac à eau pendant 5 heures.

✓ Contrainte de compactage 10MPa.

Les résultats sont présentés sur la figure 3.6 et dans le tableau 3.5

Tableau 3.5. Résultats d'absorption d'eau.

| | Eprouvette 1 | Eprouvette 2 | Eprouvette 3 | Moy (%) |
|----|--------------|--------------|--------------|---------|
| E1 | 5.75 | 6.81 | 6.21 | 6.25 |
| E2 | 5.12 | 5.31 | 5 | 5.14 |
| E3 | 5.18 | 4.57 | 5.03 | 4.92 |
| E4 | 4.69 | 4.74 | 4.77 | 4.73 |
| E5 | 8.95 | 5.33 | 4.75 | 6.34 |

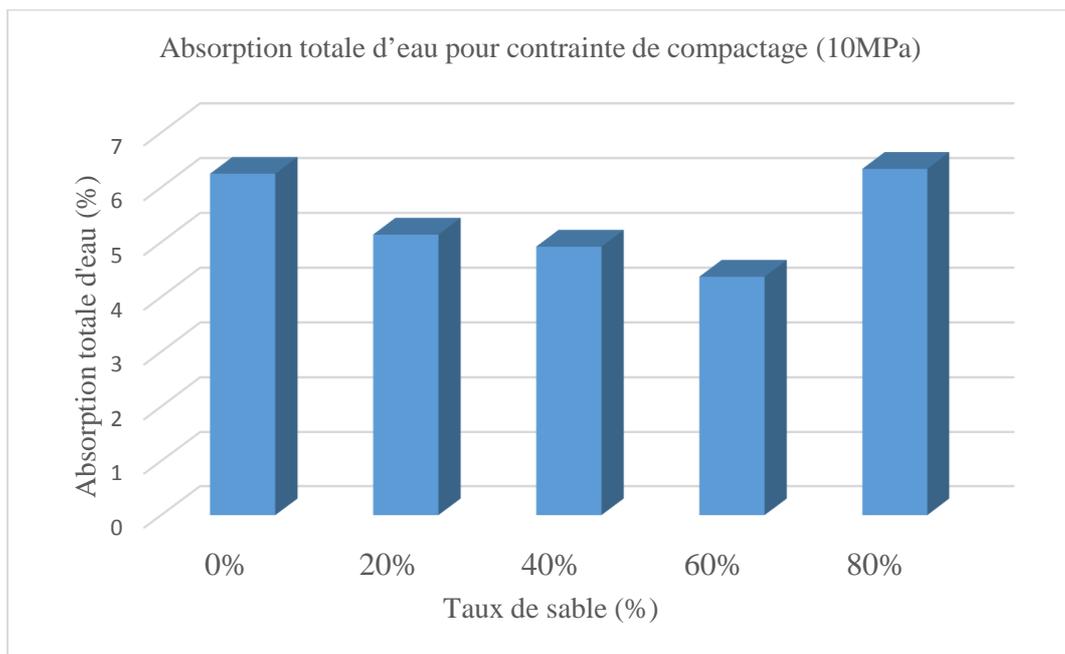


Figure 3.6. Effet du sable sur l'absorption totale d'eau des bétons compressés à 10MPa.

✓ **Contrainte de compactage 20MPa**

Les résultats sont présentés sur la figure 3.7 et dans le tableau 3.6

Tableau 3.6. Résultats d'absorption d'eau

| | Eprouvette 1 | Eprouvette 2 | Eprouvette 3 | Moy (%) |
|----|--------------|--------------|--------------|---------|
| F1 | 5.57 | 5.62 | 5.26 | 5.48 |
| F2 | 3.56 | 3.61 | 3.59 | 3.58 |
| F3 | 3.45 | 3.16 | 3.62 | 3.41 |
| F4 | 3.71 | 3.82 | 4.62 | 4.05 |
| F5 | 7.21 | 8.96 | 8.64 | 8.27 |

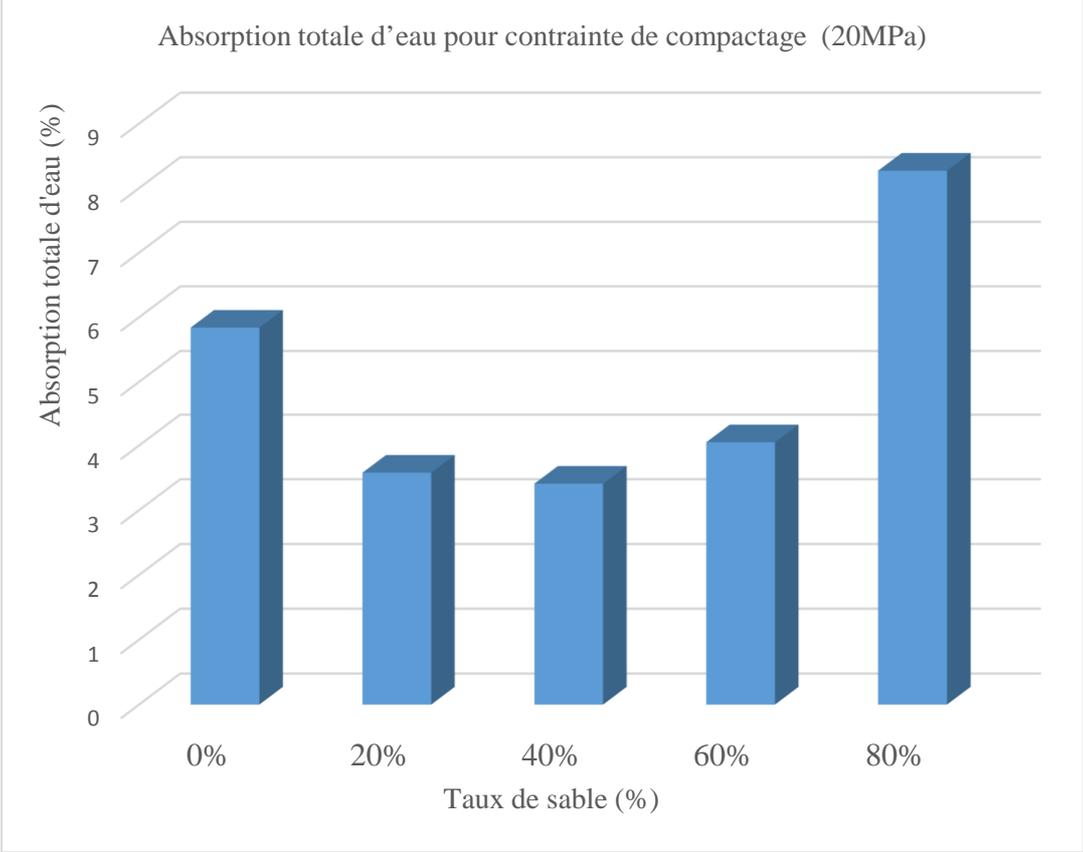


Figure 3.7. Effet du sable sur l'absorption totale d'eau des bétons compressés à 20MPa.

