



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 les caractéristiques mécaniques du béton
de terre stabilisée***

Par:

Milles. MESSAADI Sabrina & ZAIDI Hadjer

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

| | |
|--------------------------------|--------------|
| Dr. GUELMINE Layachi | Président |
| Dr. MESSAOUDENE Ibrahim | Encadreur |
| Dr. AMRIOU Abderrachid | CO-Encadreur |
| Dr. DEBOUCHA Sadek | Examineur |
| Dr. LOGHZIT Nacer | Examineur |

Promotion : 2018/2019

Remerciements

Nous remercions Dieu la miséricordieux de nous avoir donné la force de finir ce modeste travail dans les meilleures conditions. Nous tenons à remercier par cette occasion, nos encadreurs Drs. MESSAOUDENE Ibrahlim et AMRICH Abderrachid pour leurs précieux conseils et leurs aides durant toute la période du travail. Nous remercions également les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Nous adressons nos remerciements et notre sympathie à nos chères enseignants de l'université de BORDJ BOU ARRERIDJ pour toutes les connaissances acquises au cours de notre formation.

Notre gratitude la plus profonde à tous nos amis de la promotion ainsi qu'à tout le personnel

du laboratoire de Matériaux du département de Génie Civil de l'université de BORDJ BOU ARRERIDJ.

Un grand merci à nos deux chères familles.

Dédicaces

Nous dédions cette modeste mémoire a :

A nos très chers parents, nous ne pourrons jamais les remercier pour ce qu'ils ont fait pour nous, Que dieu la protège pour nous pour leurs patiences, leur amour, leur soutien et leur encouragement.

A nos chers Grand-Père et Grand-Mère. Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

A nos chers frères et sœurs qui nous ont supportés et encourager durant cette période.

A tous les membres de nos familles.

A nos amis les plus fidèles.

A tous ceux qui nous aiment et tous ceux qui nous aimons.

A tous et a toutes.

Résumé

Le béton de terre comprimée et stabilisée « BTCS » est un béton fait à base de terre, assemblée à des liants dosés en petite quantité et à de l'eau. Le principe consiste à utiliser au mieux la terre et à tirer profit des caractéristiques de ses constituants. L'architecture utilisée est adaptée au matériau qui ne doit travailler qu'en compression. Le matériau est doté de bonnes caractéristiques mécaniques et thermiques. Grâce à son rendement thermique élevé, il procure aux habitations une régulation de la température intérieure qui s'adapte avec les saisons. Ce matériau est intéressant car sa fabrication ne requiert qu'une très faible énergie, de plus, il s'agit d'un matériau bioclimatique. Notre travail expérimental étudie l'effet du sable sur les caractéristiques mécaniques du béton de terre stabilisée et comprimée.

Dans ce cadre, nous avons travaillé avec un mélange sec de (sable + ciment), on a utilisé cinq niveaux de sable (0%,20%,40%,60%,80%), deux teneurs en ciments (5 et 10 %) pour stabiliser le béton et deux contraintes de compactage (10 et 20MPa) pour l'imperméabilisation, la résistance à la compression a été déterminée sur des éprouvettes cylindriques (moules Proctor) à l'âge de 28jours.

Les résultats obtenus ont montré une meilleure résistance à la compression sèche des blocs avec 60% de sable, stabilisés avec 10% de ciment et une contrainte de compactage de 10MPa.

Mots- clés : Béton de terre, stabilisation, imperméabilisation, compression.

Abstract

Compressed and stabilized earth concrete "BTCS" is a concrete made of earth, assembled with binders dosed in small quantities and with water. The principle is to make the best use of the land and to take advantage of the characteristics of its constituents. The architecture used is adapted to the material that must only work in compression. The material has good mechanical and thermal characteristics. Thanks to its high thermal efficiency, it provides homes with indoor temperature regulation that adapts with the seasons. This material is interesting because its manufacture requires a very low energy, moreover, it is a bioclimatic material. Our experimental work investigates the effect of sand on the mechanical properties of stabilized and compressed soil concrete.

In this context, we worked with a dry mixture of (sand + cement), we used five levels of sand (0%, 20%, 40%, 60%, 80%), two cement contents (5 and 10. %) to stabilize the concrete and two compacting stresses (10 and 20MPa) for waterproofing, the compressive strength was determined on cylindrical specimens (Proctor molds) at the age of 28 days.

The results obtained showed a better resistance to the dry compression of the blocks with 60% of sand, stabilized with 10% of cement and a compaction stress of 10 MPa.

Keywords: Concrete, stabilization, waterproofing, compression.

ملخص:

خرسانة الأرض المضغوطة والمثبتة "BTCS" هي خرسانة مصنوعة من الأرض ، ويتم تجميعها مع مواد تجليد مداواة بكميات صغيرة وماء. المبدأ هو استخدام الأرض على أفضل وجه والاستفادة من خصائص مكوناتها. يتم تكييف البنية المستخدمة مع المواد التي يجب أن تعمل فقط في الضغط. المواد لديها خصائص ميكانيكية وحرارية جيدة. بفضل كفاءتها الحرارية العالية ، فهي توفر للمنازل نظامًا لدرجة الحرارة الداخلية يتكيف مع المواسم. هذه المادة مثيرة للاهتمام لأن تصنيعها يتطلب طاقة منخفضة للغاية ، علاوة على ذلك ، فهي مادة مناخية حيوية. يبحث عملنا التجريبي في تأثير الرمال على الخواص الميكانيكية لخرسانة التربة المستقرة والمضغوطة

في هذا السياق ، عملنا بمزيج جاف من (الرمل + الأسمنت) ، واستخدمنا خمسة مستويات من الرمل (0% ، 20% ، 40% ، 60% ، 80%) ، محتويان من الأسمنت (5 و 10). (%) لتحقيق الاستقرار في الخرسانة واثنين من ضغوط الضغط (10 و 20) MPa لتسرب المياه ، تم تحديد قوة الضغط على العينات الأسطوانية (قوالب بروكتور) في سن 28 يوما

ظهرت النتائج التي تم الحصول عليها مقاومة أفضل للضغط الجاف للكتل مع 60% من الرمال، واستقرت مع 10% من الاسمنت وضغط الضغط من 10 ميجا باسكال

كلمات المفتاحية: الخرسانة، الاستقرار، تسرب المياه، ضغط

SOMMAIRE

| | |
|------------------------------------|--------------|
| INTRODUCTION GÉNÉRALE | 01-02 |
|------------------------------------|--------------|

| |
|----------------------------------------------------|
| <i>CHAPITRE 01 SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE</i> |
|----------------------------------------------------|

| | |
|--------------------------------------------------------------|----|
| 1.1 Introduction | 04 |
| 1.2 La terre crue..... | 05 |
| 1.3 Technique de construction en terre..... | 05 |
| 1.4 Bloc de terre comprimée BTC..... | 08 |
| 1.5 La norme..... | 11 |
| 1.6 Avantages et inconvénients des constructions en BTC..... | 11 |
| 1.7 la terrent matériaux de construction..... | 11 |
| 1.7.1 Définition..... | 11 |
| 1.7.2 Composition..... | 12 |
| 1.8 Les argiles..... | 12 |
| 1.8.1 Définition..... | 12 |
| 1.8.2 Principaux types d'argile..... | 14 |
| 1.8.2.1 La kaolinite..... | 14 |
| 1.8.2.2 Kaolin..... | 15 |
| 1.8.2.3 Les montmorillonites..... | 16 |
| 1.8.2.4 L'illite..... | 17 |
| 1.9 Stabilisation..... | 18 |
| 1.9.1 Définition..... | 18 |
| 1.9.2 Stabilisation mécanique..... | 19 |
| 1.9.3 Stabilisation chimique..... | 20 |
| 1.9.3.1 Stabilisation au ciment..... | 20 |
| 1.9.3.2 Stabilisation à la chaux..... | 21 |
| 1.9.4 Stabilisation physique..... | 22 |

**CHAPITRE 02 CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES
ET ESSAIS**

| | |
|-------------------------------------------------|----|
| 2.1 Introduction | 24 |
| 2.2 Matériaux utilisées..... | 24 |
| 2.3 Caractéristiques des matériaux..... | 24 |
| 2.3.1 Sol | 24 |
| 2.3.1.1 Origine de sol..... | 25 |
| 2.3.1.2 Les analyses sur le sol..... | 25 |
| 2.3.1.3 Caractéristiques physiques du sol..... | 26 |
| 2.3.2 Sable de dune..... | 30 |
| 2.3.2.1 Caractéristiques su sable | 30 |
| A- Analyses granulométriques par tamisage | 31 |
| B- La masse volumique de sable | 34 |
| C- Equivalent de sable | 35 |
| 2.3.3 Ciment | 37 |
| 2.3.3.1 Caractéristique du ciment | 37 |
| A- Analyse chimique | 37 |
| B- Composition minéralogique | 37 |
| C- Propriétés physiques | 38 |
| 2.3.4 L'eau de gâchage | 38 |
| 2.4 Confection des blocs..... | 38 |
| 2.4.1 Matériel spécifique..... | 38 |
| 2.4.2 Mélanges..... | 39 |
| 2.4.3 Préparation des mélanges | 41 |
| 2.4.4 Quantités d'eau | 42 |
| 2.4.5 Compactage des mélanges..... | 43 |
| 2.5 La cure des blocs | 44 |
| 2.6 Propriétés mécaniques | 46 |
| 2.6.1 Essai de compression simple | 46 |
| 2.7 Conclusion..... | 47 |

CHAPITRE 03 RESULTATS ET DISCUSSION

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.1 Introduction | 49 |
| 3.2 Influence du mode et du temps de cure sur la résistance mécanique du BTCS..... | 49 |
| 3.3 Résistance à la compression de BTCS | 49 |
| 3.4 Influence du rapport E/C sur la résistance à la compression de BTCS..... | 56 |
| 3.5 Influence du ciment et du sable sur la masse volumique des BTC | 60 |
| 3.6 Conclusion..... | 66 |
| CONCLUSION GENERALE..... | 68 |

Liste des figures

CHAPITRE 01 SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

| | |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| ▪ Figure 1.1 : Mosquée de Djenne Malli | 05 |
| ▪ Figure 1.2 : Mur en adobe..... | 05 |
| ▪ Figure 1.3 : Coffrage utilisé dans la conception de murs en pisé..... | 06 |
| ▪ Figure 1.4 : Construction d`une maison en pisé..... | 06 |
| ▪ Figure 1.5 : Bloc en terre-paille..... | 07 |
| ▪ Figure 1.6 : Une maison de terre-paille..... | 07 |
| ▪ Figure 1.7 : Une maison de terre-paille..... | 07 |
| ▪ Figure 1.8 : Château en Bauge..... | 08 |
| ▪ Figure 1.9 : Bloc de terre comprimée..... | 09 |
| ▪ Figure 1.10 : Maison en bloc de terre comprimée | 09 |
| ▪ Figure 1.11 : Différents produits de blocs de terre comprimée..... | 10 |
| ▪ Figure 1.12 : Roue" des techniques de construction en terre..... | 10 |
| ▪ Figure 1.13 : Couches tétraédrique et octaédrique..... | 13 |
| ▪ Figure 1.14 : Agencement des couches octaédriques et tétraédriques | 14 |
| ▪ Figure 1.15 : Schéma de la structure de la kaolinite | 15 |
| ▪ Figure 1.16 : Vue isométrique de l`atomique de la kaolinite..... | 15 |
| ▪ Figure 1.17 : Schéma de la structure de la montmorillonite | 16 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ▪ Figure 1.18 : Structure atomique de la montmorillonite..... | 16 |
| ▪ Figure 1.19 : Schéma de la structure de l'illite..... | 17 |
| ▪ Figure 1.20 : Photographie au microscope à Balayage électronique d'une illite de Fithian, Illinois. | 17 |
| ▪ Figure 1.21 : Effet de compactage sur les vides des sols..... | 20 |

| |
|-------------------------------------------------------------------------|
| CHAPITRE 02 CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES ET ESSAIS |
|-------------------------------------------------------------------------|

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ▪ Figure 2.1 : L'argile utilisé dans cette étude..... | 24 |
| ▪ Figure 2.2 : L'appareil de Casagrande..... | 27 |
| ▪ Figure 2.3 : Classification LPC des sols fins en laboratoire, diagramme de plasticité..... | 29 |
| ▪ Figure 2.4 : Courbe de l'analyse granulométrique de sol..... | 30 |
| ▪ Figure 2.5 : Sable de dune..... | 30 |
| ▪ Figure 2.6 : Appareillage d'analyse granulométrique..... | 31 |
| ▪ Figure 2.7 : Courbe de l'analyse granulométrique de sable de dune..... | 33 |
| ▪ Figure 2.8 : Le schéma du moule utilisé pour la fabrication des BTC..... | 39 |
| ▪ Figure 2.9 : Moule utilisé pour la fabrication des blocs..... | 39 |
| ▪ Figure 2.10 : Combinaison des mélanges des blocs..... | 40 |
| ▪ Figure 2.11 : Le poids de mélange globale sec pour chaque bloc..... | 41 |

Liste des Figures

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| ▪ Figure 2.12 : Malaxeur..... | 42 |
| ▪ Figure 2.13 : Eprouvette avec le mélange | 42 |
| ▪ Figure 2.14 : Mélange sec avec l'eau | 43 |
| ▪ Figure 2.15 : Le mélange à l'état final..... | 43 |
| ▪ Figure 2.16 : La presse de compactage..... | 43 |
| ▪ Figure 2.17 : Démoulage de bloc..... | 44 |
| ▪ Figure 2.18 : Protège des blocs avec un plastique..... | 45 |
| ▪ Figure 2.19 : Conservation des blocs au laboratoire..... | 45 |
| ▪ Figure 2.20 : Dispositif d'essai de compression sur les échantillons de BTC | 46 |

CHAPITRE 03 RESULTATS ET DISCUSSION

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ▪ Figure 3.1 : Evolution de la résistance en fonction de taux de sable et de taux de ciment (entaient de compactage de 10MPa)..... | 50 |
| ▪ Figure 3.2 : Evolution de la résistance en fonction de taux de sable et de taux .de ciment (entaient de compactage de 20MPa)..... | 51 |
| ▪ Figure 3.3 : Evolution de la résistance en fonction de taux de sable et de taux de ciment (entaient de compactage de 10 et 20 MPa)..... | 52 |
| ▪ Figure 3.4 : Evolution de la résistance en fonction de taux de sable (Contrainte de compactage de 20MPa) | 53 |
| ▪ Figure 3.5 : Evolution de la résistance en fonction de taux de sable (Contrainte de compactage de 20MPa) | 54 |

Liste des Figures

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ▪ Figure 3.6: Evolution de la résistance en fonction de taux de sable et de taux de ciment (contrainte de compactage de 20MPa) | 55 |
| ▪ Figure 3.7: Evolution de la résistance en fonction de taux de sable et de taux de ciment (5et10%) (contrainte de compactage de 10 et 20MPa) | 56 |
| ▪ Figure 3.8: Evolution de la résistance en fonction de taux de E/C et 5% ciment(Contrainte de compactage de 10MPa) | 57 |
| ▪ Figure 3.9: Evolution de la résistance en fonction de taux de E/C et 5% ciment (Contrainte de compactage de 20MPa) | 58 |
| ▪ Figure 3.10: Evolution de la résistance en fonction de taux de E/C et 10% ciment (Contrainte de compactage de 10MPa) | 59 |
| ▪ Figure 3.11: Evolution de la résistance en fonction de taux de E/C et 10% ciment (Contrainte de compactage de 20MPa) | 60 |
| ▪ Figure 3.12 : L'influence du taux de sable sur la masse volumique des BTC.. | 61 |
| ▪ Figure 3.13 : L'influence du taux de sable sur la masse volumique des BTC.. | 62 |
| ▪ Figure 3.14 : L'influence du taux de sable sur la masse volumique des BTC.. | 63 |
| ▪ Figure 3.15 : L'influence du taux de sable sur la masse volumique des BTC.. | 64 |

Liste des Tableaux

CHAPITRE 02 CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES ET ESSAIS

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ▪ Tableau 2.1 : L`analyse granulométrique d`argile..... | 25 |
| ▪ Tableau 2.2 : L`analyse minéralogique d`argile..... | 25 |
| ▪ Tableau 2.3 : Poids volumique d`argile..... | 26 |
| ▪ Tableau 2.4 : Résultats des caractéristiques de séchage..... | 26 |
| ▪ Tableau 2.5 : Résultats limite de liquidité (wl) | 28 |
| ▪ Tableau 2.6 : Résultats limite plasticité (wp) | 28 |
| ▪ Tableau 2.7 : Résultats de l`analyse granulométrique pour le sol..... | 29 |
| ▪ Tableau 2.8 : Classement de sable..... | 32 |
| ▪ Tableau 2.9 : Les résultats d`analyse granulométrique du sable de dune. | 32 |
| ▪ Tableau 2.10 : Résultats de module de finesse..... | 33 |
| ▪ Tableau 2.11 : Résultats d`analyse granulométrique du sable de dune... | 33 |
| ▪ Tableau 2.12 : Masse volumique apparente du sable..... | 34 |
| ▪ Tableau 2.13 : Masse volumique aberrant du sable..... | 35 |
| ▪ Tableau 2.14 : Les préconisations en matière de propreté pour les sables utilise dans les bétons..... | 36 |
| ▪ Tableau 2.15 : Résultats d`équivalents de sable..... | 36 |
| ▪ Tableau 2.16 : Analyse chimique du ciment..... | 37 |
| ▪ Tableau 2.17 : Composition minéralogique du ciment..... | 37 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ▪ Tableau 2.18 : Propriétés physiques du ciment..... | 38 |
| ▪ Tableau 2.19 : Composition des différents mélanges employés dans cette d`étude avec 5% de ciment..... | 40 |
| ▪ Tableau 2.20 : Composition des différents mélanges employés dans cette d`étude avec 10% de ciment..... | 41 |

| |
|--------------------------------------------|
| CHAPITRE 03 RESULTATS ET DISCUSSION |
|--------------------------------------------|

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ▪ Tableau 3.1 : Résistance à la compression de BTCS avec (5% Ciment /10MPa Compactage) | 50 |
| ▪ Tableau 3.2 : Résistance à la compression de BTCS avec (10% Ciment /10MPa Compactage) | 51 |
| ▪ Tableau 3.3 : Résistance à la compression de BTCS avec (5% Ciment /20MPa Compactage) | 53 |
| ▪ Tableau 3.4 : Résistance à la compression de BTCS avec (10% Ciment /20MPa Compactage) | 54 |
| ▪ Tableau 3.5 : Résistance à la compression de BTCS avec E/C (5% ciment et 10MPa) | 56 |
| ▪ Tableau 3.6 : Résistance à la compression de BTCS avec E/C (5% ciment et 20MPa)..... | 57 |
| ▪ Tableau 3.7 : Résistance à la compression de BTCS avec E/C (10% ciment et 10MPa) | 58 |
| ▪ Tableau 3.8 : Résistance à la compression de BTCS avec E/C (10% ciment et 20MPa) | 59 |
| ▪ Tableau 3.9 : Masse volumique des BTC de 5% ciment | 61 |
| ▪ Tableau 3.10 : Masse volumique des BTC de 10% ciment | 62 |

Liste des Tableaux

- Tableau 3.11 : Masse volumique des BTC de 5% ciment 63
- Tableau 3.12 : Masse volumique des BTC de 10% ciment 64

Liste des symboles

BTC : Béton de terre comprimée

ATEX : Appréciation techniques d'expérimentation

BTCS : Béton de terre comprimée stabilisée

WL : limite de liquidité

WP : Limite de plasticité

W(%) : Teneur en eau

IP : Indice de plasticité

LCPC : Laboratoire central des ponts et chaussées

M : La masse (g)

D : dimension spécifiée en (mm)

MF : Module de finesse

Cu : Coefficient d'uniformité de hazzen

Cc : Coefficient de courbure

Papp : Masse volumique apparente

Pabs : Masse volumique absolue

V : Volume de récipient

SE : Équivalent de sable

H : Hauteur

Esv : Équivalent de sable visuel(%)

Esp : Équivalent de sable au piston(%)

T : Température(C°)

RC28j : Résistance en compression en (MPa)

Fr : Force de rupture (N)

S : La surface en (mm²)

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les sites archéologiques découverts dans de nombreux endroits à travers la planète témoignent de la maîtrise de l'homme des techniques de construction à base de la terre crue depuis les premières civilisations. Aujourd'hui, on estime que l'habitat d'un tiers de l'humanité est encore en terre.