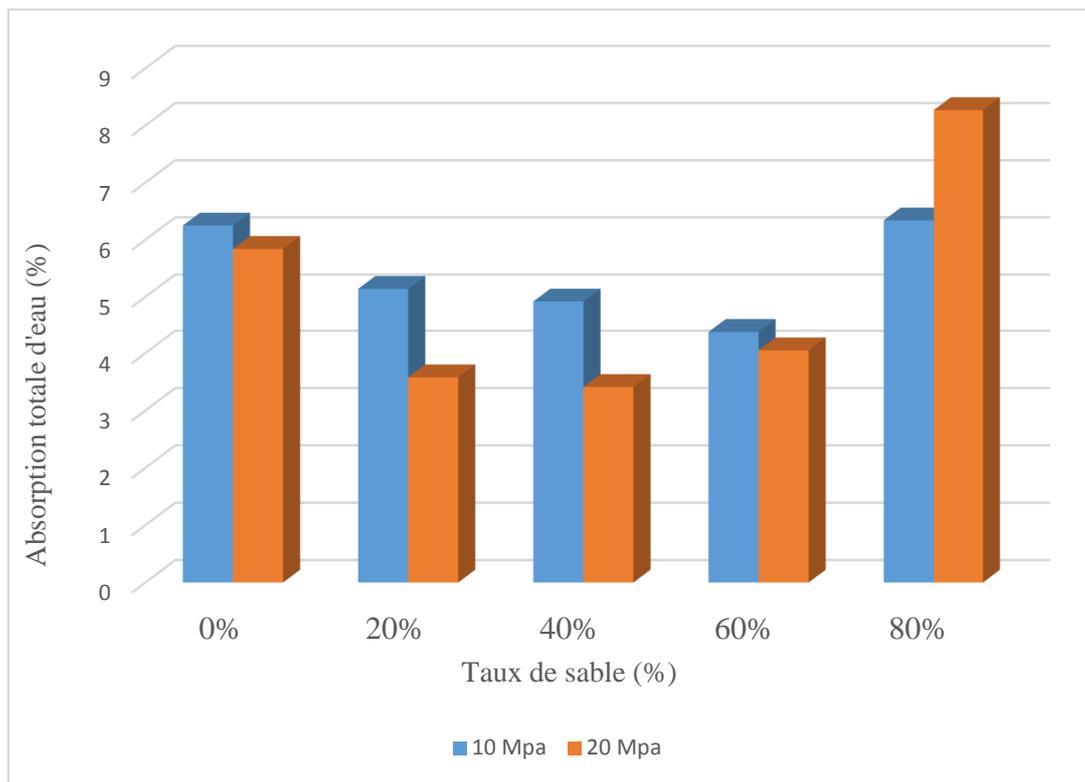


Figure 3.8. Effet du sable et de la contrainte de compactage sur l'absorption d'eau

La figure 3.8 représente la variation de l'absorption totale en fonction du taux de sable et de la contrainte de compactage.

On remarque, d'une part, que l'absorption totale diminue avec l'augmentation du dosage du sable jusqu'à 60%, par contre, elle augmente pour un taux supérieur (80%). Ce résultat est expliqué par la réaction pouzzolanique entre la silice SiO_2 de l'argile et la chaux hydratée du ciment $\text{Ca}(\text{OH})_2$ qui forme des C-S-H rendant le béton plus compact ; l'augmentation du taux de sable à plus de 60% et par conséquent la diminution de la quantité d'argile entraînent la diminution des C-S-H et un béton plus perméable.

D'autre part, l'augmentation de la contrainte de compactage (de 10 à 20MPa) imperméabilise mieux le béton ce qui diminue son absorption d'eau.

3.5. Perte de masse

- ✓ **Perte de masse pour les éprouvettes comprimées à 10MPa**
- *Perte de masse pour un taux de sable 0 %*

Tableau 3.7. Résultats de perte de masse moyenne E1 du BTC pendant 12 cycles

| Nombre De Cycles | Perte de masse E11 (%) | Perte de masse E12 (%) | Perte de masse E13 (%) | Perte de masse E1 (%) |
|------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| Cycle 1 | 6,39 | 6,65 | 6,06 | 6,52 |
| Cycle 2 | 8,73 | 7,6 | 7,52 | 8,16 |
| Cycle 3 | 9,75 | 8,82 | 17,5 | 9,28 |
| Cycle 4 | 11,14 | 10,07 | 18,57 | 10,6 |
| Cycle 5 | 12,47 | 11,72 | 18,85 | 12,09 |
| Cycle 6 | 12,91 | 12,02 | 18,57 | 12,46 |
| Cycle 7 | 14,12 | 12,9 | 19,13 | 13,51 |
| Cycle 8 | 14,88 | 11,96 | 19,02 | 13,42 |
| Cycle 9 | 14,37 | 12,55 | 18,23 | 13,46 |
| Cycle 10 | 14,31 | 12,55 | 18,35 | 13,43 |
| Cycle 11 | 14,81 | 12,72 | 18,29 | 13,76 |
| Cycle 12 | 14,88 | 12,72 | 18,51 | 13,8 |

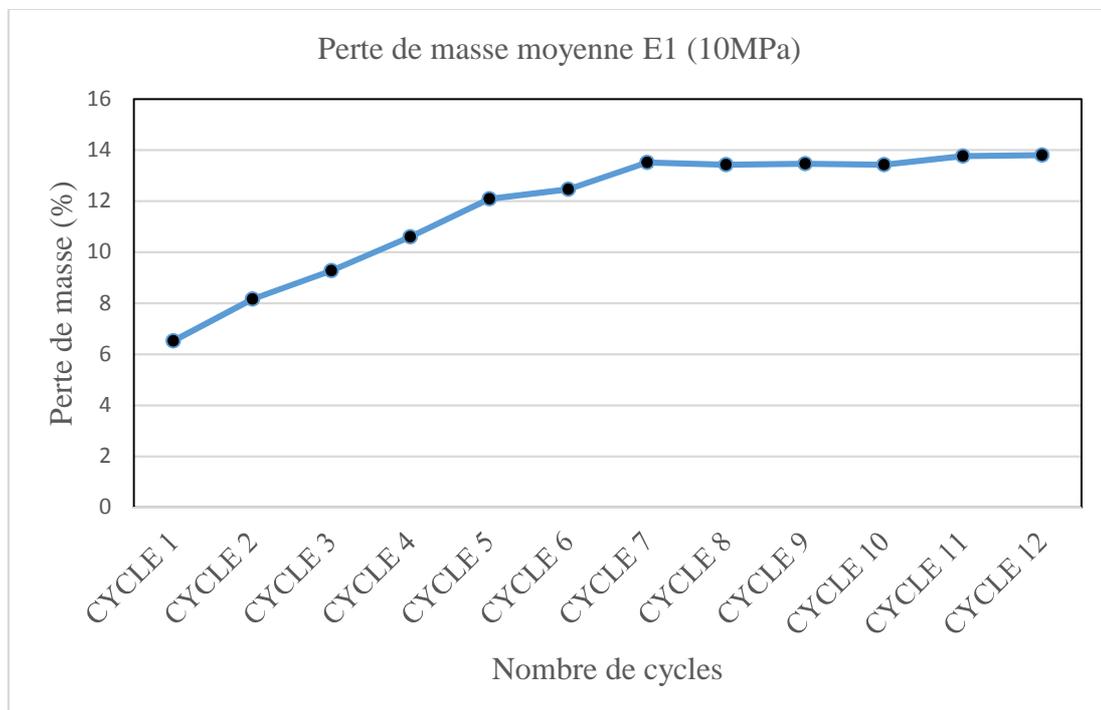


Figure 3.9. Perte de masse moyenne E1 du BTC comprimée à 10MPa



Figure 3.10. Éprouvettes E1 après 12 cycles de séchage/mouillage

- *Perte de masse pour taux de sable 20 %*

Tableau 3.8. Résultats de perte de masse moyenne E2 du BTC pendant 12 cycles

| Nombre De Cycles | Perte de masse E21 (%) | Perte de masse E22 (%) | Perte de masse E23 (%) | Perte de masse E2 (%) |
|------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| Cycle 1 | 5,56 | 5,58 | 5,31 | 5,57 |
| Cycle 2 | 7,28 | 6,89 | 6,86 | 7,08 |
| Cycle 3 | 7,28 | 7,64 | 15,1 | 7,46 |
| Cycle 4 | 8,37 | 8,42 | 16,17 | 8,39 |
| Cycle 5 | 9,28 | 9,06 | 17,17 | 9,17 |
| Cycle 6 | 9,92 | 9,23 | 17,07 | 9,57 |
| Cycle 7 | 11,75 | 10,77 | 18,08 | 11,26 |
| Cycle 8 | 12,9 | 11,23 | 18,24 | 12,06 |
| Cycle 9 | 13,24 | 11,46 | 18,35 | 12,35 |
| Cycle 10 | 13,361 | 11,57 | 18,83 | 12,46 |
| Cycle 11 | 13,71 | 11,97 | 18,72 | 12,84 |
| Cycle 12 | 13,76 | 12,03 | 18,61 | 12,89 |