Malgré le développement technologique qu'a connu l'humanité ces derniers siècles et qui a permis à l'homme moderne de disposer d'une grande variété de matériaux de construction jamais connues auparavant, mais la plupart des peuples ont encore une tradition non négligeable en matière de construction en terre ; on citera par exemple les pays comme le Yémen, le Maroc et les pays de l'Afrique noir en général.

La terre crue a été et demeure l'une des principaux matériaux de construction utilisée sur notre planète. Parmi les avantages de la terre crue, on peut souligner le peu d'énergie que nécessite sa mise en œuvre, ses qualités esthétiques et une bonne inertie thermique, celle-ci permet d'avoir un habitat frais en été et qui conserve la chaleur en hiver. Mais le problème des constructions en terre, c'est qu'elles souffrent d'un déficit en résistance, d'une fissuration systématique due au retrait et se heurtent aux problèmes liés à leur sensibilité à l'eau.

Pour cela l'homme a cherché des techniques de construction pour à éviter les inconvénients du matériau de terre et obtenir la meilleure caractéristique mécanique. Les techniques de construction en terre crue évoluent également aujourd'hui grâce aux différents modes de stabilisation. La technique des briques de terre comprimée (BTC) est une technique récente qui a permis de construire des bâtiments à plusieurs niveaux, grâce à des stabilisants qui permettent d'augmenter leur résistance. La stabilisation des BTC a été pratiquée pendant longtemps par des liants hydrauliques tels que le ciment, la chaux, le bitume, les fibres,...etc. qui a donné naissance à plusieurs produits en terre : l'adobe, le pisé, le torchis et autres.

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

Pour une exploitation rationnelle dans les constructions d`Algérie et plus précisément dans la production de blocs de terre comprimée (BTC), en vue de fabriquer des matériaux de construction de qualité, de coût abordable et qui s`accommode avec les conditions climatiques sévères de certaines régions de l`Algérie, et ceci pour améliorer la situation de la population face à la pénurie d`habitat surtout dans les zones rurales.

On a mené cette étude dans le but d'examiner l`effet du sable sur les caractéristiques mécaniques du béton de terre stabilisée et comprimée.

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

- Le premier chapitre présente une étude bibliographique sur le béton de terre comprimée (BTC), et les critères de choix des sols à stabiliser et les différents modes de stabilisation.
- Le deuxième chapitre fait le point sur les caractéristiques physiques, chimiques, mécaniques, et minéralogiques des matériaux utilisés (le sol, le sable de dune et le ciment), la confection et la cure des blocs et finalement les propriétés mécaniques des BTC.
- Le troisième chapitre présente les résultats et les discussions des résultats expérimentaux.

CHAPITRE 01

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Introduction

La terre a été et demeure l'un des principaux matériaux de construction utilisés par les hommes depuis des milliers d'années. On estime qu'aujourd'hui plus d'un tiers des habitants de la planète vit dans des habitats en terre.

La terre est un matériau disponible un peu partout sur la planète et fabriquée à travers les différentes ères géologiques. Son utilisation comme matériau de construction exploite l'une de ses propriétés qu'est la cohésion qui joue le rôle de liant naturel.

On dénombre de très nombreux modes de construction avec une infinité de variantes qui traduisent l'identité des lieux et des cultures. Douze modes d'utilisation de la terre en construction ont été recensés dont six sont très couramment employés et constituent les genres techniques majeurs.

Selon les sources CRATerre (Centre international de la construction en terre de l'école d'architecture de Grenoble), 30 % de la population mondiale, vit dans un habitat en terre. Pour les seuls pays en voie de développement, il s'agit de 50 % de la population, en majorité rurale, et au moins 20 % de la population urbaine et périurbaine. On a ainsi constaté que 60 % des habitations du Pérou sont bâties en adobe ou en pisé. A Kigali, capitale du Rwanda, 38 % des logements sont en terre. En Inde, le recensement de 1971 établissait que 72,20 % du parc immobilier est construit en terre : 67 millions de maisons où vivent près de 375 millions de personnes.

Sur le continent africain, la plus grande partie des constructions rurales et même urbaines sont en "banco" (Afrique de l'Ouest), en "thobe" (Egypte et régions septentrionales), en "daga" (Sud-Est africain) ou en "leuh" (Maroc).

Les techniques de la voûte et de la coupole en briques crues furent portées à leur perfection en Iran comme en témoignent de nombreuses cités-Bam, Yazd, Seojane, Tabriz. A Shîbam, Yémen du Sud, ce sont des immeubles en bauge de dix étages ou plus. En chine, au Henan et au Shânxi, au Gansu, ce ne sont pas moins de dix millions d'habitants qui vivent dans un habitat en terre creusé dans l'épaisseur de la ceinture de loess [1].

En Algérie, la construction en terre est très répandue dans toute sa longue histoire, particulièrement dans les zones rurales et les régions arides. Aujourd'hui, on assiste à un regain d'intérêt pour ce matériau. Pour une exploitation rationnelle de ces fibres dans les constructions

de la région et plus précisément dans la production de bétons de terre comprimée (BTC), en vue de fabriquer des matériaux de construction de qualité, de coût abordable et qui s'accommode avec les conditions climatiques sévères de certaines régions de l'Algérie, et ceci pour améliorer la situation de la population face à la pénurie d'habitat surtout dans les zones rurales, on a mené cette étude dans le but d'examiner les propriétés mécaniques du béton de terre comprimée (BTC)[2].

1.2 La terre crue

La terre crue est le matériau de construction traditionnel par excellence. On en retrouve la trace à l'âge de Bronze et la muraille de Chine présente des tronçons [3].

Une construction en terre crue présente de réels avantages y compris en milieu tropical humide. Maisons et édifices en blocs de terre comprimée, BTC, ou en pisé permettent de réguler température et humidité. La terre crue absorbe également bruits et odeurs en plus d'avoir quelques qualités anallergiques. Les méthodes d'entretien et de restauration de tels édifices sont, par ailleurs, très importantes [4].

1.3 Techniques de construction en terre

A : Adobe : la terre à l'état de pâte plastique souvent amendée de paille ou autre fibres, moulée sous forme de briques séchées au soleil.

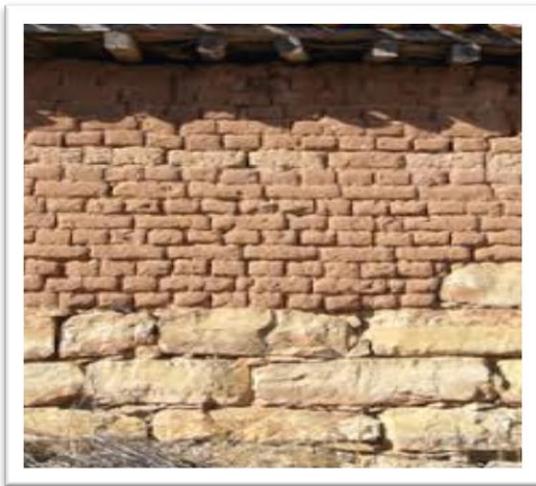


Figure 1.1 : Mosquée de Djenne Malli



Figure 1.2 : Mur en adobe

B : Pisé : la terre est compactée en masse dans des coffrages, couche par couche et banchée par banchée, avec une dame.

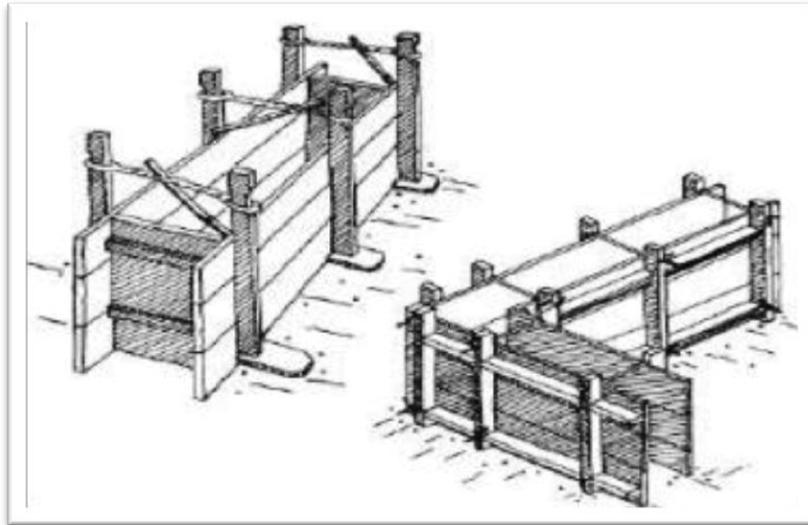


Figure 1.3 : Coffrage utilisé dans la conception de murs en pisé



Figure 1.4 : Construction d'une maison en pisé

C : Terre-paille : la terre est dispersée dans de l'eau jusqu'à l'obtention d'un liquide épais homogène que l'on mélange à la paille afin de former un film sur chaque brin. Le matériau ainsi obtenu conserve l'aspect de la paille et est banché pour ériger un mur monolithique qui nécessite une structure porteuse.



Figure 1.5 : Bloc en terre-paille



Figure 1.6 : Une maison de terre-paille

D : Torchis : la terre argileuse, amendée de paille ou autres fibres, recouvre en une ou plusieurs couches des claies qui hourdent une structure en colombages.

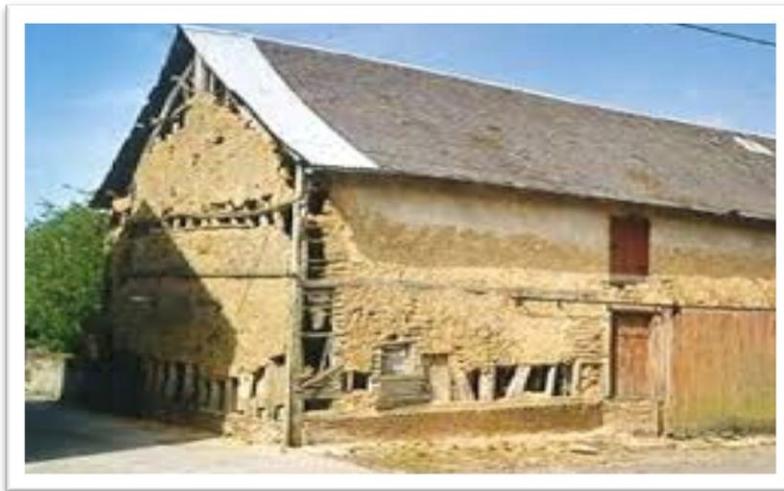


Figure 1.7 : Une maison de terre-paille

E : Terre façonnée : la terre, souvent amendée de paille ou autres fibres, est façonnée sous forme de murs de la même façon que pour la technique de poterie, sans outil.

F : Terre extrudée : la terre est extrudée par une puissante machine proche ou dérivée du matériel utilisé pour la fabrication de produits destinés à être cuits.

G : Bauge : la terre, généralement amendée de paille ou autres fibres, est mise sous forme de boules grossières, qui sont empilées les unes sur les autres et entassées légèrement à l'aide des

mains ou des pieds jusqu'à ériger des murs monolithiques façonnés. Dans d'autres cas, la bauge est incorporée dans une structure en bois.



Figure 1.8 : Château en Bauge

1.4 Blocs de terre comprimée (BTC)

L'histoire des briques (ou blocs) de terre comprimées (BTC) remonte aux années 50 dans le cadre d'un programme de recherche de l'habitat rural en Colombie [5]. La norme ARS 670 – 1996 définit les BTC comme des éléments de maçonnerie de dimensions réduites et de caractéristiques régulières, contrôlées et obtenues par compression statique ou dynamique de la terre à l'état humide suivie d'un démoulage immédiat [6]. Ce procédé est une évolution moderne de l'adobe, appelé « banco », avec l'utilisation des machines perfectionnées et multitâches permettant d'avoir des éléments parfaitement calibrés. L'utilisation de la presse permet également l'accroissement de la productivité et d'avoir une large gamme de produits selon leur forme.



Figure 1.9 : Bloc de terre comprimée



Figure 1.10 : Maison en bloc de terre comprimée

Quelques modèles de briques de terre comprimées sont présentés en. Cependant, le format le plus courant est de type parallélépipédique rectangle (ou prismatique) défini par une longueur (L), une largeur (l) et une hauteur (h).



Figure 1.11 : Différents produits de blocs de terre comprimée (Architectures des terre cure /Sophie Bronchart 2013).

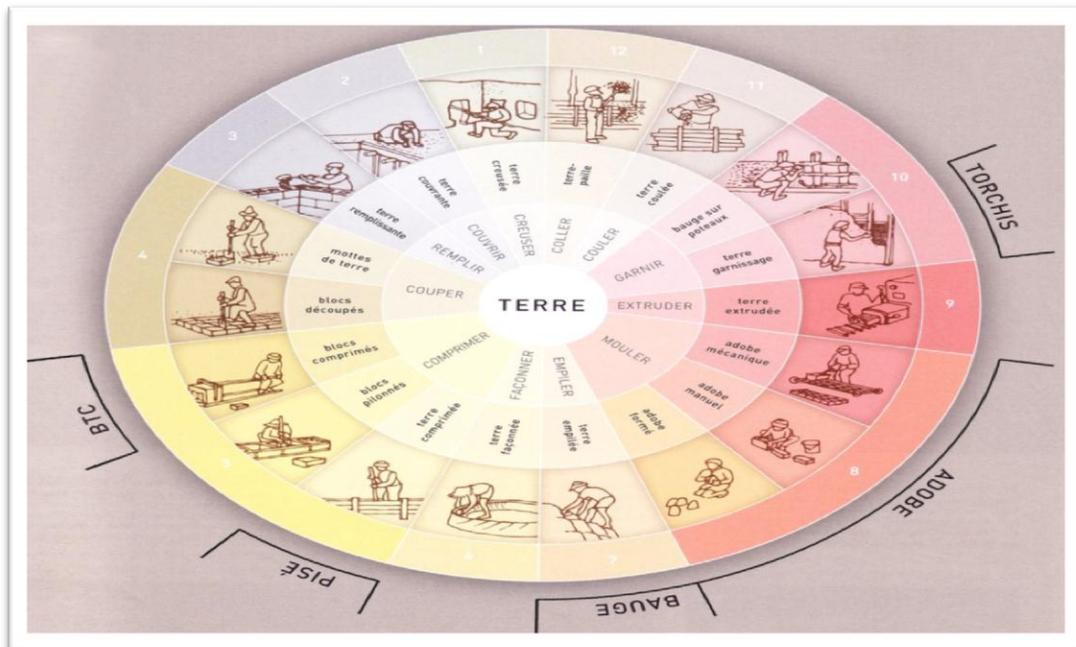


Figure 1.12 : Roue" des techniques de construction en terre

1.5 La norme

Pour les blocs de terre comprimée, BTC, existe une norme expérimentale XP P13-901. D'autres possibilités pour certifier un produit et/ou un procédé en terre crue sont envisageables telles que les ATEx, appréciations techniques d'expérimentation, ATEx A pour un produit et un procédé, ATEx B pour une construction ainsi que les Avis techniques [7].

1.6 Avantages et inconvénients des constructions en BTC

Avantages :

- disponibilité sur site des matériaux, pas ou peu de transport
- très faible énergie grise (de la production à l'élimination)
- grande diversité des techniques
- bonnes capacités thermo-physiques
- insolent phonique

Inconvénients :

- Sensibilité à l'action de l'eau
- Faible résistance mécanique
- Besoin d'entretien
- La technique et la qualité varient en fonction des sols disponibles et contraintes environnementales
- Requier un savoir-faire important
- Techniques intensives en main d'œuvre

1.7 La terre matériau de construction

1.7.1 Définition

Le sol est la fraction solide de la sphère terrestre. A la surface du sol, la terre est un matériau Meuble, d'épaisseur variable, qui supporte les êtres vivants et leurs ouvrages et où poussent les végétaux. La terre est formée à partir d'une roche mère par des processus très lents de dégradation et par des mécanismes très complexes de migration de particules. Il en résulte une infinité de

sortes de terres avec une variation illimitée de leurs caractéristiques La terre végétale ou sol des agronomes, riche en matière organique, surmonte la roche mère, plus ou moins altérée. Lorsqu'ils sont meubles et contiennent peu de matière organique, les niveaux superficiels des sols sont utilisables pour la construction en terre.