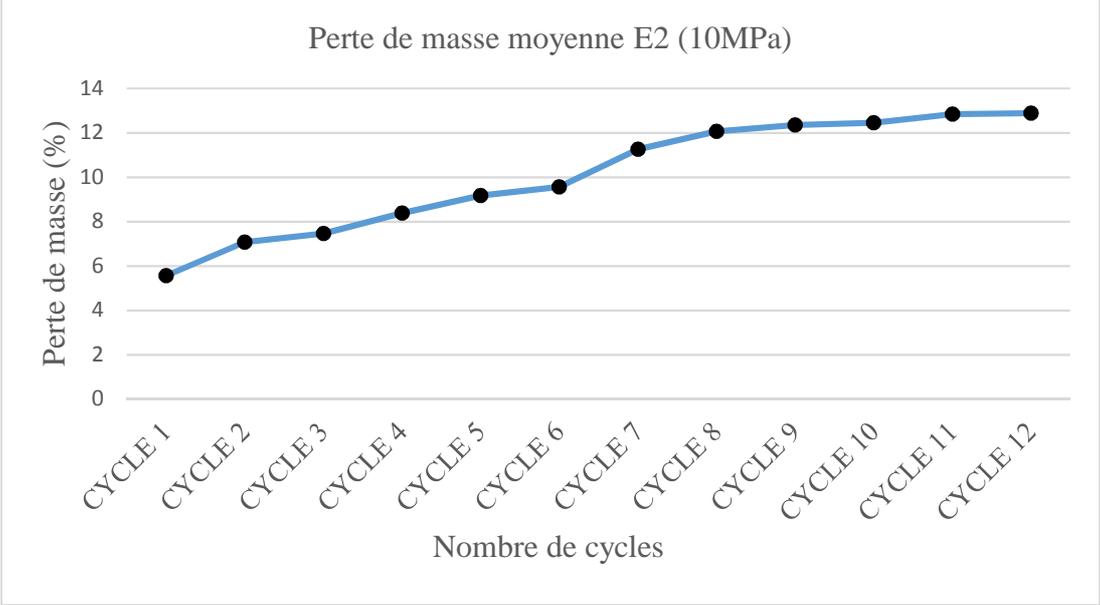


Figure 3.11. Perte de masse moyenne E2 du BTC comprimée a 10MPa



Figure 3.12. Éprouvettes E2 après 12 cycles de séchage/mouillage

- Perte de masse pour tau de sable 40%

Tableau 3.9. Résultats de perte de masse moyenne E3 du BTC pendant 12 cycles

| Nombre De Cycles | Perte de masse E31 (%) | Perte de masse E32 (%) | Perte de masse E33 (%) | Perte de masse E3 (%) |
|------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| Cycle 1 | 5,64 | 4,59 | 4,96 | 5,06 |
| Cycle 2 | 7,04 | 6,06 | 6,11 | 6,4 |
| Cycle 3 | 5,76 | 4,81 | 5,51 | 5,36 |
| Cycle 4 | 6,1 | 5,15 | 5,51 | 5,58 |
| Cycle 5 | 6,1 | 5,21 | 5,14 | 5,48 |
| Cycle 6 | 5,99 | 5,32 | 4,72 | 5,34 |
| Cycle 7 | 7,14 | 6 | 5,51 | 6,21 |
| Cycle 8 | 6,91 | 5,89 | 4,48 | 5,76 |
| Cycle 9 | 6,97 | 5,89 | 4,11 | 5,65 |
| Cycle 10 | 6,68 | 5,72 | 3,93 | 5,44 |
| Cycle 11 | 6,97 | 5,95 | 3,93 | 5,61 |
| Cycle 12 | 6,79 | 5,95 | 3,45 | 5,39 |

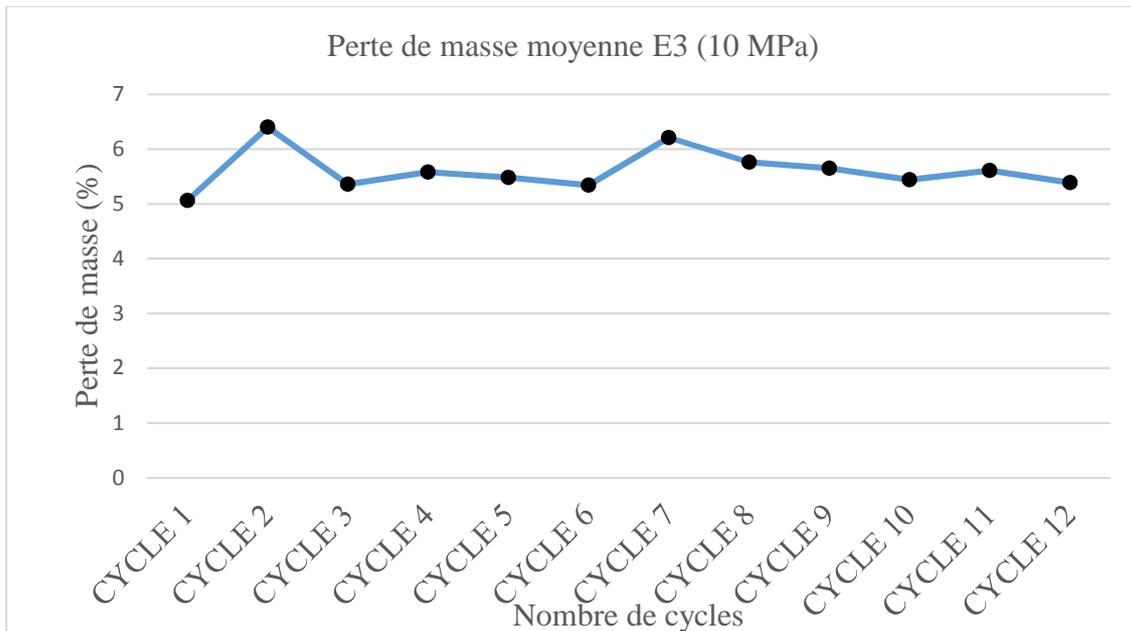


Figure 3.13. Perte de masse moyenne E3 du BTC comprimée a 10MPa



Figure 3.14. Éprouvettes E3 après 12 cycles de séchage/mouillage.

- *Perte de masse pour taux de sable 60%*

Tableau 3.10. Résultats de perte de masse moyenne E4 du BTC pendant 12 cycles

| Nombre De Cycles | Perte de masse E41 (%) | Perte de masse E42 (%) | Perte de masse E43 (%) | Perte de masse E4 (%) |
|------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| Cycle 1 | 4 | 3,69 | 3,81 | 3,83 |
| Cycle 2 | 4,63 | 4,45 | 4,42 | 4,5 |
| Cycle 3 | 4,69 | 4,29 | 4,14 | 4,37 |
| Cycle 4 | 4,94 | 4,51 | 4,42 | 4,62 |
| Cycle 5 | 4,56 | 4,4 | 4,2 | 4,38 |
| Cycle 6 | 3,75 | 3,53 | 3,53 | 3,6 |
| Cycle 7 | 4,5 | 4,24 | 4,14 | 4,29 |
| Cycle 8 | 3,88 | 5,16 | 3,42 | 4,15 |
| Cycle 9 | 3,63 | 3,48 | 3,26 | 3,45 |
| Cycle 10 | 3,44 | 3,31 | 3,09 | 3,28 |
| Cycle 11 | 3,56 | 3,31 | 3,04 | 3,3 |
| Cycle 12 | 2,94 | 2,99 | 2,48 | 2,8 |

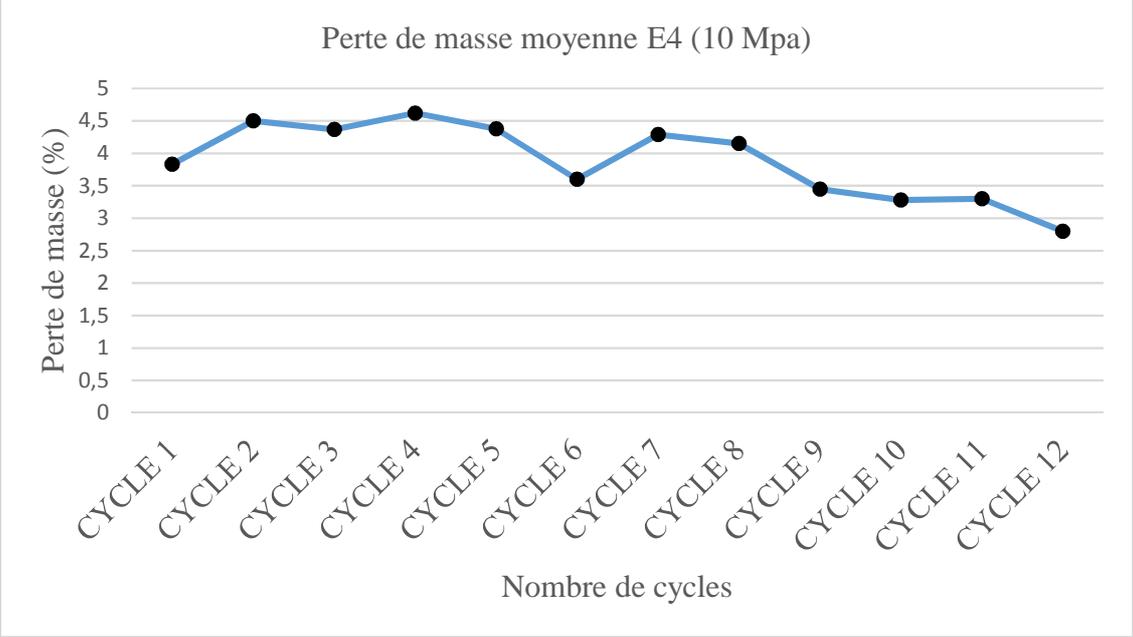


Figure 3.15. Perte de masse moyenne E4 du BTC comprimée a 10MPa



Figure 3.16. Éprouvettes E4 après 12 cycles de séchage/mouillage

- *Perte de masse pour taux de sable 80%*

Tableau 3.11. Résultats de perte de masse moyenne E5 du BTC pendant 12 cycles

| Nombre De Cycles | Perte de masse E51 (%) | Perte de masse E52 (%) | Perte de masse E53 (%) | Perte de masse E5 (%) |
|------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| Cycle 1 | 2,94 | 3,23 | 3,09 | 3,08 |
| Cycle 2 | 3,2 | 3,65 | 3,25 | 3,36 |
| Cycle 3 | 3,05 | 3,65 | 3,25 | 3,31 |
| Cycle 4 | 3,05 | 3,6 | 3,14 | 3,26 |
| Cycle 5 | 2,84 | 3,44 | 3,03 | 3,1 |
| Cycle 6 | 2,48 | 3,07 | 2,65 | 2,73 |
| Cycle 7 | 2,74 | 3,31 | 2,87 | 2,97 |
| Cycle 8 | 2,22 | 2,81 | 2,22 | 2,41 |
| Cycle 9 | 2,43 | 3,07 | 2,44 | 2,64 |
| Cycle 10 | 1,03 | 1,61 | 1,08 | 1,24 |
| Cycle 11 | 0,98 | 1,77 | 1,08 | 1,27 |
| Cycle 12 | 0,41 | 1,04 | 0,65 | 0,7 |

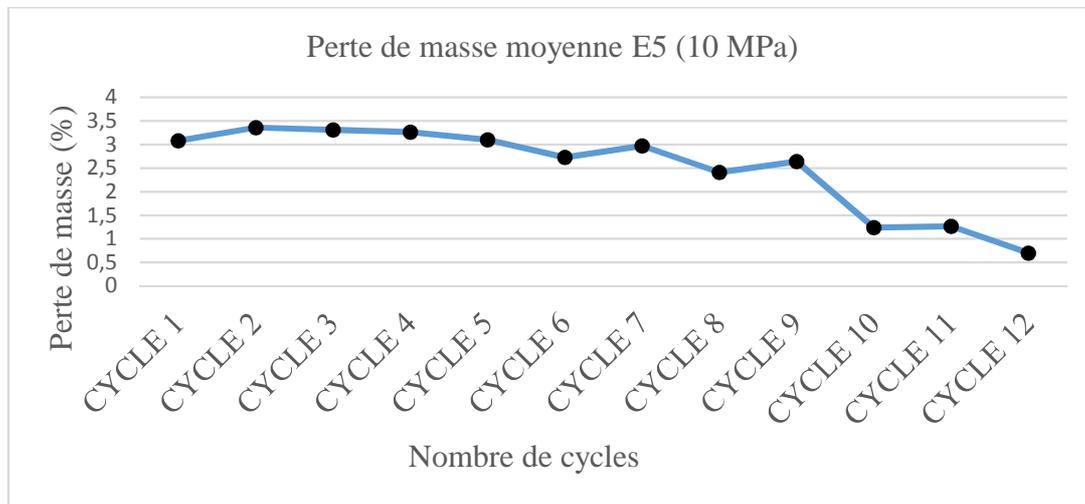


Figure 3.17. Perte de masse moyenne E5 du BTC comprimée a 10MPa.



Figure 3.18. Éprouvettes E5 après 12 cycles de séchage/mouillage

- ✓ **Perte de masse pour les éprouvettes comprimées à 20MPa**
- *Perte de masse pour taux de sable 0%*

Tableau 3.12. Résultats de perte de masse moyenne F1 du BTC pendant 12 cycles

| Nombre De Cycles | Perte de masse F11 (%) | Perte de masse F12 (%) | Perte de masse F13 (%) | Perte de masse F1 (%) |
|------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| Cycle 1 | 5.52 | 5.43 | 5.05 | 5.33 |
| Cycle 2 | 6.75 | 6.70 | 6.58 | 6.67 |
| Cycle 3 | 7.21 | 7.10 | 6.46 | 6.92 |
| Cycle 4 | 7.79 | 7.51 | 6.64 | 7.31 |
| Cycle 5 | 7.73 | 7.04 | 6.35 | 7.04 |
| Cycle 6 | 7.92 | 6.93 | 6.24 | 7.03 |
| Cycle 7 | 8.64 | 7.45 | 6.69 | 7.59 |
| Cycle 8 | 8.18 | 6.81 | 5.95 | 6.98 |
| Cycle 9 | 7.92 | 6.47 | 5.5 | 6.63 |
| Cycle 10 | 7.66 | 6.06 | 6.52 | 6.74 |
| Cycle 11 | 8.44 | 6.87 | 5.73 | 7.01 |
| Cycle 12 | 7.79 | 6.52 | 5.10 | 6.47 |