1.7.2 Composition

La terre est constituée d'un mélange en proportions variables de quatre sortes d'éléments : les graviers (5-20 mm), les sables (0.08-5 mm), les limons (2 μm -0.08 mm), et les argiles (<2 μm). Comme nous l'avons constaté, la terre est composée de matériaux inertes (graviers, sables) et de matériaux actifs (silts, argiles). Les premiers jouent un rôle de squelette et les seconds celui de liant, tel un ciment. La terre a donc une structure comparable à celle du béton avec un liant différent (Houben, 1996).

Les proportions des éléments constituant les terres vont déterminer leurs comportements et leurs propriétés, par exemple, lorsqu'ils sont soumis à des variations d'humidité certains changent de volume, d'autres non. Les premiers sont instables et les autres stables. Cette notion de stabilité, c'est-à-dire d'aptitude à supporter les alternances d'humidité et de sécheresse sans variations des propriétés, est fondamentale pour un matériau de construction (Doat, 1979) [1].

1.8 Les argiles

1.8.1 Définition

Selon Caillère et al. [Caillère et al., 1982], 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 [Gautier, 2008] montre que, le plan des tétraèdres, noté T, est composé de tétraèdres d'atomes d'oxygène autour de chaque atome noté Z. 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 forment un réseau hexagonal répété infiniment dans le plan du feuillet.[9]

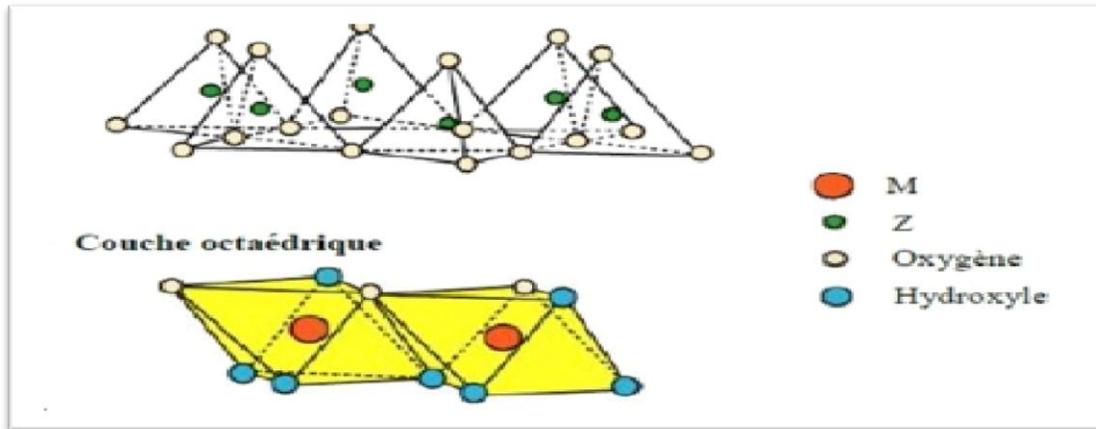


Figure 1.13 : Couches tétraédrique et octaédrique [Gautier, 2008].

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

- Groupe 1 :1, les kaolinites ou T-O (1 couche octaédrique et 1 couche tétraédrique) équidistance voisine de 7 Å.

- Groupe 2 :1, les micas ou T-O-T (1 couche octaédrique insérée entre 2 couches tétraédriques) équidistance variable entre 9 et 15 Å, suivant le remplissage ou non de l'espace inter foliaire;

- Groupe 2 :1 :1, la famille des smectites ou T-O-T est similaire au type précédent mais l'espace inter foliaire est occupé par une couche d'octaèdre brucitique (cation octaédrique = Mg) ou gibbsitique (cation octaédrique = Al).

L'équidistance caractéristique est alors de 14 Å environ.

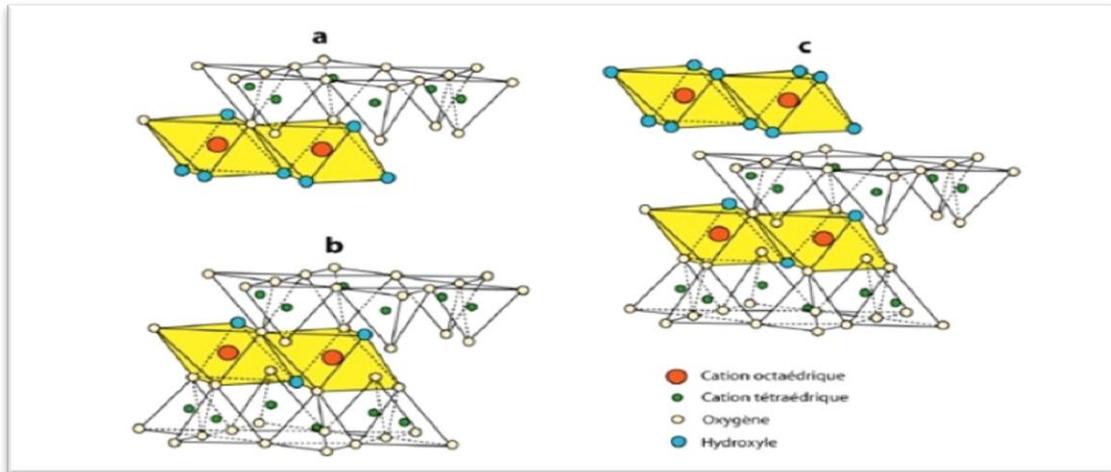


Figure 1.14 : Agencement des couches octaédriques et tétraédriques [Gautier, 2008] . (a) feuillet de type 1:1, (b) feuillet de type 2:1, (c) feuillet de type 2:1:1 avec une couche brucitique ou gibbsitique

1.8.2 Principaux types d'argiles :

Il existe plusieurs familles d'argiles qui rassemblent des dizaines d'espèces. Mais ceux

Sont trois grands types d'argiles dont la présence dans le sol est la plus fréquente :

La kaolinite, l'illite et la montmorillonite

1.8.2.1 La kaolinite

La kaolinite est un phyllosilicate de type 1 :1 d'octaédrique qui est constitué d'un empilement régulier de feuillet composés d'une couche tétraédrique siliceuse en alternance avec une couche octaédrique alumineuse. On la trouve soit sous forme hydratée ou non. La kaolinite d'octaédrique non hydratée à une distance basale qui varie de 7,1 à 7Å°. Chaque tétraèdre est relié aux tétraèdres voisins par trios de ses sommets, le quatrième sommet étant lié à la couche octaédrique sous-jacente. Cette dernière est formée par la superposition de deux plans anioniques qui délimitent trois types de sites octaédriques non équivalents désignés A, B et C, qui sont disposés suivant une géométrie hexagonale.

L'eau de ces sites reste vacante afin d'assurer la neutralité électrique du feuillet. La position des sites vacants permet de différencier la Kaolinite des autres minéraux appartenant à cette même famille. Ainsi, une Kaolinite idéale est caractérisée par un empilement de feuillets ou tous

les sites B sont libres alors que, par exemple, la dickite est constituée par une alternance de feuillets inoccupés de type B et de type C. En tous, les Kaolins comprennent quatre variétés cristallographiques : la kaolinite idéale, la nacrite, la dickite et le méta halloysite [10].

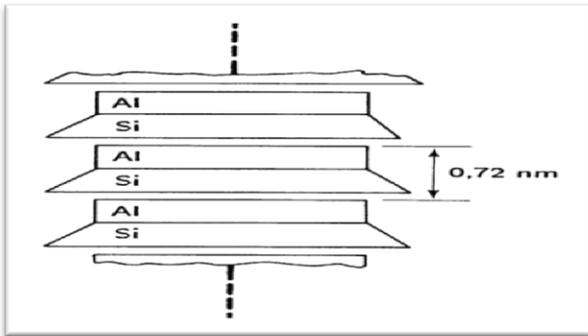


Figure 1.15 : Schéma de la structure structure de la kaolinite.

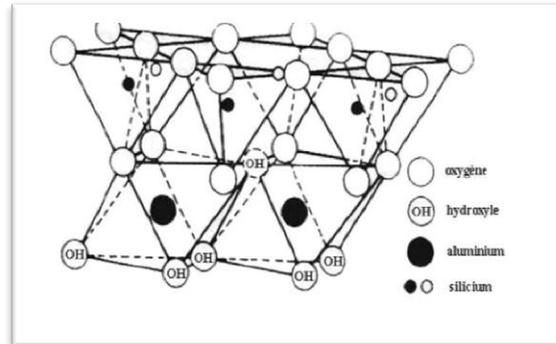


Figure 1.16: Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite

1.8.2.2 Kaolin :

Le terme kaolin a été utilisé, pour longtemps, pour désigner l'argile chinoise extraite du village « Kauling » [11]. Actuellement, le terme kaolin désigne les minéraux ayant une composition en kaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) supérieure à 50% [11]. Ils peuvent être différents selon les conditions géologiques de leur formation, leurs compositions minéralogiques moyennes et leurs propriétés physiques et chimiques.

Selon Murray et Keller [12], il existe une multitude de kaolins, ce qui nécessite leur caractérisation convenable pour déterminer de façon rationnelle l'utilisation appropriée de chacun d'eux. Les gisements les plus importants et exploités dans le monde sont en Angleterre et en Géorgie et Caroline (Etats-Unis) et en Amazonie (Brésil).

Le kaolin est largement utilisé dans la fabrication des ustensiles en porcelaine, des isolants électriques, des sanitaires et des matériaux réfractaires. L'usage du kaolin dans l'industrie des réfractaires provient du fait qu'il présente l'avantage d'être très peu onéreux et disponible en gisements facilement exploitables. Le kaolin calciné est utilisé dans la formulation de ces matériaux pour réduire le rétrécissement et augmenter la réfractivité [12].

Le kaolin est souvent blanchâtre. La présence d'impuretés, particulièrement à base de fer ou de titane, donne au kaolin une certaine coloration. Généralement, le kaolin naturel brut contient

d'autres impuretés telles que le quartz, feldspath. Le kaolin présente une grande surface spécifique (comprise entre 10 et 100 m²/g) et une masse volumique d'environ 2,6 g/cm³ [13].

1.8.2.3 Les montmorillonites :

La montmorillonite est un phyllosilicate de (type 2 T :O : T), de la famille des smectites, qui comporte des substitutions isomorphes ordonnées, localisées principalement dans la maille octaédrique et dont la formule chimique est $[(Si_4O_{10}Al_3 + (2-x)Mg_{2+x}(OH)_2]$.

La structure cristalline de la maille de montmorillonite est présentée sur la fig. Les cations compensateurs de la montmorillonite sont généralement des ions calcium ou sodium, c'est pourquoi on emploie généralement les qualificatifs 'calcique' ou 'sodique' lorsque l'on cite l'origine minérale des montmorillonites. Ces particules sont elles-mêmes constituées d'un empilement de feuillets unitaires, formant spatialement une structure de type "jeu de cartes" (Fig17).

L'épaisseur totale du feuillet et de l'espace inter feuillet associé est d'environ 14 Å. Les espaces qui se trouvent entre les feuillets (Fig18) peuvent être vides ou remplis. Les cations les plus fréquents sont Ca²⁺ , Mg²⁺, K⁺ , Na⁺ , Li⁺ .

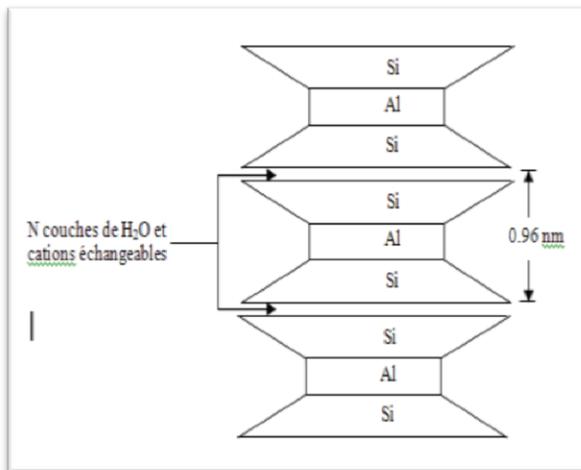


Figure 1.17: Schéma de la structure de la montmorillonite

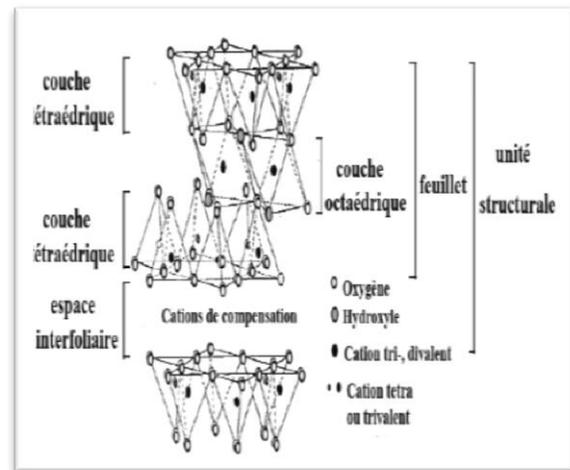


Figure 18 : Structure atomique de la montmorillonite

1.8.2.4 L'illite :

Sa structure (type 2:1) est proche de celle de la montmorillonite mais elle possède un déficit de charge plus élevée dû aux substitutions ioniques par des cations inter foliaires de potassium K^+ (figure 19 et figure 20). Les cations K^+ ont la particularité de posséder exactement la même dimension que les cavités de surface où ils sont piégés. Cette liaison des feuillets par les ions potassium anhydre est très forte et empêche que les molécules d'eau ne parviennent à entrer entre les feuillets, rendant ces ions non échangeables et hydratables. Les illites ont des feuillets d'équidistance fixe à 9,6 Å. Ce caractère leur confère un plus faible potentiel de gonflement que celui des montmorillonites et la constitution de particules de grandes tailles.

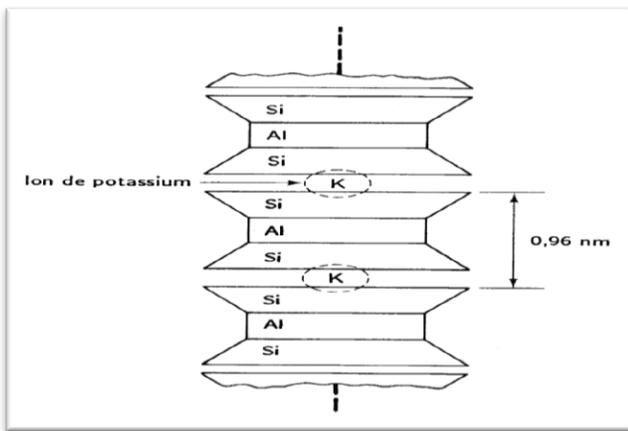


Figure 1.19: Schéma de la structure de l'illite

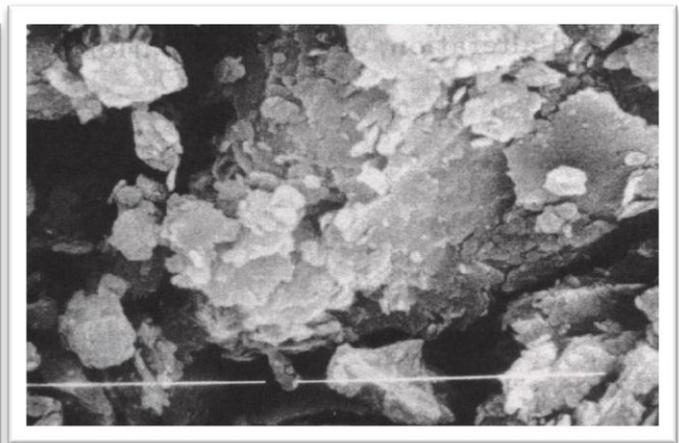


Figure 1.20: Photographie au microscope à balayage électronique d'une illite de Fithian, Illinois. La longueur du trait de lumière est de 5 μm . (Holtz, 1991)

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

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

1.9 Stabilisation

1.9.1 Définition

La stabilisation est un processus de modification des propriétés du matériau de base afin d'en augmenter les performances. Elle peut être mécanique, chimique ou physique suivant l'usage que l'on fait des briques. L'objectif étant surtout d'améliorer la tenue mécanique et la tenue à l'eau, elle vise à augmenter la cohésion des particules et à réduire le volume des vides entre les particules solides. Une bonne stabilisation du matériau, notamment vis-à-vis de l'eau, est primordiale, car elle permet de faire face aux manques de dispositifs constructifs associés à sa

protection (débords de toitures importants, protection contre les jets d'eau, soubassement suffisamment élevé et drainage en pied de mur [14].

1.9.2 Stabilisation mécanique

Cette méthode repose sur le compactage des terres en utilisant des presses manuelles ou mécaniques. Elle permet de réduire la porosité du matériau par resserrement des grains (Figure). Le compactage à lui seul permet d'obtenir un matériau aux caractéristiques mécaniques acceptables [14]. Cependant, le degré de compactage du matériau varie en fonction du type de sol, de sa teneur en eau pendant le compactage et de la force de compression appliquée.

Il existe principalement quatre méthodes de compactage :

- le compactage dynamique par vibration
- le compactage dynamique par impact
- le compactage par pétrissage
- le compactage statique

Les études menées par Mesbah et al. [15] montrent que le compactage statique est mieux adapté aux sols argileux. Les meilleurs résultats sont obtenus lorsque le sol à compacter est un mélange de sable et d'argile suivant une proportion optimale. Le compactage manuel induit des pressions de compactage allant de 0.05 à 4 MN/m², ce qui est faible comparé aux presses mécaniques pouvant atteindre des pressions de plusieurs milliers de MN/m² [16]. Malheureusement, l'inconvénient majeur de la stabilisation mécanique est qu'elle ne permet pas de diminuer la sensibilité à l'eau. Les briques obtenues sont donc peu durables dans les zones à forte pluviométrie. Mise au contact de l'eau, la brique de terre stabilisée mécaniquement redevient plastique et ne résiste pas à la compression. Par contre, et même sans liant, ce matériau présente une bonne durabilité s'il est protégé des intempéries avec des débords de toitures importants, une protection contre les jets d'eau, placée sur un soubassement suffisamment élevé et avec un drainage en pied de mur [14].