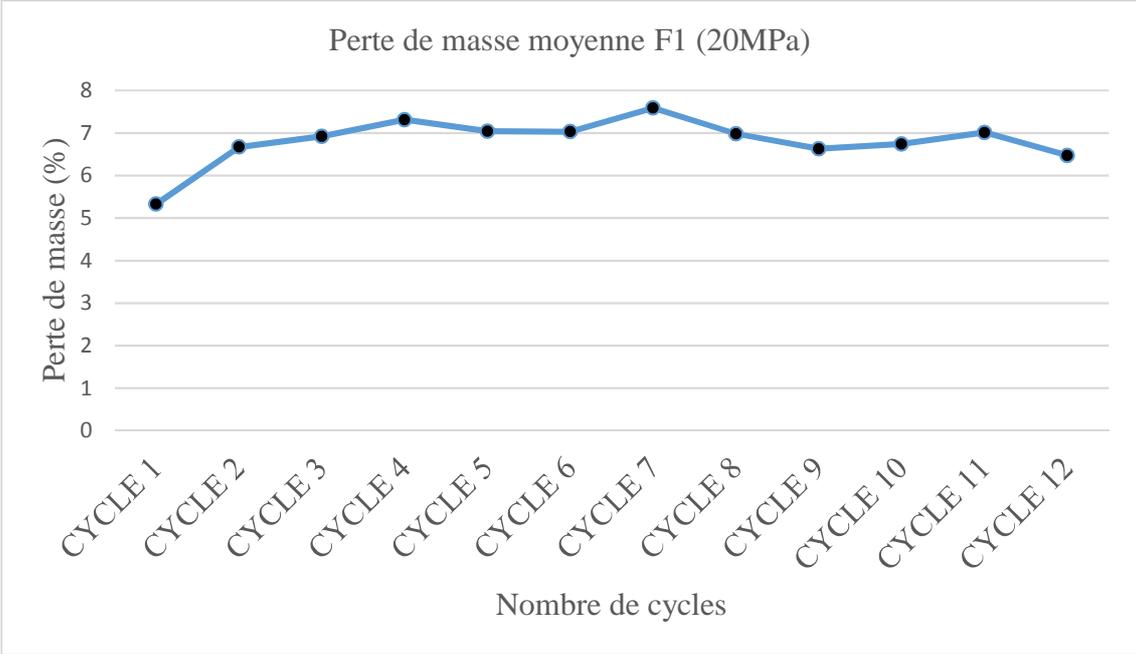


Figure 3.19. Perte de masse moyenne F1 du BTC comprimée a 20MPa.



Figure 3.20. Éprouvettes F1 après 12 cycles de séchage/mouillage

- *Perte de masse pour taux de sable 20%*

Tableau 3.13. Résultats de perte de masse moyenne F2 du BTC pendant 12 cycles

| Nombre De Cycles | Perte de masse F21 (%) | Perte de masse F22 (%) | Perte de masse F23 (%) | Perte de masse F2 (%) |
|------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| Cycle 1 | 3,55 | 3,75 | 3,85 | 3,71 |
| Cycle 2 | 3,84 | 3,86 | 3,74 | 3,81 |
| Cycle 3 | 2,98 | 3,2 | 3,28 | 3,15 |
| Cycle 4 | 3,38 | 3,5 | 3,45 | 3,44 |
| Cycle 5 | 2,29 | 2,43 | 2,41 | 2,37 |
| Cycle 6 | 2,01 | 2,59 | 2,59 | 2,39 |
| Cycle 7 | 2,98 | 3,14 | 3,16 | 3,09 |
| Cycle 8 | 2,63 | 2,76 | 2,3 | 2,56 |
| Cycle 9 | 2,86 | 3,09 | 3,05 | 3 |
| Cycle 10 | 2,63 | 3 | 3,16 | 2,96 |
| Cycle 11 | 2,75 | 2,98 | 3,22 | 2,98 |
| Cycle 12 | 2,86 | 3,09 | 3,05 | 3 |

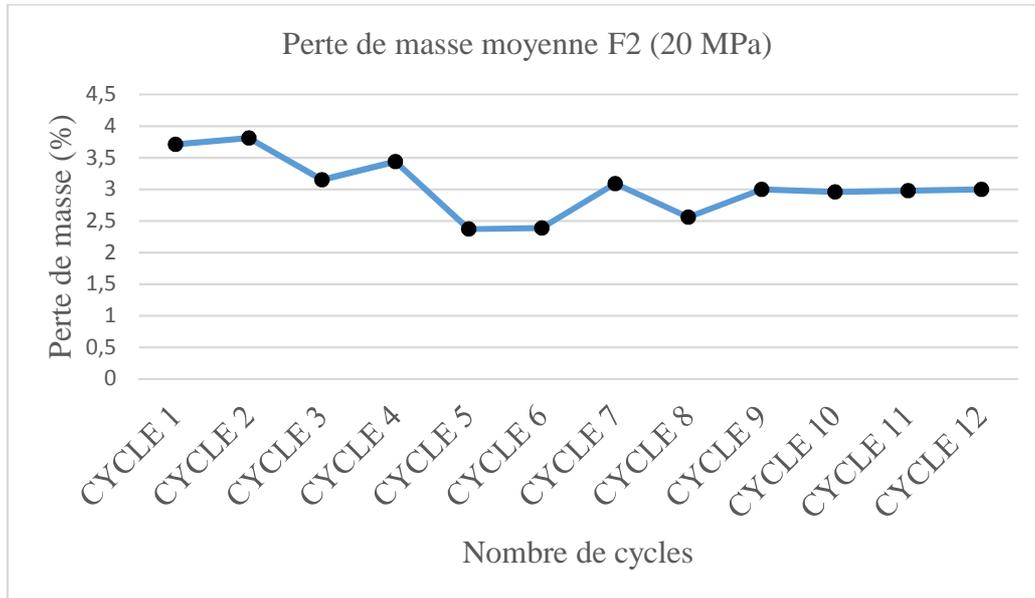


Figure 3.21. Perte de masse moyenne F2 du BTC comprimée a 20MPa



Figure 3.22. Éprouvettes F2 après 12 cycles de séchage/mouillage

- *Perte de masse pour taux de sable 40%*

Tableau 3.14. Résultats de perte de masse moyenne F3 du BTC pendant 12 cycles

| Nombre De Cycles | Perte de masse F31 (%) | Perte de masse F32 (%) | Perte de masse F33 (%) | Perte de masse F3 (%) |
|------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| Cycle 1 | 3,56 | 3,46 | 3,789 | 3,6 |
| Cycle 2 | 3,68 | 4,44 | 3,9 | 4 |
| Cycle 3 | 2,92 | 3,11 | 3,19 | 3,07 |
| Cycle 4 | 3,1 | 3,23 | 3,36 | 3,23 |
| Cycle 5 | 2,28 | 2,42 | 2,48 | 2,39 |
| Cycle 6 | 2,34 | 2,3 | 2,37 | 2,33 |
| Cycle 7 | 2,75 | 2,77 | 2,77 | 2,76 |
| Cycle 8 | 2,45 | 2,48 | 2,42 | 2,45 |
| Cycle 9 | 2,63 | 2,65 | 2,6 | 2,62 |
| Cycle 10 | 2,34 | 2,48 | 2,77 | 2,53 |
| Cycle 11 | 2,16 | 3 | 2,54 | 2,56 |
| Cycle 12 | 2,28 | 3,11 | 2,42 | 2,6 |

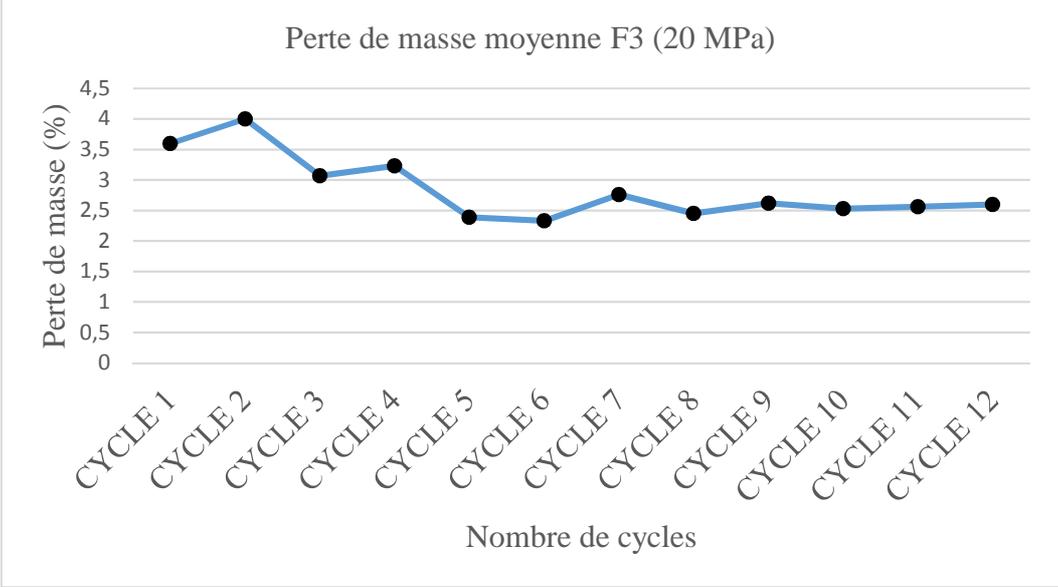


Figure 3.23. Perte de masse moyenne F3 du BTC comprimée a 20MPa



Figure 3.24. Éprouvettes F3 après 12 cycles de séchage/mouillage

- *Perte de masse pour taux de sable 60%*

Tableau 3.15. Résultats de perte de masse moyenne F4 du BTC pendant 12 cycles

| Nombre De Cycles | Perte de masse F41 (%) | Perte de masse F42 (%) | Perte de masse F43 (%) | Perte de masse F4 (%) |
|------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| Cycle 1 | 3,08 | 4,87 | 3,27 | 3,74 |
| Cycle 2 | 3,72 | 2,88 | 3,03 | 3,21 |
| Cycle 3 | 3,14 | 2,27 | 2,8 | 2,73 |
| Cycle 4 | 2,9 | 2,54 | 2,62 | 2,68 |
| Cycle 5 | 1,91 | 1,55 | 1,49 | 1,65 |
| Cycle 6 | 2,03 | 1,71 | 1,66 | 1,8 |
| Cycle 7 | 2,38 | 2,1 | 2,08 | 2,18 |
| Cycle 8 | 2,09 | 1,88 | 1,78 | 1,91 |
| Cycle 9 | 2,2 | 1,88 | 1,9 | 1,99 |
| Cycle 10 | 2,03 | 1,71 | 2,08 | 1,94 |
| Cycle 11 | 2,2 | 1,93 | 2,2 | 2,11 |
| Cycle 12 | 2,32 | 1,55 | 1,9 | 1,92 |

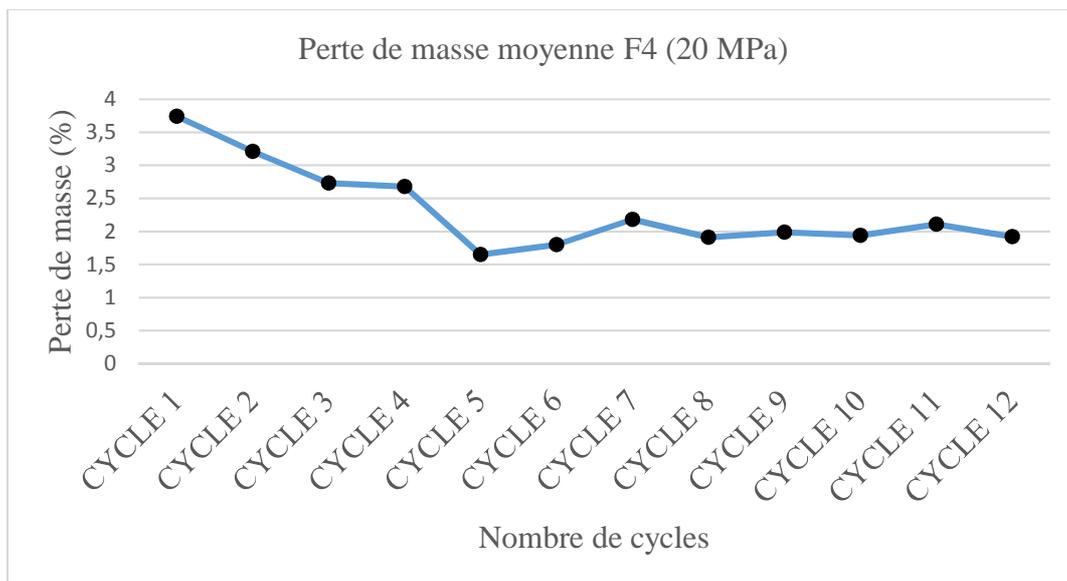


Figure 3.25. Perte de masse moyenne F4 du BTC comprimée a 20MPa



Figure 3.26. Éprouvettes F4 après 12 cycles de séchage/mouillage

- *Perte de masse pour taux de sable 80%*

Tableau 3.16. Résultats de perte de masse moyenne F5 du BTC pendant 12 cycles

| Nombre De Cycles | Perte de masse F51 (%) | Perte de masse F52 (%) | Perte de masse F53 (%) | Perte de masse F5 (%) |
|------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| Cycle 1 | 2,65 | 2,9 | 2,85 | 2,8 |
| Cycle 2 | 2,16 | 2,6 | 2,25 | 2,33 |
| Cycle 3 | 1,89 | 1,53 | 1,7 | 1,7 |
| Cycle 4 | 1,73 | 2,06 | 1,37 | 1,72 |
| Cycle 5 | 1,13 | 0,71 | 0,65 | 0,83 |
| Cycle 6 | 1,3 | 0,77 | 1,26 | 1,11 |
| Cycle 7 | 1,79 | 1,59 | 1,64 | 1,67 |
| Cycle 8 | 1,62 | 1,42 | 1,42 | 1,48 |
| Cycle 9 | 1,68 | 1,42 | 1,42 | 1,5 |
| Cycle 10 | 1,79 | 1,59 | 1,26 | 1,54 |
| Cycle 11 | 1,89 | 1,71 | 1,09 | 1,56 |
| Cycle 12 | 2,06 | 1,18 | 1,31 | 1,51 |

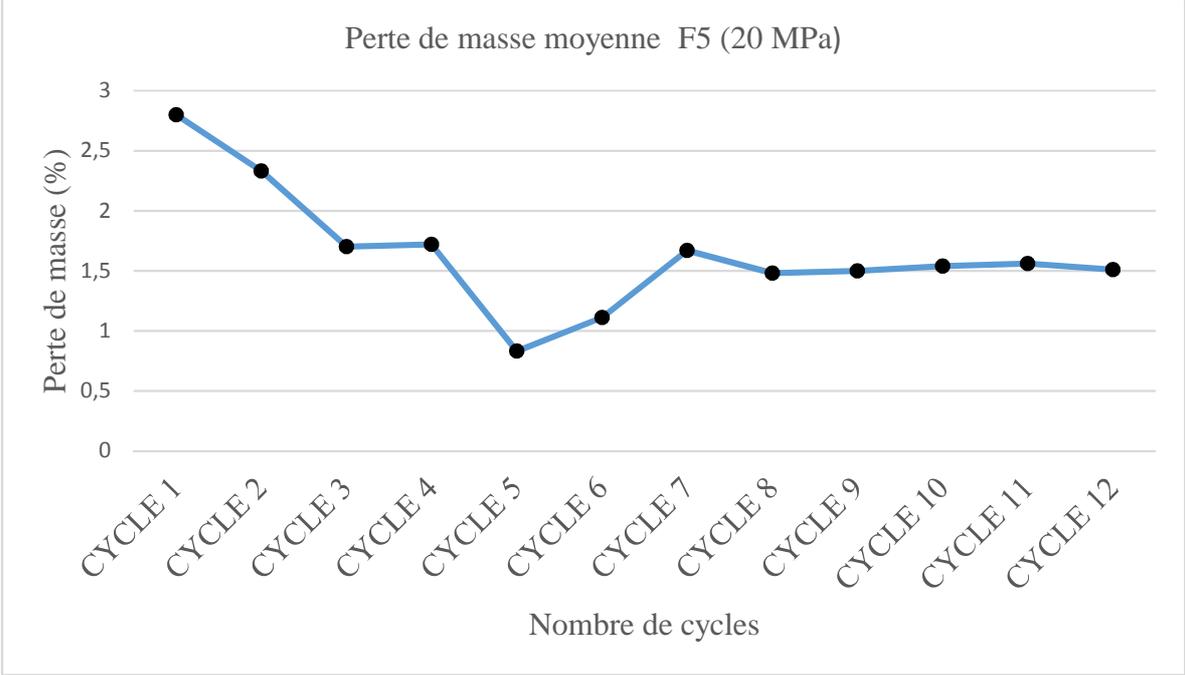


Figure 3.27. Perte de masse moyenne F5 du BTC comprimée a 20MPa



Figure 3.28. Éprouvettes F5 après 12 cycles de séchage/mouillage

3.5.1. Effet de sable et de la contrainte de compactage sur la perte de masse du BTC après 12 cycles de séchage/mouillage