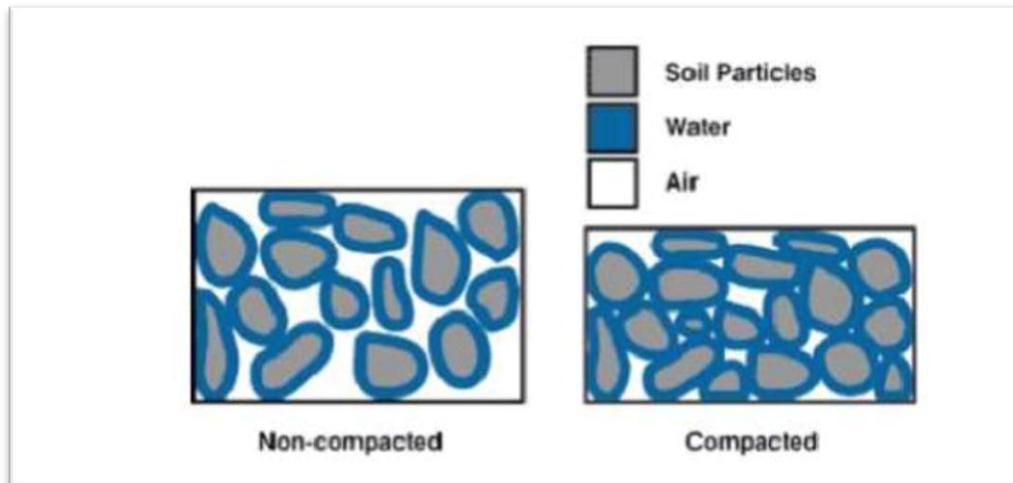


Figure 1.21 : Effet de compactage sur les vides des sols

1.9.3 Stabilisation chimique

La stabilisation chimique consiste à ajouter un liant minéral ou organique à la terre qui modifie ses propriétés. Ce phénomène conduit à une réaction physico-chimique entre les particules et le matériau d'adjonction en créant une matrice qui se lie ou enrobe les particules constituant le matériau de base. Les additifs les plus souvent utilisés pour la stabilisation des briques en terre sont le ciment et la chaux [17]. Outre ces deux liants, plusieurs autres stabilisants d'origines différentes (animales, végétales ou sous-produits industriels) peuvent aussi être utilisés, tels que la bouse de vache [18], les fibres de palmier [19], le bitume [20] et le liant géopolymère [21]. Le choix et la quantité du liant à ajouter dépendent de la nature du sol, du type de liant et du degré d'amélioration de la qualité du sol souhaité.

1.9.3.1 Stabilisation au ciment

La stabilisation de la terre par le ciment induit trois phénomènes : l'échange cationique, la floculation des argiles et la réaction pouzzolanique. Ce dernier phénomène est le plus important et est responsable de l'amélioration des propriétés intrinsèques des briques par un mécanisme de liaison des particules du sol par les silicates de calcium hydratés (C-S-H). Les C-S-H sont produits d'une part au cours de l'hydratation du ciment, et, d'autre part, par la réaction pouzzolanique entre l'hydroxyde de calcium produit par le ciment (portlandite) et les particules argileuses du sol [18]. Le ciment crée des liens physiques entre les particules, ce qui augmente la résistance des terres et diminue leur porosité. En général, les réactions d'hydratation des ciments

sont plus rapides que celle des autres liants hydrauliques. En ce qui concerne le processus de cimentation et de liaisons entre particules par le ciment, de nombreux facteurs doivent être considérés. Cela nécessite une bonne homogénéisation du mélange terre-ciment et une quantité d'eau suffisante pour l'hydratation du ciment et l'humidification de la terre. Par ailleurs, vu que le ciment atteint sa dureté et sa résistance maximale à partir de 21-28 jours, il faudrait que les blocs restent humides et soient à l'abri de la dessiccation durant tout ce temps. Ils peuvent pour cela être couverts d'une bâche ou à défaut, subir une cure par arrosage [21]. Généralement, le ciment, considéré comme un bon stabilisant pour les sols granulaires, est dosé à 3 à 4 % (en poids de ciment) par rapport au poids de la terre sèche utilisée. Cependant, lorsque le sol est trop argileux, il faudra un taux moyen de 10 % en poids de la terre argileuse pour lier les particules entre elles [14]. En général, il peut être utilisé avec n'importe quel type de sol, mais avec de l'argile, il est peu économique. D'après Gooding [23], le bloc de terre stabilisée avec 3 à 12 % en masse de ciment, semble être le bloc le plus couramment produit et utilisé.

1.9.3.2 Stabilisation à la chaux

Stabilisation de la brique en terre à la chaux se traduit par quatre réactions : les échanges cationiques entre la chaux et les particules d'argiles, fonction de la nature de l'argile, la floculation, la carbonatation et la réaction pouzzolanique qui est la plus importante [24]. La réaction entre la chaux et les minéraux argileux, notamment la silice et l'alumine, contribue à la formation de nouveaux minéraux comme les C-S-H (silicates de calcium hydratés), les C-A-H (aluminates de calcium hydratés) et C-A-S-H (silico-aluminates de calcium hydratés). Ces nouveaux minéraux sont principalement responsables de l'amélioration des propriétés mécaniques des matériaux stabilisés [18]. Cependant, la réaction pouzzolanique induite par ce type de stabilisant est plus ou moins lente et dépend de divers facteurs tels que la minéralogie et la taille des particules du sol à stabiliser [16]. En outre, on retiendra que la chaux reste tout de même le stabilisant convenable pour les sols dont la teneur en argile est élevée. Il existe en général deux types de chaux :

La chaux aérienne, vive ou éteinte, dont l'utilisation pour la stabilisation des terres varie en fonction des applications de la terre à stabiliser :

- La chaux aérienne vive CaO qui est utilisée en géotechnique routière pour absorber l'eau des sols trop humides afin de les rendre plus aptes au compactage ;

- La chaux aérienne éteinte $\text{Ca}(\text{OH})_2$, obtenue par hydratation de la chaux vive CaO , qui est généralement utilisée pour la stabilisation des terres pour BTC

La chaux hydraulique naturelle (chaux renfermant naturellement des silicates de calcium anhydres) ou artificielle (mélange de chaux aérienne et de ciment), dont les conditions d'utilisation sont identiques au ciment et qui peut également être utilisée pour la stabilisation des terres pour BTC.

1.9.4 Stabilisation physique

La stabilisation physique consiste à intervenir sur la texture et la distribution granulométrique des terres par introduction contrôlée des fractions de grains d'autres matériaux (principalement du sable et des fibres végétales) [25]. Ce procédé modifie la structure des terres et améliore les propriétés physico-mécaniques des terres à traiter. Elle peut également se faire par cuisson sous un cycle de 12 à 48 heures à une température du four de 900 à 1200°C. Les matériaux issus de ce traitement thermique prennent le nom de terre cuit.

CHAPITRE 02

CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES ET ESSAIS

2.1 Introduction

Le bloc en terre est un mélange composé de sable de dune, d'argile et d'eau de gâchage, sans doute, liée aux caractéristiques de ses constituants.

Dans ce chapitre nous allons étudier les caractéristiques des différents matériaux utilisés dans la composition des BTC, en suite nous allons donner le principe des méthodes utilisé dans la détermination des caractéristiques étudiés.

2.2 Matériaux utilisés

Nous avons utilisé des matériaux locaux, leurs caractérisations sont étudiées expérimentalement au laboratoire de notre universités

Les matériaux utilisés dans cette recherche sont : le sol, le sable de dune, le ciment.

2.3 Caractéristiques des matériaux

2.3.1 Sol

2.3.1.1 Origine du sol

Le sol utilisé provient de la région de Bir Lahmer Madjenne la willaya de Bordj Bou Arreridj. (Groupe BEN HAMMADI Argilore de B.B.A)

L'échantillon d'argile est codifié AR 15 07653



Figure 2.1: l'argile utilisée dans cette d'étude

2.3.1.2 les analyse sur le sol

A- Analyse chimique

Tableau 2.1: L`analyse chimique d`argile

| 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 |

B- Analyse minéralogique

Tableau 2.2: L`analyse minéralogique d`argile

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

C- Détermination du poids volumique et humidité naturelle

Tableau 2.3: Poids volumique d`argile

| Poids volumique (Kg/m3) | Humidité naturelle (%) |
|------------------------------------|-----------------------------------|
| 2355.1 | 8.7 |

D - Propriétés de façonnage et de séchage lent

Tableau 2.4: Résultats des caractéristiques de séchage

| Caractéristiques de séchage | Résultats |
|---------------------------------------------------------|------------------|
| Temps de séchage (Heures) | Séchage lent |
| Humidité de façonnage (%) | 20.7 |
| Retrait sur sec (%) | 8.4 |
| Resistance mécanique a la flexion (Kg/cm ²) | 16.01 |
| Coloration | Marron |

2.3.1.3 Caractéristique physique

Avant de soumettre le sol aux essais, il est écrêté à 1 mm. Houben (Houben, 1994) a indiqué 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-Limites d'Atterberg

Les limites d'ATTERBERG consistent en des teneurs en eau limites qui marquent la transition entre deux états de consistance d'un sol cohérent. C'est pourquoi, on distingue trois états dans la

consistance des argiles (les états liquide, plastique et solide) La transition d'un état à l'autre est très progressive, c'est pourquoi toute tentative pour fixer la limite entre deux états comporte une part d'arbitraire, on utilise généralement les limites définies par Atterberg et précisées ensuite par Casagrande.

*Limite de liquidité (w_L)= l'état liquide vers l'état plastique

* Limite de plasticité (w_p)= l'état plastique vers l'état solide.

- **But de l'essai :**

mesurer des teneurs en eau et l'identification de la limite (liquide ou plastique) afin de permettre la classification du sol étudié.

MODE OPERATOIRE

➤ **Limite de liquidité**

Pour déterminer la limite de liquidité w_L est la teneur en eau w (%) qui correspond à une fermeture en 25 coups, en utilise une appareil conforme aux spécifications qui porte le nom de Casagrande.



Figure 2.2: L`appareil de Casagrande

➤ **Limite de plasticité**

La limite de plasticité w_p est la teneur en eau (exprimée en %) du rouleau qui se brise en petits tronçons de 10 à 20 mm de longueur au moment où son diamètre atteint 3 mm.

- **Présentation des résultats**

La présentation des résultats comprend les tableaux des valeurs obtenues durant l'essai

Tableau 2.5: Résultats limite de liquidité (wl)

| Echantillons | 21 | | 23 | | 26 | |
|-----------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Tare N | 11 | 14 | 10 | A1 | 1P | 3B |
| Sol humide + tare | 28 | 22 | 27 | 28 | 27 | 28 |
| Sol sec + tare | 26.67 | 21.17 | 25.43 | 26.02 | 25.39 | 26.96 |
| Eau (g) | 1.33 | 0.23 | 1.57 | 1.98 | 1.61 | 1.04 |
| Tare (g) | 22.09 | 18.37 | 22.44 | 22.11 | 21.69 | 22.75 |
| Sol sec (g) | 4.58 | 3.4 | 3.29 | 3.91 | 3.7 | 4.21 |
| Teneur en eau % | 29.03 | 6.76 | 52.50 | 50.63 | 43.51 | 24.70 |
| Teneur en eau (moy) % | 17.89 | | 51.56 | | 34.10 | |
| WI % | 34.27 | | | | | |

Tableau 2.6: Résultats limite de plasticité (wp)

| Echantillons | 1 | 2 |
|---------------------|--------------|----------|
| Tare N | T06 | F2 |
| Sol humide + tare | 13.183 | 25.217 |
| Sol sec + tare | 12.56 | 24.55 |
| Eau (g) | 0.623 | 0.667 |
| Tare (g) | 10..343 | 22.157 |
| Sol sec (g) | 2.393 | 2.217 |
| Teneur en eau % | 28.5 | 28.03 |
| Wp% | 23.37 | |

➤ **Indice de plasticité Ip**

$I_p = w_l - w_p = 10.2\%$

• **Classification LPC des sols**

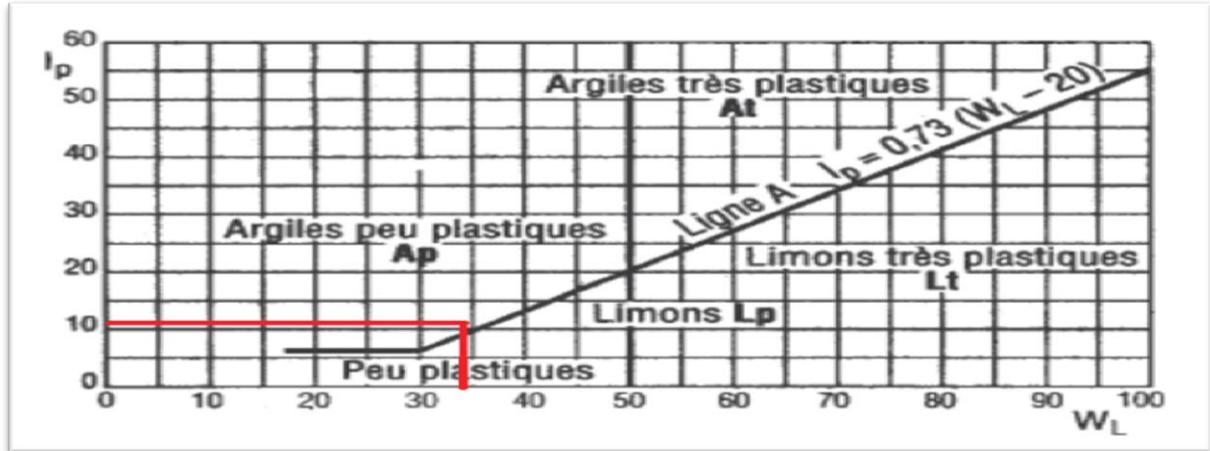


Figure 2.3: Classification LCPC des sols fins.

On remarque que le sol se situe sans la zone limite de liquidité ($25 < W_L < 50$) et dans la zone limite de l'indice de plasticité ($2.5 < I_P < 29$) selon la norme XP P 13-901. le graphe figure 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 ($\% 2 \mu m > 5\%$).

• **Analyse granulométrique**

Tableau 2.7: Résultats de l'analyse granulométrique du sol

| Diamètre de tamis (mm) | Refus (g) | Refus cumulés | Refus cumulés (%) | Tamisât cumulé (%) |
|------------------------|-----------|---------------|-------------------|--------------------|
| 1.15 | 1 | 1 | 0.1 | 99.9 |
| 0.63 | 389 | 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 |

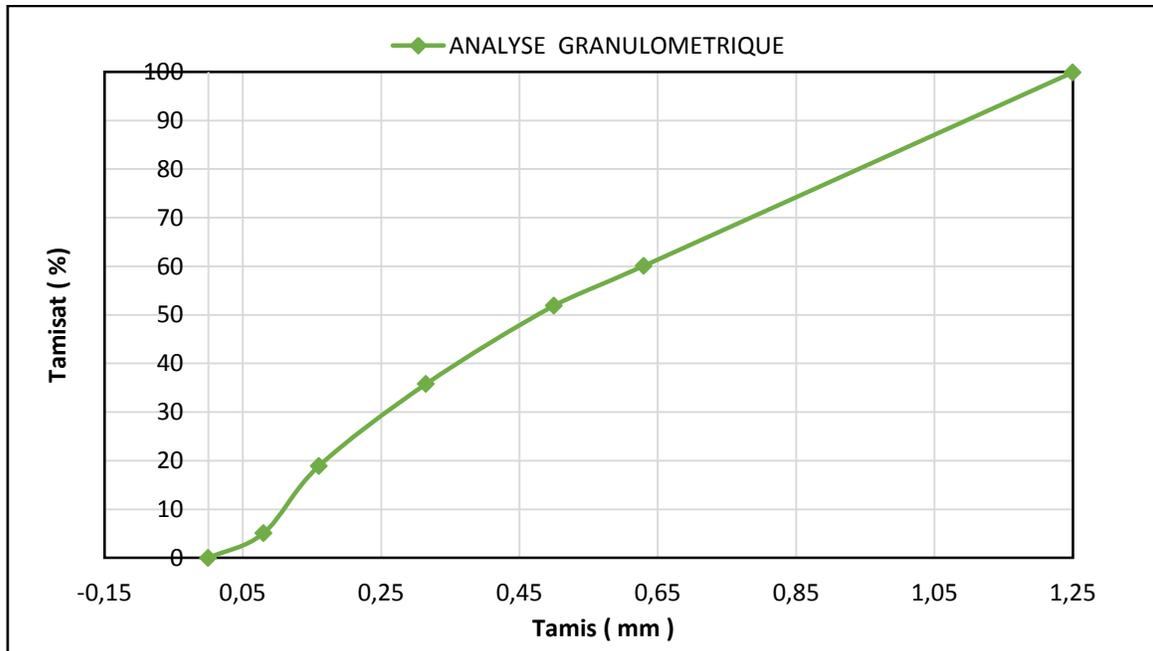


Figure 2.4: Courbe de l'analyse granulométrique du sol

2.3.2 *Sable de dune*

2.3.2.1 *Caractéristique du sable de dune*

Le sable de dune résulte 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 constitué de quartz. Pour notre étude, nous avons utilisé le sable des dunes de OUD SOUF.

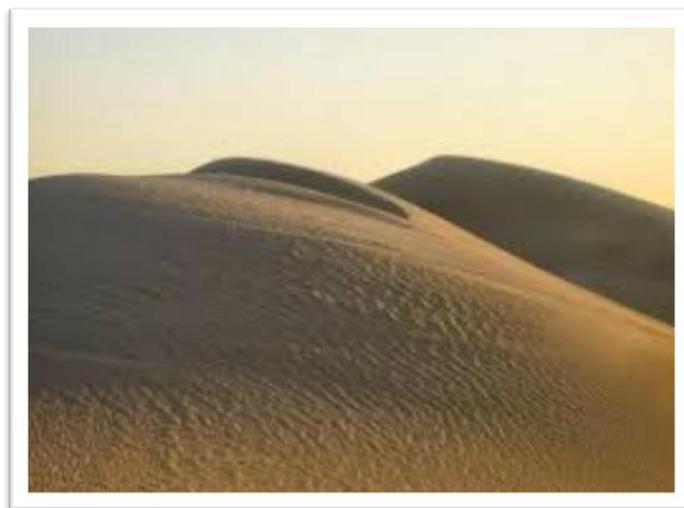


Figure 2.5: Sable de dune

A- 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 consistants 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 a 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 a $(D/10)^2$, avec M exprime 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 inferieur du cadre de l'appareil en suite l'ensemble est serre aux montants par la couronne supérieure, a l'aide de deux jeux de ressort et vis de blocage.