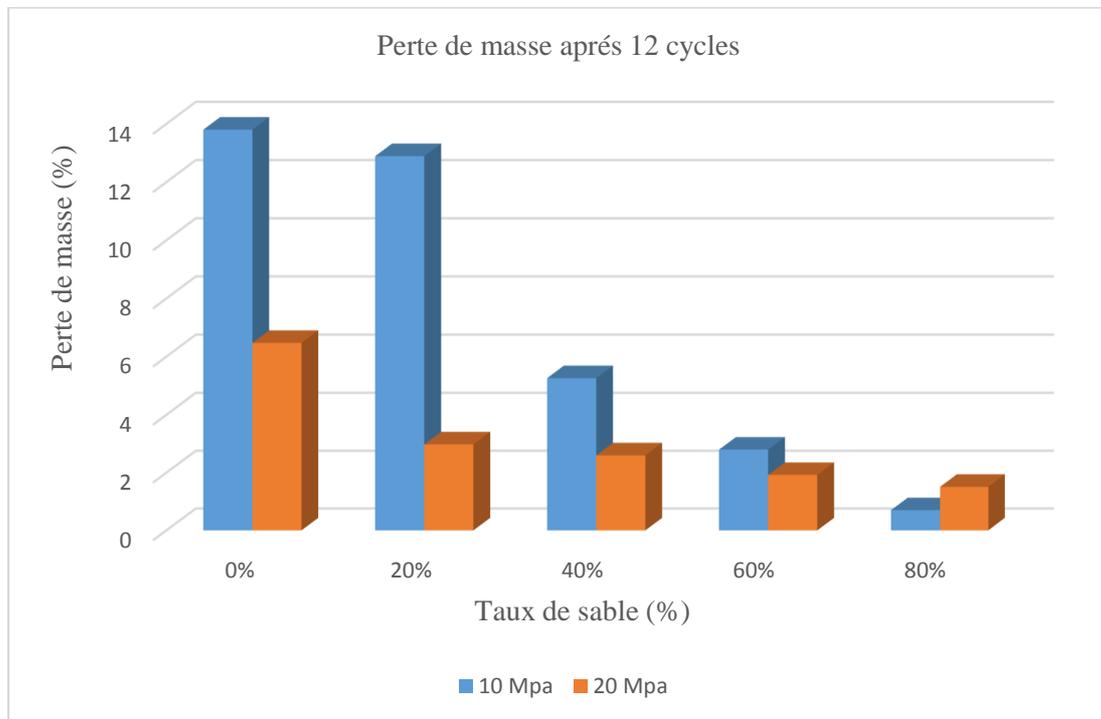


Figure 3.29. Effet de sable et de la contrainte de compactage sur la perte de masse des BTC après 12 cycles de séchage/mouillage

La figure 3. 29 présente l'influence du taux de sable et de la contrainte de compactage sur les pertes de masse après douze cycles (12) de séchage/mouillage des BTC.

Les résultats obtenus montrent clairement l'effet positif du sable. En effet la perte de masse diminue à chaque fois que le taux de sable augmente. Elle passe de 13% à 2% pour des taux de sable de 0% 80%, respectivement.

Aussi, la perte de masse diminue en augmentant la contrainte de compactage. Celle-ci rend le BTC plus cohérent et plus compact par l' élimination des vides inter-granulaires. La perte de masse diminue de plus de 50% quand la contrainte de compactage passe de 10 à 20MPa.

3.6. Conclusion

Le présent chapitre présente les résultats de l'étude de l'effet de sable sur la durabilité des BTC. Les résultats montrent que :

- La résistance à la compression atteint un maximum pour un taux de sable de 60 % et une contrainte de compactage de 10MPa et elle est encore bien meilleure pour un taux de sable de 20% et une contrainte de compactage de 20MPa. La résistance à la compression pour un taux de sable de 60% et une contrainte de compactage de 20MPa, elle est aussi très acceptable (plus de 15MPa).

- L'absorption totale diminue avec l'augmentation du dosage du sable jusqu'à 60%. L'augmentation de la contrainte de compactage (de 10 à 20MPa) imperméabilise mieux le béton ce qui diminue son absorption d'eau.
- La perte de masse diminue à chaque fois que le taux de sable augmente. Elle passe de 13% à 2% pour des taux de sable de 0% à 80%, respectivement. Aussi, elle diminue en augmentant la contrainte de compactage. Celle-ci rend le BTC plus cohérent et plus compact par l'élimination des vides inter-granulaires. La perte de masse diminue de plus de 50% quand la contrainte de compactage passe de 10 à 20MPa.

Conclusions générales et perspectives

L'objectif de notre travail expérimental est de mieux comprendre l'effet du sable sur le comportement mécanique et la durabilité d'un nouveau matériau, le béton à base de terre compressée (BTC) et stabilisée par du ciment. Les BTC sont des éco – matériaux ou bétons écologiques qui peuvent être utilisés dans le bâtiment et les travaux publics.

Dans ce cadre, on a utilisé cinq teneurs en sable (0, 20, 40, 60 et 80 %) du poids du mélange sec, avec 10% de ciment pour le stabiliser. Le mélange est compacté avec deux contraintes différentes (10 et 20MPa). Les échantillons (moules Proctor) ont été soumis à l'essai de résistance mécanique en compression sèche à 28jours. La durabilité à l'effet de séchage/mouillage a été étudiée de point de vue : résistance à la compression, masse volumique, absorption totale et perte de masse.

Les résultats obtenus montrent que :

- La résistance à la compression atteint un maximum pour un taux de sable de 60 % et une contrainte de compactage de 10MPa et elle est encore bien meilleure pour un taux de sable de 20% et une contrainte de compactage de 20MPa. La résistance à la compression pour un taux de sable de 60% et une contrainte de compactage de 20MPa, elle est aussi très acceptable (plus de 15MPa).
- L'absorption totale diminue avec l'augmentation du dosage du sable jusqu'à 60%. L'augmentation de la contrainte de compactage (de 10 à 20MPa) imperméabilise mieux le béton ce qui diminue son absorption d'eau.
- La perte de masse diminue à chaque fois que le taux de sable augmente. Elle passe de 13% à 2% pour des taux de sable de 0% à 80%, respectivement. Aussi, elle diminue en augmentant la contrainte de compactage. Celle-ci rend le BTC plus cohérent et plus compact par l'élimination des vides inter-granulaires. La perte de masse diminue de plus de 50% quand la contrainte de compactage passe de 10 à 20MPa.

En perspectives, trois domaines méritent d'être approfondis :

- Etudier les propriétés thermiques des BTC à base de ciment et sable.
- Etudier la durabilité des BTC dans les conditions hivernales rigoureuses.
- Etudier l'effet de sable et poudre de verre sur les propriétés mécaniques et de durabilité des BTC.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Guillaud H., Houben H.** 2006. Traité de construction en terre (Vol. 2006).
- [2] **Hibouche A** sols traités aux liants performance hydro-mécanique et hygro-thermiques application on BTP » Thèse doctorat, Université de Havre octobre 2013.
- [3] **Houben H, Guillaud H.** Earth construction—a comprehensive guide. London: Intermediate Technology; 1994.
- [4] **Florian C.** « Étude expérimentale du comportement hydro-mécanique de la terre crue compactée pour la construction » Thèse doctorat, Université de Lyon, 2017.
- [5] **Costi de Castrillo, M., M. Philokyrou, et I. Ioannou.** (2017). Comparison of adobes from prehistory to-date. *Journal of Archaeological Science: Reports* 12, 437-448
- [6] **Dao, K., M. Ouedraogo, Y. Millogo, J.-E. Aubert, et M. Gomina.** (2018). Thermal, hydric and mechanical behaviours of adobes stabilized with cement. *Construction and Building Materials* 158, 84-96
- [7] **Houben, H, V. Rigasse, et P. Gamier.** (1996). Blocs de terre comprimée: Equipements de production. Belgique: CDI ; CRATerre-EAG.
- [8] **Röhlen, U., C. Ziegert, et A. Mochel.** (2013). Construire en terre crue: construction, rénovation, finitions. Paris: Éd. "Le Moniteur
- [9] **Touré, P. M., V. Sambou, M. Faye, A. Thiam, M. Adj, et D. Azilnon.** (2017). Mechanical and hygrothermal properties of compressed stabilized earth bricks (CSEB). *Journal of Building Engineering* 13, 266-271.
- [10] **Zhang, L., L. Yang, B. P. Jelle, Y. Wang, et A. Gustavsen.** (2018). Hygrothermal properties of compressed earthen bricks. *Construction and Building Materials* 162, 576-583.
- [11] **LAYEB A, HALBAOUI A** « Caractérisations physico-mécaniques d'un bloc de terre stabilisé avec la chaux à base des fibres (déchet de pneu usés - Verre) » Mémoire de Fin d'Etudes Université Ziane Achour de Djelfa, 2017.
- [12] **Rigassi V.** « Blocs de terre comprimée. Volume I. Manuel de production, CRATerre-EAG, Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig, Allemagne, »104 p, 1995
- [13] **Armel B L** « Comportement hygro-thermo-mécanique de matériaux structuraux pour la construction associant des fibres de kéfàf à des terres argileuses » Thèse doctorat, Université de Caen Normandie **décembre 2017**
- [14] **Cabane N.** 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 Nationale Supérieure des Mines de St Etienne, Université Jean Monet, 182 p, 2004
- [15] **IZEMMOUREN O** « Effet des ajouts minéraux sur la durabilité des briques de terre comprimée » Thèse doctorat, Université Mohamed Khider, 2016.
- [16] **Caillère S., Henin S. et Rautureau M.,** 1982. Minéralogie des argiles : Classification et nomenclature (Tome 2), vol. 2, Paris : Masson
- [17] **Gautier M.,** 2008. Interactions entre argile ammoniée et molécules organiques dans le contexte du stockage des déchets. Cas de molécules à courtes chaînes. Thèse de doctorat de l'Université d'Orléans.
- [18] **Jiménez Delgado MC, Guerrero IC.** The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review. *Construction and Building Materials* vol 21 (2007) 237–251
- [19] **Doat P, Hays A, Houben H, Matuk S, Vitoux F.** Construire en terre. Editions Alternatives et Parallèles, collection An Architecture, Paris, France, 265p, 1979
- [20] **Guettala A. Abibsi A., Houari H.** Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure, *Construction and Building Materials* 20 119–127.2005

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [21] **M. Vénuat**, Le traitement des sols à la chaux et au ciment, CERILH, 1980.
- [22] **Bahar R, Benazzoug M, Kenai S.** Performance of compacted cement stabilised soil. Cement and Concrete Composites. Elsevier Applied Science Publishers, U.K., Vol. 25, No 6, pp 633- 641, 2004.
- [23] **Guettala A, Houari H., Mezghiche B., Chebili R.** Durability of lime stabilized earth blocks. Courrier du Savoir, N°02, pp. 61-66, 2002.
- [24] **Izemmouren O, Guettala A.** Amélioration de la durabilité des blocs de terre comprimée à base d'un sol de la région de Biskra. Matec web of conférence, vol 11 02001, 2014.
- [25] **Saussaye L.**, 2012. Traitement des sols aux liants hydrauliques : aspects géotechniques et physico-chimiques des perturbations de la solidification, Caen. Thèse de l'Université de Caen Basse Normandie.
- [26] **Cabane N.**, 2004. 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 étienne.
- [27] **Lasledj A.**, 2009. Traitement des sols argileux à la chaux : processus physico-chimique et propriétés géotechniques. Thèse de doctorat. Université d'Orléans.
- [28] **Locat J., Tremblay H. et Lerouel S.**, 1996. Mechanical and hydraulic behavior of a soft inorganic clay treated with lime. Canadian Geotechnical Journal, vol. 33, n° 14, pp. 654-669.
- [29] **Khattab S. A. A.**, 2002. Etude multi-échelles d'un sol argileux plastique traité à la chaux. Thèse de doctorat. Université de Orléans, P.250.
- [30] **Konana K. L.**, 2006. Interactions entre des matériaux argileux et un milieu basique riche en calcium. Thèse de doctorat. Université de Limoges.
- [31] **Rossi, P.L., Ildefonse, P., De Nobrega, M.T., Chauvel, A.**, 1983. Study of structural and mineralogical transformations caused by compaction with or without lime addition to lateric clays from Brazil. Bulletin of the International Association of Engineering Geology 28: 153-159
- [32] **Gedney D.S.**, Bartholomew and associates, 1987. Lime stabilization, reaction, properties, design, and construction. State of the art report n°5. Transport Research Board
- [33] **Bell F.G.**, 1996. Lime stabilization of clay minerals and soil. Eng. Geol. Vol. 42 (4): 223–237.
- [34] **Basma A. et Tuncer E.**, 1990. Effect of lime on volume change and compressibility of expansive clays. Transportation research record, n° 11295, pp. 52-61.
- [35] **Locat J., André B.M., Choquette M.**, 1990. Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: shear strength development. Canadian Geotechnical Journal. vol. 27, pp 294 – 304.
- [36] **Benezet J. C.**, 1997. Réactivité pouzzolanique dans le système quartz-oxyde de calcium-eau. Thèse de doctorat. Université Montpellier II.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [37] **Osula D.O.A.**, « A comparative evaluation of cement and lime modification of laterite», *Engineering Geology*, vol. 42, 1996, p. 71-81
- [38] **Guney Y., Sari D., Cetin M. et Tunçan M.**, 2007. Impact of cyclic wetting-drying on swelling behavior of lime-stabilized soil. *Building and Environment*, vol. 42, pp. 681-688.
- [39] **Rogers C.D.F., Glendinning S.**, 2000. Lime requirement for stabilization. *Transportation Research Record*, 1721: 9-18
- [40] **Guettala A., Guenfoud M.**, 1997. Béton de terre stabilisé, propriétés physicomécaniques et influence des types d'argiles. *La technique moderne* n°1-2. pp. 21-26
- [41] **Little D.N.**, 1995. Handbook for stabilization of pavement subgrades and base courses with lime. National Lime Association, Arlington, 219 p.
- [42] Guettala A. Béton de terre stabilisé: amélioration de sa durabilité à l'eau. thèse de doctorat, Université de Biskra, 203 p, 2003
- [43] Bungey, J H et Millard, S G <testing of concrete in structures.3RD EDITION> 1996
- [44] Kerali AG. Durability of compressed and cement-stabilized building blocks. Ph.D Thesis. UK: University of Warwick, school of Engineering, September 2001.