La durée de l'essai : 3 minutes.



Figure 2.6: Appareillage d'analyses granulométriques

- **Le module de finesse du sable de dune**

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 :

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

Tableau 2.8 : 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 2.9: les resultats des analyses granulometrique du sable de dune

| Diamètre de tamis (mm) | Refus (g) | Refus cumulés | Refus cumulés% | Tamisât cumulé (%) |
|------------------------|-----------|---------------|----------------|--------------------|
| 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 | 3.22 | 67.8 |
| 0.5 | 144 | 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 |
| 0 | 7 | 1000 | 100 | 0 |

Tableau 2.10: Resultats du module de finesse de sable

| | | |
|-------|-------------------|------------------|
| Sable | Module de finesse | Qualité de sable |
| | 2.1 | Sable moyen |

Tableau 2.11: Résultats de l’analyse granulométrique du sable de dune

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

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

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

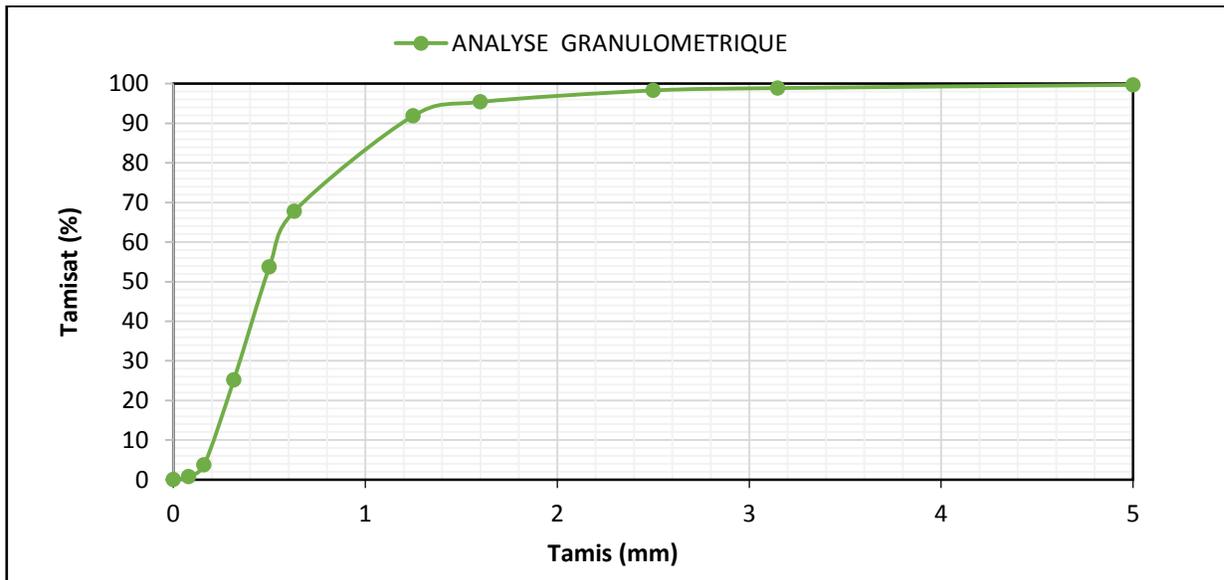


Figure 2.7: Courbe de l’analyse granulométrique du sable de dune

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 moyen.

B – la masse volumique

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

- **La masse volumique apparente (app)**

C'est la masse d'un corps par unité de volume apparent en état naturel.

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. Il résulte que :

$$P_{app} = M/V$$

M : masse de sable

V : volume de récipient

Tableau 2.12: Masse volumique apparente du sable

| M1 (g) | M2 (g) | (M2-M1) (g) | V _o = 1L (cm ³) | P _o (g/cm ³) |
|--------|--------|-------------|-------------------------------------------|-------------------------------------|
| 1445 | 3082 | 1637 | 1000 | 1.637 |

- **La masse volumique absolue (abs)**

C'est la masse d'un corps par unité de volume absolue de matière pleine (volume de matière seule sans tenir compte les vides et les pores).

Le volume absolue ou réel d'une corp est généralement déterminée en mesurent le volume d'un liquide que déplace l'introduction de ce corps.

De nombreuses méthode permettent de déterminer les masses et les volumes des matériaux à étudier dans étude en va utiliser la méthode de l'éprouvette graduée.

Tableau 2.13: Masse volumique absolue du sable

| Désignation | V (ml) | ρ abs (g/cm ³) | Moyenne |
|-------------|--------|---------------------------------|---------|
| Essai 1 | 115 | 2.6 | 2.6 |
| Essai 2 | 119 | 2.52 | |
| Essai 3 | 111 | 2.7 | |

C – Equivalent de sable

- **But:** Cet essai effectué selon la norme (NF EN 933-8) est utilisé pour évaluer la propriété des Sables. Il est destiné aux sols plastiques pour lesquels la mesure de l'indice de plasticité est peu précise.

- **Mode opératoire**

Tamiser le matériau à tester de façon à séparer les éléments sableux les plus grossiers des particules fines sur la fraction 0/5 mm.

- L'éprouvette est remplie d'une solution flocculante normalisée
- Puis, on verse environ 120 g du matériau sec
- Après un petit intervalle d'attente, le mélange est soumis à 90 cycles de 20 cm d'amplitude en 30 secondes (norme).
- 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 flocculat de l'eau.
- lire les valeurs de H₁ et H₂ à l'aide d'une règle.

L'équivalent de sable est donné par la formule

$$SE = 100. H2/H1$$

Tableau 2.14 : Les préconisations en matière de propreté pour les sables utilisés dans les bétons

| SE | Nature et qualité du sable |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| SE < 60 | Sable argileux- Risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité |
| 60 ≤ SE ≤ 70 | Sable légèrement argileux- de propreté admissible pour béton de qualité quand ou ne craint pas particulièrement de retrait. |
| 70 ≤ SE ≤ 80 | Sable propre – à faible pourcentage de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haut qualité. |
| SE > 80 | Sable très propre – l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau. |

- Les résultats d'essai sont présentés dans le tableau 2.15 suivant :

Tableau 2.15: Résultats d'équivalent de sable

| | ESV | ESp |
|-------|------|-----|
| Sable | 89.5 | 90 |

| | |
|-----------------------------------|--------------------------|
| Qualité de sable dune d'Oued Souf | Sable très propre |
|-----------------------------------|--------------------------|

ESv : (équivalent de sable visuel).

ESp : (équivalent de sable au piston).

2.3.3 Ciment

Le ciment utilise est un ciment Mokaouem NA 442 – CEM I 42.5 N-SR3, Disponible sur le marché fabriqué par la cimenterie Lafarge de hammam Dalaa (wilaya de M'Silla).

C'est un ciment gris résistant aux sulfates, résultat de la mouture d'un clinker contenant un faible taux d'aluminates de calcium avec une proportion de gypse inferieure a celle d'un ciment portland composé.

2.3.3.1 Caractéristiques du ciment

A- Analyses chimiques

Tableau 2.16: Analyses chimiques du ciment

| | | |
|------------------------------------------|-----|----------------|
| Perte au feu (NA5042) | (%) | 0.5 à 3 |
| Teneur en sulfates (SO ₃) | (%) | 1.8 à 3 |
| Teneur en oxyde de magnésium (MgO) | (%) | 1.2 à 3 |
| Teneur en chlorures (NA5042) | (%) | 0.01 à 0.05 |

B- Composition minéralogique

Tableau 2.17 : Composition minéralogique du ciment

| | |
|-----------------------------------|---------|
| Taux d'aluminate C ₃ A | < 3.0 % |
|-----------------------------------|---------|

C- Propriétés physiques

Tableau 2.18: Propriétés physiques du ciment

| | | |
|--------------------------------------|----------------------|-------------|
| Consistance normale | (%) | 25 à 28 |
| Finesse Blaine (NA231) | (cm ² /g) | 3200 à 3800 |
| Retrait à 28 jours | (µm /m) | < 1000 |
| Expansion | (mm) | ≤ 2.0 |
| Chaleur d`hydratation | (j/g) | < 270 |
| Début de prise à 20° (NA 230) | (min) | > 60 |
| Fin de prise à 20° (NA 230) | (min) | 240 à 400 |
| Resistance à la compression 2 jours | (MPa) | ≥10 |
| Resistance à la compression 28 jours | (MPa) | ≥ 42.5 |

2.3.4 L`eau de gâchage

Pour notre béton, nous avons utilisé l`eau de robinet disponible au laboratoire de génie civil de notre université.

2.4 Confection des blocs

2.4.1 Matériel spécifique

Pour la confection des éprouvettes nécessaires au programme d'essai, le modèle est en acier trempé, formant après montage .Le moule est muni d'un piston pour assurer la transmission de la contrainte de compactage de la presse au mélange.

Le schéma et le modèle du moule utilisé sont présentés sur les figures 2.8.

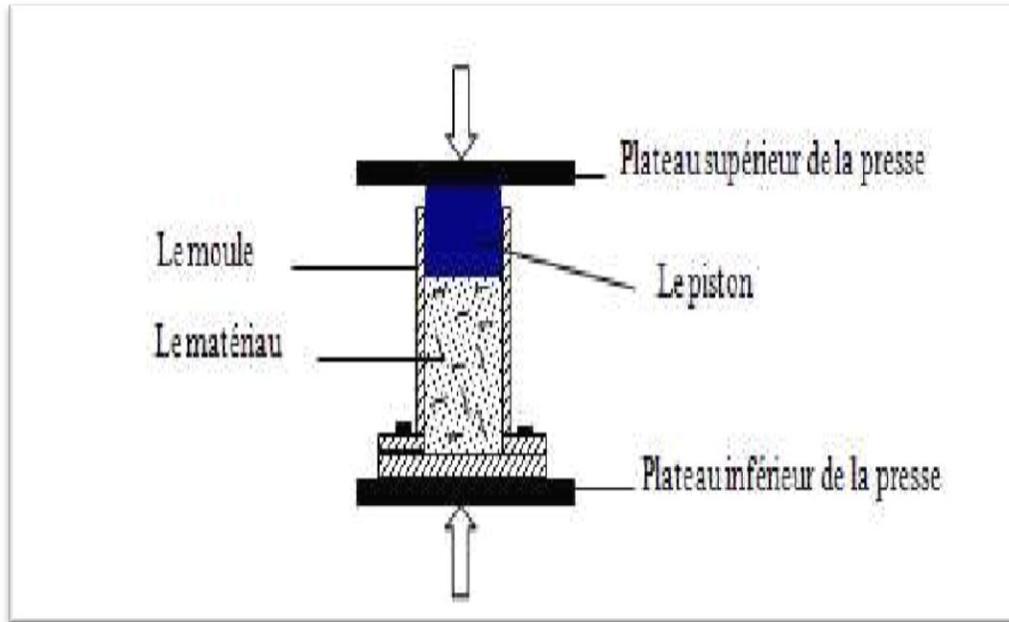


Figure 2.8: Le schéma du moule utilisé pour la fabrication des BTC



Figure 2.9: Moule utilisé pour la fabrication des blocs

2.4.2 Mélanges

D'après des études menées par (Mesbah et al.,1999) et P'KLA, 2002), le compactage statique est mieux adapté aux sols argileux, et que la détermination de la teneur en eau optimale pour le BTC à partir de l'essai Proctor est inappropriée, car l'énergie de compactage n'est pas la même

que celle d'un compactage statique utilisé pour la fabrication du BTC. Ceci nous a poussé à utiliser la presse directement, en appliquant le compactage.

Pour la préparation des mélanges, on s'est basé sur l'étude réalisée par Guettala et al. (Guettala, 1997), qui a montré que la concentration du sable dans les BTC a peu d'influence sur la résistance mécanique, mais des dosages entre 30% et 60 % ont données les meilleurs résultats.

La composition des mélanges employés dans cette étude est présentée sur la figure 2.10.

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 2.10 : Combinaison des mélanges des blocs

Tableau 2.19 : Composition des différents mélanges employés avec 5% de ciment

| N° | Argile (%) | Sable (%) | Ciment (%) | Contrainte Compression (MPa) |
|----|------------|-----------|------------|------------------------------|
| 1 | 95 | 0 | 5 | 10 et 20 |
| 2 | 75 | 20 | 5 | |
| 3 | 55 | 40 | 5 | |
| 4 | 35 | 60 | 5 | |
| 5 | 15 | 80 | 5 | |

Tableau 2.20: Composition des différents mélanges employés avec 10% de ciment

| N° | Argile (%) | Sable (%) | Ciment (%) | Compression (MPa) |
|----|------------|-----------|------------|-------------------|
| 1 | 90 | 0 | 10 | 10 et 20 |
| 2 | 70 | 20 | 10 | |
| 3 | 50 | 40 | 10 | |
| 4 | 30 | 60 | 10 | |
| 5 | 10 | 80 | 10 | |



Figure 2.11: Le poids du mélange global sec pour chaque bloc

2.4.3 Préparation 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 puis malaxés avec l'eau 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 2.12: Malaxeur



Figure 2.13: Eprouvette avec le mélange

2.4.4 Quantité d'eau

La quantité d'eau est déterminée expérimentalement. On ajoute l'eau puis le malaxage est réalisé légèrement jusqu'à au moment où le mélange devient homogène visuellement.



Figure 2.14: Malaxage du mélange avec l'eau



Figure 2.15: Le mélange à l'état final

2.4.5 Compactage des mélanges

Les mélanges sont compactés selon le mode statique à simple effet par le biais d'une presse hydraulique : 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 lecture de la pression voulue. Durant toute cette étude on a appliqué deux contraintes de compactage (10 MPa et 20 MPa).



Figure 2.16: La presse de compactage

Le démoulage se fait immédiatement après le compactage.



Figure 2.17: Démoulage de bloc

2.5 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 durant les premiers jours avant leur utilisation.

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_ 2°C) pendant 24 heures avant d'être soumis aux différents modes de cure

(Au laboratoire, a étuve, Le traitement naturel par étuvage à la vapeur sous rayonnements solaires)

On a étudié l'influence du mode de cure, les BTC sont curés selon mode :

- au laboratoire



Figure 2.18 : Protèges le bloc avec un plastique

➤ *Conservation au laboratoire*

Tous les blocs étudiés, sauf ceux qui sont cités dans les deux autres modes, sont conservés au laboratoire à une température $T = 20 + 2^{\circ}\text{C}$ pendant 28 jours.



Figure 2.19: Conservation des blocs au laboratoire

2.6 Propriétés mécaniques

On s'intéresse dans cette étude à déterminer les caractéristiques mécaniques suivantes : la résistance en compression des BTC à l'état sec par le biais de l'essai de compression simple.

2.6.1 Essais de compression simple

On s'est intéressé également à déterminer la résistance en compression des échantillons de BTC par le biais d'une presse hydraulique avec une capacité de 10 MPa et 20 MPa.

La résistance en compression de ces échantillons est la propriété mécanique la plus déterminante pour le choix des types de matériaux constituant les murs d'un bâtiment. Cet essai mécanique permet de déterminer la résistance à la compression sèche.

En ce qui concerne la résistance en compression sèche, elle permet de déterminer la résistance nominale en compression simple des briques de terre comprimées selon la norme XP P 13-901 [3]. La résistance en compression de ces échantillons étant alors déterminée à travers l'équation citée ci-dessus.

$$R_{c28j} = (Fr/S)$$

Avec :

R_{c28j} : résistance en compression (MPa)

Fr : force de rupture (N)

S : surface de contact de l'échantillon avec la plaque de la presse (mm^2)



Figure 2.20: Dispositif d'essai de compression sur les échantillons de BTC

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les différentes caractéristiques des matières premières utilisées pour fabriquer un béton de terre comprimée.

Objectifs spécifiques de ce chapitre c'est de :

- Connaître les caractéristiques des différentes matières (sol, sable, ciment),
- Connaître les principes et les modes opératoires des essais au laboratoire,
- Connaître comment préparer un bloc de terre comprimée,
- Déterminer les caractéristiques mécaniques de BTC.

CHAPITRE 03

RESULTATS

ET

DISCUSSION

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'analyse et l'interprétation des résultats expérimentaux de l'étude de l'effet de sable sur la résistance mécanique du BTCS, à savoir : la résistance à la compression à l'état sec. Le béton est stabilisé chimiquement par deux taux différents de ciments (5 et 10%) et compacté par deux contraintes différentes de compactage (10 et 20MPa).

3.2 Influence du mode et du temps de cure sur la résistance mécanique du BTCS

D'après Neville (Neville, 2000), la cure est l'ensemble des procédures utilisées pour favoriser l'hydratation du ciment qui consiste en un contrôle de la température et des mouvements de l'humidité autour et à l'intérieur du béton. Les études réalisées sur les bétons et les mortiers, ont justifié l'importance de la cure pour atteindre de bonnes résistances. Dans cette étude, étant donné que le bloc de terre comprimée est stabilisé chimiquement par le ciment, donc il est composé d'une matrice cimentaire exigeant une cure adéquate afin de compléter la réaction chimique.

Pour les BTC à base de ciment, la cure par couverture d'un film en plastique pendant une durée de 28 jours dans un climat modéré est très suffisante pour que la résistance du bloc atteigne une valeur acceptable.

3.3 Résistance à la compression de BTCS

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

Les essais de compression sont réalisés à 28jours.

Tableau 3.1 : Résistance à la compression de BTCS avec (5% Ciment et compacté à 10MPa)

| | Argile (%) | Sable (%) | Ciment (%) | Rc28j=1 (MPa) | Rc28j=2 (MPa) | Rc28j=3 (MPa) | Rc28j moy (MPa) |
|----|------------|-----------|------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|
| A1 | 95% | 0% | 5% | 4.901 | 5.87 | 5.614 | 5.46 |
| A2 | 75% | 20% | 5% | 4.06 | 4.611 | 4.092 | 4.25 |
| A3 | 55% | 40% | 5% | 4.875 | 4.602 | 4.919 | 4.80 |
| A4 | 35% | 60% | 5% | 5.227 | 4.144 | 4.417 | 4.80 |
| A5 | 15% | 80% | 5% | 3.65 | 3.86 | 3.02 | 3.51 |

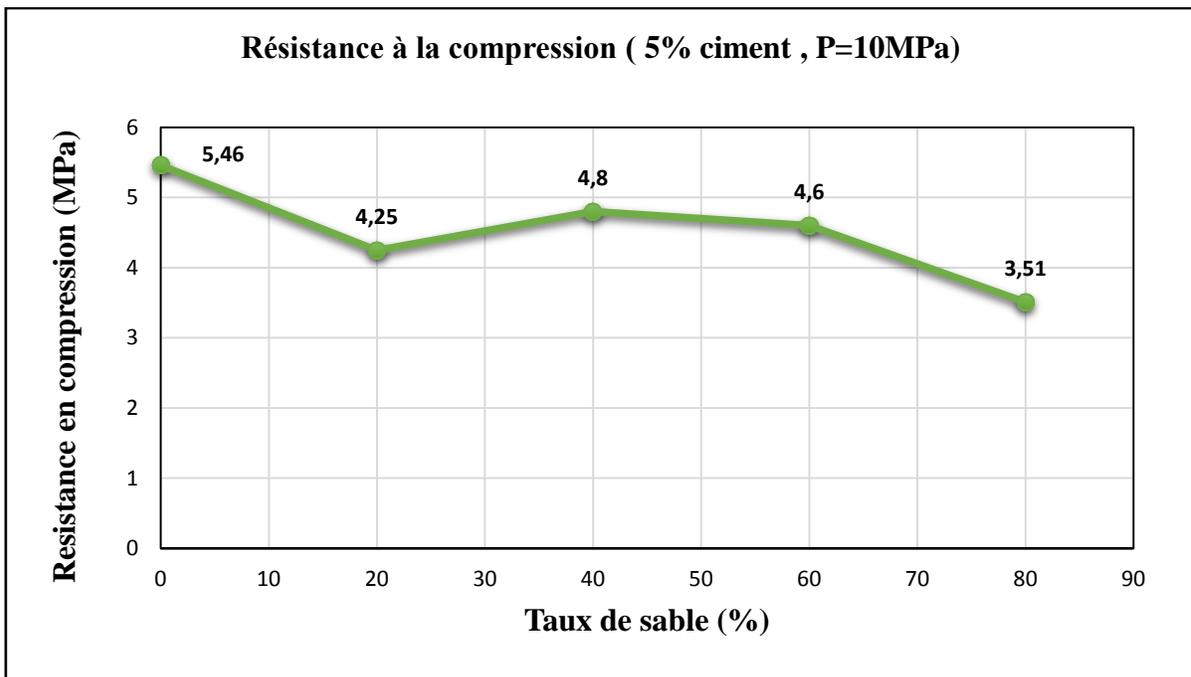


Figure 3.1 : Evolution de la résistance en fonction de taux de sable

D'après la figure 3.1, pour un dosage en ciment de 5 % et un compactage de 10MPa, la résistance à la compression diminue légèrement en augmentant le taux du sable (de 0% à 60 %). La diminution est remarquable pour un taux de sable de 80%.

Tableau 3.2 : Résistance à la compression de BTCS avec (10% Ciment et compacté à 10MPa)

| | Argile (%) | Sable (%) | Ciment (%) | Rc28j=1 (MPa) | Rc28j=2 (MPa) | Rc28j=3 (MPa) | Rc28j moy (MPa) |
|----|------------|-----------|------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|
| C1 | 95% | 0% | 10% | 8.755 | 9.655 | 7.33 | 8.58 |
| C2 | 75% | 20% | 10% | 8.016 | 8.43 | 8.826 | 8.424 |
| C3 | 55% | 40% | 10% | 10.216 | 10.99 | 10.04 | 10.42 |
| C4 | 35% | 60% | 10% | 10.770 | 11.034 | 10.647 | 10.83 |
| C5 | 15% | 80% | 10% | 6.978 | 7.171 | 6.265 | 6.81 |

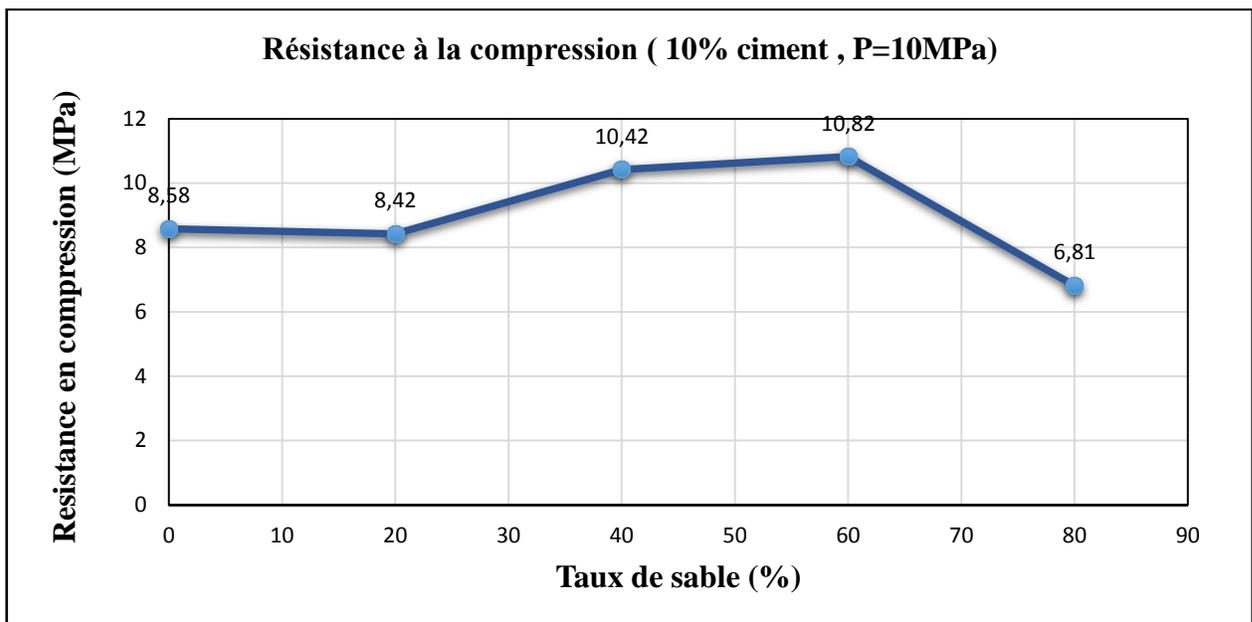


Figure 3.2: Evolution de la résistance en fonction de taux de sable

La figure 3.2 montre que dans le cas d'un dosage de 10% de ciment et un compactage de 10MPa, la résistance à la compression augmente quand le taux de sable dépasse 20% pour un atteindre un maximum pour un taux de 60%. Au-delà de 60%, la résistance diminue sensiblement.

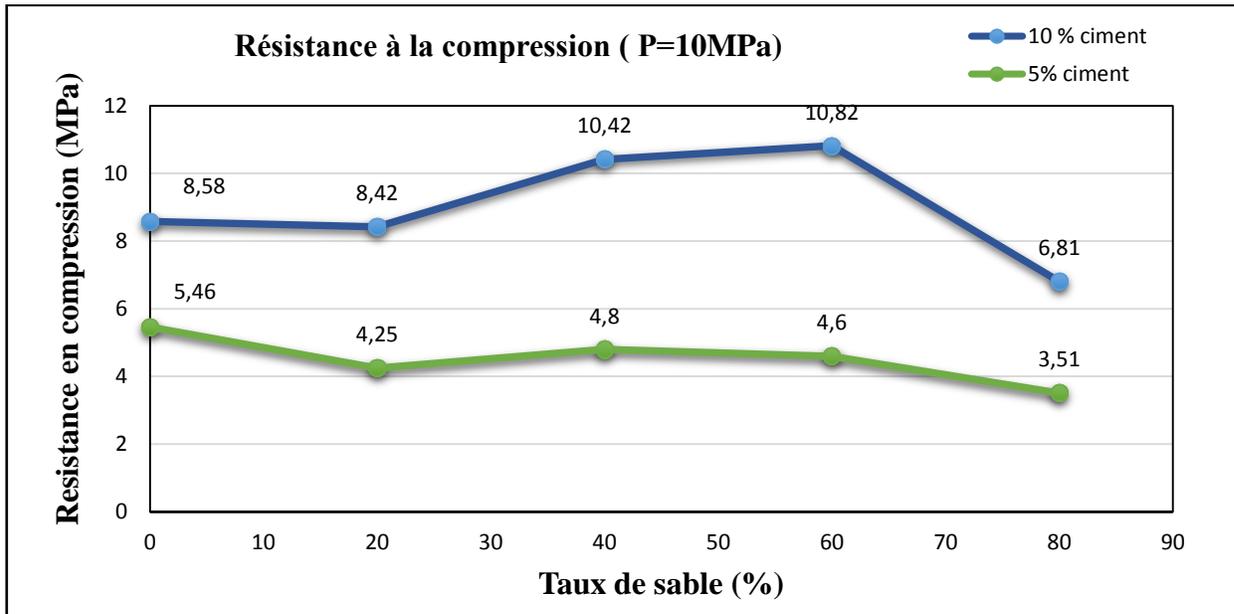


Figure 3.3: Evolution de la résistance en fonction du dosage en ciment (P=10MPa)

La figure 3.3 met en évidence l'effet chimique de l'introduction du ciment dans le BTC. En effet, avec 10%, les résistances ont enregistré des valeurs doubles qu'avec un taux de 5% de ciment. Ce résultat est expliqué par la réaction pouzzolanique entre la silice SiO₂ de l'argile et la chaux hydratée du ciment Ca(OH)₂ qui forme des C-S-H rendant le béton plus compact et par conséquent plus résistant.

Tableau 3.3 : Résistance à la compression de BTCS avec (5% Ciment et compacté à 20MPa)

| | Argile (%) | Sable (%) | Ciment (%) | Rc28j=1 (MPa) | Rc28j=2 (MPa) | Rc28j=3 (MPa) | Rc28j moy (MPa) |
|----|------------|-----------|------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|
| B1 | 95% | 0% | 5% | 2.45 | 4.77 | 3.933 | 3.71 |
| B2 | 75% | 20% | 5% | 5.95 | 5.71 | 5.86 | 5.84 |
| B3 | 55% | 40% | 5% | 5.49 | 6.06 | 5.81 | 5.78 |
| B4 | 35% | 60% | 5% | 5.87 | 5.768 | 5.65 | 5.76 |
| B5 | 15% | 80% | 5% | 3.02 | 1.80 | 2.28 | 2.36 |

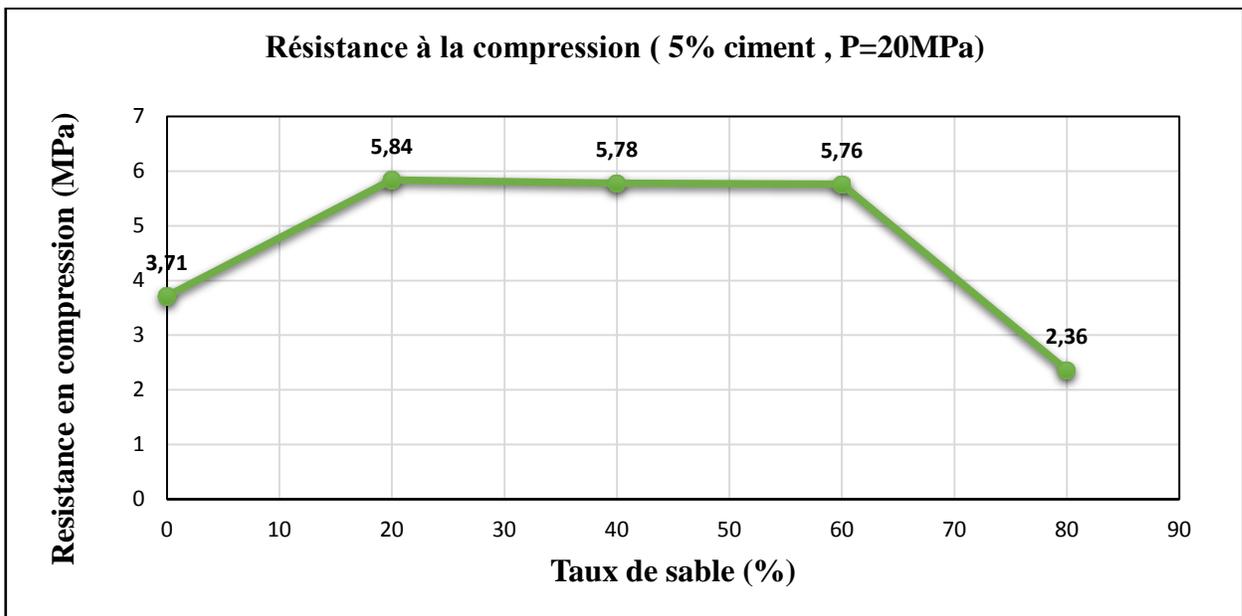


Figure 3.4 : Evolution de la résistance en fonction de taux de sable
(Contrainte de compactage de 20MPa)

D'après la figure 3.4 : pour un compactage de 20MPa et un dosage en ciment de 5%, la résistance à la compression augmente en fonction du taux du sable jusqu'à 60 %. Au-delà de cette valeur, on remarque une chute remarquable de résistance.

Tableau 3.4 : Résistance à la compression de BTCS avec (10% Ciment et 20MPa Compactage)

| | Argile (%) | Sable (%) | Ciment (%) | Rc28j=1 (MPa) | Rc28j=2 (MPa) | Rc28j=3 (MPa) | Rc28j moy (MPa) |
|----|------------|-----------|------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|
| D1 | 95% | 0% | 10% | 10.818 | 9.653 | 10.656 | 10.38 |
| D2 | 75% | 20% | 10% | 7.65 | 7.84 | 8.93 | 8.14 |
| D3 | 55% | 40% | 10% | 8.32 | 8.88 | 9.573 | 8.93 |
| D4 | 35% | 60% | 10% | 9.91 | 9.89 | 9.357 | 9.72 |
| D5 | 15% | 80% | 10% | 5.23 | 4.079 | 5.90 | 5.07 |

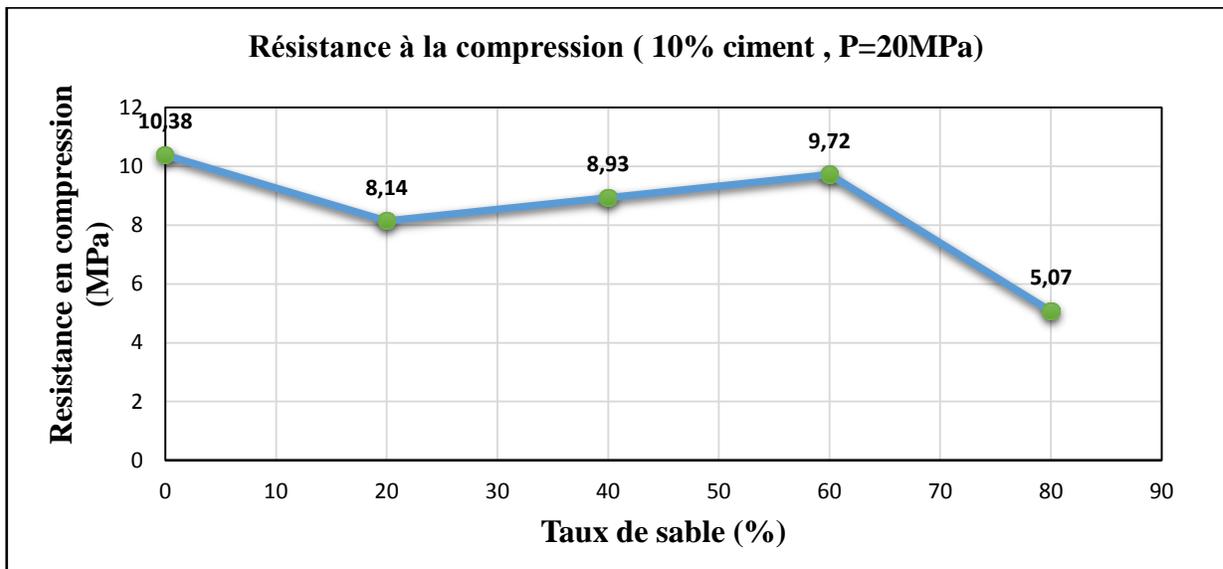


Figure 3.5 : Evolution de la résistance en fonction de taux de sable (Contrainte de compactage de 20MPa)

La figure 3.5 montre que pour un dosage en ciment de 10% et un compactage de 20MPa, la résistance à la compression diminue légèrement pour des taux de sable de 20% et 40%, mais elle augmente pour atteindre une résistance très acceptable (d'environ 10MPa) pour un taux de sable de 60 %. Au-delà de cette valeur, on remarque une chute importante de résistance.

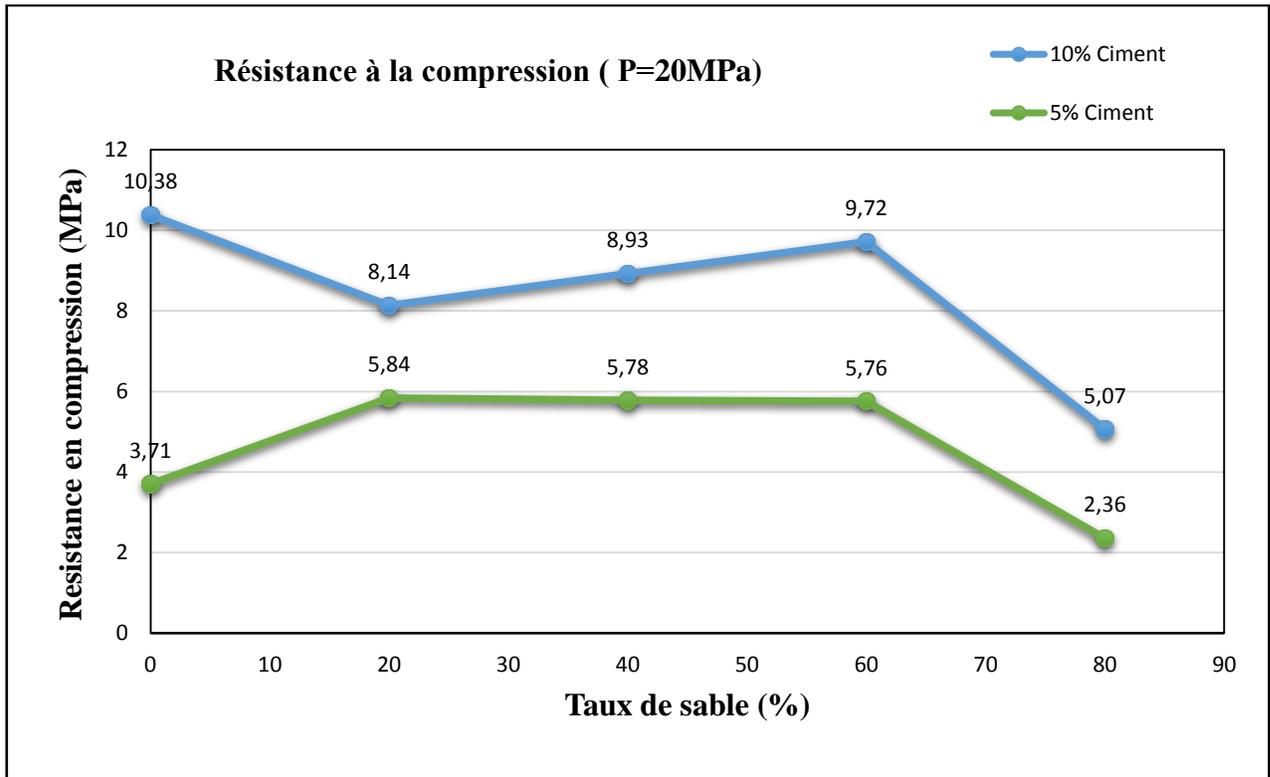


Figure 3.6: Evolution de la résistance en fonction du dosage en ciment (P=20MPa)

La figure 3.6 montre clairement l'effet du dosage en ciment sur la résistance à la compression du BTC pour les différents taux de sable (compactage de 20MPa). Les mélanges avec 10% de ciment présentent les meilleurs résultats. Ce résultat est expliqué par la réaction pouzzolanique entre la silice SiO₂ de l'argile et la chaux hydratée du ciment Ca(OH)₂ qui forme des C-S-H rendant le béton plus compact et par conséquent plus résistant

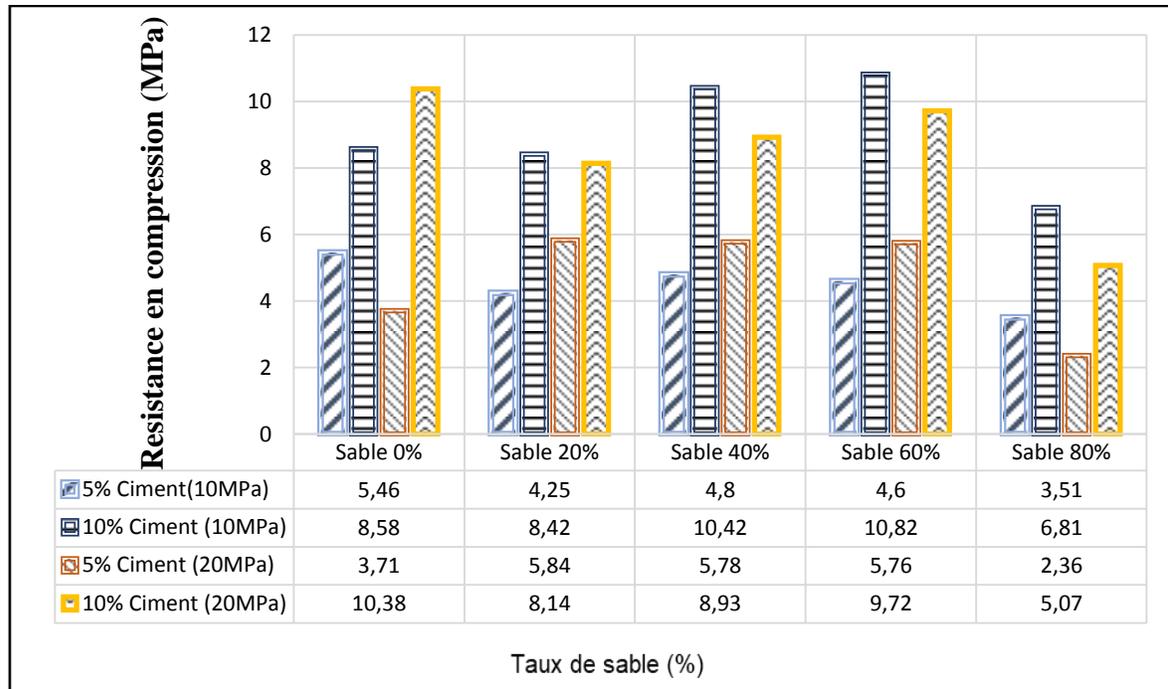


Figure 3.7: Evolution de la résistance en fonction des différents paramètres

La figure 3.7, présente l’effet des différents paramètres étudiés sur la résistance à la compression du BTC. Pour les différents taux de sable (compactage de 10MPa et 20MPa), On remarque que les meilleures résistances sont obtenues pour les mélanges avec un taux de sable de 60% et un dosage de ciment de 10%.

3.4. Influence du rapport E/C sur la résistance à la compression de BTCS

Tableau 3.5 : Résistance à la compression de BTCS avec E/C (5% ciment et 10MPa)

| | E/C | Rc28 Jours | Ciment (%) |
|----|------|------------|------------|
| A1 | 2.45 | 5.46 | 5 |
| A2 | 2.4 | 4.25 | |
| A3 | 2.35 | 4.80 | |
| A4 | 2.05 | 4.60 | |
| A5 | 1.65 | 3.51 | |

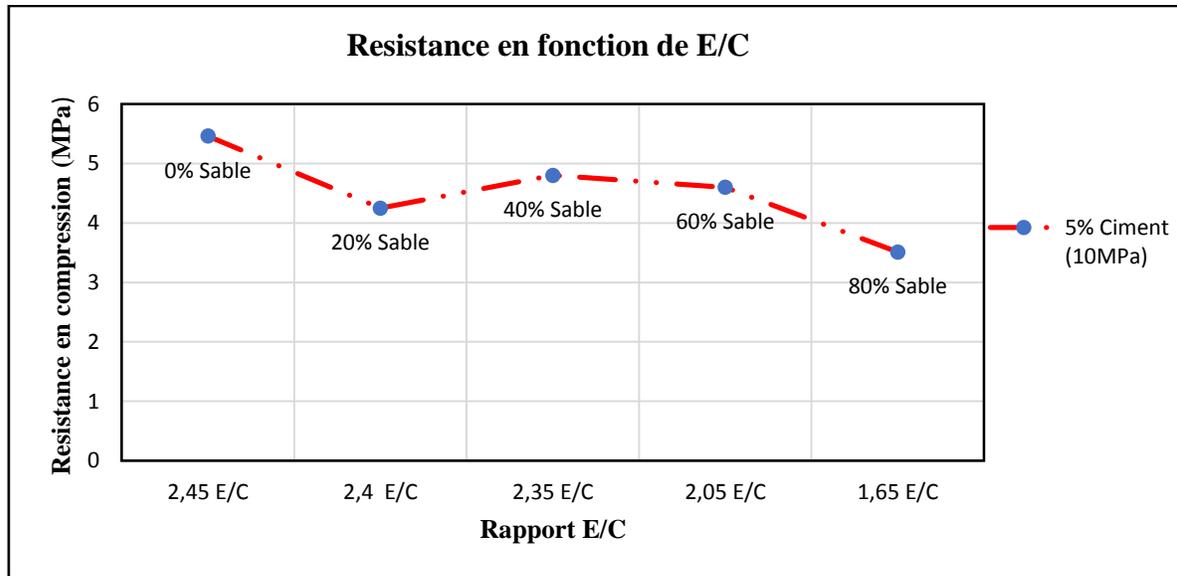


Figure 3.8: Evolution de la résistance en fonction du rapport E/C
(5% de ciment Contrainte de compactage de 10MPa)

La figure 3.8 montre que les meilleures résistances du BTC sont enregistrées pour des rapports d'E/C supérieurs à 2. La résistance diminue pour un rapport d'E/C de l'ordre de 1. Ce résultat est évident : un rapport d'E/C supérieur à 2 permet à la réaction chimique entre la SiO₂ de l'argile et la chaux du ciment de se poursuivre et d'avoir une hydratation complète.

Tableau 3.6 : Résistance à la compression de BTCS avec E/C (5% ciment et 20MPa)

| | E/C | Rc28 Jours | Ciment (%) |
|----|------|------------|------------|
| B1 | 2.45 | 3.71 | 5 |
| B2 | 2 | 5.87 | |
| B3 | 1.75 | 5.78 | |
| B4 | 1.45 | 5.76 | |
| B5 | 1.15 | 2.36 | |

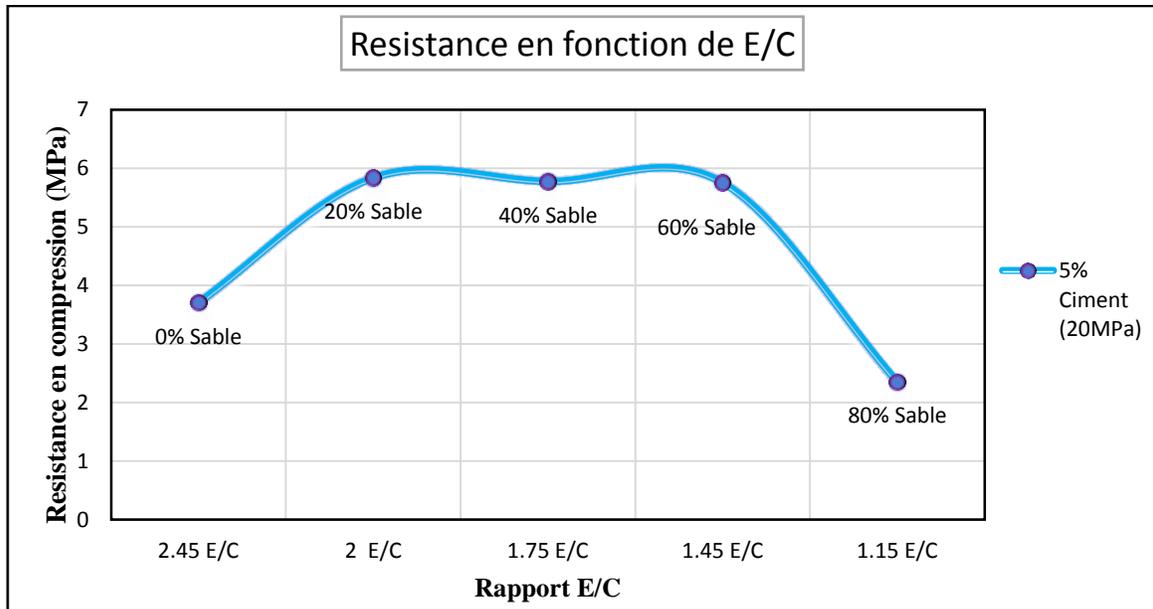


Figure 3.9: Evolution de la résistance en fonction de taux d'E/C et 5% ciment
(5% de ciment et Contrainte de compactage de 20MPa)

La figure 3.9 montre qu'en augmentant la contrainte de compactage de 10MPa à 20MPa, les résistances sont bien meilleures pour des rapports d'E/C entre 1 et 2. Le compactage rend le béton plus compact et plus résistant. La résistance du BTC augmente jusqu'à un taux de sable de 60 %. Ensuite, elle chute remarquablement pour un taux de 80%.

Tableau 3.7 : Résistance à la compression de BTCS avec E/C (10% ciment et 10MPa)

| | E/C | Rc28 Jours | Ciment (%) |
|----|-------|------------|------------|
| C1 | 1,225 | 8.58 | 10 |
| C2 | 1,05 | 8.42 | |
| C3 | 0,95 | 10.42 | |
| C4 | 0,75 | 10.82 | |
| C5 | 0,5 | 6.81 | |

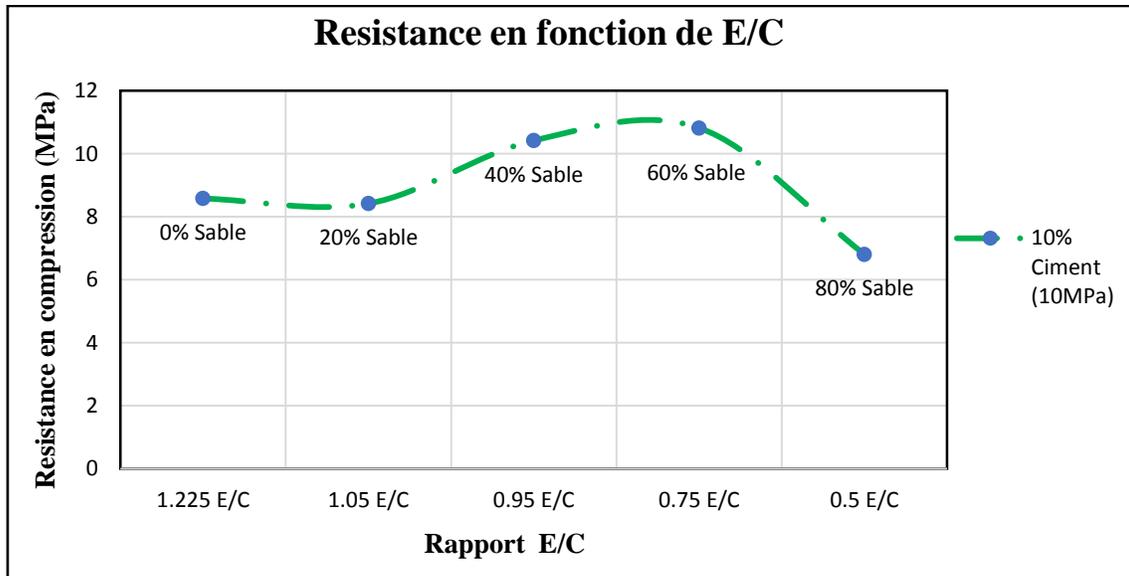


Figure 3.10: Evolution de la résistance en fonction de taux de E/C et 10% ciment
(Contrainte de compactage de 10MPa)

Dans la figure 3.10 on voit qu’avec un dosage en ciment de 10% et un compactage de 10 MPa, la résistance du BTS augmente jusqu’à un taux de sable de 60 % pour des rapports d’E/C entre 1.225 et 0.75. Ensuite, on remarque une chute de résistance.

Tableau 3.8 : Résistance à la compression de BTCS avec E/C (10% ciment et 20MPa)

| | E/C | Rc28 Jours | Ciment (%) |
|----|------|------------|------------|
| D1 | 1.15 | 10.38 | 10 |
| D2 | 1 | 8.14 | |
| D3 | 0.87 | 8.93 | |
| D4 | 0.7 | 9.72 | |
| D5 | 0.45 | 5.07 | |

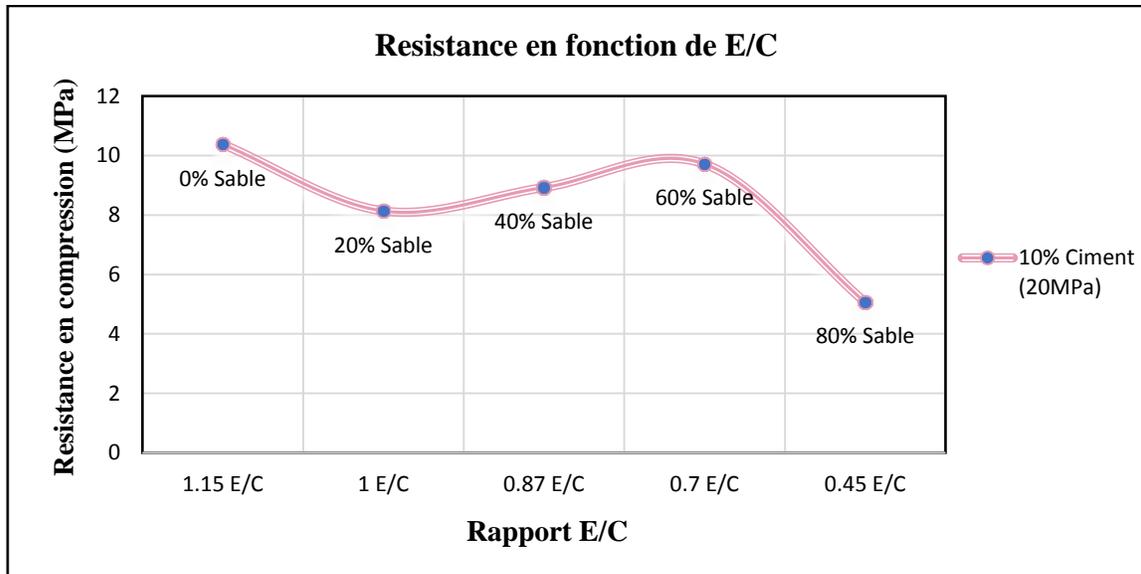


Figure 3.11: Evolution de la résistance en fonction de taux de E/C et 10% ciment
(Contrainte de compactage de 20MPa)

La figure 3.11 montre que la résistance du BTS diminue en fonction du rapport E/C jusqu'à un taux de sable de 60% pour des rapports d'E/C entre 1.15 et 0.7 ensuite on remarque une chute de résistance.

3.5 Influence du ciment et du sable sur la masse volumique des BTC

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 comme suit :

Tableau 3.9: Masse volumique des BTC avec 5% ciment

| | | Masse volumique moyenne du BTC (kg/m ³) | | |
|----|-----|-----------------------------------------------------|------------|-----------|
| | | Etat frais | Etat durci | Ciment |
| A1 | 0% | 2270 | 2220 | 5% |
| A2 | 20% | 2330 | 2270 | |
| A3 | 40% | 2310 | 2260 | |
| A4 | 60% | 2230 | 2210 | |
| A5 | 80% | 2500 | 2410 | |

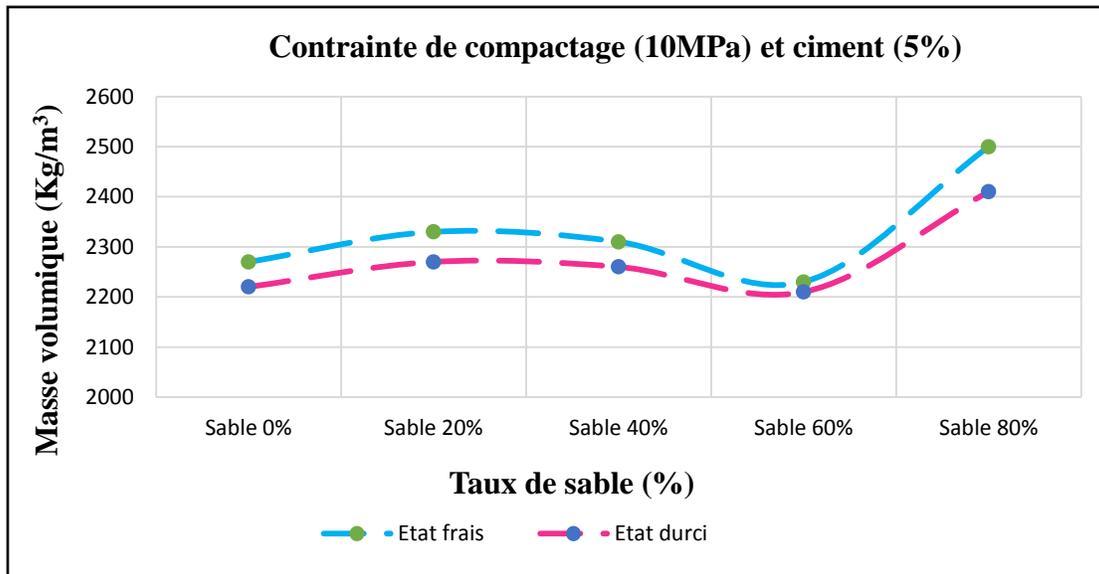


Figure 3.12 : L'influence du taux de sable sur la masse volumique des BTC (Contrainte de compactage (10MPa) et ciment (5%))

Tableau 3.10 : Masse volumique des BTC avec 10% ciment

| | | Masse volumique moyenne du BTC (kg/m ³) | | |
|----|-----|-----------------------------------------------------|------------|------------|
| | | Etat frais | Etat durci | Ciment |
| C1 | 0% | 2260 | 2210 | 10% |
| C2 | 20% | 2170 | 2120 | |
| C3 | 40% | 2250 | 2210 | |
| C4 | 60% | 2390 | 2360 | |
| C5 | 80% | 2350 | 2320 | |

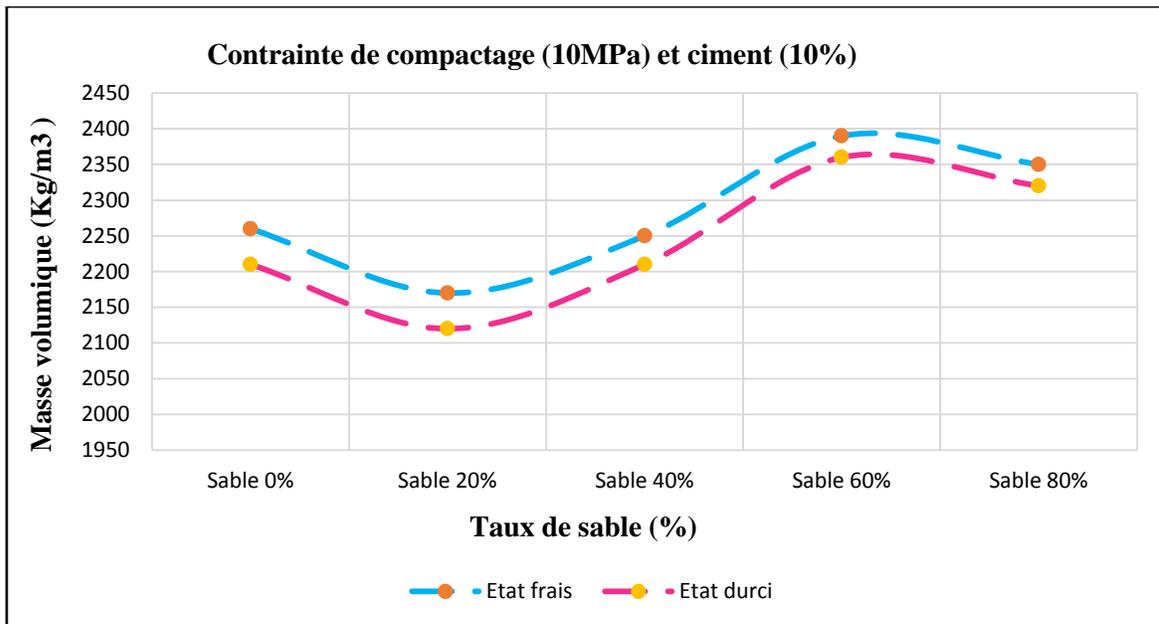


Figure 3.13 : L'influence du taux de sable sur la masse volumique des BTC (Contrainte de compactage (10MPa) et ciment (10%))

✓ **Contrainte de compactage 20MPa**

Les résultats sont représentés comme suit :

Tableau 3.11 : Masse volumique des BTC de 5% ciment

| | | Masse volumique moyenne du BTC (kg/m ³) | | |
|----|-----|-----------------------------------------------------|------------|-----------|
| | | Etat frais | Etat durci | Ciment |
| B1 | 0% | 2010 | 1980 | 5% |
| B2 | 20% | 2350 | 2320 | |
| B3 | 40% | 2330 | 2300 | |
| B4 | 60% | 2270 | 2250 | |
| B5 | 80% | 2170 | 2040 | |

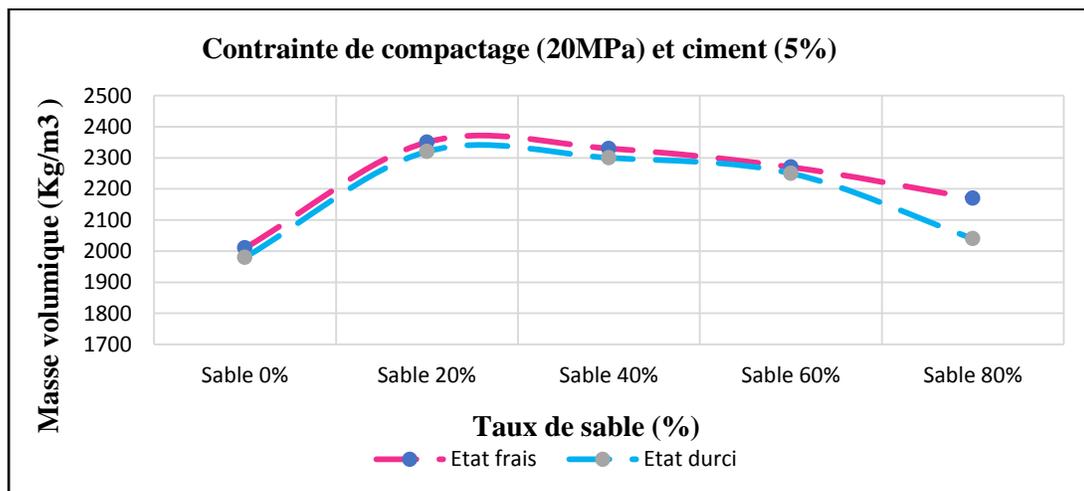


Figure 3.14 : L'influence du taux de sable sur la masse volumique des BTC (Contrainte de compactage (20MPa) et ciment (5%))

Tableau 3.12 : Masse volumique des BTC de 10% ciment

| | | Masse volumique moyenne du BTC (kg/m ³) | | |
|----|-----|-----------------------------------------------------|------------|------------|
| | | Etat frais | Etat durci | Ciment |
| D1 | 0% | 2200 | 2150 | 10% |
| D2 | 20% | 2270 | 2240 | |
| D3 | 40% | 2250 | 2230 | |
| D4 | 60% | 2230 | 2210 | |
| D5 | 80% | 2070 | 2060 | |

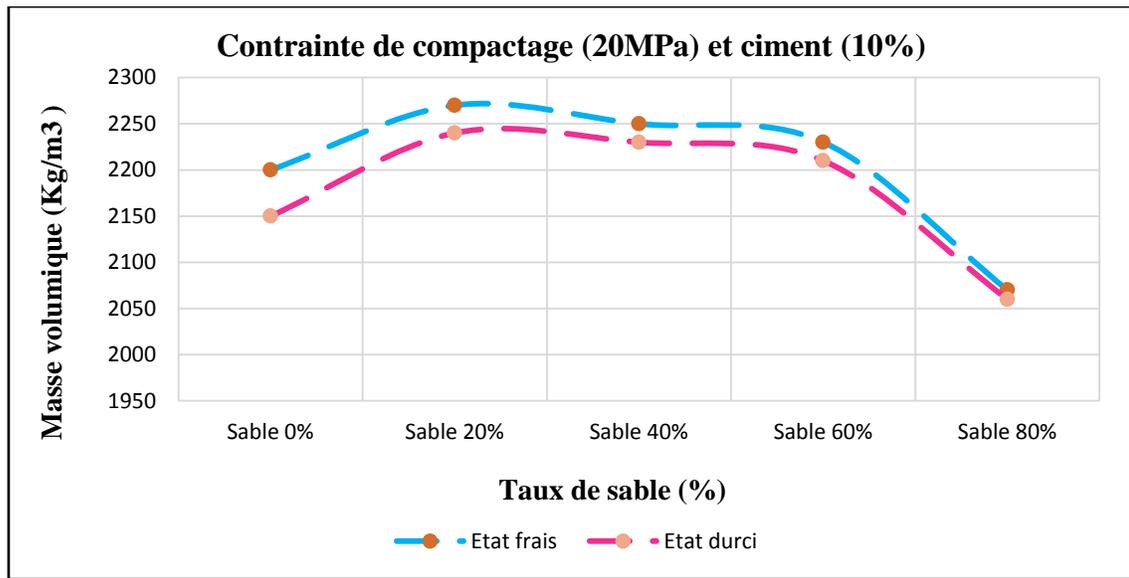


Figure 3.15 : L'influence du taux de sable sur la masse volumique des BTC (Contrainte de compactage (20MPa) et ciment (10%))

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

D'après les résultats représentés sur les figures 12, 13, 14 et 15, on constate que la masse volumique des BTC atteint un maximum de 2360Kg/m^3 pour une contrainte de 10MPa, un taux de sable de 60% et taux de ciment de 10%. Ces résultats sont en corrélation avec les résistances mécaniques en compression.

Par contre pour une contrainte de compactage de 20MPa, le maximum 2320kg/m^3 est atteint pour un taux de sable de 20% et un taux de ciment de 5%.

IL est clair aussi, que les masses volumiques diminuent légèrement en passant de l'état frais à l'état durci. Cela est expliqué par le retrait chimique dû à l'hydratation du ciment ainsi que le retrait plastique.

3.6 Conclusion :

Le présent chapitre présente les résultats de l'étude de l'effet de sable sur la résistance mécanique en compression des bétons de terre compressée et stabilisée BTCS.

Les résultats montrent que :

- Pour une contrainte de compactage de 10MPa ou 20MPa), les meilleures résistances sont obtenues pour les mélanges avec un taux de sable de 60% et un dosage de ciment de 10%.
- Pour une contrainte de 10MPa, les meilleures résistances du BTC sont enregistrées pour des rapports d'E/C supérieurs à 2
- En augmentant la contrainte de compactage de 10MPa à 20MPa, les résistances sont bien meilleures pour des rapports d'E/C entre 1 et 2.
- La masse volumique des BTC atteint un maximum de 2360Kg/m³ pour une contrainte de 10MPa, un taux de sable de 60% et un taux de ciment de 10%. Ces résultats sont en corrélation avec les résistances mécaniques en compression.

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'objectif de cette étude est de voir l'effet du sable sur les caractéristiques mécaniques du béton de terre stabilisée d'un nouveau matériau. On a effectué des essais pour mesurer la résistance à la compression de 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, nous avons travaillé avec un mélange sec de (sable + ciment), on a utilisé cinq niveaux de sable (0%,20%,40%,60%,80%), deux teneurs en ciments (5 et 10 %) pour stabiliser le béton et deux contraintes de compactage (10 et 20MPa) pour l'imperméabilisation, la résistance à la compression a été déterminée sur des éprouvettes cylindriques (moules Proctor) à l'âge de 28jours.

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).
- Pour une contrainte de 10MPa, les meilleures résistances du BTC sont enregistrées pour des rapports d'E/C supérieurs à 2.
- En augmentant la contrainte de compactage de 10MPa à 20MPa, les résistances sont bien meilleures pour des rapports d'E/C entre 1 et 2.
- La masse volumique des BTC atteint un maximum de 2360Kg/m^3 pour une contrainte de 10MPa, un taux de sable de 60% et un taux de ciment de 10%. Ces résultats sont en corrélation avec les résistances mécaniques en compression.

Respectives :

- La perte de masse diminue à chaque fois que le taux de sable augmente. Elle passe de 13% à 12% pour des taux de sable de 0%,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 20 MPa.

En perspectives, deux domaines méritent d'être approfondit :

- Etudier les propriétés thermiques des BTC a base de ciment et sable.
- Etudier l'effet de sable et poudre de verre sur les propriétés mécaniques des BTC.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Akli Hibouche (Sols traités aux liants performances hydromécaniques et hydro-thermique application en BTP en 2013
- [2] A.Layeb et A.Hablaoui sur caractérisation physico-mécaniques d'un bloc de terre stabilisé avec la chaux à base des fibres (déchet de pneu usés-verre)
- [4] WWW.DEAL-GUYANE La terre crue, publié le 6 mai 2016 (modifié le 11 mars 2019)
- [5] B. Taallah, A. Guettala, S. Guettala, A. Kriker, Mechanical properties and hygroscopicity behavior of compressed earth block filled by date palm fibers, Constr. Build. Mater. 59 (2014) 161–168. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.02.058
- [6] H. Houben, Série technologies no. 11, blocs de terre comprimés, normes, Brux. CRAterreEAG ISBN. (1998) 2–906901
- [7] WWW.DEAL-GUYANE La terre crue, publié le 6 mai 2016 (modifié le 11 mars 2019)
- [9] www.tel.archives-ouvertes.fr Développement d'un nouveau éco-B à base de sol et fibres végétales : étude de comportement mécanique et durabilité Duc Chinh Ngo en 27 Apr 2018
- [10] B. RABEHI, (Évaluation des propriétés réfractaires et cimentaires du kaolin de Djebel Debbagh), Thèse de Doctorat UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES, 2012/2013
- [11] P. Y. Chen, M. L. Lin, Z. Zheng, (On the origin of the name kaolin and kaolin deposits of the Kauling and Dazhou areas), Kiangsi, China, Applied Clay Science, Vol. 12, 1997, p125.
- [12] H. H. Murray, (Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite : a general overview), Applied Clay Science, Vol. 17, 2000, p207-221.
- [13] N. K. L. G. Laure, (Transformations thermiques, organisation structurale et frittage des composés kaolinite-muscovite), Thèse de Doctorat, Université de Limoges, 2004.
- [14] P. Meukam, Valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiments, Université de Yaoundé I, 2004

BIBLIOGRAPHIE.....

[15] A. Mesbah, J. Morel, P. Walker, K. Ghavami, Development of a direct tensile test for compacted earth blocks reinforced with natural fibers, *J. Mater. Civ. Eng.* 16 (2004) 95–98.

[16] E. Adam, A. Agib, Compressed stabilized earth block manufacture in Sudan, Fr. Paris Print. Graphoprint UNESCO. (2001).

[17] H.B. Nagaraj, M.V. Sravan, T.G. Arun, K.S. Jagadish, Role of lime with cement in longterm strength of Compressed Stabilized Earth Blocks, *Int. J. Sustain. Built Environ.* 3 (2014) 54–61. doi:10.1016/j.ijjsbe.2014.03.001

[18] Y. Millogo, Etude géotechnique, chimique et minéralogique de matières premières argileuse et latéritique du Burkina Faso améliorées aux liants hydrauliques: application au génie civil (bâtiment et route), Thèse de doctorat, université de Ouagadougou, Burkina Faso, 2008

[19] B. Taallah, A. Guettala, S. Guettala, A. Kriker, Mechanical properties and hygroscopicity behavior of compressed earth block filled by date palm fibers, *Constr. Build. Mater.* 59 (2014) 161–168. doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.02.058

[20] H. Houben, H. Guillaud, *Traité de construction en terre*, Editions Parenthèses, 1989

[21] F. Gouny, F. Fouchal, O. Pop, P. Maillard, S. Rossignol, Mechanical behavior of an assembly of wood–geopolymer–earth bricks, *Constr. Build. Mater.* 38 (2013) 110–118. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.07.113

[22] A. P’Kla, Caractérisation en compression simple des blocs de terre comprimée (BTC): application aux maçonneries“ BTC-Mortier de terre,” Villeurbanne, INSA, 2002

[23] D.E.M. Gooding, Improved processes for the production of soil-cement building blocks, University of Warwick, 1994

[24] F.G. Bell, Lime stabilization of clay minerals and soils, *Eng. Geol.* 42 (1996) 223–237

[25] B. Taallah, Etude du comportement physico-mécanique du bloc de terre comprimée avec fibres, Université Mohamed Khider Biskra, 2014

[26] La norme NF EN 933-1 Décembre 1997 Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : détermination de la granularité. Analyse granulométrique par tamisage

[27] La norme NF EN 933-8 Mars 2012 Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 8 : évaluation des fines - Équivalent de sable

[28] La norme XP P13-901 Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : définitions - Spécifications - Méthodes d’essais - Conditions de réception, (2001).